

L'impact de l'information des voyageurs sur les réseaux de transport en commun

Sommaire

4.1	Introduction	87
4.2	Gestion de l'information des voyageurs	88
4.2.1	Flux d'information des voyageurs	88
4.2.2	Flux d'information dans le simulateur	89
4.3	Système multi-agent	90
4.3.1	Agents voyageurs	90
4.3.2	Agents d'information locale	92
4.3.3	Service de planification	93
4.3.4	Agents véhicules	93
4.4	Les perturbations	93
4.4.1	Injection de perturbations	93
4.4.2	Impact des perturbations sur le comportement des agents véhicules	93
4.5	Représentation spatiotemporelle de l'environnement	94
4.5.1	Problématique	94
4.5.2	Proposition	95
4.5.3	Les perturbations dans l'environnement spatiotemporel	97
4.5.4	Usage de l'environnement spatiotemporel par les agents d'information locale	97
4.5.5	Usage de l'environnement spatiotemporel par le service de planification	98
4.6	Modèle temporel de la simulation	99
4.7	Conclusion	100

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons notre méthode pour intégrer l'information des voyageurs dans le simulateur afin de pouvoir évaluer son impact sur le déplacement des agents voyageurs.

Dans le contexte du transport moderne, les quantités d'informations échangées entre les gestionnaires et les voyageurs s'avèrent importantes et proviennent de plusieurs sources géographiquement distribuées et interconnectées. Aussi, ces informations sont fortement dynamiques vu que l'état des réseaux est susceptible de changer très rapidement. Nous avons choisi de nous fonder sur le simulateur multi-agent du chapitre précédent pour vérifier l'impact de l'information des voyageurs sur les déplacements des voyageurs. En effet, la dynamique des informations, leurs différentes sources et natures (locales en diffusion, personnalisée, etc.) fait que l'analyse d'un tel système d'une manière statique et agrégée est une tâche très complexe. Il nous faut donc nous fonder sur un système dynamique et une représentation individualisée des voyageurs afin d'analyser finement le comportement des voyageurs face aux informations reçues.

Nous proposons des méthodes qui optimisent au mieux ces échanges d'information. Nous désirons représenter la fourniture d'informations temps-réel pour les voyageurs, et de plus personnalisées pour les voyageurs équipés. Ainsi, nous avons choisi d'utiliser l'environnement du système multi-agent comme support d'échange. Nous avons opté pour une représentation spatiotemporelle de cet environnement pour représenter l'état du réseau dans le temps. Cette méthode permet de suivre la dynamique du réseau tout en respectant l'aspect temporel de l'information et assure l'optimisation des échanges.

La suite de ce chapitre est structurée comme suit. La section 4.2 illustre notre méthode pour intégrer l'information des voyageurs dans notre simulateur. La section 4.3 décrit le comportement des agents additionnels de notre système, notamment les deux types d'agents voyageurs connectés et non-connectés et le rôle des informations perçues dans leurs processus de déplacement. La section 4.4 présente l'injection des perturbations sur le réseau et leur prise en compte dans le comportement des agents véhicules. La section 4.5 décrit notre méthode pour cibler les informations individuelles aux voyageurs connectés à travers leurs *smartphones*, en utilisant les réseaux espace-temps. Nous décrivons le modèle temporel de la simulation en section 4.6. Enfin, la section 4.7 est la conclusion de ce chapitre.

4.2 Gestion de l'information des voyageurs

Dans cette section, nous décrivons l'intégration de l'information des voyageurs dans le simulateur.

4.2.1 Flux d'information des voyageurs

Dans un système moderne d'information des voyageurs, il existe plusieurs types d'information des voyageurs.

1. Le premier type concerne les informations statiques sur la structure spatiale du réseau. Ces informations concernent la structuration du réseau en lignes, itinéraires et arrêts. Elles sont disponibles sous format papier ou sur les sites Internet des opérateurs concernés.
2. Le deuxième type concerne les informations statiques sur la structure temporelle du réseau, i.e. les tableaux de marche théoriques de véhicules de transport en commun. Cette information est généralement présente sous format papier aux arrêts de transport en commun ou sur les sites des opérateurs concernés.

3. Le troisième type d'information concerne les informations dynamiques sur les positions des véhicules de transport en commun. Il s'agit de modifications dynamiques des tableaux de marche des véhicules. Cette information est parfois disponible aux arrêts concernés du réseau et sur les sites Internet des opérateurs. Lorsque les modifications des tableaux de marche concernent les véhicules de toute une ligne ou de tout un itinéraire, ces modifications concernent la structure dynamique du réseau. Il s'agit du quatrième type d'information.
4. Le quatrième type d'information concerne la modification systématique des missions ou des courses des véhicules d'une ligne ou d'un itinéraire. Ces informations sont disponibles sur les arrêts du réseau, sur les sites Internet, mais également sur les autres arrêts du réseau, généralement les grands pôles d'échange, ou les arrêts de la même ligne que la partie du réseau touché.
5. Le cinquième type d'information concerne les informations dynamiques sur la structure spatiale ou temporelle du réseau, mais reçues de la part d'autres voyageurs. Ces échanges point à point peuvent survenir lorsque les voyageurs sont aux mêmes endroits par communication directe, ou via les réseaux sociaux, entre voyageurs de la même communauté (mêmes intérêts, mêmes lignes de transports habituels, mêmes zones origines et/ ou destinations).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux quatre premiers types d'information, que nous désirons intégrer dans le simulateur. Le dernier type d'information fera l'objet de travaux futurs.

4.2.2 Flux d'information dans le simulateur

En l'état, il existe peu de flux d'informations dans le simulateur. Les interactions dans le simulateur sont de deux types :

1. Les agents voyageurs communiquent avec le service de planification afin d'obtenir leurs itinéraires.
2. Les agents véhicules perçoivent les agents voyageurs aux arrêts pour décider s'ils peuvent les embarquer à bord.

Afin de simuler des scénarios perturbés, et d'intégrer les quatre types d'information listés plus haut, il faut doter le simulateur des capacités suivantes :

1. Les agents véhicules doivent être capables d'adapter leurs mouvements à l'état du réseau. Ils doivent donc être capables de percevoir des changements de vitesses sur les arcs qu'ils empruntent et adapter leur déplacement en conséquence. Ces changements de vitesses peuvent aller jusqu'à la rupture totale (en cas de panne ou de crise).
2. Les agents voyageurs doivent pouvoir être notifiés des changements survenus sur leur itinéraire et adapter leurs plans en conséquence.

Concernant la deuxième capacité, les voyageurs peuvent être notifiés de différentes manières des modifications survenues sur leur environnement spatiotemporel. Selon qu'ils soient connectés à une plateforme d'information temps-réel ou non, les voyageurs se comportent d'une manière différente. C'est la raison pour laquelle nous créons deux types d'agents voyageurs. Les

agents voyageurs connectés disposent d'un service de *monitoring* de leurs itinéraires, leur permettant de disposer en permanence du meilleur itinéraire possible étant donné l'état courant du réseau. Les voyageurs non connectés quant à eux ne disposent que des informations statiques sur le réseau, mis à jour avec les informations reçues localement pendant leur voyage.

Afin d'intégrer la diffusion des informations sur le réseau de transport d'une manière réaliste et efficace, il faut répondre aux deux questions suivantes :

1. comment faire pour effectuer le suivi des itinéraires des voyageurs, et ne les garder informés que des changements survenus sur les parties du réseau qui les intéressent ?
2. comment faire pour représenter les flux d'information locale, leurs mises à jour et leur diffusion aux seuls agents voyageurs qui peuvent y accéder (contrainte spatiotemporelle) ?

Afin de répondre à ces deux questions, nous avons procédé à la modification du comportement du service de planification, et à l'intégration d'un nouveau type d'« agent d'information locale ». L'agent d'information locale est responsable de l'information des agents voyageurs dans son voisinage. Il doit donc disposer des informations pertinentes à diffuser et avoir accès aux agents voyageurs pertinents.

4.3 Système multi-agent

4.3.1 Agents voyageurs

Les agents voyageurs représentent les usagers du réseau de transport en commun. Nous définissons deux types d'agents voyageurs, selon leur équipement en *smartphones* et leur connexion à une source d'information temps-réel ou non.

Les voyageurs non connectés

Les voyageurs non connectés à un système d'information temps réel fondent leur calcul sur une vue statique du réseau. Leur connaissance est donc faite du graphe de transport avec un ensemble de nœuds et un ensemble d'arcs. L'agent voyageur connaît également les itinéraires k des véhicules et leur fréquence moyenne théorique $\phi(k)$ telle que définie dans le chapitre précédent ainsi que les temps de parcours théoriques moyens entre les arrêts. Cette représentation de l'environnement provient de la définition statique des réseaux de transport en commun telle que décrite par les opérateurs de transport. Elle représenterait les connaissances d'un voyageur en visite courte dans une ville, ou un voyageur habitué qui ne regarde pas ou plus les sources d'informations de transport temps-réel. Comme le montre la figure 4.1, l'agent a comme connaissance du monde un sous-ensemble du réseau statique de transport.

L'agent non connecté fonde son calcul de plus court chemin sur cette vue statique et partielle du réseau. Une fois son itinéraire calculé, il est complètement autonome. Il va attendre les véhicules dans les arrêts planifiés et ne va changer d'itinéraire que lorsqu'il est bloqué dans une perturbation (retard ou déconnexion de ligne) ou lorsqu'il reçoit une information locale (de la part d'un agent d'information locale, voir plus loin) à propos d'une perturbation.

Quand un agent non connecté reçoit une information locale concernant une perturbation sur le réseau, il déduit une approximation du nouvel état du réseau (cf. Figure 4.2). Il s'agit d'une

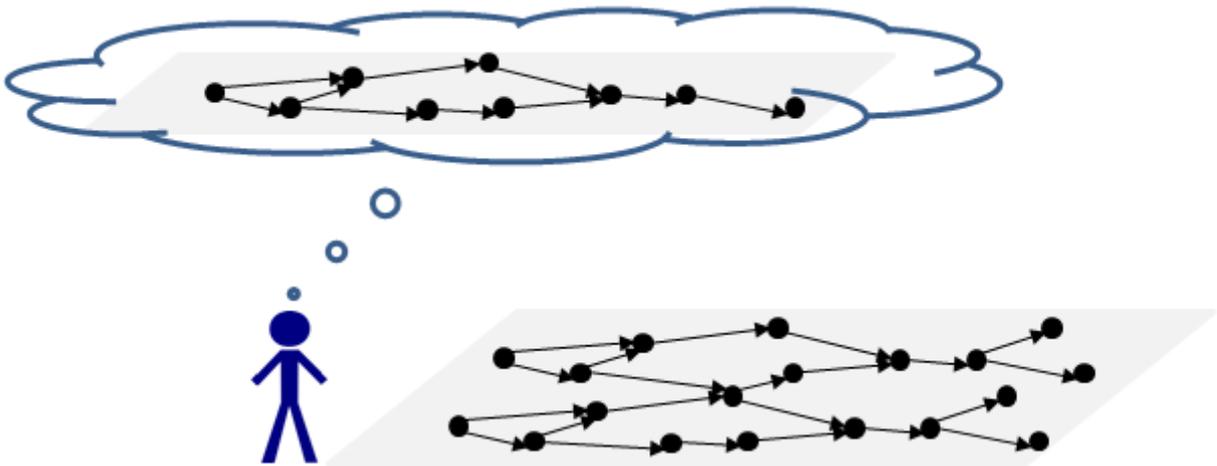


FIGURE 4.1 – La représentation mentale d'un voyageur non connecté

approximation car l'information ne concerne qu'un sous-ensemble du réseau. D'autres perturbations peuvent avoir lieu ailleurs sur le réseau, mais sa représentation mentale du réseau ne le reflète pas car il n'a pas l'information. En appliquant les modifications reçues à sa représentation mentale - et statique - du réseau de transport, l'agent non connecté calcule un plus court chemin fondé sur cette représentation.

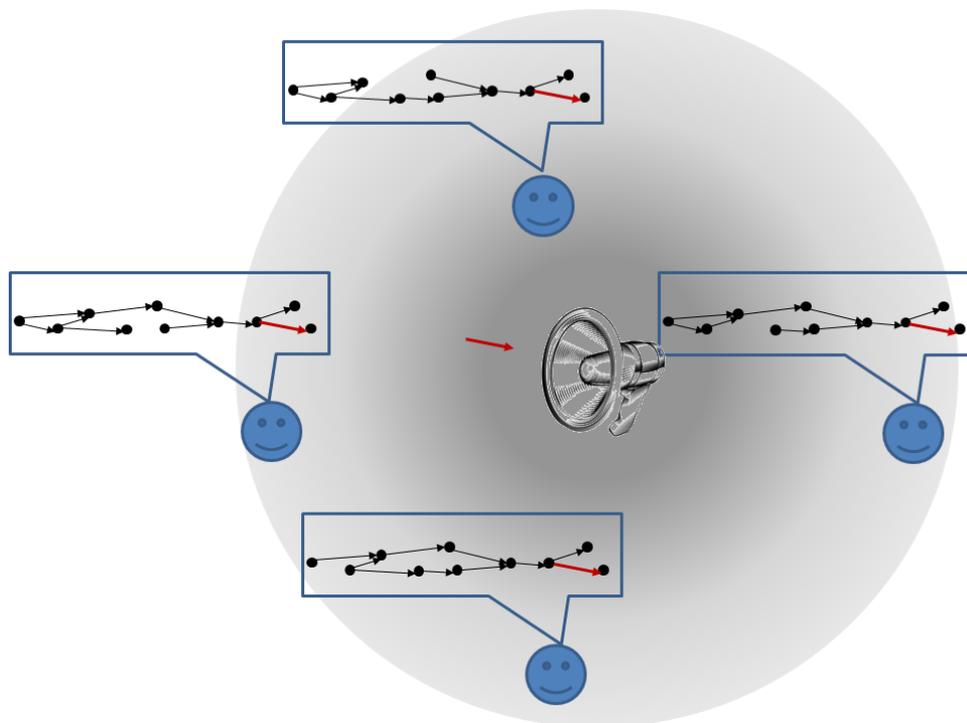


FIGURE 4.2 – L'impact des informations locales sur les voyageurs non connectés

Ainsi, les voyageurs non connectés n'interagissent pas avec le service de planification comme

le faisaient les agents voyageurs dans le simulateur. Tous leurs calculs sont fondés sur des connaissances locales sur une vision propre du réseau de transport en commun. Les agents voyageurs non connectés ne partagent pas tous la même perception du réseau de transport en commun. Même si la connaissance initiale du réseau de départ est la même, les voyageurs se forgent une vision propre du réseau, résultat de leur mouvement et de leur interaction locale avec les informations diffusées tout au long du parcours. A moins que les voyageurs aient une même origine, une même destination et qu'ils partent au même moment, la vision dynamique du réseau par les agents voyageurs est différente. Contrairement aux agents voyageurs connectés que nous décrivons dans la section suivante.

Les voyageurs connectés

Les voyageurs connectés sont en interaction en permanence avec une source d'information temps-réel. Leurs itinéraires sont suivis en permanence et de nouveaux itinéraires leur sont proposés lorsqu'une perturbation qui concerne leur chemin est détectée. Pour simuler ce type d'agents voyageurs, nous réutilisons le service de planification du simulateur, pour lequel nous ajoutons une fonction de *monitoring* des itinéraires. Quand les passagers sont connectés, ils ont des préférences qui définissent, entre autres, l'écart temporel accepté entre leur itinéraire calculé et leur situation réelle. Lorsque l'écart observé par le voyageur connecté dépasse ce seuil, le service de planification lui recalcule un nouvel itinéraire. Le service de planification envoie au voyageur connecté un itinéraire composé d'une liste de coordonnées. L'itinéraire de chaque voyageur connecté est donc suivi. L'objectif du suivi est de demander un nouvel itinéraire pour l'agent dans deux cas :

1. la position réelle de l'agent est différente de la position planifiée avec un certain écart Δ_a (défini dans les préférences de l'agent) ;
2. il y a un événement sur le réseau de transport qui a un impact sur l'itinéraire courant du voyageur. Le voyageur dans ce cas n'a pas encore perçu les effets de la perturbation, mais il les percevra s'il ne change pas de chemin.

Le premier cas est donc traité par le comportement des agents, puisque autant la position de l'agent que son itinéraire planifié font partie de ses connaissances. L'agent voyageur demandera un nouvel itinéraire s'il remarque un écart par rapport au trajet planifié. Le deuxième cas est traité par le service de planification à travers la fonction de *monitoring* : le service de planification s'occupe de rester à l'écoute des seules perturbations qui concernent l'agent voyageur connecté. Le détail de cette écoute et de cette fonction de *monitoring* sera détaillé plus loin.

4.3.2 Agents d'information locale

Les agents d'information locale représentent des appareils qui diffusent de l'information trafic sur les écrans ou via des annonces vocales au niveau des arrêts et des stations du réseau. L'information diffusée par les agents d'information locale concernent des événements survenant dans le réseau, ils doivent donc en être informés, comme les agents connectés.

4.3.3 Service de planification

Le service de planification répond aux requêtes de déplacement des agents voyageurs connectés. Il est responsable de calculer le meilleur itinéraire pour cet agent voyageur. La méthode de calcul des itinéraires est la même que celle décrite dans le chapitre précédent. Il devient également responsable du *monitoring* des itinéraires des voyageurs connectés.

4.3.4 Agents véhicules

Les agents véhicules tels que décrits dans le chapitre précédent calculent une fois pour toutes leurs itinéraires, les coordonnées géographiques qu'ils doivent avoir ainsi que la succession de vitesses qu'ils adopteront au début de la simulation. Dans ce chapitre, les agents véhicules voient survenir des perturbations dans leurs parcours, et cela doit être reflété dans leur comportement. Dans la sous-section suivante, nous décrivons la manière avec laquelle les perturbations sont injectées dans la simulation et l'impact que cela a sur le comportement des agents véhicules.

4.4 Les perturbations

4.4.1 Injection de perturbations

Pour valider l'impact de l'information temps-réel, autant individuelle qu'au niveau des arrêts, nous devons modéliser les perturbations. En effet, l'information devient très importante dans le cas de perturbations, puisqu'il s'agit dans ces cas de diriger les flux passagers sur les réseaux. Les perturbations sont exclusivement injectés en tant que modifications dynamiques des tableaux de marche des véhicules. En effet :

1. Les retards sont injectés dans le modèle en ajoutant du temps additionnels aux temps de passage aux arrêts.
2. Les ruptures ou les pannes sont modélisées par une suppression de la partie en aval de l'endroit concerné de la mission de l'agent véhicule.
3. Pour modéliser la rupture sur toute une ligne ou un itinéraire, les tableaux de marche des véhicules restants sont tous supprimés, en aval de l'endroit concerné par la rupture.

Les fréquences $\phi(k)$ des itinéraires k sont également modifiées en conséquence. Le graphe logique représentant l'état du réseau de transport est modifié en conséquence, comme spécifié dans le chapitre précédent. De cette manière, le service de planification peut effectuer ces calculs sur le bon état du réseau.

4.4.2 Impact des perturbations sur le comportement des agents véhicules

Les agents véhicules calculent au début de la simulation un itinéraire, des temps de passages, une séquence de coordonnées géographiques et des vitesses. Cependant, contrairement au chapitre précédent, les agents véhicules ne se contentent pas de suivre leur plan du début à la fin de la simulation. En effet, les tableaux de marche ayant servi au calcul de leurs itinéraires

initiaux sont amenés à changer comme nous venons de le décrire plus haut. Les agents véhicules, à chaque pas de simulation vérifient si les temps de visites des arrêts restant dans leur tableau de marche ont été modifiés. Si tel est le cas, le reste des vitesses et temps de passages sont recalculés. S'il s'agit d'une interruption, l'agent véhicule délétera l'ensemble des agents voyageurs à son bord au dernier point du réseau précédant l'interruption. Les échanges d'information concernant ces retards et interruptions, afin de les transférer aux bons agents (connectés et non connectés), sont décrits dans les sections qui suivent.

4.5 Représentation spatiotemporelle de l'environnement

La notification des perturbations dans les réseaux de transport en commun et la replanification des trajets des voyageurs est une tâche complexe. En effet, les changements dans les itinéraires et temps de parcours sont exogènes et les agents ne savent pas *a priori* où elles peuvent survenir. Nous avons donc d'une part les fournisseurs d'information géolocalisée temps réel sur l'état des réseaux et d'autre part des agents voyageurs potentiellement intéressés par cette information.

4.5.1 Problématique

Ce problème de mise en relation dynamique des agents est connu sous le nom de « problème de connexion » [Davis and Smith1983] : comment trouver les agents qui pourraient avoir les informations ou les capacités recherchées. Dans notre simulation, les agents rejoignent et quittent le système librement et leurs besoins en informations dépendent de leur parcours. Ces besoins sont donc variables par essence. Pour pouvoir gérer cette variabilité, deux familles d'approches ont été adoptées dans la littérature. D'une part, des auteurs ont proposé une gestion centralisée des échanges. Elle consiste en la délégation de la mise en relation des agents à un type spécial d'agents [Payne *et al.*2002, Wong and Sycara2000, Decker *et al.*1997]. Ces agents responsables de la mise en relation, et qui ne sont ni des demandeurs ni des fournisseurs, sont appelés les agents intermédiaires (*middle agents*). Suivant la nature des fonctions qui lui sont attribuées, ces agents peuvent être :

- un facilitateur qui connaît les caractéristiques de tous les agents du SMA et qui tient cette connaissance à disposition des autres agents en fournissant un service de pages jaunes.
- un courtier (*broker*) qui joue le rôle d'intermédiaire entre les agents du SMA et par lequel passe toute recherche de partenaires pour une coopération.

Dans les deux cas, tout agent doit connaître l'intermédiaire, et être connu de celui-ci par une représentation de ses caractéristiques, pour avoir accès à des connaissances sur les autres agents, nécessaires au raisonnement social ou à la mise en place de coopération. Les modifications de l'état du SMA peuvent détruire certaines propriétés de la connaissance de l'intermédiaire. Celui-ci doit alors gérer cette modification de manière à retrouver les propriétés perdues. Tout agent sujet à un ajout, retrait ou à une évolution doit signaler cette modification à l'intermédiaire. Les avantages de ce mode de gestion de l'ouverture tient principalement à sa simplicité de conception et de mise en oeuvre. Cependant, la centralisation de cette gestion présente des inconvénients : l'agent intermédiaire est indispensable à la recherche de partenaires pour coopérer et risque d'être très sollicité par les agents d'où une surcharge de communication à traiter ce

qui nuit aux performances du système.

D'autre part, d'autres auteurs proposent une gestion distribuée des échanges pour le problème de connexion [Vercouter2001]. Le principe est fondé sur la notion de recommandation. En effet, les agents s'échangent mutuellement des recommandations parmi leurs accointances, sans avoir besoin d'un agent intermédiaire. Cette approche permet la constitution progressive et distribuée d'un carnet d'adresses aux agents.

Cependant, ni l'une ni l'autre des deux approches ne convient, telle quelle, à notre problématique. Dans ces propositions, la mise en relation est fondée sur la compatibilité de capacité ou de préférences entre agents. Or, dans le cas des informations voyageurs, le problème n'est pas de retrouver l'émetteur d'une information, puisque les sources d'information sont connues (les opérateurs de transport) et c'est le contenu de l'information échangée qui doit être géré. En effet, l'intérêt porté à une information dans le simulateur ne dépend pas de sa nature mais de sa valeur. C'est également le cas, par exemple, dans le cadre de la gestion des informations dans un poste de régulation aérienne, où il a été montré [Cahour and Salembier1996] qu'une partie des interactions relevait du concept de l'écoute flottante ou *mutual awareness* [Dugdale *et al.*2000, Balbo and Zargayouna2004]. Dans ce contexte, les opérateurs ont l'ensemble des informations du poste de régulation à leur disposition et ils dirigent leur attention en fonction de l'intérêt d'une information par rapport à leur activité. Notre problématique d'information des voyageurs dans le cadre d'une simulation des déplacements s'inscrit dans ce cadre.

4.5.2 Proposition

Notre proposition est une extension des travaux sur la représentation explicite de l'environnement multi-agent (e.g. [Saunier *et al.*2006, Weyns *et al.*2004, Weyns and Michel2014, Balbo2000, Saunier2008]). Il s'agit également d'une extension des travaux sur les graphes spatiotemporels pour les problématiques de transport dynamique (e.g. [Zargayouna2005], [Zargayouna2007] et [Zargayouna and Zeddini2012]). Le principe général est celui de la mise en commun d'informations puis d'une sélection locale par les agents en fonction de leur activité. Cette méthode a également été testée dans le cadre de la résolution de problèmes [Chevaillier *et al.*2003]. L'application choisie concerne la gestion distribuée d'emploi du temps et la mise en commun des informations est réalisée par diffusion. Les différents tests réalisés montrent que si les objectifs de résolution du problème sont atteints, le recours aux diffusions pénalise fortement l'efficacité de la proposition [Balbo and Zargayouna2004]. Dans notre cas également, la diffusion de toute l'information trafic à tous les agents voyageurs est une méthode simple et intuitive pour la mise en relation des demandeurs et fournisseurs d'informations, mais elle est coûteuse car générant des échanges et des traitements inutiles.

Nous adoptons donc une approche centrée-environnement, car elle se focalise sur les données partagées et permet des sélections sur celles-ci sans avoir besoin de connaître ou de maintenir une connaissance sur les émetteurs de ces données. Cette représentation a été utilisée par le passé dans différentes applications : le transport à la demande, les tournées de véhicules, la gestion de crise, etc. [Zargayouna2005, Zargayouna and Zeddini2012]. Dans notre application, l'environnement spatiotemporel multi-agent représente l'état du réseau de transport en commun dans le temps. Cet environnement est l'interlocuteur privilégié des agents voyageurs et est actif, dans le sens où il sauvegarde des informations et réagit en fonction de leur dynamique.

Soit le réseau de transport $G = (V, E)$, avec l'ensemble de nœuds $V = \{(v_i)\}, i =$

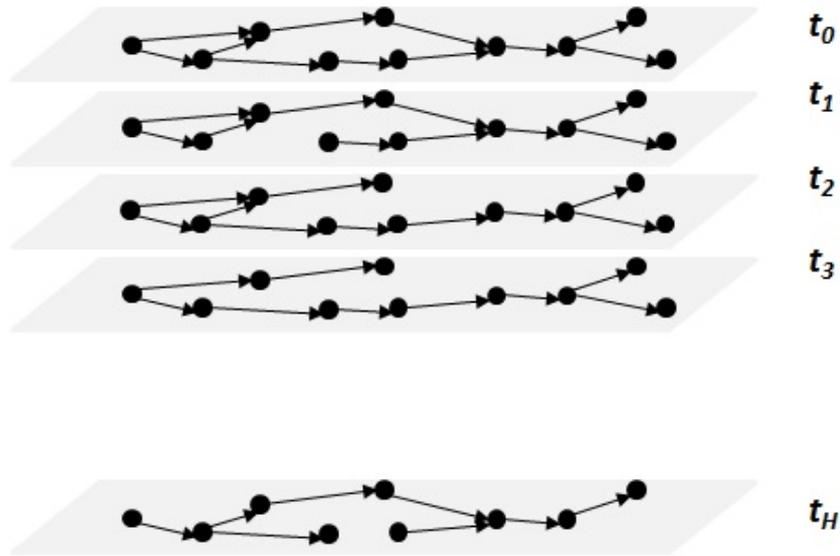


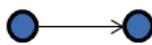
FIGURE 4.3 – Le graphe spatiotemporel

$\{0, \dots, N\}$ et un ensemble d'arcs $E = \{(v_i, v_j) | v_i \in V, v_j \in V, v_i \neq v_j\}$. Soit deux matrices $D = \{(d_{ij})\}$ et $T = \{(t_{ij})\}$ de coûts, de dimensions $N \times N$ (l'arc (v_i, v_j) a une distance de d_{ij} et un temps de parcours de t_{ij}). La représentation spatiotemporelle de l'environnement multi-agent est faite d'une duplication de G , H fois, avec H le temps maximal permis par l'application considérée : $G(t) = (N(t), E(t))$, avec $N(t)$ un ensemble de nœuds au temps t et $E(t)$ un ensemble de liens orientés au temps t , et $0 \leq t \leq H$ (cf. Figure 4.3). Les copies temporelles de G ne sont pas nécessairement identiques. En effet, nous pouvons avoir différents temps de parcours entre deux copies afin de refléter l'état du trafic. Des nœuds peuvent être présents dans une copie et absents dans une autre afin de refléter l'expansion d'une situation de crise. Les arcs peuvent également être absents afin de refléter les tableaux de marche des véhicules de transport en commun.

Ce réseau espace-temps représente à tout moment l'état actuel du réseau : les positions des véhicules de transport en commun, ainsi que leurs trajets planifiés et mis à jour. Un agent qui désirerait être informé des seuls événements survenant à un arc (v_1, v_2) du réseau pendant une période allant de t_1 à t_2 doit s'inscrire auprès des arcs $\{((v_1, v_2), t_1), \dots, ((v_1, v_2), t_2)\}$. Comme nous le montrons dans la suite, avec cette représentation de l'environnement, toute modification dynamique de l'offre de transport est répercutée directement sur les seuls agents qui sont concernés, ce qui évite les diffusions massives d'information à tous les agents du système.

Dans le simulateur, nous avons implémenté le réseau espace-temps sous la forme d'une table de correspondances (cf. Figure 4.4). La clé d'accès à la table est un arc du graphe spatial. La valeur correspondant à l'arc est une liste triée d'instant, correspondant à des temps de démarrage des véhicules au nœud origine de cet arc. A chaque valeur de temps est associée un couple $\langle \text{véhicule}, \langle \text{agents} \rangle \rangle$, correspondant au véhicule concerné et tous les agents inscrits à l'arc espace-temps correspondant. Lorsque le tableau de marche d'un véhicule est modifié, les couples $\langle \text{véhicule}, \langle \text{agents} \rangle \rangle$ concernés sont retrouvés dans la table de correspondance, et tous

Arc	Temps ↑	< véhicule, < voyageurs,... >>
	t1	< véhicule1, < voyageur1, voyageur3,...>>

	t2	< véhicule2, < voyageur4, voyageur8,...>>

...

FIGURE 4.4 – L'implémentation du graphe spatiotemporel dans le simulateur

les agents sont notifiés du changement.

4.5.3 Les perturbations dans l'environnement spatiotemporel

Les perturbations sont modélisées en modifiant la représentation spatiotemporelle de l'environnement, en corollaire de la modification des tableaux de marche des agents véhicules. En effet, les retards sont injectés dans le modèle en modifiant dynamiquement les temps de passage des véhicules. Soit l'arc $((v_1, v_2), t)$ représentant le passage d'un véhicule au nœud v_1 en direction du nœud v_2 à l'instant t . Si le véhicule a un retard de Δ_t , l'arc $((v_1, v_2), t)$ est supprimé et remplacé par l'arc $((v_1, v_2), t + \Delta_t)$. Les pannes et les déconnexions de tout ou une partie d'une ligne sont modélisées également en supprimant l'ensemble des arcs spatiotemporels correspondants. Comme nous le verrons plus bas, dès qu'un arc spatiotemporel est modifié, l'information est diffusée à tous les agents d'information locale pertinents ainsi qu'aux voyageurs connectés concernés.

4.5.4 Usage de l'environnement spatiotemporel par les agents d'information locale

Les agents d'information locale s'inscrivent auprès de tous les arcs espace-temps des lignes qui passent par leurs arrêts. En effet, nous faisons le choix, réaliste, de ne diffuser au niveau des arrêts que les événements concernant les lignes passant par ces arrêts et non tous les événements survenant sur le réseau de transport. Autrement, la masse d'information aux arrêts deviendra vite difficile à diffuser sur les écrans ou par des annonces vocales. Ces informations dans les arrêts ne peuvent être perçues par un agent voyageur que s'il se trouve dans la station ou l'arrêt

concerné. Dans les simulations en cours, un seul agent d'information locale est présent par arrêt du réseau, et les informations qu'il diffuse sont perçues par tout agent voyageur en transit dans cet arrêt.

La délivrance de ces informations aux agents voyageurs passant par l'arrêt suit le même principe que celui de l'attente des voyageurs des véhicules au niveau des arrêts. En effet, l'information perçue par l'agent d'information locale est stockée comme un attribut de l'arrêt concerné. Les agents voyageurs, arrivés au niveau de l'arrêt, consultent les informations qui y sont stockées.

4.5.5 Usage de l'environnement spatiotemporel par le service de planification

Le service de planification est responsable de l'information des voyageurs connectés. Pour être au courant des seuls événements qui le concernent, le service de planification inscrit l'agent voyageur aux seuls arcs spatiotemporels de l'environnement qui forment son itinéraire (Figure 4.5). Quand le temps de passage ou le temps de parcours change, le nouveau temps de passage et de parcours est diffusé aux voyageurs connectés concernés. Le processus de planification est donc lancé avec le nouvel état du réseau.

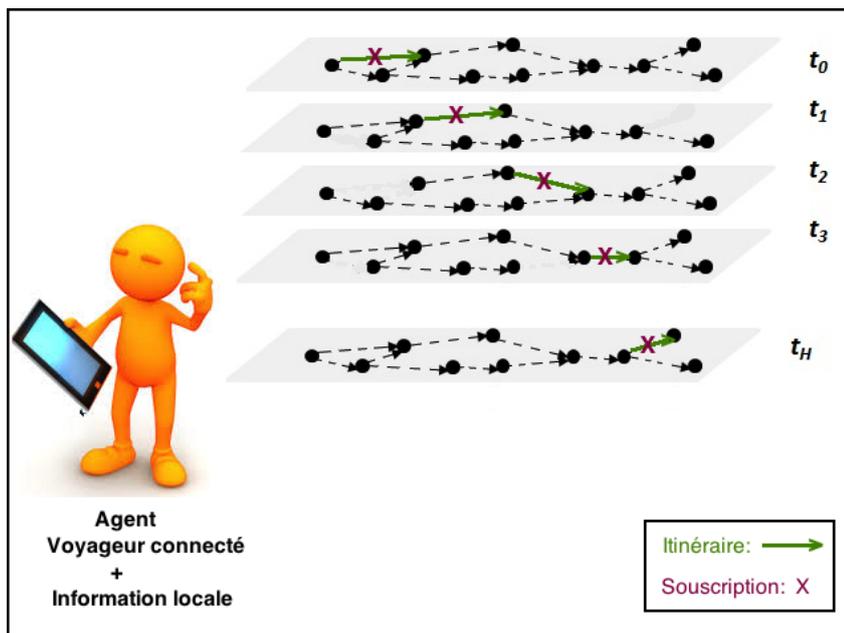


FIGURE 4.5 – La souscription de l'agent voyageur connecté sur le graphe spatiotemporel.

Il existe donc deux types de réseau dans notre simulation. Le premier type est un graphe spatial utilisé comme représentation mentale des voyageurs non connectés. Il est mis à jour par l'expérience du voyageur et les informations locales reçues. Il existe autant de graphes de ce type que de voyageurs non connectés dans le système. Le second type est le graphe spatiotemporel. Il en existe une seule copie. Ce graphe est utilisé par le service de planification

(pour le compte des agents voyageurs connectés), par les agents d'information locale et par l'opérateur qui y injecte les perturbations quand elles surviennent (Figure 4.6).

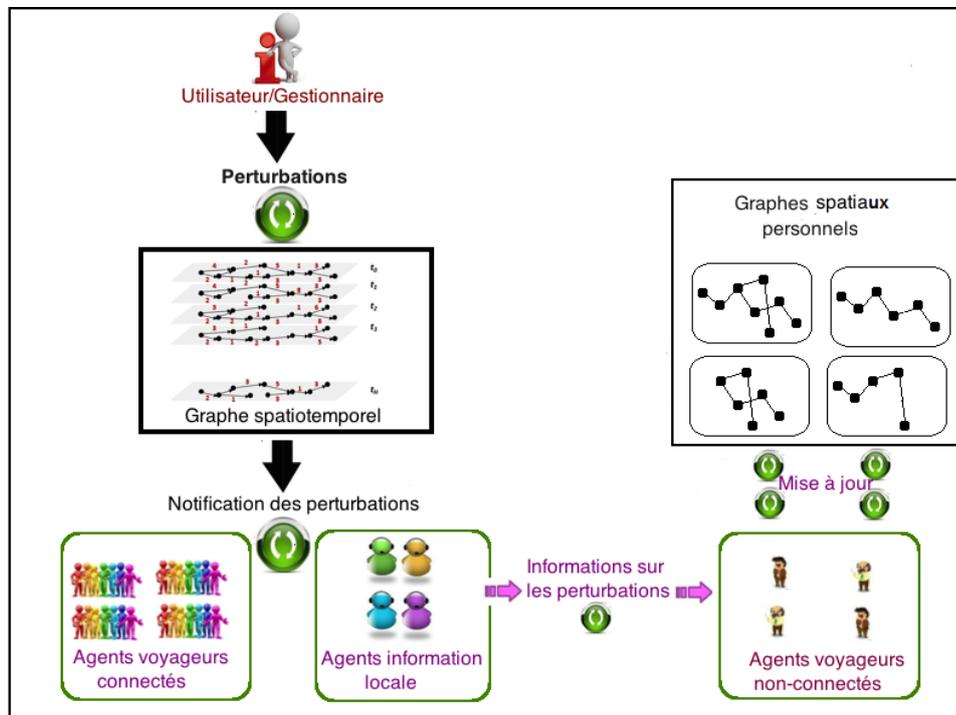


FIGURE 4.6 – Les graphes du simulateur.

4.6 Modèle temporel de la simulation

L'exécution concurrente des agents nécessite la synchronisation de leurs accès à l'environnement de transport, afin d'éviter des états incohérents du réseau dus à des tentatives de modifications simultanées. Ainsi, l'appel de la méthode de déplacement dans la géographie est séquentialisé, les agents voyageurs et véhicules, une fois leur décision de déplacement prise, se déplacent donc un par un.

D'autres considérations quant à l'ordre d'exécution des agents sont également à prendre en compte. En effet, les principales interactions entre agents sont effectuées entre :

- les agents voyageurs et les agents véhicules lors de la montée dans les arrêts ;
- les agents connectés et le service de planification ;
- les agents d'information locale et les agents voyageurs dans les arrêts.

Puisque les véhicules arrivent au niveau des arrêts et recherchent les agents voyageurs désireux de monter à bord, il y a un risque qu'un agent voyageur désireux effectivement prendre le véhicule ne soit pas encore à l'arrêt, non pas parce qu'il est en retard, mais parce que l'ordonnanceur ne lui a pas encore donné la main dans le même pas de temps simulé. Pour cette raison, les agents voyageurs sont exécutés en priorité, avant les agents véhicules.

Des incohérences de réaction des voyageurs aux perturbations peuvent également survenir. Par exemple, nous pourrions avoir des voyageurs qui réagissent immédiatement aux perturbations, alors que d'autres ne réagissent qu'au pas de simulation suivant, car l'injection de la perturbation aura été effectué au milieu de l'exécution des agents pour un pas de temps donné. Pour éviter cette situation, les perturbations et leur impact sur le réseau espace-temps, sur le service de planification, ainsi que sur les agents d'information locale sont effectués avant l'exécution des agents voyageurs et véhicules.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les enrichissements nécessaires au simulateur pour intégrer les flux d'informations sur les réseaux de transport en commun. Nous y avons également décrit les changements introduits dans le système multi-agent et les comportements des voyageurs afin de mieux représenter l'impact de l'information temps-réel, en diffusion ou personnalisée, sur l'état dynamique des réseaux.

Dans le chapitre suivant, nous donnons les résultats des simulations que nous avons tournées et nous en donnons notre interprétation.