

Effets de l'information routière sur l'équilibre de l'utilisateur.

6.1. INTRODUCTION

6.1.1. Contexte

Depuis des années, les services d'information de trafic connaissent un constant développement dans une variété de formes : carte routière, panneaux de signalisation, panneaux à messages variables (PMV), radio trafic, etc. En plus, les services d'information du trafic par téléphone, Internet ou dispositif nomade fournissent des informations avancées qui sont personnalisées en fonction du besoin individuel. En fait, l'utilisateur choisit son itinéraire ou son heure de départ en fonction de l'expérience ainsi que de l'information dont qu'il dispose (Miles et Chen, 2004), (Leurent, 2004).

Par son caractère stochastique, la congestion non-récurrente ne peut pas être détecté/anticipé par l'utilisateur individuel. Grâce à l'avancement des technologies, notamment en télécommunication, informatique et technique de mesure et de traitement du transport routier, l'opérateur est devenu capable de détecter les perturbations afin de mesurer et même à anticiper les conditions de circulation pour mieux réagir. En outre, des informations sur les conditions de circulation peuvent être communiquées aux usagers routiers. La disposition de l'information pointue permet à l'utilisateur d'améliorer son choix en adaptant sa décision aux perturbations présentes sur le réseau. Au niveau de réseau, il est espéré que les bénéfices provenant des services d'information de trafic ne sont pas limités à un gain individuel mais également étendues à un avantage pour l'ensemble du système car les décisions individuellement optimales pourront contribuer à améliorer la performance globale du réseau.

Le trafic sur un réseau routier est composé par la circulation de véhicules routiers en nombre important. Dans la limite des modalités d'exploitation, des règles de circulation, et surtout des conditions de trafic, chaque usager-automobiliste du réseau choisit son horaire de départ, son allure de déplacement, son itinéraire. Réciproquement, les choix de déplacement de l'ensemble des usagers conditionnent la répartition de la demande sur le réseau, puis les conditions de circulation. Le réseau routier subit souvent la congestion récurrente, i.e. l'excès de la demande par rapport l'offre, mais aussi la congestion non-récurrente, i.e. les perturbations exogènes telles que les incidents, les accidents, les conditions météorologiques difficiles ou d'autres aléas.

Par son caractère stochastique, la congestion non-récurrente est difficile voire impossible d'être détectée par un individu avant son déplacement. Grâce à

L'avancement des technologies, notamment en informatique, télécommunication et techniques de recueillement et de traitement des données routières, l'exploitant est devenu capable de détecter les perturbations, de mesurer l'ampleur de leurs conséquences et d'anticiper l'état du trafic pour mieux adapter les mesures de gestion du trafic. L'information concernant les conditions actuelles ou prévisionnelles de trafic peut être également communiquée aux usagers.

L'utilisateur effectue ses choix de déplacement en fonction des conditions de circulation et de l'état du trafic, ou plutôt de la connaissance dont il dispose à ce sujet, d'après son expérience et grâce à l'information routière qui lui est accessible (*cf.* Chapitre 4).

L'information routière est un service en constant développement, sous des formes variées : sur la route les automobilistes trouvent des panneaux de signalisation (statique), des panneaux à messages variables (PMV), et les radios trafic. De plus, les cartes routières, les services d'information par téléphone ou internet, les dispositifs de guidage par équipement embarqué, apportent des informations avancées qui sont adaptables aux besoins individuels (« customisables »). Et l'obtention d'une information pointue permet à l'utilisateur routier d'effectuer ses choix de manière opportuniste, en s'adaptant aux circonstances particulières du réseau lors de son déplacement : par adaptation en route ou antérieurement au déplacement (*cf.* Chapitre 4).

L'information procure à l'utilisateur un *profit individuel*, en lui permettant d'optimiser ses choix. Plus particulièrement, en cas de perturbation l'information dynamique permet à l'utilisateur de réagir, et de réduire son exposition à une source de gêne telle qu'un retard : l'utilisateur peut économiser du temps, pas forcément par rapport aux conditions « normales » qu'il escomptait, mais par rapport aux effets de la perturbation qu'il subirait s'il ne s'y adaptait pas. Nous nous concentrons ici sur le gain en temps, sans compter le gain de confort ni le gain de sécurité en cas d'accident ou en situation accidentogène. Ainsi l'utilisateur peut retirer un profit individuel de l'information dynamique, et ce d'autant plus qu'il est mieux équipé pour en recevoir : cela justifie son investissement dans un équipement individuel, investissement à amortir sur toutes les circonstances d'utilisation.

Au *plan collectif*, le profit dépasse la somme des profits individuels, parce que comme le comportement d'ensemble du trafic est la somme des comportements individuels, l'information de régulation et d'orientation induit des effets collectifs, susceptibles de réduire considérablement l'ampleur et la gravité d'une perturbation. Cela justifie d'investir dans des équipements collectifs d'information, depuis les capteurs de trafic sur le réseau jusqu'aux médias pour diffuser de l'information routière.

La diffusion de l'information dynamique de trafic aux usagers constitue d'une thématique complexe dont l'objectif, contenu, cible, niveau de diffusion, support, etc. en particulier les interactions entre les sources de la congestion, les lois physiques de l'écoulement et les comportements des usagers et d'autres mesures d'exploitation appelle à un modèle pertinent pour pouvoir analyser les phénomènes complexes puis acquérir une meilleure compréhension sur ce sujet.

6.1.2.Revue bibliographique

Dans la pratique d'exploitation du trafic routière, les conséquences d'un cas de perturbation, par exemple un accident, en présence de la congestion récurrente, de l'information routière, et d'autres mesures de gestion sont souvent analysées par simulation microscopique (Al-Deek, Khatkhaty *et al.*, 1998), (Hu, Wang *et al.*, 2005) et (Levinson, Gillen *et al.*, 1999; Levinson, 2003). Les indications données par simulation microscopique sont parfois peu pertinentes et peu conclusives parce que :

- La simulation microscopique ne reproduit que certains scénarii de perturbation, par l'exhaustivité des cas possibles.
- La simulation microscopique n'est pas capable de reproduire l'état l'équilibre du trafic donc de prendre en compte les effets des perturbations, de l'information routière et d'autres mesures sur le trafic pour le long terme.

Au plan de modélisation, la distinction des sources de congestion et leurs interactions avec l'information dynamique de trafic a été correctement traitée pour le choix d'horaire de départ par (Noland, Small *et al.*, 1998), (Leurent, 2001; Leurent, 2004), (Saito, Yasui *et al.*, 1998) bien que l'approche analytique ne inclut pas la réaction des usagers à la congestion.

Tout fois, concernant le choix d'itinéraire, la simulation dynamique des années 2000s (Lo et Szeto, 2004), a pris le même cadre d'hypothèses que la simulation statique des années 1990s (Al-deek et Kanafani, 1989) (Van Vuren et Watling, 1991; Maher et Hughes, 1995), (Zhang et Verhoef, 2006) en supposant que les usagers informés perçoivent un temps de parcours déterministe pendant que les usagers non-informés perçoivent un temps de parcours stochastique. En fait, cette définition est exactement au contraire de la nature stochastique de la dynamique des perturbations éventuelles sur un réseau routier et de la définition de l'information dynamique : « *l'information routière sur l'état de la circulation et les perturbations auxquelles les automobilistes sont confrontés* » (Sétra, 1996).

La diffusion de l'information de trafic aux usagers constitue d'une problématique complexe dont l'objectif, contenu, cible, niveau de diffusion, support de diffusion, type d'équipement, etc. en particulier les interactions entre les sources de la congestion, les lois physiques de l'écoulement et la diffusion de

l'information appelle à un modèle pertinent pour pouvoir simuler et analyser les phénomènes complexes puis acquérir une meilleure compréhension sur ce sujet.

La distinction des sources de congestion et leurs interactions avec l'information dynamique de trafic a été correctement traitée pour le choix d'horaire de départ par (Noland, Small *et al.*, 1998), (Leurent, 2001; Leurent, 2004) bien que l'approche analytique ne inclut pas la réaction des usagers à la congestion. Tout fois, concernant le choix d'itinéraire, la simulation dynamique des années 2000s (entre autres (Lo et Szeto, 2004)) a pris la même cadre d'hypothèses que la simulation statique des années 1990s (Van Vuren et Watling, 1991; Maher et Hughes, 1995) en supposant que les usagers informés perçoivent un temps de parcours déterministe pendant que les usagers non-informés perçoivent un temps de parcours stochastique. En fait, cette définition est exactement au contraire de la nature stochastique de la dynamique des perturbations éventuelles sur un réseau routier.

Les perturbations sur le réseau, en particulier le lien entre les perturbations et l'information dynamique sont encore mal-modélisés avec quelques contributions analytiques. La plupart des travaux sur ce sujet est par simulation numérique (Al-Deek, Khattak *et al.*, 1998), (Hu, Wang *et al.*, 2005) et (Levinson, Gillen *et al.*, 1999; Levinson, 2003) qui fournit une représentation très limité des cas perturbés ainsi qu'une compréhension analytique modeste.

6.1.3.Objectif

Notre objectif dans ce chapitre est de concevoir une modélisation rigoureuse des effets de l'information dynamique sur le trafic en tenant en compte

- La congestion en distinguant des perturbations exogènes de la congestion récurrente.
- Les comportements des usagers en distinguant le comportement des usagers informés de celui des usagers non-informés

Nous nous interrogeons sur la performance effective d'un certain niveau de diffusion de l'information et d'un certain équipement de réception de l'information pour un usager et plus largement sur l'intérêt collectif dans la disposition d'un certain système d'information. Notre questionnement est de nature économique : quel profit peut être tiré d'un équipement/ d'un système d'information ?

Nous ne cherchons pas à quantifier les coûts et les profits d'un système particulier mais à modéliser un aspect crucial et jusqu'ici trop méconnu dans les évaluations de système, à savoir la structure probabiliste des perturbations et l'influence du niveau de diffusion de l'information sur la résilience globale du flux aux perturbations.

Notre philosophie est de développer un modèle des perturbations, de l'équipement individuel et des réactions aux perturbations suffisamment explicite et réaliste pour ces aspects sous une forme aussi simple possible que possible sans en altérer la nature. Nous appliquons ce modèle à un réseau simple de deux routes parallèles avec deux classes d'utilisateurs respectivement équipée ou non pour simuler les réactions aux perturbations et le profit pour la collectivité, évalué simplement en gain du temps.

6.1.4.Méthode

Notre méthode est donc la modélisation probabiliste du trafic, au but d'analyse économique. Notre modèle est conçu afin d'explicitier : le trafic sur un réseau, les conditions de circulation avec l'influence de la congestion et l'éventualité de perturbations, la composition du trafic par des usagers disposant ou non d'équipement d'information et qui choisissent leur itinéraire en fonction de l'information.

L'équipement d'information permet aux usagers équipés de connaître le coût perturbé (temps perturbé) ; tandis que les usagers non équipés choisissent leur itinéraire en fonction seulement d'une connaissance en moyenne.

Avec ce modèle, nous simulons les effets du volume de demande sur la congestion, et du taux d'équipement sur la résilience du trafic aux perturbations : nous montrons qu'un certain taux d'équipement peut suffire à éliminer l'effet des perturbations.

De plus nous distinguons notre modèle des approches précédentes visant le même objectif : nous critiquons les hypothèses du modèle de Maher et Hughes (1995) et nous en montrons les effets irréalistes ; nous montrons aussi qu'un traitement trop grossier des hypothèses de modélisation, aboutit à des conclusions erronées.

Afin de conserver l'essence physique et économique de la problématique, nous traitons le modèle de manière formelle, analytique ce qui permet de tracer le rôle de chaque hypothèse.

6.1.5.Contenu

Ce chapitre comprend 4 sections hors l'introduction et conclusion. Nous commençons par formuler le jeu d'hypothèses concernant le réseau, le phénomène de congestion, le temps de parcours, les aspects aléatoires des perturbations, les classes d'utilisateurs et leur comportement §6.2. Nous traitons analytiquement le problème d'équilibre du trafic en section §6.3. En §6.4, nous spécifions notre hypothèse concernant la distribution aléatoire des perturbations. Et en fin, nous effectuons des simulations numériques en §6.5.

6.2. FORMULATION DES HYPOTHESES

Dans cette section, nous posons les hypothèses du côté de l'offre de transport concernant le réseau, la congestion et les perturbations aléatoires §6.2.1. Puis en sous-section §6.2.2, nous décrivons la structure de la demande, à savoir le volume total et le taux d'équipement, le comportement des usagers correspond à la classe qu'il appartient.

6.2.1. L'offre de transport

Réseau

Nous considérons un réseau routier qui se compose des arcs $a \in A$, l'ensemble des arcs, avec les nœuds $n \in N$, l'ensemble des nœuds. *A priori*, les itinéraires se composent de sections de route ; chaque section supporte un niveau de trafic qui en induit le coût moyen pour un usager, selon le modèle de congestion.

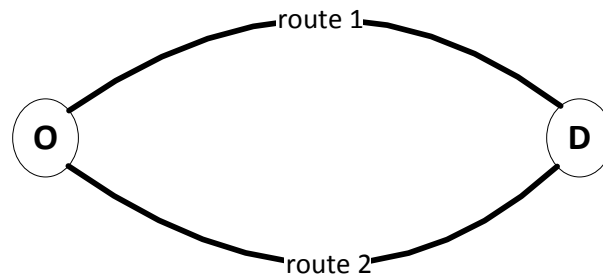


Fig. 6-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination

Notre application se limite à un cas d'école : un réseau composé de deux routes parallèles desservant une relation entre un sommet d'origine et un sommet de destination (Fig. 6-1).

La congestion : un modèle statique par section

Sur un réseau de transport, la congestion est le phénomène de trafic selon lequel une concentration accrue de mobiles, par le jeu de leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun et la qualité de service pour tous.

Ce phénomène a été abondamment étudié au niveau local d'une section routière : on distingue classiquement un régime saturé, dans lequel les véhicules forment une file d'attente sans « trous » dans le trafic, file dont l'écoulement est principalement déterminé par les conditions de capacité en aval ; et un régime non saturé, appelé fluide même s'il comporte des interactions entre les véhicules.

Fig. 6–2 montre d'une part des observations conjointes de temps et de débit sur une section autoroutière par période de 6 minutes, d'autre part une fonction temps-débit classique (¹).

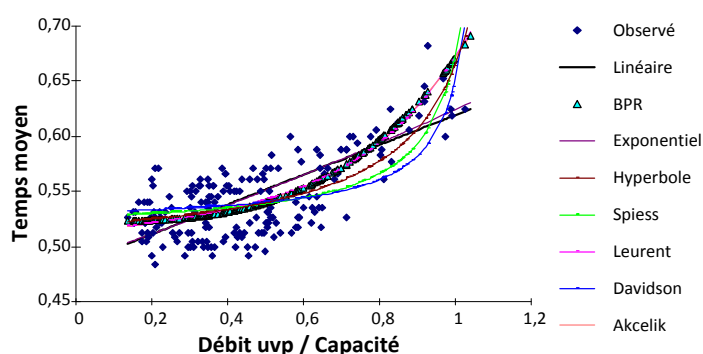


Fig. 6–2 : Observation débit temps unitaire et plusieurs modèle débit-temps. Source : Leurent, 2006

Nous renvoyons le lecteur intéressé à la modélisation probabiliste du temps de parcours et du trafic, à (Leurent, 2001) et à l'article associé (Leurent, 2006) ou (Singh, 1999), (Fosgerau et Fukuda, 2008)

Sur chaque arc a , le débit en arc x_a induit un temps individuel T_a subi des effets de congestion, qui se modélise par une fonction temps-débit : $T_a = \tilde{t}_a(x_a)$, une fonction mathématique croissante entre le temps de parcours individuel moyen et le débit en véhicules sur la section. C'est le modèle classique de congestion dans les modèles statiques d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau, qui demeurent les plus utilisés dans les études de planification. Pour l'instance, prenons une fonction affine linéaire, comme suivant : $\tilde{t}_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$ dans laquelle α_a signifie le temps à vide et γ_a est la sensibilité du temps individuel à la congestion (Fig. 6–3). Cette hypothèse correspond au régime non saturé, pas au régime saturé dans lequel le débit est contraint par la capacité de poursuite.

¹ La fonction puissance proposée par le BPR (Bureau of Public Roads, le Sétra américain) a été largement utilisée depuis les années 1960 : sa formule $T(x) = T_0 [1 + \alpha \cdot (x/\kappa)^\beta]$ relie le temps moyen $T(x)$ en charge sous le débit x , au temps libre (à trafic nul) T_0 , au taux de charge x/κ avec κ la capacité d'écoulement, et α et β deux paramètres de forme

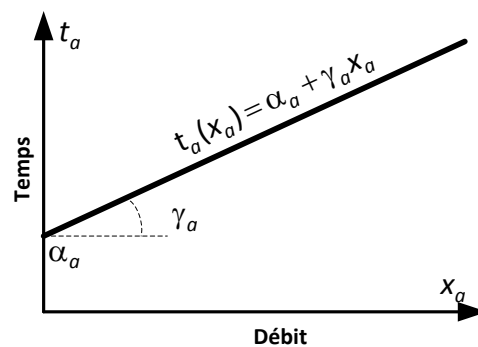


Fig. 6-3 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps

Aspects aléatoires : les perturbations du coût

Le temps de parcours d'une section routière est une notion susceptible de plusieurs acceptions :

- (i) Le temps passé par un usager lors d'un déplacement réalisé est une grandeur physique objective.
- (ii) Le temps de parcours estimé avant réalisation, même par un ingénieur disposant de toute l'information a priori possible, est une grandeur physique entachée d'incertitude car exposée à diverses perturbations.
- (iii) Le temps perçu par l'utilisateur est empreint de subjectivité, même si l'utilisateur l'estime en unités physiques.

Le temps de parcours, comme un emploi particulier du budget temporel dont dispose l'utilisateur, est une consommation de ressource économique, et il revêt une signification économique dans les choix de déplacement.

Nous nous intéressons ici au temps de parcours comme grandeur physique, soit avant soit après réalisation du déplacement. Nous supposons que l'opérateur du réseau et le fournisseur d'information mesurent précisément le temps et informent exactement les utilisateurs équipés d'un dispositif individuel d'information.

Nous réduisons la subjectivité de l'individu à son statut d'équipement. Nous assimilons le temps estimé par l'utilisateur sur un itinéraire, à son estimation de coût qui intervient dans son choix d'itinéraire.

Enfin, nous modélisons deux causes de variations objectives du temps de parcours :

- (i) Les variations en fonction de l'état macroscopique du trafic hors perturbations : i.e. le modèle de congestion.
- (ii) Les variations par perturbation exogène, qui se greffent sur le temps attendu hors perturbation.

Nous négligeons les fluctuations inhérentes aux interactions ponctuelles entre les véhicules dans un flot de trafic.

En fixant l'état macroscopique du trafic, sous la forme des débits par section du réseau, nous modélisons l'effet de perturbations exogènes sur les temps de parcours de manière probabiliste, en explicitant la fréquence d'occurrence des perturbations selon leur ampleur. Autrement dit, nous associons à chaque section une distribution statistique du retard subi en perturbation, distribution dans laquelle une probabilité est associée à chaque valeur éventuelle du retard.

En dépit de notre modèle débit-temps statique, les effets dynamiques d'une période à une autre, c'est-à-dire variations inter-périodes sont modélisées par un variable aléatoire. En fin, supposons que il existe un ensemble Ω des circonstances (ou période) ω , chacune génère les débits $x_a(\omega)$ et les temps :

$$T_{a\omega} = \tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_a(\omega) \quad (\text{eq. 6-1})$$

La variable aléatoire modélise $\zeta_a(\omega)$ modélise la variation éventuelle du temps qui se produit probablement à cause des perturbations exogènes, avec moyenne $\mu_a = E(\zeta_a)$ et variance $\sigma_a^2 = V[\zeta_a]$. Pour simplifier, supposons que les variables aléatoires $\zeta_a(\omega)$ sont indépendamment distribuées.

Nous avons la formule de temps moyens sur toutes les occurrences :

$$E_{\omega}[T_{a\omega} : x_{a\omega} = x] = \tilde{t}_a(x) + \mu_a \quad (\text{eq. 6-2})$$

6.2.2. La demande

Volume et structure de référence

Nous considérons une période de déplacement supposée en régime stationnaire, et une relation origine-destination avec un volume de déplacements noté Q . Dans cette population de déplacements, nous supposons que tous les usagers ont une même perception du temps tel que connu à chacun d'eux, et un même comportement économique rationnel, de choix individuel d'itinéraire. Ainsi les usagers ne sont différenciés que par leur manière d'estimer le temps, qui résulte de leur statut d'équipement en dispositif d'information.

Le taux d'équipement, noté β , divise le volume total en deux volumes de classe. Par conséquent, le volume de la classe informé et non-informé est respectivement $q^I = \beta Q$ et $q^N = (1 - \beta)Q$

Deux classes d'utilisateurs selon l'équipement

Plusieurs études empiriques ont montré que la connaissance d'un automobiliste est déterminée de manière très complexe par plusieurs facteurs dont deux facteurs primordiaux sont l'effort cognitif et la disponibilité de l'information routière. En négligeant le facteur de l'effort cognitif par une considération en moyen de cet aspect, nous supposons que la perception d'un usager-automobiliste ne dépend que du service d'information dont il dispose. Dans la littérature scientifique (Al-Deek, Khattak *et al.*, 1998), (Maher et Hughes, 1995), (Ramming, 2002), on rencontre diverses segmentations selon des types d'information : information dynamique, information statique, information descriptive, information prédictive, information sur la topologie, information sur le coût, etc.

Nous analysons les déplacements d'une relation origine-destination, par exemple du nœud O vers le nœud D. La population des voyageurs se déplaçant du nœud O au nœud D appartient à une de deux classes d'utilisateurs selon leur statut d'équipement : la classe I des utilisateurs équipés, puis parfaitement informés en information dynamique ou la classe N des utilisateurs non-équipés, puis non-informés dynamiquement- ils ne connaissent que les conditions moyennes associées à l'état macroscopique de trafic

Les quantités d'utilisateurs de deux classes sont définies par le taux d'équipement β , la proportion des utilisateurs équipés parmi l'ensemble des utilisateurs, et le volume total de demande Q . Le taux d'équipement β dose la diffusion de l'information dans la population.

Comportement des utilisateurs

Nous supposons que tous les utilisateurs choisissent leur itinéraire lors de leur déplacement de l'origine vers la destination de la même manière de raisonnement : minimiser leur coût individuel. Tout fois, la décision de chaque utilisateur dépend également de la connaissance sur les conditions du trafic dont il dispose.

L'utilisateur informé est supposé de connaître parfaitement les conditions de trafic quelque soit la circonstance :

$$t'_o(\omega) = T_o(\omega) \quad (\text{eq. 6-3})$$

Pendant que l'utilisateur non-équipé est supposé de connaître une connaissance grossière sur les conditions du trafic, c'est-à-dire les valeurs moyennes des temps.

$$t_a^N = E_\omega[T_a(\omega)]. \quad (\text{eq. 6-4})$$

Pour l'instant, le coût à l'utilisateur est limité au temps de déplacement, en négligeant les péages, le confort ou d'autres critères de qualité. Nous focalisons sur les perturbations qui font de notre principale préoccupation.

Pour l'arc a , et la classe d'utilisateurs $u \in \{I, N\}$ à l'occurrence ω , notons $x_a^u(\omega)$ le débit sur l'arc, il détient que :

$$\begin{aligned} x_a(\omega) &= x_a^I(\omega) + x_a^N(\omega) \\ x_1^I(\omega) + x_2^I(\omega) &= q^I \\ x_1^N(\omega) + x_2^N(\omega) &= q^N \end{aligned} \quad (\text{eq. 6-5})$$

Notons que les usagers non-informés ne font que leur choix à long terme et les débits non-informés ne dépendent pas de ω :

$$\forall \omega : x_a^N(\omega) = \bar{x}_a^N$$

6.2.3. L'équilibre offre-demande bi-niveau

Enchainons les hypothèses concernant l'offre et demande dans les explications suivantes :

- A chaque occurrence ω , chaque usager choisit son itinéraire : son déplacement sur cette route induit un débit supplémentaire.
- En considérant la population des voyageurs, leurs choix individuels induisent les débits sur le réseau.
- Le débit sur un chaque arc détermine son temps selon la fonction de congestion (fonction débit-temps).
- A son tour, les temps sur les deux arcs conditionnent le choix individuel des usagers.

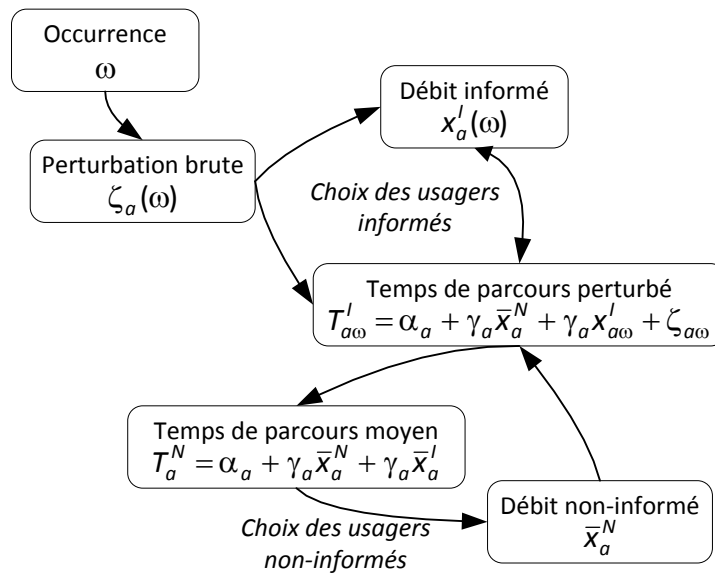


Fig. 6-4 : Dépendances logiques entre les hypothèses

Il existe un cycle d'enchaînement des interactions entre l'offre et la demande. La fig. Fig. 6-4 fournit une illustration sur les dépendances entre les notions dans notre modèle en précisant le comportement spécifique de chaque classe en fonction de son accès à l'information dynamique.

D'abord une circonstance ω induit des perturbations brutes $\zeta_a(\omega)$ sur les temps des arcs. Puis les usagers informés adaptent leur itinéraire en fonction de la perturbation et du mécanisme de congestion ; cela produit une affectation $x'_a(\omega)$. Puis, l'affectation des usagers informés I aux arcs a s'opère selon une alternative :

- exclusivement sur l'arc a si $t_a(\omega) < t_{3-a}(\omega)$, avec alors $x'_a(\omega) = q' = \beta Q$ et $x'_{3-a}(\omega) = 0$.
- entre les deux arcs si $t_1(\omega) = t_2(\omega)$.

Pour trancher l'alternative, il faut déterminer si l'effet de congestion jouant sur un volume $q' = \beta Q$, est susceptible de compenser la perturbation brute : pour cela il faut et il suffit que, en notant $\alpha'_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$,

$$-\gamma_2 q' \leq \alpha'_2 - \alpha'_1 + \xi_2(\omega) - \xi_1(\omega) \leq \gamma_1 q' \quad (\text{eq. 6-6})$$

A ce stade chaque temps $t_a(\omega)$ est bien établi et connu : le temps moyen $\bar{t}_a = E_\omega[t_a(\omega)]$ synthétise l'ensemble des circonstances, et il induit le choix d'itinéraire pour les usagers N non équipés ; et donc les volumes \bar{x}_a^N . Enfin \bar{x}_a^N rétroagit sur les temps via la fonction de congestion.

Il s'agit d'un modèle d'équilibre du trafic à bi-niveau : instant et long terme. Chaque niveau pose des contraintes à l'autre. Notre modèle ne doit pas être confondu à un modèle à deux classes dans lequel il y a une classe déterministe et une classe Probit (Van Vuren et Watling, 1991) et (Maher et Hughes, 1995)

6.3. ANALYSE D'EQUILIBRE DU TRAFIC

Nous supposons provisoirement que les \bar{x}_a^N sont fixés. Nous en déduisons successivement l'affectation de q^l aux $x_a^l(\omega)$ en fonction de ω (§6.3.1), puis la moyenne d'un débit informé \bar{x}_a^l (§6.3.2), et ensuite la rétroaction sur les \bar{x}_a^N (§6.3.3). En fin, nous caractérisons le problème de point-fixe (§6.3.4) et proposons les indicateurs d'utilité pour l'individu et pour le trafic (§6.3.5).

6.3.1. Affectation instantanée des usagers informés

En notant $\alpha_a^l = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$, $T_{a\omega} = \alpha_a^l + \gamma_a x_a^l(\omega) + \zeta_{a\omega}$ est le temps de l'arc a à l'occurrence ω . S'il y avait qu'un usager informé, il choisirait l'itinéraire de minimum $T_{a\omega}(0) = \alpha_a^l + \zeta_{a\omega}$. Cependant, la réaffectation dynamique des usagers informés va tenter d'augmenter le temps de cette route due à sa fonction de congestion : cet effet peut résulter une compensation partielle, c'est-à-dire $T_{a\omega}$ reste encore moins que $T_{b\omega}$ ou une compensation totale, c'est-à-dire l'égalité des temps :

$$\alpha_a^l + \gamma_a x_a^l(\omega) + \zeta_{a\omega} = \alpha_b^l + \gamma_b x_b^l(\omega) + \zeta_{b\omega} \quad (\text{eq. 6-7})$$

Dans le dernier cas, $x_a^l(\omega) + x_b^l(\omega) = q^l$ conduit à :

$$x_a^l(\omega) = \frac{\gamma_b q^l + \alpha_b^l + \zeta_b - \alpha_a^l - \zeta_a}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 6-8})$$

, et:
$$T_{a\omega} = \frac{\gamma_a \gamma_b q^l + \gamma_a \alpha_b^l + \gamma_b \alpha_a^l}{\gamma_a + \gamma_b} + \frac{\gamma_b \zeta_a + \gamma_a \zeta_b}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 6-9})$$

Dans le cas précédent, nous avons $x_{a\omega}^l = q^l$ et $x_{b\omega}^l = 0$, puis $T_{a\omega} = \alpha_a^l + \gamma_a q^l + \zeta_{a\omega}$ et $T_{b\omega} = \alpha_b^l + \zeta_{b\omega}$, avec $T_{a\omega} \leq T_{b\omega}$. Cette condition est équivalente à : $\zeta_{b\omega} - \zeta_{a\omega} \geq \alpha_a^l - \alpha_b^l + \gamma_a q^l$

6.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés

Pour calculer les débits par arc moyens des usagers informés, les \bar{x}'_a , nous déconditionnons par rapport aux perturbations ζ_1, ζ_2 tout en restant conditionnels aux \bar{x}^N_a .

Notant $B \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 + \gamma_1 q'$ et $A \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 - \gamma_2 q'$: conditionnellement à $z = \zeta_2 - \zeta_1$, nous avons :

- si $z > B$ puis $T_{1\omega}(q') \leq T_{2\omega}(0)$ alors $x'_1(\omega) = q'$ et $x'_2(\omega) = 0$,
- si $z < A$ puis $T_{1\omega}(0) \geq T_{2\omega}(q')$ alors $x'_1(\omega) = 0$ et $x'_2(\omega) = q'$,
- si $z \in [A, B]$ puis $T_{1\omega} = T_{2\omega}$ aux débits $x'_1(\omega) = \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2}$ et $x'_2(\omega) = \frac{B - z}{\gamma_1 + \gamma_2}$

En notant F la fonction de distribution de $Z = \zeta_2 - \zeta_1$ sur l'ensemble Ω des cas ω et \tilde{F} sa fonction moment tronqué $\tilde{F}(x) = \int^x z dF(z)$, par agrégations, nous avons :

$$\bar{x}'_1 = 0 \cdot \int_{-\infty}^A dF(z) + \int_A^B \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2} dF(z) + q' \cdot \int_B^{+\infty} dF(z) = q' - \bar{x}'_2 \quad (\text{eq. 6-10})$$

, dans laquelle :

$$\bar{x}'_2 = \frac{G(B) - G(A)}{\gamma_1 + \gamma_2} \text{ dont } G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x) \quad (\text{eq. 6-11})$$

L'indépendance de ζ_1 et ζ_2 entraîne le fait que Z est une variable aléatoire de moyenne $\mu = \mu_2 - \mu_1$ et variance $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$

6.3.3. Affectation des usagers non-informés

Il reste à affecter les usagers N entre les deux arcs. Nous supposons que faute d'accès à l'information dynamique, un usager N perçoit uniquement les temps moyens des itinéraires, et choisit un itinéraire de temps moyen minimal. Reste à préciser de quel temps moyen s'agit-il, et la réponse à cette question dépendrait de l'exposition particulière de chaque usager N . Nous supposons que les usagers N sont tous exposés à l'ensemble des perturbations, et qu'ils subissent les temps moyens induits par les trafics et la congestion, les perturbations et leur amortissement par les usagers informés.

Notant $\alpha^N_a \equiv \alpha_a + \mu_a + \gamma_a \bar{x}'_a$ et comparant α^N_1 avec α^N_2 :

- si $\alpha_1^N \geq \alpha_2^N + \gamma_2 q^N$ alors $\bar{x}_2^N = q^N$ et $\bar{x}_1^N = 0$.
- si $\alpha_1^N + \gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N$ alors $\bar{x}_1^N = q^N$ et $\bar{x}_2^N = 0$.
- si $-\gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N - \alpha_1^N \leq \gamma_2 q^N$ alors $\bar{x}_a^N = \frac{\alpha_b^N - \alpha_a^N + \gamma_b q^N}{\gamma_a + \gamma_b}$.

La dernière condition se déduit de $\bar{t}_a = \bar{t}_b = \theta$ avec $\bar{t}_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^l + \gamma_a \bar{x}_a^N + \mu_a$, lorsque l'affectation des usagers non-informés sur les itinéraires les moins coûteux subis de la congestion entraîne un équilibre du trafic avec un équilibre de temps θ .

6.3.4. Caractérisation du problème de point-fixe

En enchaînant l'ensemble des formules précédentes, nous obtenons que les débits non-informés (\bar{x}_a^N) induit les temps de référence d'usagers informés (α_a^l), qui, à son tour, déterminent les débits informés moyens (\bar{x}_a^l), qui en suite détermine les temps de référence d'usagers non-informés (α_a^N), qui enfin déterminent les débits non-informés (\bar{x}_a^N). Ce cycle indique que chaque variable parmi (\bar{x}_a^N), (\bar{x}_a^l), (α_a^l), (α_a^N) résout a spécifique problème de point-fixe. Pour le cas d'école de deux routes que nous traitons, ce problème est facile à résoudre car il implique à seulement une inconnue : un algorithme de relaxation serait approprié, pour l'instance un algorithme de combinaison convexe aux débits non-informés. Dans la section suivante, une solution analytique est fournie sous certaines hypothèses statistiques des variables aléatoires.

6.3.5. Indicateurs d'utilité

Nous mesurons les effets de l'information dynamique sur le trafic par les trois indicateurs suivants :

Pour un usager non-informé de la classe N , le coût moyen est suivant :

$$\bar{C}^N = \bar{t}_1^N \frac{x_1^N}{q^N} + \bar{t}_2^N \frac{x_2^N}{q^N} \quad (\text{eq. 6-12})$$

Pour un usager informé de la classe l , le coût moyen est calculé par l'agrégation des coûts à toutes les occurrences :

$$\bar{C}^l = E_\omega[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}] = \int_z \min\{\bar{c}_{1/z}^l, \bar{c}_{2/z}^l\} dF(z) \quad (\text{eq. 6-13})$$

Dans laquelle $\bar{c}_{a/z}^l \equiv E_\omega[\alpha_a^l + \zeta_a(\omega) + \gamma_a x_a^l(\omega) \mid (\zeta_2 - \zeta_1)(\omega) = z]$ désigne le coût moyen de la route a à un usager informé, conditionnel à $\zeta_2 - \zeta_1 = z$

En accord avec la comparaison de $\bar{c}'_{1/z}$ à $\bar{c}'_{2/z}$, le coût minimal est donné par une des deux routes selon trois cas suivants :

- $\bar{c}'_{2/z} = \alpha'_2 + E[\zeta_2(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_2 q'$ if $z \in]-\infty, A]$ alors route 2 est optimale
- $\bar{c}'_{1/z} = \alpha'_1 + E[\zeta_1(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_1 q'$ if $z \in]B, +\infty]$ alors route 1 est optimale
- $\bar{c}'_{1/z} = \alpha'_1 + E[\zeta_1(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_1 \frac{z-A}{\gamma_1 + \gamma_2}$ if $z \in]A, B]$ alors les deux routes sont optimales.

Regroupant les trois cas, nous avons :

$$\bar{c}' = \alpha'_1 + \gamma_1 q' - \frac{\gamma_2 A \cdot F(A) + \gamma_1 B \cdot F(B)}{\gamma_1 + \gamma_2} + \frac{\gamma_1 [\tilde{F}(B) - \tilde{F}(A)]}{\gamma_1 + \gamma_2} + \int_{-\infty}^A \bar{c}'_{2/z} dF(z) + \int_A^{+\infty} \bar{c}'_{1/z} dF(z) \quad (\text{eq. 6-14})$$

Comme $\int_{-\infty}^x \bar{c}'_{2/z} dF(z) + \int_x^{+\infty} \bar{c}'_{1/z} dF(z) = \tilde{F}(x) + \mu_1$, nous obtenons une formule plus simple :

$$\bar{c}' = \bar{t}_1 - G(A) \quad (\text{eq. 6-15})$$

Pour l'ensemble du trafic, le coût moyen par usager est calculé en effectuant la moyenne pondérée des coûts de deux classes :

$$\bar{c} = \beta \bar{c}' + (1 - \beta) \bar{c}^N = \bar{c}^N - \beta \Gamma^N \quad (\text{eq. 6-16})$$

Pour un usager du réseau, l'utilité (par déplacement) d'être équipé en information dynamique est équivalente à :

$$\Gamma^N = \bar{c}^N - \bar{c}' \quad (\text{eq. 6-17})$$

Les indicateurs à un taux d'équipement β devront être comparés à une situation de référence, disons la situation sans information : $\beta = \beta_0 = 0$

6.4. ANALYSE PARAMETRIQUE ET NUMERIQUE

Dans notre application à un cas d'école, deux formules analytiques sont fondamentales : d'abord, celle des débits moyens des usagers informés (eq.) et deuxièmement, celle du coût moyen pour un usager informé (eq.). Toutes les

deux impliquent la fonction G, dont les propriétés de base nous permettent d'effectuer l'analyse de sensibilité du modèle de manière analytique et paramétrique. En outre, les hypothèses supplémentaires sur la distribution statique des perturbations aléatoires rendent des renseignements considérables concernant l'influence du taux d'équipement, du volume de demande, de l'ampleur des congestions accidentelles et de la sensibilité à la congestion.

6.4.1. Propriété de l'écart des perturbations

L'écart des perturbations, $Z \equiv \Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1$, a la fonction CDF F et la fonction de moment tronqué $\tilde{F}(x) = \int^x z dF(z)$ et une fonction liée $G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x)$. Par sa définition,

$$G(x) = \int^x (x-z) dF(z) \quad (\text{eq. 6-18})$$

Donc elle est une fonction non-négative (car $(x-z) \geq 0$ et $dF(z) \geq 0$) et croissante.

Des spécifications supplémentaires sur les perturbations aléatoires sont nécessaires pour tracer l'influence de leurs paramètres principaux, c'est-à-dire valeur moyenne et l'écart-type. Nous allons considérer les distributions Gaussienne et Bernoulli-Exponentielle des variables aléatoires.

Cas Gaussien

Supposons que $\zeta_a \approx N(\mu_a, \sigma_a^2)$ et que le couple (ζ_a, ζ_b) font un vecteur Gaussien, donc l'écart $Z \equiv \Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1 \approx N(\mu, \sigma^2)$ avec $\mu = \mu_2 - \mu_1$ et $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\text{cov}(\zeta_a, \zeta_b)$ a aussi une distribution Gaussienne. La variance est réduite à $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ si les perturbations locales sont indépendantes. La variable Gaussienne Z a :

- La fonction de densité de probabilité $f(x) = \exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2] / (\sigma\sqrt{2\pi})$ dont $\phi(t)$ est fonction de densité de probabilité d'une variable Gaussienne centrée réduite (avec moyenne 0 et variance 1).
- La fonction de distribution accumulée $F(x) = \Pr\{z \leq x\} = \Phi(\frac{x-\mu}{\sigma})$ dont $\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \phi(u) du$ est la fonction de distribution accumulée variable Gaussienne centrée réduite.

- La fonction de moment tronqué $\tilde{F}(x) = \mu \cdot \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$, réduite à $\tilde{F}(x) = -\sigma \cdot \phi(x/\sigma)$ pour le cas $\mu = 0$.

Cela nous permet de dériver la moyenne des minimums des deux variables Gaussienne :

$$\begin{aligned} E[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}] &= \bar{c}_1 + \tilde{F}(0) \\ &= \bar{c}_1 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_2 - \bar{c}_1}{\sigma}\right) + \bar{c}_2 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

En fin, définissons la fonction $g_N(x) = \phi(x) + x\Phi(x)$ qui est une fonction positive, croissante, illustrée par la Fig. 6-6

Cas Bernoulli-Exponentiel

Nous supposons que ζ_σ est nulle à probabilité $1 - \eta_\sigma$ et positif à probabilité η_σ , qui fait l'hypothèse Bernoullienne. La partie positive est distribuée exponentielle avec paramètre λ_σ . Puis $E[\zeta_\sigma] = \eta_\sigma / \lambda_\sigma$ et $V[\zeta_\sigma] = \eta_\sigma(2 - \eta_\sigma) / \lambda_\sigma^2$.

L'écart des perturbations Z a :

- La valeur moyenne $\left(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}\right)$,
- La variance $\frac{\eta_1(2 - \eta_1)}{\lambda_1^2} + \frac{\eta_2(2 - \eta_2)}{\lambda_2^2}$,
- La fonction de distribution accumulée
- $F(x) = 1_{\{x < 0\}} \left(\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} \left[1 - \left(\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \exp(-\lambda_2 x)\right]$,
- La fonction de moment tronqué :

$$\tilde{F}(x) = 1_{\{x < 0\}} \left(\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \left(x - \frac{1}{\lambda_1}\right) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} \left[\left(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}\right) - \left(\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \left(x + \frac{1}{\lambda_2}\right) \exp(-\lambda_2 x)\right] \text{ et}$$

$$G(x) = 1_{\{x < 0\}} \left(\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} \left[\left(\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \exp(-\lambda_2 x) + x - \left(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}\right)\right]$$

Le cas Bernoulli-Exponentiel donne une représentation plus réaliste des perturbations aléatoires de temps (de parcours) : les perturbations non-nulles se paraissent à une proportion (probabilité) limitée, et elles prennent des valeurs positives plus fréquemment que des valeurs négatives dont l'ampleur devrait être restreinte.

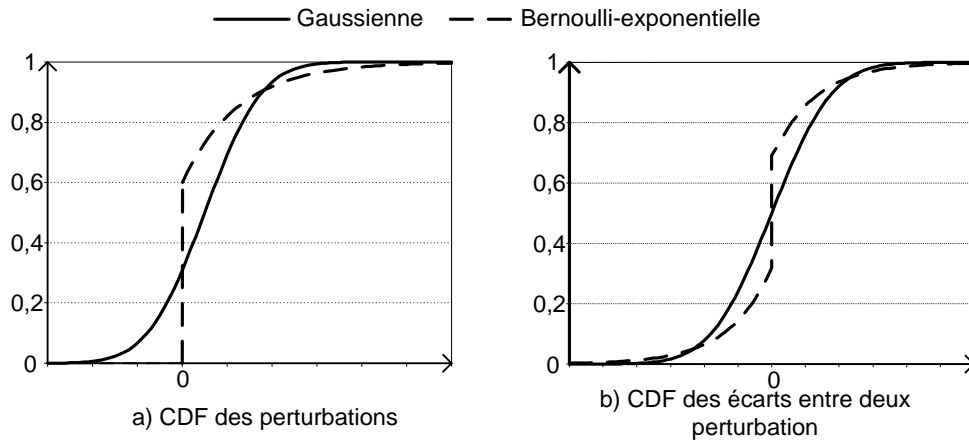


Fig. 6-5 : Distribution des perturbations selon l'hypothèse (à gauche) et de l'écart entre les deux perturbations (à droite)

Pour faciliter la comparaison au cas Gaussien, nous supposons en supplément que $\eta_a = \eta$ et $\lambda_a = \lambda$ qui entraîne à un écart Z symétrique. Puis la fonction G est réduite à :

$$G(x) = \frac{\eta}{\lambda} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \exp(-\lambda|x|) + (x)^+,$$

qui est liée à une sorte de fonction normalisée : g_{BE}

$$g_{BE}(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \exp(-\sqrt{2}|x|) + (x)^+,$$

de manière suivante:

$$G(x) = \frac{\sqrt{2}}{\lambda} g_{BE}\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}} x\right) \tag{eq. 6-19}$$

Par conséquent, g_{BE} est normalisée par rapport à λ , puis à l'écart-type $\sigma_a = 1/\lambda_a$ d'une perturbation car il est positif. Notons $\sqrt{2}/\lambda$ par σ dans ce cas.

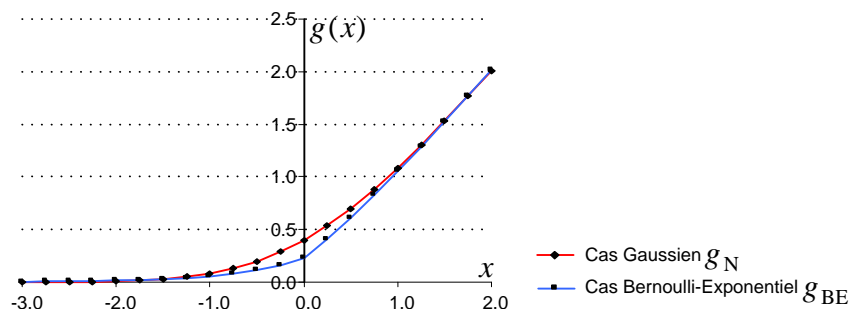


Fig. 6-6 : Fonction pour mesurer le gain de l'information

6.4.2. Analyse paramétrique du gain de l'information par rapport à la variabilité des perturbations

Au cas d'inégalité des temps moyens (coûts moyens), par exemple $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$, rappelons de (eq. 6-17) que le gain de l'information est :

$$\Gamma^N = G(A) \quad (\text{eq. 6-20})$$

, dans lequel: $A \equiv \alpha_1 + \gamma_1 x_1^N - \alpha_2 - \gamma_2 x_2^N - \gamma_2 q' = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) \bar{x}_1'$

Comme G est une fonction non-négative et croissante, plus la différence des temps moyens est importante, plus le gain de l'information est élevé. Une sensibilité à la congestion plus élevée (par exemple, γ_a) réduit le gain de l'information.

A chacun des deux cas, sachant que $G(x) = \sigma g(x/\sigma)$, par la négativité de A (car $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$ et $\bar{x}_1' \geq 0$), il semble que une augmentation de la variabilité des perturbations aléatoires, c'est-à-dire une augmentation de la congestion accidentelle, entraîne un gain de l'information plus important : un σ plus élevé réduit A/σ , puis il augmente $g(A/\sigma)$; comme la fonction est positive, $\sigma g(A/\sigma)$ augmente également.

6.4.3. Cas d'égalité des temps moyens

L'équation caractérisant \bar{x}_2' est équivalent à $B = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 + \mu + G(B) - G(A)$. Sous égaux temps moyens et Z centré, cela se réduit à $B = \mu + G(B) - G(A)$. Si Z est symétrique, nous avons :

$$B = -A = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \beta Q.$$

Puis
$$\bar{x}_2' = \bar{x}_1' = \frac{1}{2} q' = \frac{1}{2} \beta Q \quad (\text{eq. 6-21})$$

$$\bar{C}' = \bar{t}_1 - \sigma \cdot g\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2\sigma} \beta Q\right) \quad (\text{eq. 6-22})$$

$$\bar{C}^N = \bar{t}_1 = \frac{Q\gamma_1\gamma_2 + \alpha_1\gamma_2 + \alpha_2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad (\text{eq. 6-23})$$

Le gain de l'information donc :

$$\Gamma^M = \sigma \cdot g\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \frac{\beta Q}{\sigma}\right) \quad (\text{eq. 6-24})$$

L'utilité individuelle d'être équipé accroît avec σ , autrement dit avec l'ampleur des perturbations. Elle décroît avec $q' = \beta Q$, puis avec le volume de demande Q et le taux d'équipement β . Elle décroît aussi avec $\gamma_1 + \gamma_2$ qui mesure la sensibilité du temps au débit – c'est-à-dire la sensibilité à la congestion.

Sous l'inégalité des temps $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$, puis $x'_1 \geq q'/2$, le gain Γ^M d'être équipé est moins que dans le cas d'égalité des temps.

6.4.4. Sensibilité du gain de l'information au taux d'équipement

A un volume de demande Q donné, le gain privé de l'information décroît avec le taux d'équipement β quand les temps moyens sont égaux sur les deux arcs. Cela est due au fait que plus les usagers sont équipés, plus compensation est induite entre les deux arcs, qui bénéficie les usagers non-informés. Ce processus d'égalisation est appliqué à chaque $z \in [A, B]$, avec $B - A = q'(\gamma_1 + \gamma_2) = (\gamma_1 + \gamma_2)\beta Q$: une augmentation de β peut entraîner un intervalle $[A, B]$ plus large.

Définissons la condition de saturation à un niveau de confiance $1 - \varepsilon$, auquel au moins une proportion de $1 - \varepsilon$ occurrences ω est couvertes par l'intervalle $[A, B]$: cela est satisfait sous la condition :

$$\beta \geq \frac{2u_{\varepsilon/2}\sigma}{(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot Q} \equiv \tilde{\beta}_\varepsilon \quad (\text{eq. 6-25})$$

dans laquelle $u_{\varepsilon/2}$ note la fractile au niveau de probabilité $1 - \varepsilon/2$ de Z

- $\tilde{t}_1(x_1) = 40 + 2x_1$ et $\sigma_1 = 0.3\tilde{t}_1$.
- $\tilde{t}_2(x_2) = 80 + x_2$ et $\sigma_2 = 0.3\tilde{t}_2$.

Deux cas de figure sont choisis pour les simulations numériques : faible volume de demande $Q=10$ et haut volume de demande $Q=100$

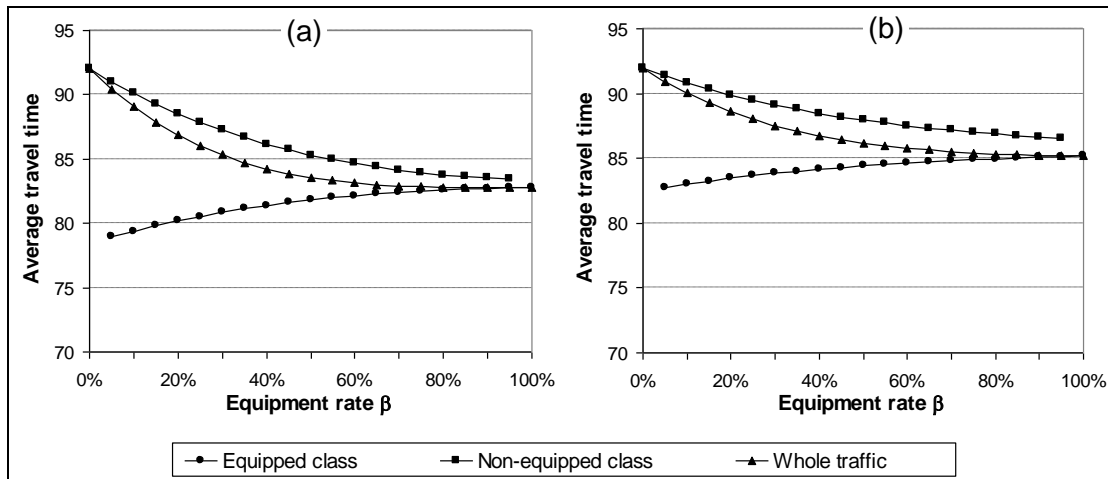


Fig. 6-7 : Coûts moyens à $Q=20$: (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel

La Fig. 6-7 établie à faible volume de demande $Q=20$ montre que \bar{C}^I ainsi que \bar{C} décroît avec β mais l'écart entre \bar{C}^N et \bar{C}^I (autrement dit Γ^N) décroît aussi vers 0.

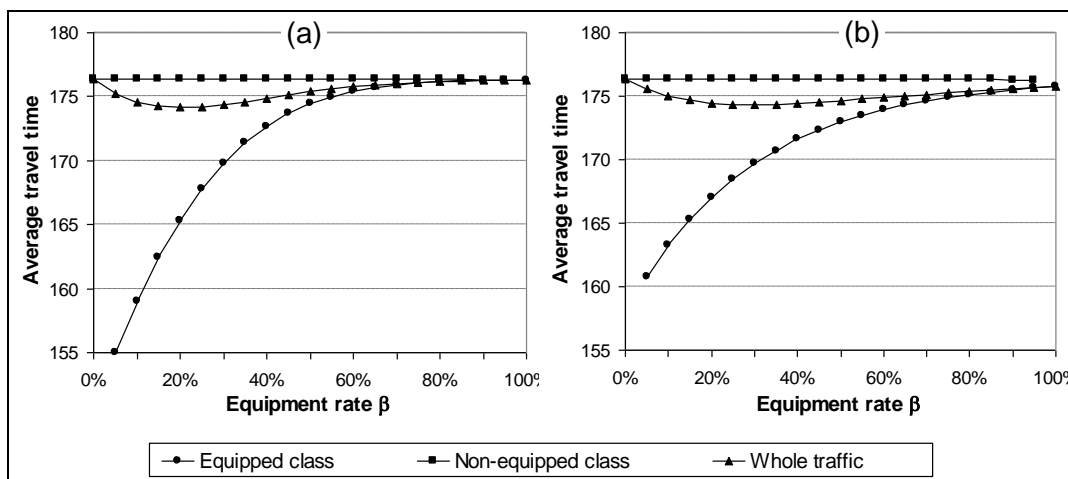


Fig. 6-8 : Coûts moyens à $Q=130$: (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel

La Fig. 6-8 établie à un volume de demande élevé $Q=130$ dépeint les mêmes effets mais d'une manière plus modérée : \bar{C} atteint son minimum à une valeur relativement faible de β tandis que \bar{C}^N est presque constante.

En outre, les deux hypothèses de perturbation aléatoire (Gaussienne et Bernoulli-Exponentielle) donne presque les mêmes renseignements, même si les effets de saturation sont plus forts que dans le cas Gaussien.

En général, l'information dynamique entraîne des effets positifs aux usagers informés et à l'ensemble du trafic, puis pas d'effet négatif aux usagers non-informés. Cependant, le bénéfice à l'ensemble du trafic atteint son maximum à un taux d'équipement assez faible puis peut diminuer si le taux d'équipement continue à s'accroître

6.4.5. Sensibilité du gain de l'information au volume de demande

Déterminons le domaine d'égalité des temps moyens en fonction des paramètres Q et β : en supposant que $\alpha_1 \leq \alpha_2$, si $Q < Q_0^* \equiv (\alpha_2 - \alpha_1) / \gamma_1$, indépendamment de la valeur de β les temps moyens ne sont pas égaux avec $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$, donc l'affectation de tous les usagers sur la route de moindre de temps ne peut pas rendre compétitif à l'autre route en temps moyens. Si $Q > Q_0^*$, puis l'hypothèse d'égalité des temps peut induire l'égalité des débits informés sur les deux arcs, impliquant que la proportion π des usagers non-informés sur la route 2 doit satisfaire :

$$\pi = \frac{1}{2} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-r)Q} \equiv \hat{\pi} \quad (21)$$

Pour un $\hat{\pi}$ dans l'intervalle $[0, 1]$, β doit être dans un intervalle qui dépend de γ_1 et γ_2 , puis :

- Si $\beta \leq 2\min\{\gamma_1, \gamma_2\} / (\gamma_1 + \gamma_2)$ l'égalité des temps s'établit si $Q \geq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1 - \beta(\gamma_1 + \gamma_2)/2} \equiv Q_\beta^*$; au dessous de ce seuil, tous q^N sont affectés à la route de coût minimal.
- $2\gamma_2 \leq \beta(\gamma_1 + \gamma_2) \leq 2\gamma_1$ l'égalité s'établit si $\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta} \leq Q \leq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta - \gamma_2}$. Au dessous de cette borne inférieure q^N sont affectés sur la seule route de coût minimal, si non q^N sont affectés sur les deux routes.
- Si $\beta > 2\gamma_1 / (\gamma_1 + \gamma_2)$, l'égalité ne peut pas s'établir.

Les trois cas se produisent si $\gamma_2 \leq \gamma_1$, sinon, si $\gamma_2 > \gamma_1$ le second cas ne se produit pas.

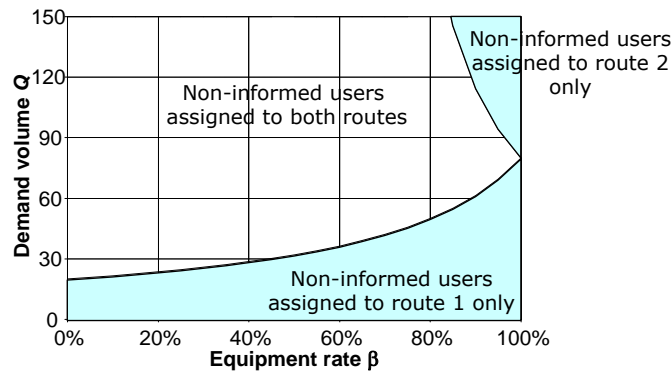


Fig. 6-9 : Domaines d'égalité et d'inégalité des temps moyens en fonction de β and Q

6.5. DISCUSSIONS

6.5.1. Sur le modèle à la Maher et Hughes (1995)

(Maher et Hughes, 1995) a modélisé les effets de la diffusion de l'information parmi une population des usagers-décideurs-automobilistes dans une modélisation de deux classes d'utilisateur qui sont supposées respectivement informée et non-informée : les usagers informés sont supposés de percevoir le temps moyen pendant que les usagers non-informés sont supposés de percevoir le temps perturbé ; les perturbations sont donc subjectives et due à une erreur de connaissance et de perception. Les auteurs ont modélisé l'affectation du trafic par un problème d'équilibre offre-demande avec deux classes d'utilisateurs respectivement informée et non-informée : les usagers informés ont un comportement déterministe, dénoté D et les usagers non-informés ont un comportement stochastique, dénoté S . L'application du modèle à la (Maher et Hughes, 1995) engendre le jeu de conditions suivant :

- $x_a = x_a^D + x_a^S$ et $\bar{t}_a = \tilde{t}_a(x_a)$.
- Pour la classe non-informée S , le temps perçu pour l'arc a est : $t_a = \bar{t}_a + \zeta_{a\omega}$, et la probabilité de choix de la route 2 est $p_2^S \equiv \Pr\{t_2 \leq t_1 | S\} = \Pr\{\zeta_2 - \zeta_1 \leq \bar{t}_1 - \bar{t}_2\} = \Phi\left(\frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_2}{\sigma}\right)$ puis $x_2^S = p_2^S q^S$ et $x_1^S = (1 - p_2^S) q^S$.
- La classe informée D est affecté à la route la plus courte en temps de parcours moyen, puis $q^D = x_1^D + x_2^D$, $x_a^D \geq 0$ et $x_a^D (\bar{t}_a - \min\{\bar{t}_1, \bar{t}_2\}) = 0$.

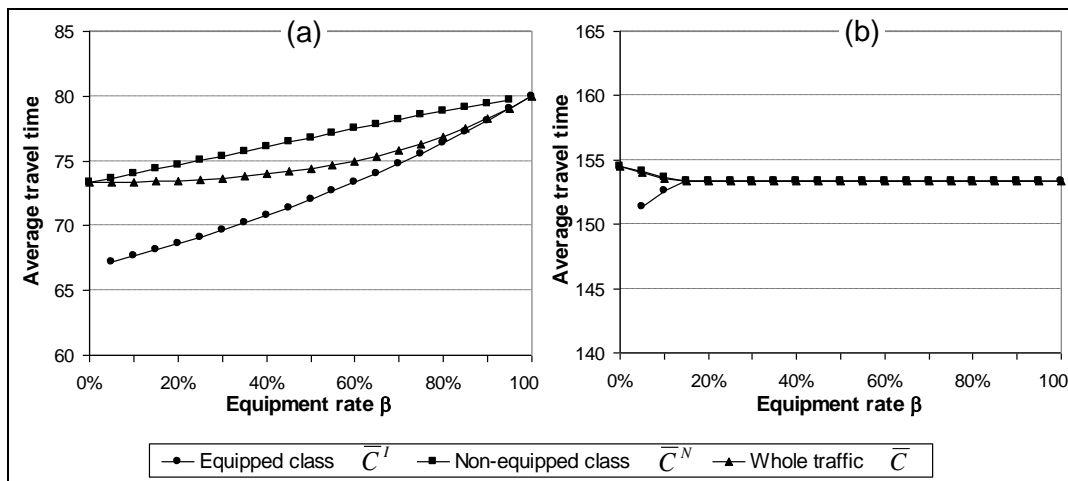


Fig. 6-10 : Coût moyens donnés par le modèle à la Maher et Hughes à $Q=20$ (a) et $Q=130$ (b)

Le jeu de conditions ci-dessus se réduit à une équation de x_2^S qui est facile à résoudre de manière numérique avec les mêmes paramètres qu'en section §6.4 donne la Fig. 6-10 .

A $Q=20$, les temps moyens ne sont pas égaux et la diffusion de l'information fait augmenter le temps moyen. Cela est contre-intuitif et erroné.

A $Q=130$, les temps moyens sont égaux et la diffusion de l'information donne certains effets mais pas de manière significative.

6.5.2. Sur modèle amélioré avec un traitement grossier

L'interprétation de l'information dynamique proposée par (Maher et Hughes, 1995) est déficiente en ce que, selon eux, l'information dynamique permettrait à son usager de percevoir un temps déterministe non-perturbé pendant que l'usager non-informé percevrait le temps perturbé. En fait, l'information dynamique appartient à l'état du trafic en temps réel et aux perturbations auxquelles les usagers sont confrontés. Chaque usager équipé est informé des conditions réelles de son déplacement. Ainsi, une correction au modèle à la Maher et Hughes est évidemment de changer des indices S et D dans les conditions liées à leurs classes d'usager : cela permet d'obtenir un modèle d'affectation corrigé avec deux classes d'usagers, à savoir les usagers équipés notés S qui sont informés des perturbations et les prendre en compte dans leur choix d'itinéraire – conformément à un modèle d'affectation stochastique, et les usagers non-équipés notés D qui connaissent les temps moyens quelle que soit la particularité de chaque cas – conformément à un modèle d'affectation déterministe.

Cette application sur un outil d'affectation conventionnel conduit à une version grossière de notre modèle dans laquelle le temps de parcours à une occurrence ω est modélisé par $\tilde{t}_a(\bar{x}_a) + \zeta_{a\omega}$ avec la fonction de temps appliqué au débit moyen \bar{x}_a pendant que l'adaptation dynamique des usagers informés devrait conduire à la fonction $\tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$

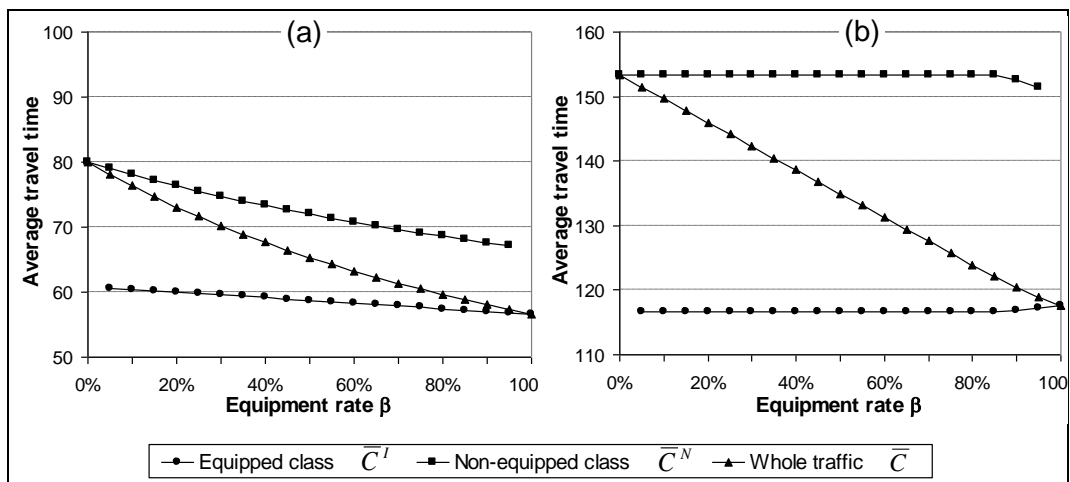


Fig. 6-11 : Temps moyens donnés par modèle grossier à $Q=20$ (a) et $Q=130$ (b)

Une application avec les mêmes paramètres que précédemment mène à la Fig. 6–11 pour Q égal à 20 et 130 respectivement. Pour les deux cas, le modèle grossier donne des résultats plus sensibles, tout en étant beaucoup plus exagérés par rapport à notre modèle fin. Un résultat inquiétant, cependant, est que les usagers non équipés ne tirent aucun avantage indirect à partir de l'équipement de la majorité des usagers.

6.6. CONCLUSION DU CHAPITRE

6.6.1. Récapitulation

Ce chapitre a présenté un modèle fin de l'information dynamique et ses effets sur le trafic en tenant en compte la congestion et les perturbations. Un jeu d'hypothèses complet a été développé, ce qui rend un cadre théorique convenable d'analyser l'équilibre offre-demande. En outre, en prenant des spécifications sur des perturbations, nous avons obtenu des formules analytiques qui ont permis à la fois d'analyser la sensibilité et de faciliter des applications numériques dont les résultats donnent des sens.

L'approche analytique a également été utile pour démontrer les avantages de notre modèle par rapport au courant de modélisation de (Van Vuren et Watling, 1991), (Maher et Hughes, 1995), (Lo et Szeto, 2004), etc. L'hypothèse statistique spécifique au sujet de la perturbation aléatoire a contribué à faciliter le traitement analytique, comme certains des effets sont de faible amplitude, ils seraient difficilement décelables dans une approche numérique basée par exemple sur simulation dynamique microscopique.

Les simulations numériques ont montré que, avec l'information dynamique neutre, il existe un certain taux d'équipement optimal à la diffusion de l'information. L'augmentation de la diffusion de l'information engendre une dégradation de la performance globale du système. En plus, les résultats donnés par deux différentes hypothèses sur la forme des perturbations, à savoir Gaussien et Bernoulli-Exponentiel, ne sont pas sensiblement différents.

6.6.2. Recommandation pour les études d'évaluation

(Maher et Hughes, 1995) ont simulé leur jeu d'hypothèses au moyen d'un logiciel d'affectation statique du trafic aux itinéraires sur un réseau routier. De même les logiciels commerciaux d'affectation statique (Emme, TransCad, Visum, Cube, QRS...) permettent de distinguer plusieurs classes d'utilisateurs selon leur niveau d'information ; mais leur principe pour calculer l'état d'équilibre offre-demande empêche de traiter de manière fine notre jeu amélioré d'hypothèses : car en raison de leur algorithme d'équilibrage, même si chaque classe peut percevoir certaines conditions de trafic, les classes susceptibles de réagir en temps réel ne le feraient que partiellement (*cf.* le pas d'itération dans la méthode des

combinaisons convexes), et sans que leur réaction amortisse les perturbations brutes.

C'est pourquoi, parmi les logiciels commerciaux à utiliser pour une étude d'évaluation, seuls conviennent actuellement les simulateurs microscopiques du trafic : Paramics, Vissim, Aimsun etc. Pour évaluer effectivement l'utilité de l'information dynamique, il s'agit d'en appliquer un de manière répétitive, en simulant un ensemble de situations diversement perturbées. Pour ce faire, il faut disposer d'une connaissance structurelle et probabiliste des perturbations du trafic sur le réseau étudié, et aussi faire la part entre les sources originelles de perturbation et la réaction du trafic par effet de congestion.

Dans une étude d'évaluation qui serait basée sur une simulation numérique, il convient d'enregistrer les effets des hypothèses en calculant des indicateurs appropriés, tels que les débits par arc et par classe d'utilisateurs non seulement en moyenne (les \bar{x}_a^u) mais encore en situation particulière (des $x_a^u(\omega)$).

6.6.3. Pistes de développement

Suite à ce chapitre, nous proposons d'investiguer profondément sur les pistes suivantes :

- Sur le contenu de l'information : dans ce chapitre nous n'avons traité que l'information neutre qui incite les utilisateurs à faire des décisions égoïstes. Un développement du modèle sur les différents contenus de l'information, notamment les contenus permettant des décisions coopératives entre les utilisateurs est nécessaire.
- Sur l'interaction entre l'information et d'autres mesures de gestion du trafic : le service d'information est seulement une composante parmi plusieurs mesures de gestion du trafic appliquées sur un réseau, telle que le contrôle de trafic, la tarification de la congestion, etc. Il est nécessaire également de considérer les interactions entre les différentes mesures de gestion déployées par l'opérateur.

