



GATE
Groupe d'Analyse et de Théorie Économique
UMR 5824 du CNRS



DOCUMENTS DE TRAVAIL - WORKING PAPERS

W.P. 02-08

Modèle de congestion routière à deux itinéraires : une expérience

Yannick GABUTHY
Matthieu NEVEU

Juin 2002

GATE Groupe d'Analyse et de Théorie Économique
UMR 5824 du CNRS
93 chemin des Mouilles – 69130 Écully – France
B.P. 167 – 69131 Écully Cedex
Tél. +33 (0)4 72 86 60 60 – Fax +33 (0)4 72 86 60 90
Messagerie électronique gate@gate.cnrs.fr
Serveur Web : www.gate.cnrs.fr

Modèle de congestion routière à deux itinéraires : une expérience

An Experimental Study of Departure Time and Route Choice

Yannick Gabuthy[†]

Matthieu Neveu^{*}

Résumé. Dans la plupart des analyses théoriques consacrées à l'étude de la congestion routière, les usagers sont contraints d'emprunter un itinéraire unique. L'objectif de notre papier est, tout d'abord, de généraliser l'approche de Arnott et al. (1990b) en introduisant un deuxième itinéraire dans l'analyse, puis de tester expérimentalement le modèle développé. Le résultat théorique propose une répartition des usagers par groupe. Le nombre d'usagers par groupe est égal à la capacité d'absorption de l'itinéraire considéré. La répartition entre les itinéraires dépend du prix du péage d'infrastructure (élevé ou faible). Les prédictions théoriques sont réfutées par les résultats expérimentaux : les sujets parviennent à se coordonner de manière à éviter un coût de transport prohibitif lié à une congestion importante mais ne suivent pas la répartition théorique, et le prix du péage influence significativement le choix d'itinéraire. De plus, l'impact du niveau de congestion passé sur les décisions de changement d'heure de départ et d'itinéraire est réduit par le niveau du péage d'infrastructure.

Abstract. Most theoretical studies of traffic congestion during the morning commute have been limited to one origin, one destination, and one route. The purpose of our paper is to generalize the analysis of Arnott et al. (1990b) to situations with a single origin and destination connected by two routes, and to test the model in an experiment. The theoretical result shows that commuters choose to take the road by group. The group's size is equal to the route's capacity of absorption and the route choice depends on the tolling regime (high toll or low toll). The experimental evidence does not support the predictions of the model : individuals solve the coordination problem in order to avoid a prohibitive congestion cost, however, experimental subjects do not follow the theoretical departure distribution. Route split is significantly sensitive to the choice of tolling regime. Furthermore, the impact of past congestion on route choices and departure time decisions is reduced by the level of the toll.

Mots Clés : Coordination, Economie Expérimentale, Congestion, Choix de Route, Péage Routier.

Key words: Coordination, Experimental Economics, Congestion, Route Choices, Route Toll.

JEL codes: C72, C9, R41

GATE (Groupe d'Analyse et de Théorie Economique), 93 chemin des Mouilles 69130 Ecully, France.

[†] Email : gabuthy@gate.cnrs.fr.

^{*} Email : neveu@gate.cnrs.fr.

‡ Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme contractuel PREDIT (Ministère de l'Équipement), réalisé conjointement avec les laboratoires LET (Lyon), BETA (Strasbourg) et Laurent Denant-Boemont du CREREG (Rennes). Nous remercions donc les participants de ce programme ainsi que Romain Zeiliger pour la réalisation du protocole expérimental.

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 (Arnott et al. 1998). Ces modèles de congestion peuvent donc traiter la décision individuelle d'heure de départ (Arnott et al. 1990b). La majeure partie de cette littérature se concentre sur les déplacements contraints (le plus souvent domicile-travail) et examine en conséquence les choix des usagers soumis à de multiples décisions, telles que l'heure de départ ou l'itinéraire retenu, compte tenu d'une heure d'arrivée fixée comme objectif. L'utilisateur cherche donc à minimiser une fonction de coût individuelle composée d'un coût de déplacement (lié au temps de congestion et au temps incompressible de transport), d'un coût de retard ou d'avance par rapport à l'heure d'arrivée objectif, et d'un péage d'infrastructure. Les objectifs de ces modèles sont de déterminer l'équilibre de congestion et d'évaluer les coûts subis par l'utilisateur, ainsi que par la collectivité. Dans ce cadre, le phénomène de congestion résulte d'un défaut de coordination des usagers en situation d'interaction stratégique (De Palma 1992). La représentation de la congestion en terme de goulet d'étranglement provient de la conception de Vickrey (1969). Compte tenu qu'une infrastructure routière définit un débit maximum de passage par unité de temps (i.e. la capacité de la route), la congestion se forme si cette capacité est inférieure au taux d'arrivée aléatoire de véhicules à une période de référence. De ce fait, la congestion est un phénomène dynamique qui se répercute sur plusieurs périodes. En effet, le trafic d'une période de temps est directement lié, d'une part, au trafic des périodes précédentes, et d'autre part, au taux de départ sur la période courante. Fondé sur un modèle très restreint (itinéraire unique, heure d'arrivée objectif commune à tous les usagers, coûts liés au déplacement identiques, capacité de l'infrastructure fixée,...), le développement de la littérature s'est articulé autour de deux objectifs : tester et enrichir les résultats initiaux. Il s'agit notamment d'analyser l'impact de l'information routière sur les décisions stratégiques, de supposer les usagers hétérogènes du point de vue de la fonction de coût ou encore de proposer aux individus plusieurs itinéraires possibles (Arnott et al. 1989, Arnott et al. 1990a). Dans cette optique, notre objectif est d'étendre l'analyse de Arnott et al. (1990b) en considérant deux itinéraires (différents selon la capacité d'absorption et le prix du péage d'infrastructure) puis de soumettre le modèle à réfutation expérimentale. Dans leurs prises de décisions, les individus sont ainsi confrontés à un arbitrage entre le temps de trajet, l'écart par rapport à l'heure d'arrivée objectif et le prix du péage d'infrastructure. Deux étapes sont alors nécessaires à la détermination de l'équilibre de Nash du jeu : il s'agit d'une part de déterminer l'heure de départ de chaque usager sur chaque itinéraire, le comportement des autres individus étant considéré comme donné. D'autre part, il s'agit d'*implémenter* la répartition des usagers entre les deux itinéraires. Cet équilibre est obtenu lorsque qu'aucun individu ne peut réduire son coût de transport en modifiant sa décision d'heure de départ et/ou d'itinéraire. Le résultat théorique est caractérisé par une séquence de départ constante égale à la capacité de l'itinéraire considéré tandis que la répartition entre les deux itinéraires dépend du prix du péage d'infrastructure. Notons que le modèle théorique est développé en temps discret afin de permettre l'analyse expérimentale. Les expérimentations réalisées permettent d'analyser la répartition des individus et leur comportement de coordination sur un intervalle de départ. Les principaux résultats sont les suivants. Il apparaît que la séquence de départ défini à l'équilibre n'est pas réfutée expérimentalement : les sujets parviennent à se coordonner de manière à éviter un coût de transport prohibitif, lié à une congestion importante. De plus, il apparaît que les sujets modifient leurs choix d'itinéraire et d'heure de départ en fonction de la congestion subi dans le passé. Cette influence est d'autant plus forte que le niveau de péage

est faible. Enfin, le prix du péage influence également significativement la répartition des sujets entre les deux itinéraires, même s'ils choisissent majoritairement l'itinéraire payant. Le papier est organisé comme suit. Dans la section 2, nous développons le modèle de base en version discrète et introduisons un deuxième itinéraire. Les sections 3 et 4 sont consacrées aux études expérimentales et à l'analyse des données. Dans la section 5, sont présentés les principaux apports de notre étude et une extension possible.

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

L'analyse théorique est consacrée à l'étude des décisions individuelles d'heure de départ et d'itinéraire lorsque deux itinéraires sont accessibles et que les usagers sont contraints d'arriver à une heure objectif commune. Un itinéraire est gratuit et est doté d'une faible capacité d'absorption tandis que l'autre est payant mais de plus forte capacité. Le prix du péage est fixe sur l'itinéraire payant. Dans cette section sont présentés successivement le modèle de référence à un itinéraire en temps discret ainsi que ses solutions théoriques, puis le modèle à deux itinéraires et ses solutions théoriques.

Modèle de base à un itinéraire

Nous considérons une population de N usagers ($N \geq 2$) effectuant un trajet domicile-travail, les lieux de départ et de destination sont communs pour 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 possibles, $\{T_q, \dots, T_q\}$, est un ensemble discret et fini de valeurs.

Le temps de trajet d'un individu i est la somme d'un temps fixe de déplacement, noté T_f^d , et d'un temps variable, noté $T^v(t)$, 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 ($T^v(t) = 1$). 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 $R(t)$:

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

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 ($N(t)$) :

¹ 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.

$$D(t) = R(t) + N(t) \quad (2)$$

Nous pouvons à présent déterminer le temps variable de transport nécessaire à un individu pour arriver à destination.

Ce temps variable de transport² est noté :

$$T^v(t) = \text{Arrondi.Supérieur}\left(\frac{D(t)}{s}\right) \quad (3)$$

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'itinéraire est noté $D(t)/s$.

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 partant en t :

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

où α , β et γ sont des paramètres exogènes positifs représentant les différents coûts individuels unitaires du temps. Plus précisément, α correspond au coût unitaire associé au temps passé sur la route (i.e. coût de déplacement), β au coût unitaire associé à l'avance par rapport à l'objectif (i.e. coût d'avance) et γ au coût unitaire associé au retard (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 avec itinéraire gratuit.

Il est alors possible de calculer la ponctualité d'un individu (i.e. l'écart entre sa période d'arrivée et la période objectif). La valeur $t^* - Tf - T^v(t) - t$ 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:

$$C_i(t) = \alpha(Tf + T^v(t)) + \beta \cdot \text{Max}\{0, t^* - Tf - T^v(t) - t\} + \gamma \cdot \text{Max}\{0, T^v(t) + t + Tf - t^*\} \quad (4)$$

Chaque individu, dans le choix de sa période de départ, est ainsi confronté à un arbitrage entre le temps de trajet et la ponctualité (Arnott et al. 1990b). L'équilibre de Nash en stratégies pures³ est défini lorsqu'un usager ne peut diminuer son coût total de transport en changeant unilatéralement sa période de départ.

Proposition 1. *A l'équilibre, les N 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. Voir annexe.

² 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. 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 $T^v(t) = 2, \dots$

³ 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 ».

Ainsi, selon une certaine relation entre les paramètres α, β et γ , le nombre de périodes de départ à l'équilibre est constant et égal à K , telle qu'aucune congestion ne se forme. Outre cette analyse, l'extension du modèle à deux itinéraires permet d'étudier l'impact du péage d'infrastructure sur le comportement de répartition des usagers.

Extension à deux itinéraires

Nous conservons la structure du modèle précédent et introduisons un deuxième itinéraire. 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 coût de transport et le coût de passage sur chaque itinéraire.

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

Proposition 2. *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 $X \in \{1, \dots, K_B\}$.*

Preuve. Voir annexe.

L'intuition derrière cette proposition est la suivante : l'itinéraire payant est préféré à l'itinéraire gratuit si et seulement si le différentiel de coût total de transport (sans le péage) est supérieur au montant du péage d'infrastructure et si chacune des périodes de départ d'équilibre sur l'itinéraire payant est préférable à une situation de congestion sur l'itinéraire gratuit. En conclusion, dans leur choix de répartition, les usagers comparent les meilleures heures de départ possibles sur chaque itinéraire, étant donné les décisions des autres usagers, et déterminent si cet écart entre ces périodes de départ justifie le choix de l'itinéraire payant et son coût de péage.

Dans la section suivante, nous définissons les valeurs des paramètres du modèle afin de le soumettre à réfutation expérimentale. Nous présentons le protocole expérimental ainsi que les issues théoriques.

Protocole expérimental

L'objectif de l'analyse expérimentale est double. D'une part, il s'agit d'analyser le comportement des individus en situation d'interaction par rapport aux prédictions théoriques. D'autre part, nous analysons l'impact du prix de péage sur le comportement décisionnel des usagers en renouvelant l'expérience avec des valeurs du péage modifiées.

Nous définissons les valeurs retenues pour les paramètres du modèle. Notons que ces valeurs ont été définies de manière à respecter l'évidence empirique et les conditions d'équilibre présentées dans la proposition 2. Au cours de l'expérience, les usagers disposent de 15 périodes de départ possibles sur chaque itinéraire. Ces périodes de départ appartiennent à l'ensemble $\{t^*-9, \dots, t^*+4\}$, l'heure d'arrivée objectif étant égale à 0. Nous considérons un total de $N = 8$ usagers. 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 ($Tf_A = Tf_B = 0$). Nous retenons également $K_A = 8$ et $K_B = 4$. 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. La répartition des usagers sur chaque itinéraire dans les conditions d'équilibre est la suivante. D'une part, lorsque le prix du péage est de 4, trois usagers choisissent l'itinéraire A et cinq usagers choisissent 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. D'autre part, lorsque le prix du péage est de 8, nous obtenons une répartition égalitaire : quatre usagers choisissent l'itinéraire A et quatre usagers choisissent 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 $\{t^*-1, \dots, t^*-2\}$ sur l'itinéraire B.

Les expériences ont été réalisées au moyen du logiciel REGATE⁴ au laboratoire GATE. Les 96 participants⁵ 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-P8), six groupes de huit personnes sont testés afin d'obtenir un nombre suffisant de données indépendantes au vu des tests statistiques et économétriques réalisés. Chaque participant prend 15 décisions successives de choix de période de départ et d'itinéraire (i.e. l'expérience est répétée 15 fois). Après chaque répétition, les informations suivantes sont renvoyées à chaque participant⁶ : 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 participant⁷. 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 €. La moyenne des gains en euro sur l'ensemble des expériences réalisées est de 15,05 € (écart type 0,61). Le gain moyen pour le traitement HO-P4 a été de 15,1 € (écart type 0,57) et le gain moyen pour le traitement HO-P8 a été de 15,01 € (écart type 0,59).

Analyse des données expérimentales

Dans cette section, nous analysons 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 les conséquences des temps de transport et des heures d'arrivée sur le changement de décision des individus.

Les choix d'heure de départ

⁴ Le logiciel est disponible gratuitement à l'adresse suivante <http://www.gate.cnrs.fr/> ou sur demande auprès des auteurs.

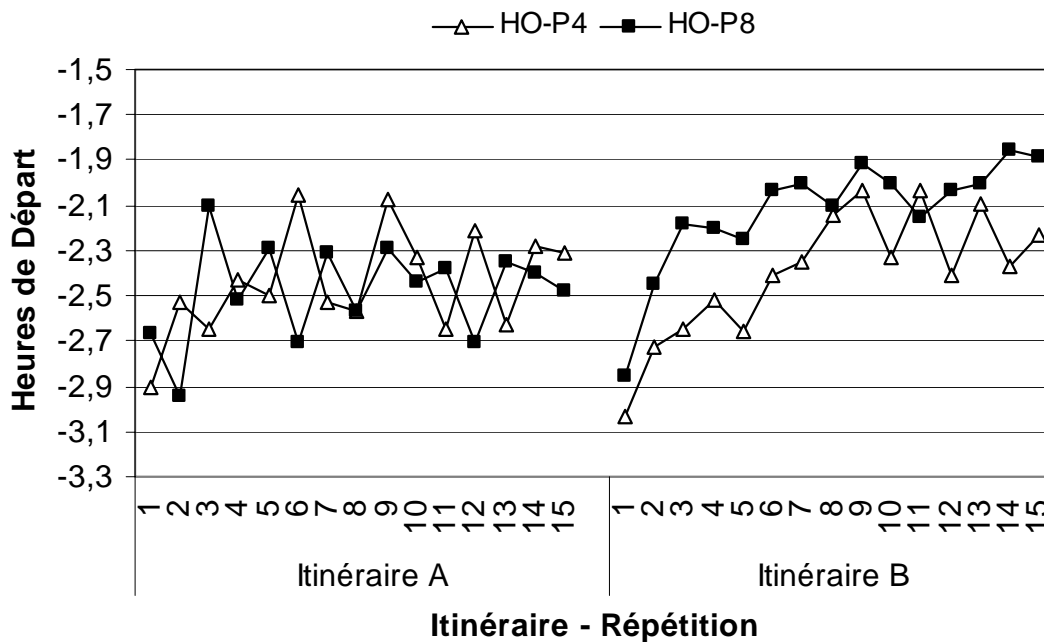
⁵ Il s'agit du nombre total de sujets sur les deux traitements (péage à 4 et péage à 8).

⁶ Les instructions sont disponibles auprès des auteurs sur simple demande.

⁷ 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.

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. Sur l'ensemble de l'expérience⁸, l'itinéraire A a été choisi 255 fois dans le traitement HO-P4 alors qu'il a été choisi 312 fois dans le traitement HO-P8. L'itinéraire B a été choisi 465 fois dans le traitement HO-P4 et 408 fois dans le traitement HO-P8. Le graphique suivant représente l'évolution des heures de départ moyennes dans chaque traitement en fonction de l'itinéraire étudié.

Observation 1. Les usagers choisissent les mêmes heures de départ sur l'itinéraire gratuit,



quel que soit le coût du péage de l'itinéraire payant.

Observation 2. Les usagers partent plus tôt sur l'itinéraire payant lorsque le péage est faible que lorsque le péage est fort.

Preuve de l'observation 1.

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 2.

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

⁸ Soit un total de 720 décisions par traitement.

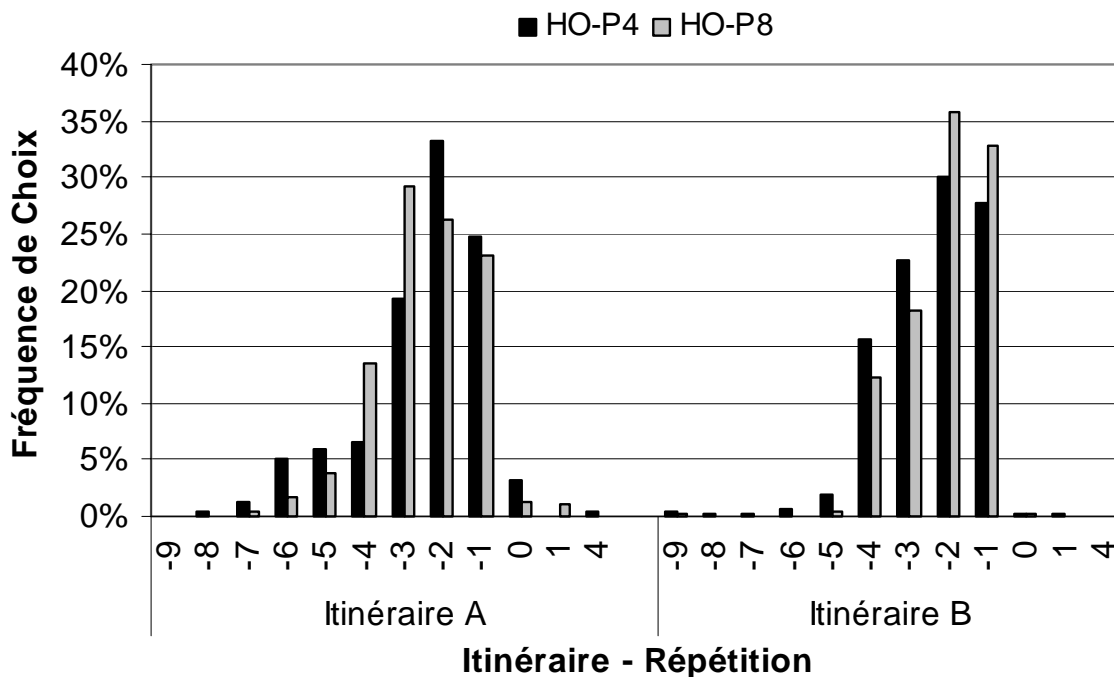
un coût de péage de 4 points choisissent en moyenne des mêmes heures de départ plus éloignées de l'heure objectif les usagers qui ont un coût de péage de 8 points.

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

Nous analysons maintenant la distribution des heures de départ choisies par les usagers. Nous considérons la distribution des choix d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble de l'expérience. Le graphique suivant présente les distributions des HD dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.

Sur l'itinéraire A, pour le traitement HO-P4, nous observons une distribution avec un mode à -2. De plus, 77,25% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre [-3 ; -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, 80,43% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre [-3 ; -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 [-2 ; -1] est moins importante avec 68,63% des décisions.

Observation 3. Quels que soient le niveau du péage et l'itinéraire, la répartition des choix des usagers sur l'intervalle de départ n'est pas conforme à la prédiction théorique.

Preuve de l'observation 3.

Dans chacun des deux traitements, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre le traitement retenu et la prédiction de répartition théorique. Avec un taux d'erreur de 1%, nous rejetons l'hypothèse nulle. Nous concluons que pour le traitement HO-P4, d'une part et pour

le traitement HO-P8, d'autre part, les choix d'heure de départ des usagers ne suivent pas la répartition théorique.

Observation 4. Sur les itinéraires A et 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.

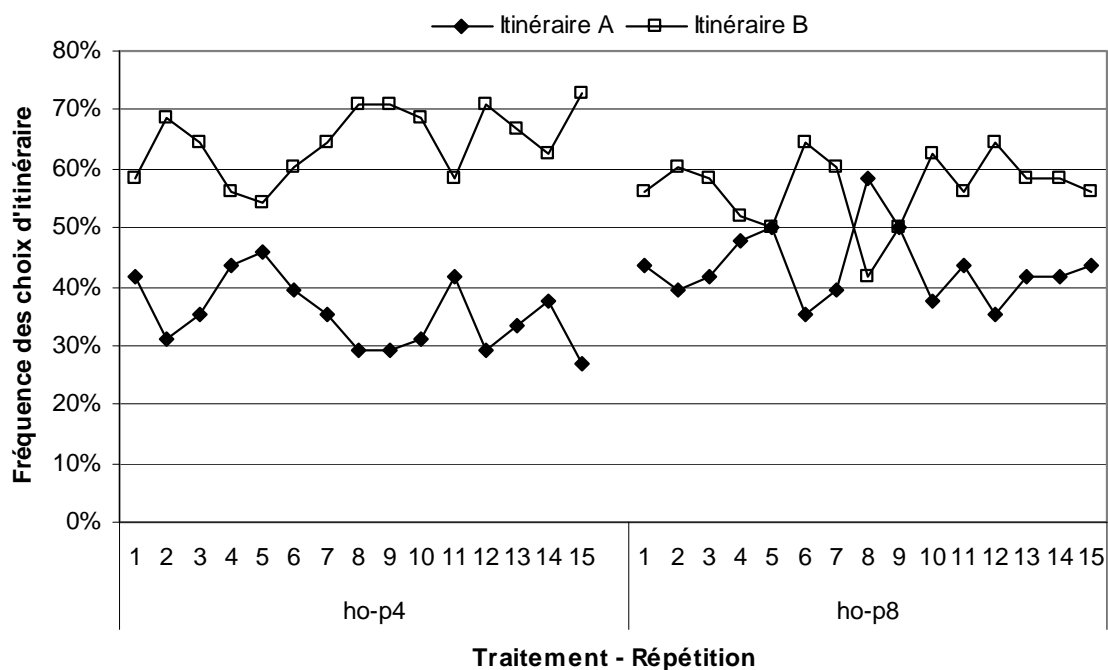
Preuve de l'observation 4.

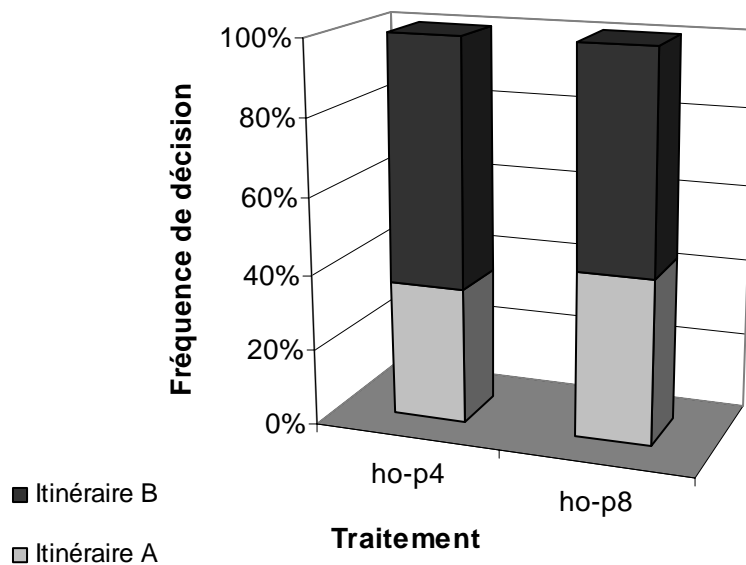
Pour comparer ces deux distributions, en considérant uniquement les usagers ayant choisi l'itinéraire A (respectivement l'itinéraire B), nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10% (respectivement 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, quelle que soit l'heure de départ envisagée, lorsque les usagers sont soumis à des coûts de péage différents. Pour chaque traitement, les graphiques suivants présentent, 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.

L'analyse des données montre que l'itinéraire B est le plus sollicité 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.





Graphique 4 : Distribution des choix d'itinéraire selon le traitement

Observation 5. Les choix d'itinéraire des usagers sont conformes à la prédiction théorique lorsque le péage est de 4. Lorsque le péage est de 8, les usagers choisissent d'avantage l'itinéraire payant que ne le prédit le modèle théorique.

Observation 6. Le coût du péage influence le choix d'itinéraire des usagers. Plus le péage est important, moins les usagers ont recours à l'itinéraire payant.

Preuve de l'observation 5.

Afin de savoir si les usagers choisissent plus ou moins un itinéraire par rapport à l'autre, lorsque le péage est de 4 (respectivement de 8), nous soumettons les données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle suppose que la répartition des usagers entre les itinéraires est identique à la répartition théorique (3/8 sur A et 5/8 sur B pour HO-P4, et 1/2 et 1/2 pour HO-P8). Au taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle pour HO-P4. Au contraire, au taux d'erreur de 5% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle pour HO-P8 et nous concluons que les usagers soumis à un péage à 8 choisissent plus l'itinéraire B que ne le suppose la prédiction théorique.

Preuve de l'observation 6.

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 d'itinéraire 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 concernant les choix d'heure de départ et d'itinéraire. Nous nous intéressons maintenant aux conséquences de ces décisions en analysant, tout d'abord, les niveaux de

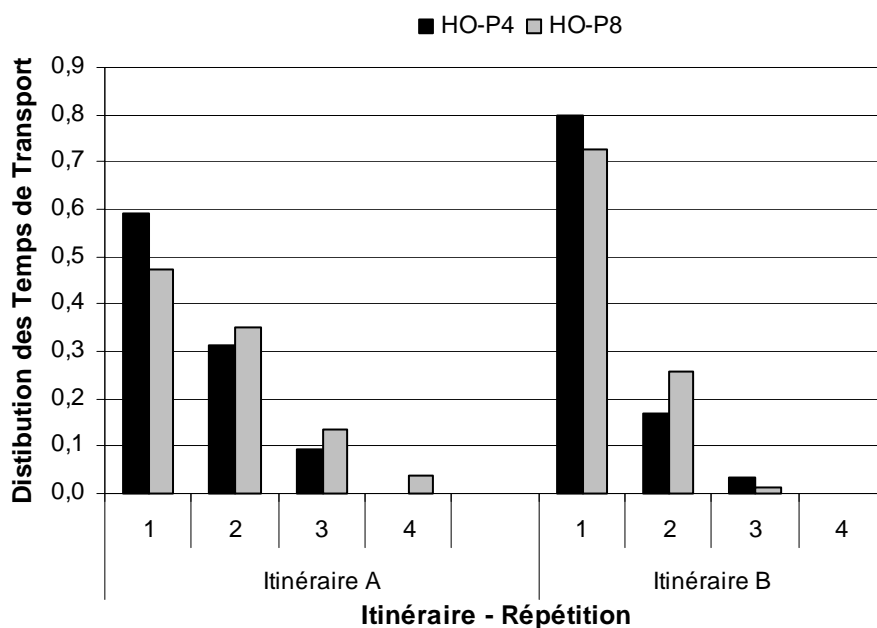
congestion apparus dans les expériences puis les heures d'arrivée des usagers. Dans chacune de ces analyses, nous étudions l'impact de ces données sur la modification des choix des usagers pour savoir dans quelle mesure la congestion et l'heure d'arrivée influence le comportement des sujets.

Niveau de congestion et heure d'arrivée : comment les usagers modifient leurs décisions ?

Rôle de la congestion 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. Nous analysons tout d'abord la distribution et l'évolution de TT, selon l'itinéraire et le prix du péage. Le graphique suivant présente les distributions des TT dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B.

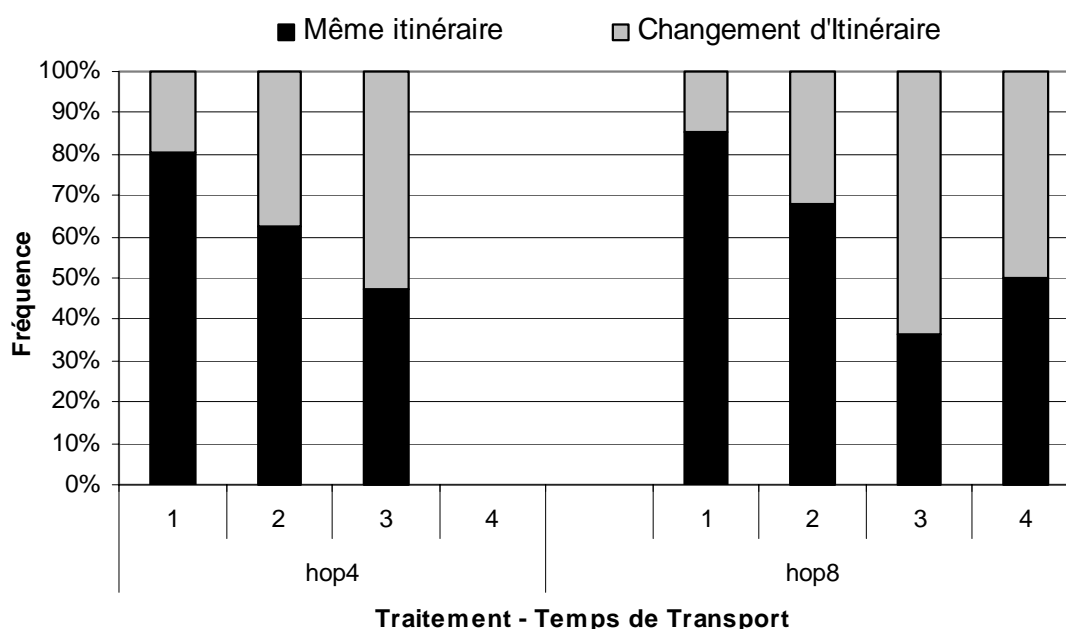
Sur l'itinéraire A, la valeur modale est de 1 quel que soit le traitement considéré. Cette absence de congestion concerne 59,2% des cas pour le traitement HO-P4 et 47,4% des



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

Compte tenu des observations 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 3⁹ (i.e. des TT allant de 1 à 3), 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 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 choisi de rester sur le même itinéraire. Dans les deux cas intermédiaires (AB et BA), les usagers ont choisi 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 suivant présente dans chaque traitement et pour chaque temps de transport, la répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers.



Graphique 6 : 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), « rester sur le même itinéraire » représente 80,66% des observations (avec 20,68% pour AA et 60,08% pour BB) et 85,67% des observations dans le traitement HO-P8 (avec un total de 899 observations pour HO-P8 et TT=1, il y a 28,33% pour AA et 57,14% pour BB).

Observation 7. 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.

⁹ 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.

Preuve de l'observation 7.

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'itinéraire. Nous comparons donc le nombre de 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).

Enfin, contrairement aux précédentes conclusions, lorsque le temps de transport est de 3, 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 8. Dans des situations de faible et moyenne congestion, les usagers soumis à un péage fort restent aussi fréquemment sur le même itinéraire que les usagers soumis à un péage faible.

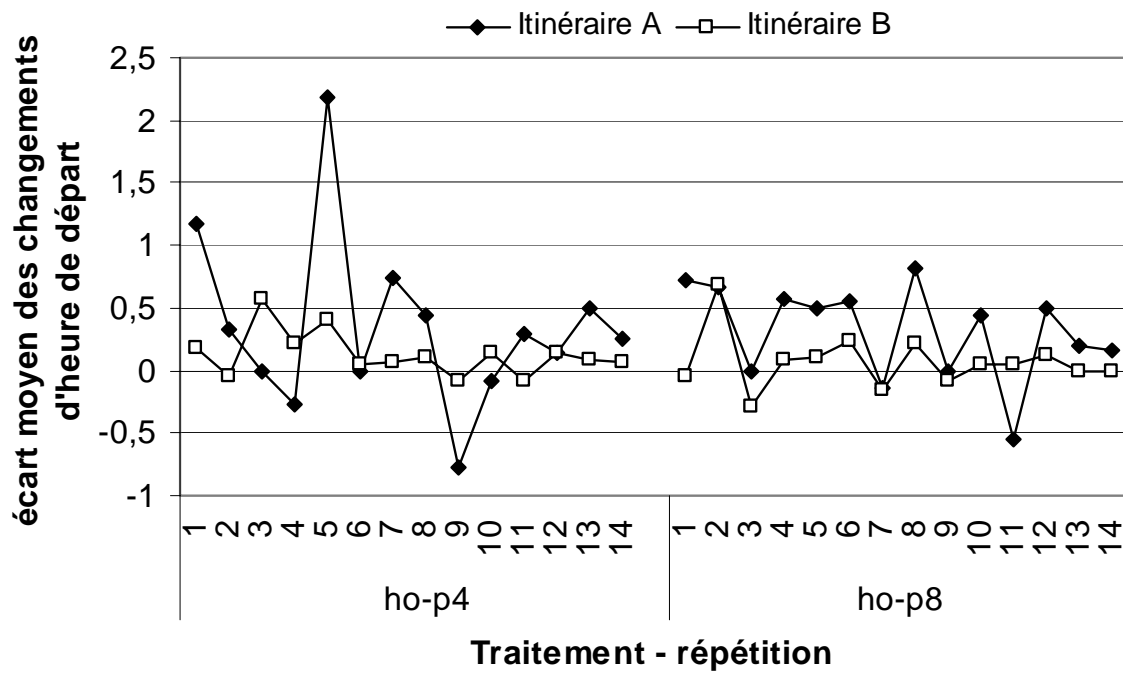
Preuve de l'observation 8.

Comme présenté dans la preuve 7, 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 (respectivement TT = 3) Au taux d'erreur de 10% (respectivement 10%) nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque le temps de transport est de 2 (respectivement 3), les décisions de changement d'itinéraire ont la même répartition entre les deux traitements (HO-P4 et HO-P8).

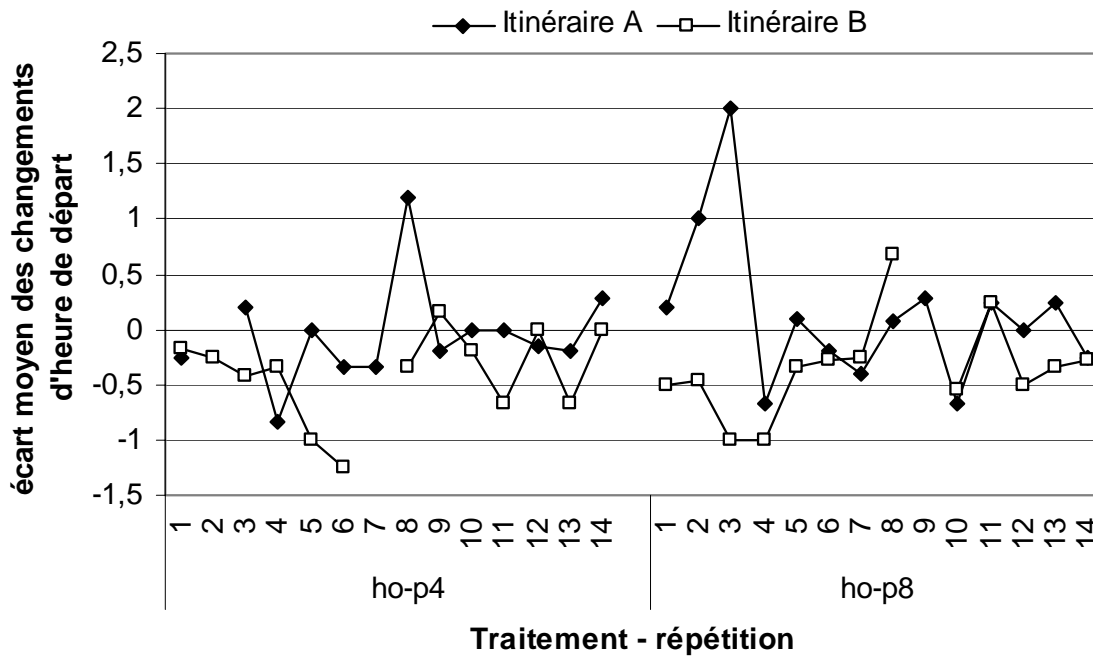
Considérons à présent l'influence du temps de transport sur les changements d'heure de départ pour des niveaux de congestion de 1 et de 2¹⁰ (i.e. TT = 1 ou 2). Pour chacun de ces temps de transport, nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Les données 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. Le graphique suivant présente

¹⁰ 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.

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



Graphique 8 : Evolution des écarts moyens des changements d'heure de départ, TT=2

Observation 9. Lorsque les usagers n'ont pas connu de congestion, ils changent faiblement leur heure départ et le font de la même façon quel que soit le niveau du péage.

Preuve de l'observation 9.

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 péage¹¹.

Observation 10. Après avoir connu une faible congestion sur l'itinéraire gratuit, les usagers qui ont un coût de péage faible changent moins leur heure départ que les usagers qui ont connu un péage fort.

Observation 11. 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 10.

Nous considérons les observations concernant l'itinéraire A. 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 11.

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 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 se coordonner pour éviter des temps de transport trop importants, les

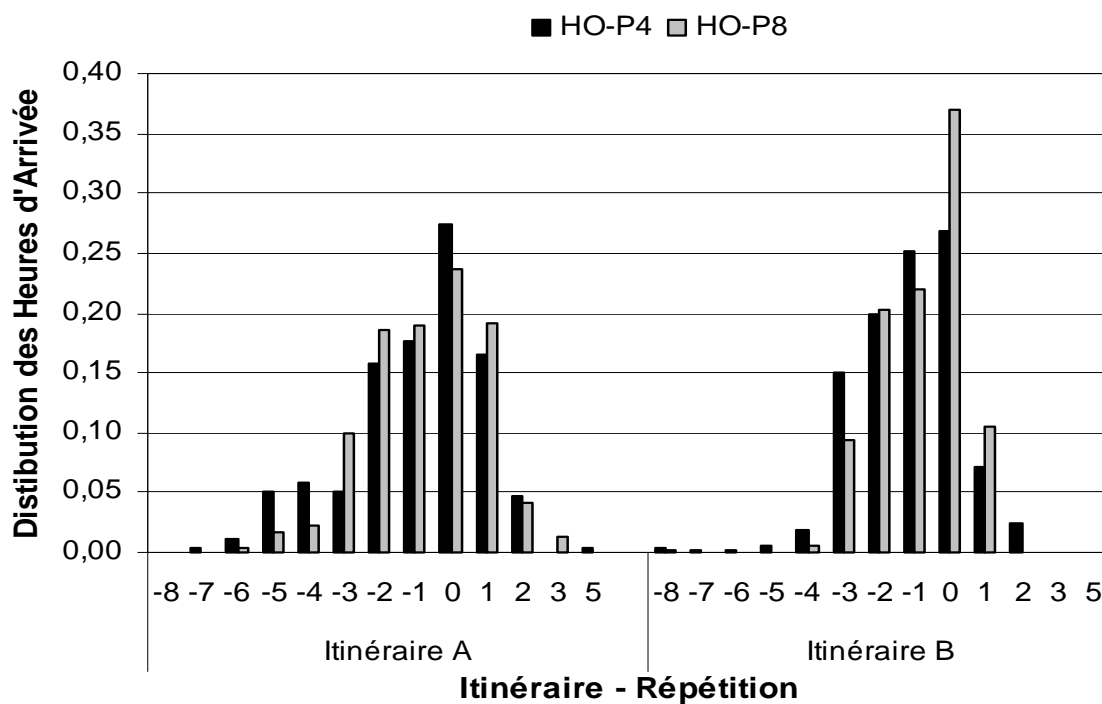
¹¹ L'analyse itinéraire par itinéraire propose les mêmes conclusions.

tests statistiques ont montré que le temps de transport des usagers est un facteur explicatif de leur choix. Ce temps de transport influence sensiblement le changement d'itinéraire, même si le coût du péage conduit les usagers à adopter des attitudes différentes. Le temps de transport influence également le changement des heures de départ. Mais nous avons constaté que cette influence s'exerçait dans une moindre mesure.

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. 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 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. Les données présentées regroupent les différentes heures d'arrivée sur l'ensemble des 15 répétitions du jeu et dans chaque traitement. Le graphique suivant présente les distributions des HA dans chaque traitement pour chaque itinéraire.



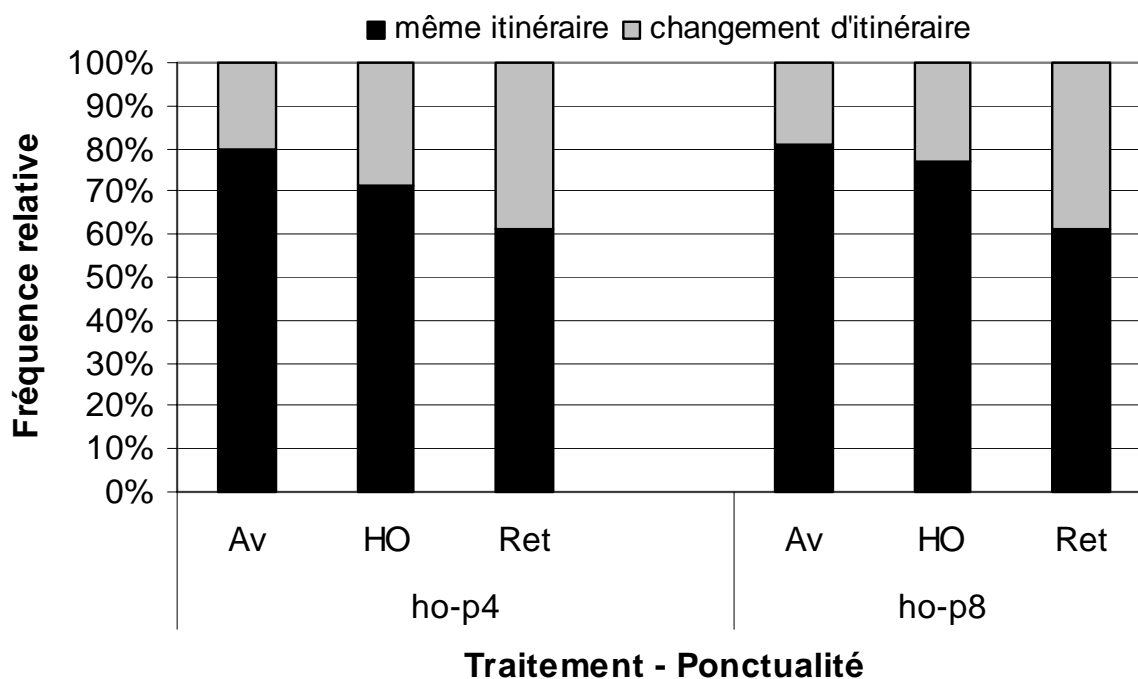
Sur l'itinéraire A, la valeur modale est de 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 27,5% des heures d'arrivée sont égales à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 51% des heures d'arrivée et les « retard » 21,5% des cas. Pour le traitement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

Compte tenu de ces observations 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, BB¹². Le graphique suivant présente dans chaque traitement et pour chaque type d'arrivée, la 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



¹² Le codage est le même que pour l'analyse précédente sur l'impact du Temps de Transport.

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

Preuve de l'observation 12.

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 de 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 13. 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 14. 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 13.

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 de données de type de « même itinéraire » (i.e. AA) au nombre de « changement d'itinéraire » (i.e. AB) dans chacun des deux 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 14.

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 (ponctu = 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).

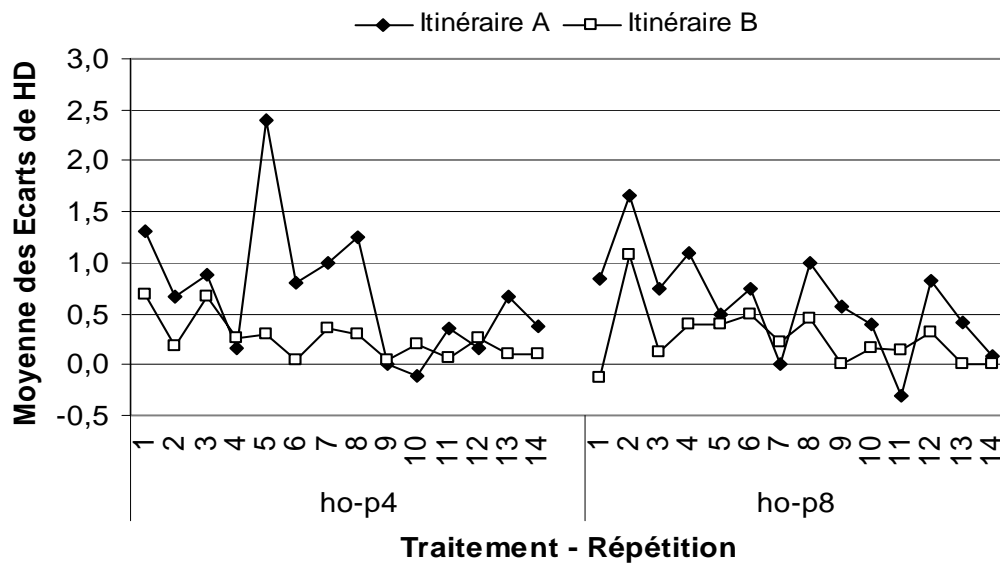
Observation 15. Lorsque les usagers arrivent en retard, le coût du péage n'influence pas les décisions de changement d'itinéraire.

Preuve de l'observation 15.

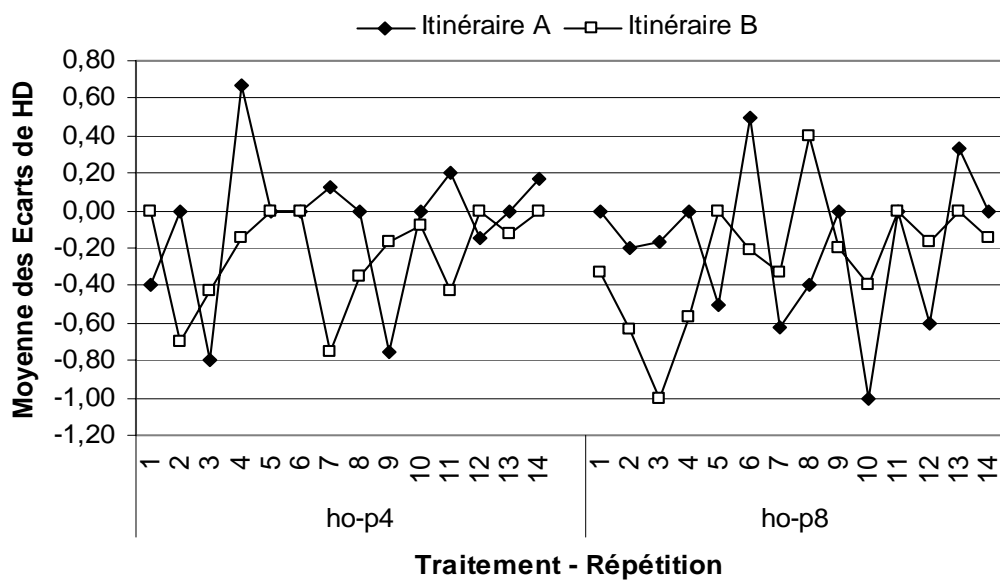
Nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HO-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Ret ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les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

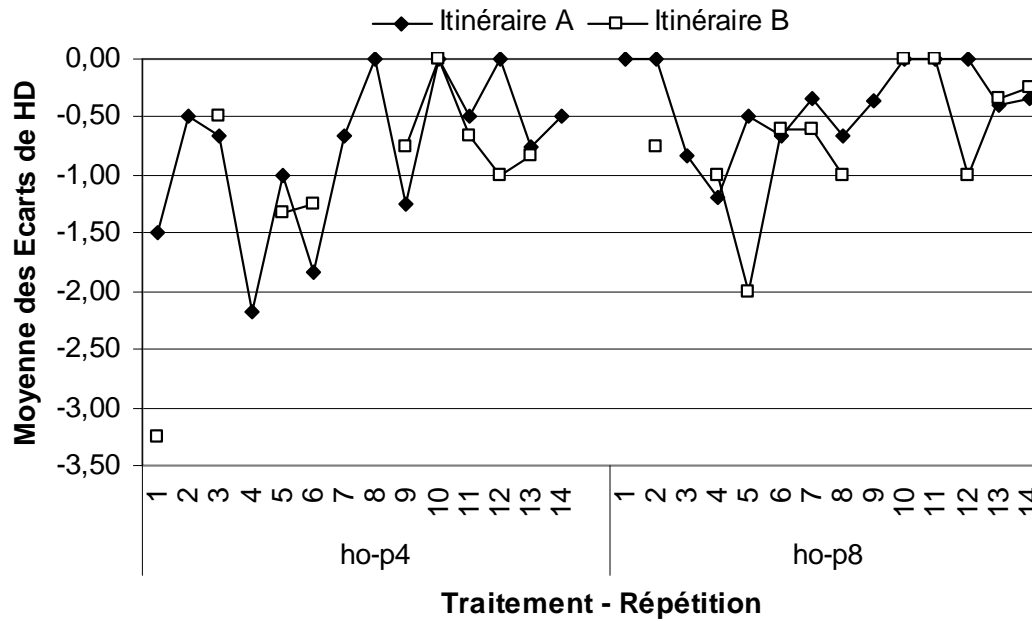
Considérons à présent l'influence de la ponctualité sur les changements d'heure de départ. Pour chacune des ponctualités possibles (Av, Ho et Ret), nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : 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 suivants présentent pour chaque ponctualité, la moyenne des écarts des heures de départ sur chaque itinéraire et dans chaque traitement.



Graphique 11 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Av





Observation 16. 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 16.

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 péage.

Observation 17. 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 17.

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 18. 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 19. 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.

Preuve de l'observation 18.

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 19.

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

Cette étude a permis de mettre en avant le comportement des usagers d'infrastructures routières soumis à un problème de coordination. Ce modèle théorique est novateur du fait d'une discrétisation du temps et de l'introduction d'un deuxième itinéraire payant. Les prédictions théoriques ont été testées expérimentalement, et deux niveaux de péage ont été comparés afin de mettre en évidence des règles de comportement de modification des choix individuels. A l'équilibre, les usagers se répartissent par groupe sur un intervalle de périodes de départ. Le nombre d'usagers par groupe est égal à la capacité d'absorption de l'itinéraire considéré (aucune congestion ne peut donc se former). La répartition sur chaque itinéraire dépend du prix du péage d'infrastructure. Les principaux résultats expérimentaux obtenus sont les suivants :

1. Concernant le choix d'itinéraire, seul un coût de péage faible permet aux usagers de se répartir conformément à la répartition théorique.
2. Les choix des heures de départ expérimentaux ne correspondent pas à la prédiction théorique. Toutefois, les usagers parviennent à se coordonner afin d'éviter la formation

d'une congestion importante, mais le prix du péage d'infrastructure influence négativement cette coordination.

3. Le niveau de congestion subi *ex-ante* influence les décisions de changement d'heure de départ et de choix d'itinéraire *ex-post*. Mais cette réaction individuelle à la congestion est limitée par le prix du péage : les sujets réagissent davantage à une congestion passée lorsque le coût du péage est faible.
4. La ponctualité par rapport à l'heure objectif influence uniquement les changements d'heure de départ. Les sujets ne considèrent pas le changement d'itinéraire comme un moyen de minimiser l'écart par rapport à l'heure objectif.

Une extension pertinente de notre analyse consisterait à envisager des usagers hétérogènes selon l'un des trois aspects suivants : (1) les coûts de déplacement et d'écart par rapport à l'heure objectif, (2) les coûts relatifs d'avance et de retard, (3) l'heure d'arrivée objectif. En effet, plusieurs études empiriques relatives aux déplacements domicile-travail (Ott et al. 1980, Small 1981, Moore et al. 1984) montrent que des individus appartenant à différentes catégories socioéconomiques ou classes d'âge différent dans leurs comportements routiers. Par exemple, les usagers appartenant à une catégorie élevée présentent une plus grande variabilité dans leurs heures d'arrivée, tandis que les travailleurs ayant des enfants sont plus enclins à arriver plus tôt. Arnott et al. (1989) présentent une analyse théorique à itinéraire unique avec hétérogénéité des usagers et montrent que l'arbitrage entre le temps de transport et l'écart d'arrivée par rapport à l'objectif est influencé par l'hypothèse d'hétérogénéité : elle introduit une hiérarchie dans la séquence de périodes de départ d'équilibre des usagers. Par conséquent, il serait intéressant d'étendre cette analyse à des usagers hétérogènes en considérant deux itinéraires et de tester expérimentalement les prédictions théoriques obtenues.

Références

- R. Arnott, A. De Palma et R. Lindsey. "Schedule Delay and Departure Time Decisions with Heterogeneous Commuters", *Transportation Research Record*, 1197, 56-67, 1989.
- R. Arnott, A. De Palma et R. Lindsey. "Departure Time and Route Choice for the Morning Commute", *Transportation Research*, 3, 209-228, 1990a.
- R. Arnott, A. De Palma et R. Lindsey. "Economics of Bottleneck", *Journal of Urban Economics*, 27, 111-130, 1990b.
- R. Arnott, A. De Palma et R. Lindsey. "A Structural Model of Peak-Period Congestion : A traffic Bottleneck with Elastic Demand", *American Economic Review*, 45, 301-335, 1993.
- R. Arnott, A. De Palma et R. Lindsey. "Recent Developments in Bottleneck Model", dans K. Button et E. Verhoef (eds.) *Road pricing, traffic congestion and the environment: Issues of efficiency and social feasibility*. Cheltenham, U.K. et Northampton, Mass.: Elgar, 1998.
- C. Camerer. "Individual Decision-making", *The Handbook of Experimental Economics*, in J. Kagel and A. Roth (eds), Princeton University Press, 1995.
- A. De Palma. "A game-theoretic Approach to the Analysis of Simple Congested Networks", *American Economic Review*, 82, 494-500, 1992.
- A. Moore, P. Jovanis et F. Koppelman. "Modeling the Choice of Work Schedule with Flexible Work Hours", *Transportation Science*, 18:2, 141-164, 1984.
- J. Ochs. "Coordination Problems", *The Handbook of Experimental Economics*, in J. Kagel and A. Roth (eds), Princeton University Press, 1995.
- M. Ott, H. Slavin et D. Ward. "Behavioral Impacts of Flexible Working Hours", *Transportation Research Record*, 767, 1-6, 1980.
- A. Rapoport et D.A. Seale. "An Experimental Study of Coordination and Learning in iterated Two Market Entry Game", *mimeo, The Hebrew University of Jerusalem*, 1999.
- K. Small. "The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips", *American Economic Review*, 72:3, 467-479, 1981.
- J.A. Sundali, A. Rapoport et D.A. Seale., "Coordination in Market Entry Games with symmetric Players", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 64:2, 203-218, 1995.
- W. Vickrey. "Congestion Theory and Transport Investment", *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 59, 251-61 (1969).

Annexes

Preuve de la Proposition 1 :

- *Cas 1* : $N \leq s$. 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 :

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

$R(t) = 0$ (il ne peut y avoir de congestion car $N \leq s$). Le coût $C_i(\tilde{t})$ est 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} . Le coût total individuel de transport est donc: $C_i(\tilde{t}) = \alpha(Tf + 1)$.

- *Cas 2* : $s < N \leq 2s$. A l'équilibre, s usagers choisissent de partir en $t^* - Tf - 1$ et $N - s$ usagers en $t^* - Tf - 2$ 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 $\beta < \alpha + \gamma$.
- *Cas 3* : $N > 2s$. A 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 trois 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,

$$C_i(t^* - Tf - K) < C_i(t^* - Tf - K - 1) \Leftrightarrow \alpha(Tf + 1) + (K - 1)\beta < \alpha(Tf + 1) + (K)\beta \quad (5)$$

et

$$\begin{aligned} C_i(t^* - Tf - K) < C_i(t^* - Tf) &\Leftrightarrow \alpha(Tf + 1) + (K - 1)\beta < \alpha(Tf + 1) + \gamma \\ &\Leftrightarrow (K - 1)\beta < \gamma \end{aligned} \quad (6)$$

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 hors équilibre, lorsque $N(t) > s$. Soit,

$$\begin{aligned} C_i(t^* - Tf - K) / N(t^* - Tf - K) \leq s &< C_i(t^* - Tf - 2) / N(t^* - Tf - 2) > s \\ &\Leftrightarrow (K - 1)\beta < \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} C_i(t^* - Tf - 2) / N(t^* - Tf - 2) > s &< C_i(t^* - Tf - K - 1) / N(t^* - Tf - K) \leq s < C_i(t^* - Tf) \\ &\Leftrightarrow \alpha < (K)\beta < \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

Compte tenu des équations (7) et (8), les équations (5) et (6) sont toujours vérifiées.

Preuve de la proposition 2 :

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

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

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

Etant données les conditions d'équilibre précédentes, 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,

$$\begin{aligned}
C^A(t^*-Tf_A-K_A-1) > C^B(t^*-Tf_B-K_B) &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + (K_A)\beta > \alpha(Tf_B + 1) + (K_B-1)\beta + p_B \\
&\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B) + (K_A-K_B+1)\beta > p_B
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
C^A(t^*-Tf_A) > C^B(t^*-Tf_B-K_B) &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + \gamma > \alpha(Tf_B + 1) + (K_B-1)\beta + p_B \\
&\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B) + \gamma - (K_B-1)\beta > p_B
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
C^A(t^*-Tf_A-2/N(t^*-Tf_A-2) >_{S_A}) > C^B(t^*-Tf_B-X/N(t^*-Tf_B-X) \leq_{S_B}) &\text{ avec } X \in \{1, \dots, K_B\} \\
&\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 2) > \alpha(Tf_B + 1) + (X-1)\beta + p_B \\
&\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (X-1)\beta > p_B
\end{aligned} \tag{11}$$

Nous devons 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 :

$$\begin{aligned}
C_i^A(t') > C_i^B(t'') &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + (t_A-1)\beta > \alpha(Tf_B + 1) + (t_B-1)\beta + p_B \\
&\Leftrightarrow t_A - t_B > [p_B - \alpha(Tf_A - Tf_B)]/\beta.
\end{aligned} \tag{12}$$

L'équation (12) nous donne l'écart minimum de période de départ entre les itinéraires qui justifie le passage sur l'itinéraire payant. De plus, selon les équations précédentes, les conditions (9) et (10) se déduisent des conditions (8) et (11). De plus, si $t_A - t_B \geq K_A - K_B + 1$, alors la relation suivante est vérifiée:

$$\alpha(Tf_A - Tf_B) + \beta(t_A - t_B) > \alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (K_B-1)\beta > p_B \tag{13}$$