



HAL
open science

Cœur de Ville, Véhicules intelligents en environnement urbain

Thierry Berger, Yves Sallez, Christian Tahon, Silviu Răileanu, Christophe Kolski, René Mandiau, Dimitri Tabary, Slim Hammadi, A. Melki, D. Jolly

► **To cite this version:**

Thierry Berger, Yves Sallez, Christian Tahon, Silviu Răileanu, Christophe Kolski, et al.. Cœur de Ville, Véhicules intelligents en environnement urbain. [Rapport de recherche] Laboratoire d'automatique, de mécanique et d'informatique industrielles et humaines. 2009. hal-03390575

HAL Id: hal-03390575

<https://uphf.hal.science/hal-03390575v1>

Submitted on 19 Nov 2024

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

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

Projet PPF "Cœur de Ville"

Véhicules intelligents en environnement urbain

Rapport final juillet 2009

Auteurs :

Thierry BERGER (LAMIH-SP), Yves SALLEZ (LAMIH-SP), Christian TAHON (LAMIH-SP),
Silviu RAILEANU (LAMIH-SP), Christophe KOLSKI (LAMIH-RAIHM), René MANDIAU (LAMIH-RAIHM),
Dimitri TABARY (LAMIH-RAIHM), Slim HAMMADI (LAGIS), Asma MELKI (LAGIS), Daniel JOLLY (LGI2A)

**Sciences et Techniques
De l'Information et de la Communication**

Département Scientifique N° 9

**Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis**

Préambule

Ce projet PPF « Cœur de Ville », démarré en septembre 2006, associe les laboratoires LAMIH-UVHC, LAGIS-ID-Ecole Centrale de Lille et LGI2A-Université d'Artois.

Le comité de pilotage est composé de membres des laboratoires cités participant au projet. Placé sous la direction de Christian TAHON du LAMIH-SP, il compte plusieurs personnalités extérieures :

- Michel PARENT de l'INRIA (équipe IMARA),
- Stéphane ESPIE de l'INRETS (équipe MSIS),
- Gérard COUVREUR de l'INRETS (équipe ESTAS).

Le projet vise à traiter des problèmes de transport urbain incluant une flotte de cybercars distribués dans un cœur de ville. Il vise à prendre en compte les problèmes de gestion de demandes, d'allocation des cybercars, de réallocation d'un cybercar, des contraintes entre la flotte de cybercars et les autres moyens de transport, les perturbations...

I – Rappel du contexte

De nombreuses villes de par le monde doivent faire face aux différents défis associés au Transport. L'efficacité d'un système de transport peut être caractérisée par les principaux critères suivants : la disponibilité immédiate, l'aspect « porte-à-porte », la rapidité, la sécurité et le confort. Dans ce contexte, l'utilisation du véhicule personnel s'avère un mode efficace de transport. Cependant cette utilisation implique de nombreux inconvénients tous inter-reliés : congestion urbaine, gaspillage énergétique, bruits et pollution qui dégradent la qualité de vie en ville.

Face à cette situation, des solutions prometteuses voient le jour: le co-voiturage (un véhicule personnel est partagé par le conducteur et un ou plusieurs passagers), la location de voitures ou de bicyclettes (auto-partage pour de courtes périodes de temps) et le transport à la demande avec de nouveaux types de véhicules. Dans cette dernière catégorie, deux principales technologies peuvent être distingués : les Personal Rapid Transit (petits véhicules automatisés se déplaçant sur un rail fixe) et cybercars (véhicules automatisés capables de rouler sur la chaussée sans système de guidage par rail). Un PRT peut être considéré comme un cybercar transitant sur un rail fixe. Ces véhicules ont généralement une capacité d'emport de 4 à 6 personnes. La Figure 1 illustre les deux types de véhicules automatisés. Dans la suite du document le terme cybercar est le terme générique retenu pour désigner un véhicule automatisé se déplaçant sur des rails matériels ou non.

Dans ce projet, nous nous focalisons sur la place de ces nouvelles solutions dans le cadre des ITS (Intelligent Transportation System) et nous mettons en évidence les complémentarités avec les transports publics classiques (bus, tramways...). Dans les transports publics classiques, les usagers doivent se synchroniser avec l'offre de transport, prédéfinie par la société gestionnaire. Un atout important des systèmes de transport à la demande est d'introduire plus de flexibilité : dans les solutions PRT, cybercars ou auto-partage, c'est le véhicule qui se synchronise avec les besoins de l'utilisateur.



PRT



Cybercar

Figure 1. Véhicules de transport à la demande

I.1 – La solution « Cybercars »

Dans le concept d'auto-partage, une flotte de véhicules est disponible pour de petits trajets en ville. Plusieurs projets ont été développés depuis le milieu des années 90 (Praxitèle en France, City-Car en Suisse, Crayon au Japon...) (Shaheen et al., 2000). Un déploiement réussi de l'auto-partage est souvent couplé avec des zones densément peuplées (centre-ville), et certaines limitations ont été mises en évidence :

- les véhicules sont généralement disponibles dans un nombre restreint d'emplacements, ce qui limite le nombre d'utilisateurs potentiels,
- le redéploiement des véhicules est assuré par la société opératrice via des conducteurs, ce qui accroît le coût d'exploitation.

Ce dernier problème est résolu si les véhicules sont autonomes et capables de répondre aux demandes comme dans le cas des cybercars ou des PRTs.

Michel PARENT (Parent, 2004) donne la définition suivante d'un cybercar: « *Cybercars are road vehicles with fully automated driving capabilities. A fleet of such vehicles forms a transportation system, for passengers or goods, on a network of roads with on-demand and possibly with door-to-door capability* ».

Aux premiers stades de leurs applications, les cybercars sont principalement conçus pour des trajets courts à vitesse réduite dans un environnement urbain (zones piétonnes ou semi-piétonnes), en espace public (aéroports, hôpitaux, centres d'achat) ou dans des zones privées (sites industriels ou académiques). A plus long terme, les cybercars devraient être capables de rouler à haute vitesse sur des voies protégées dédiées. Ces extensions futures dépendront en grande partie des améliorations technologiques apportées aux véhicules, principalement en matière de sécurité.

Depuis 2001, plusieurs projets européens (Cybercars, CyberMove, NETMOBIL, CityMobil) ont évalué la capacité des véhicules automatisés à assurer une mobilité de qualité. Un certain nombre d'expériences ont été réalisées dans différents contextes avec des véhicules de différentes technologies dans un certain nombre de villes (Rome, Antibes, Nancy, Coimbra, Castellon) et dans des espaces publics (campus de l'EPFL en Suisse, aéroport d'Heathrow ou un système PRT est en construction).

Les principaux avantages mis en évidence par les projets sont :

- La disponibilité permettant aux usagers de trouver un véhicule à tout moment de la journée,
- Facilité d'utilisation, permettant aux personnes handicapées ou âgées de voyager aisément dans la ville,

- Facilité de redéploiement des véhicules : les cybercars se déplacent de manière autonome d'une place à une autre et peuvent être parqués dans des stationnements, libérant ainsi l'espace urbain,
- Réduction de la congestion urbaine et bonne intégration environnementale (qualité de l'air, économie d'énergie).

(Pour plus d'informations sur le concept de cybercar et les projets en cours ou passé, consulter le site <http://www.cybercars.org/>)

I.2 – Problématique

La problématique vise l'exploitation d'une flotte de cybercars, en milieu urbain, soumise à perturbations. Les modes d'exploitation dégradés d'un réseau de cybercars font suite à l'occurrence de diverses perturbations tant d'origine matérielle que d'origine humaine. Il convient en particulier de prendre en compte les phénomènes suivants :

- forte variation de la demande due à un événement particulier (déroulement de manifestations culturelles, grève d'autres types de transports...),
- défaillance technique au niveau des ressources (panne cybercar, problème de communication...),
- perturbations au niveau du réseau (travaux sur voie de circulation, voie bloquée suite à un accident...).

Tout en respectant les contraintes de sécurité, les objectifs de la reconfiguration sont multiples :

- qualité des services rendus aux usagers (temps de parcours, ponctualité, correspondances...),
- optimisation des ressources (matériel, personnel,...),
- prise en compte des contraintes d'acheminements,
- planification des phases de retour à un mode d'exploitation nominale.

L'exploitation des réseaux de transport de cybercars nécessite donc le traitement des problèmes suivants :

- allocation des cybercars,
- redéploiement du cybercar après une course,
- routage dynamique des cybercars,
- intégration de la flotte de cybercars au sein des Transports Publics,
- interactions Homme-Système cybercar.

I.3 – Stratégies et méthodes

Le projet proposé vise :

- à proposer des approches innovantes aux problèmes de reconfiguration en abordant trois niveaux comme illustrés sur la figure 2 ci-dessous :

- **un niveau "stratégique"** : ce niveau assure la gestion prévisionnelle de la flotte de cybercars. Il assure l'optimisation de l'utilisation des ressources (affectation des cybercars, gestion des places de stationnement, prise en compte des fluctuations de la demande...). Il génère alors des demandes de déplacement qui sont traités au niveau tactique. C'est à ce niveau qu'interviennent les opérateurs d'exploitation.

- **un niveau "tactique"** : ce niveau est chargé de satisfaire mettre en œuvre les demandes de déplacement issus du niveau stratégique précédent. Il génère les trajectoires à suivre par les cybercars en tenant compte des perturbations.

- **un niveau "opératif"** : propre aux cybercars : à ce niveau, le but est d'améliorer la réactivité des cybercars soumis aux perturbations très localisées (traversée de piétons, route obstruée...).

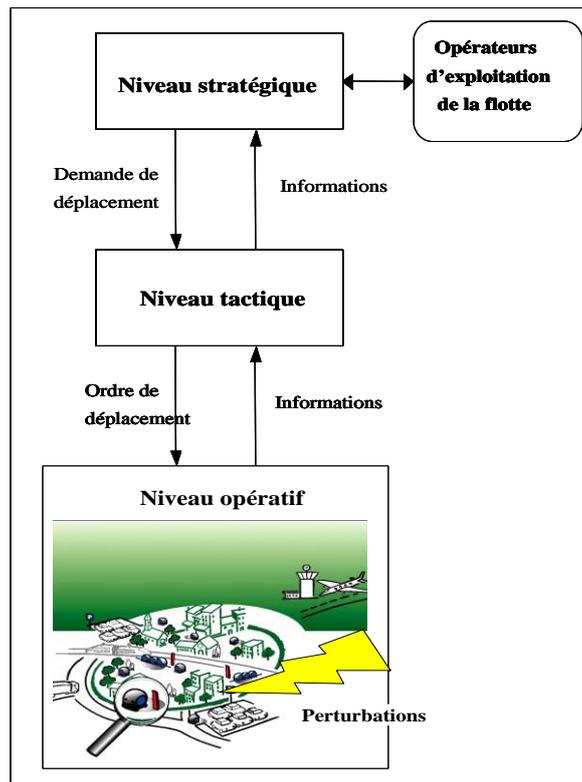


Figure 2. 3 niveaux de contrôle

Suite à des discussions avec l'INRETS et l'INRIA, l'opportunité de mener une étude sur le niveau opératif et d'utiliser de réels cybercars a été écartée. Le projet a donc été repositionné sur les deux premiers niveaux. Ceci a également induit l'abandon justifié de reproduire à échelle réduite, via des robots mobiles Pioneer 2AT, une maquette d'un système constitué de cybercars sur un réseau guidé immatériel. Cependant la plateforme, citée ci-après, de cybervéhicules de type PRT est conservée et constitue le support expérimental.

- **à développer une plateforme expérimentale** : afin de valider les concepts et modèles, une plate-forme expérimentale de "transitique intelligente" est développée. Les entités réelles, significatives de PRT, sont des palettes mobiles « intelligentes » évoluant sur le réseau monorail Montrac du pôle AIP-Priméca Nord-Pas de Calais (site de Valenciennes). Ce réseau est instrumenté de façon à pouvoir reconstituer des problématiques de routage similaires à celles exposées précédemment. Il comporte 10 palettes « intelligentes » se déplaçant de manière autonome sur un réseau comportant 22 intersections. Pour se faire, il est nécessaire d'accroître sensiblement l'autonomie décisionnelle des palettes, pilotées actuellement par des automates, et ceci nécessite une instrumentation et des équipements supplémentaires.

Le réseau Montrac est décrit plus en détail sur les figures 20 et 21.

La partie suivante reprend les études en cours et présente l'état d'avancement.

II – Etudes-Etat d'avancement

L'état d'avancement est organisé en six parties :

- Cybercars/ITS, propose l'architecture cadre ACTIF pour rattacher les cybercars aux autres moyens de transports notamment de Transport Public. Ce thème a été traité par l'équipe LAMIH-SP : T. Berger.
- Routage des cybercars, concerne le déplacement des cybercars sur le réseau de transport en faisant face aux perturbations. Ce thème est traité par les équipes LAMIH-SP et LAMIH-RAIHM : R. Mandiau, Y. Sallez, T. Berger, F. Dumitrescu (stage de recherche).
- Architecture Holonique adaptée au transport, l'architecture intègre plus particulièrement l'allocation des cybercars aux différentes demandes. Ce thème est traité au sein de l'équipe LAMIH-SP : C. Tahon, T. Berger, S. Raileanu (Doctorant).
- Interaction Homme-Système Cybercars, qui étudie les modalités d'interaction « sensible au contexte » entre usager(s) et cybercar(s). Ce thème est traité dans les équipes LAMIH-RAIHM et LAMIH-SP : C. Kolski, D. Tabary, T. Berger, O. Serrate (Doctorant).
- Régulation des Transports Publics (TP), cette partie intègre les cybercars comme moyen d'action pour pallier une défaillance des TP. Ce thème est traité par les équipes LAGIS-ID et LAMIH-SP : C. Tahon, S. Hammadi, A. Melki (Doctorante).
- Plateforme expérimentale, support aux futures validations. Cette plateforme est mutualisée entre les différentes équipes : LAMIH-SP, LAMIH-RAIHM, LAGIS-ID et LGI2A.

Celles-ci sont successivement détaillées.

II.1 – Cybercars/ITS – Modèle ACTIF

Introduction

L'objectif de l'Intelligent Transportation Systems (ITS) est *“to create a system that enhances transportation through the safe and efficient movement of people, goods, and information, with greater mobility and fuel efficiency, less pollution, and increased operating efficiency. The system must be accommodating and fair in serving the interests of government, individuals, and companies who desire to competitively develop and market transportation technologies”* (Nakanishi, 2004).

ITS applique les technologies de l'information et de la communication pour gérer le trafic, encourager les conducteurs à utiliser des modes de transport alternatifs et leur permettre de trouver les services et les informations dont ils ont besoin pour conduire en sécurité, éviter les encombrements et réaliser leurs déplacements avec le moins de difficulté possible (Zhang et al., 2002).

Cependant ITS s'avère complexe et difficile à déployer avec succès. Une façon d'éviter cette situation est de créer une architecture-cadre ITS, contenant le minimum d'hypothèses de haut niveau nécessaires (Jesty, 2004). Une architecture-cadre ITS favorisera alors l'interopérabilité au sein du système, permettra une meilleure maîtrise des coûts, permettra de gérer les risques et facilitera l'ingénierie du système grâce à une démarche globale (Pietri, 2005). C'est ce que permet le modèle cadre ACTIF.

Un nombre croissant de pays européens ont créé leurs propres architectures ITS, basés sur l'architecture KAREN/FRAME, qui est sensée les assister dans la fourniture de services ITS (Jesty, 2004). FRAME (Framework Architecture Made for Europe) (webref1) est l'architecture-cadre d'ITS européenne. L'architecture-cadre ITS découlant de FRAME pour la France s'appelle ACTIF (Webref2) (Aide à la conception des systèmes de transports interopérables en France).

Positionnement des cybercars en respect avec le modèle ACTIF

Pour les cybercars comme pour tout type de transport, nous devons prendre en compte de nombreux aspects classiques, tels que le coût, la sécurité, la maintenance, les demandes de transports... Pour incorporer tous ces aspects, et ne pas redécouvrir des solutions pour des besoins classiques, nous resituons nos travaux dans le modèle ACTIF (Webref2) (Aide à la conception des systèmes de transports interopérables en France). ACTIF est utilisé comme un modèle générique d'infrastructure pour différents modes de transport, assez complet pour permettre le positionnement du système de cybercars vis-à-vis des aspects mentionnés précédemment.

Dans le modèle ACTIF, 9 domaines fonctionnels sont distingués :

- FA1. Fournir des moyens électroniques de paiement
- FA2. Gérer les services d'urgence et de sécurité
- FA3. Gérer les infrastructures de transport et le trafic
- FA4. Gérer les opérations de transport public
- FA5. Fournir des systèmes avancés d'assistance pour le conducteur
- FA6. Fournir des informations et gérer la mobilité multimodale
- FA7. Faire respecter les réglementations
- FA8. Gérer le fret et les flottes de véhicules
- FA9. Gérer les données globales partagées

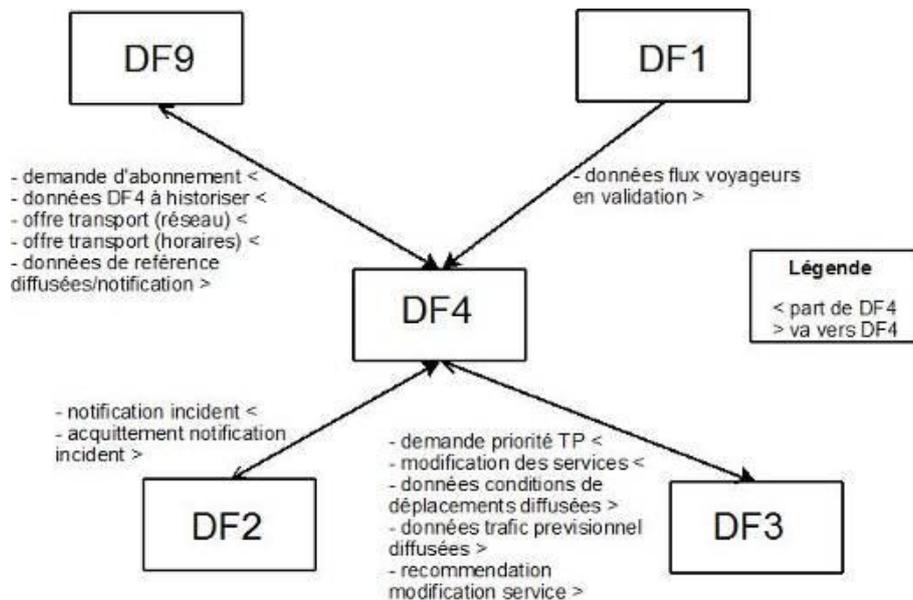


Figure 3. Modèle simplifié d'ACTIF

Le domaine fonctionnel « Gérer les opérations de transport public » est particulièrement adapté pour l'introduction du système de cybercars. La figure 3 est une vue simplifiée d'ACTIF montrant les interactions entre FA4 « Gérer les opérations de transport public » et les autres domaines. Ce domaine est divisé en cinq sous-domaines qui sont respectivement :

- FA4.1. Organiser et planifier les transports publics
- FA4.2. Superviser, réguler et informer les passagers
- FA4.3. Gérer les ressources humaines et matérielles
- FA4.4. Organiser les services partagés
- FA4.5. Gérer les données partagées

Sans rentrer trop dans le détail (Webref2) :

FA4.1. gère le planning et l'organisation des services, la gestion et la maintenance des ressources.

FA4.2. supervise et contrôle les transports publics traditionnels (bus, tramway). Ce sous-domaine gère également les systèmes d'aide et d'information aux usagers.

FA4.4. gère le planning et organise les services partagés dans les transports publics, tels que les services à la demande ou la gestion de véhicules partagés mais aussi les initiatives privées telle que le co-voiturage.

De ce fait, les cybercars sont inclus dans le sous-domaine FA 4.4, comme indiqué sur le figure 4. Ce sous-domaine permet de circonscrire le système cybercars et de le relier aux autres sous-domaines ou domaines connexes de FA4.

Le système Cybercars nécessite certains ajouts dans les modules 4.1 et 4.4. Nous proposons de scinder le sous-domaine 4.1 en deux parties. La première partie gère les transports publics traditionnels (PT) et la seconde gère les transports à la demande (ODT : On Demand Transport). Dans ODT, le module prend en compte les demandes prévisibles et établit une répartition prévisionnelle des cybercars. Cette répartition consiste à positionner les cybercars libres dans la ville, de façon à répondre rapidement aux demandes des usagers. Les sorties de ce module sont les « demandes de répartition ».

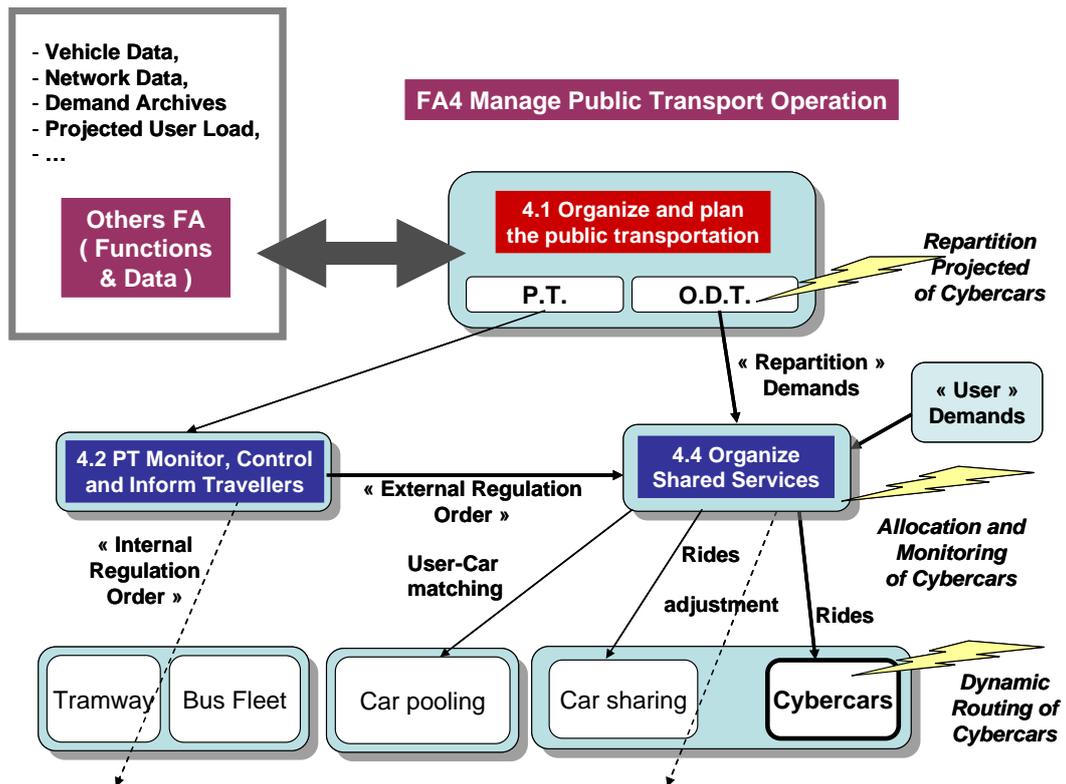


Figure 4. Modèle simplifié de FA4 intégrant les cybercars

Pour les cybercars, le module 4.4 effectue l'allocation des cybercars libres selon les demandes des usagers. Les résultats se traduisent par des courses affectées aux différents cybercars. Une course est un ordre de mouvement, envoyé à un cybercar donné, d'une position vers une destination pour un usager ou un groupe d'usagers. Une course (dans le cas d'une « demande de répartition ») peut également être le mouvement d'un cybercar libre vers une destination dans l'attente d'un usager potentiel.

FA 4.4 inclut le suivi de toutes les courses de cybercars. Si nécessaire, des corrections peuvent être appliquées aux cybercars pour par exemple modifier le trajet d'un cybercar. Le mouvement effectif des cybercars, prenant en compte en temps réel les perturbations du trafic, repose sur l'approche de routage dynamique décrite ci-après.

II.2 – Routage des cybercars

Notre approche de routage dynamique repose sur l'utilisation du concept de stigmergie. Le terme "stigmergie" décrit le mécanisme de marquage de l'environnement utilisé par les insectes sociaux durant leurs activités (Theraulaz et Bonabeau, 1999). Par exemple, les fourmis trouvant de la nourriture, la rapportent au nid et déposent une traînée de phéromones. Les autres fourmis, détectant les phéromones, suivent la piste chimique jusqu'à la source de nourriture. Ce phénomène entraîne un renforcement du dépôt chimique sur le chemin emprunté. Les phéromones ayant tendance à s'évaporer dans le temps, les chemins les plus courts accumulent de plus en plus de phéromones et ont ainsi un avantage sur les autres chemins. Après quelques temps, en raison de ce renforcement naturel, seuls les plus courts chemins persistent.

Plusieurs chercheurs (Dorigo and Stützle, 2004 ; Parunak et al., 2001 ; Brückner, 2000 ; Peeters et al., 1999 ; et Hadeli et al., 2004) ont appliqué le concept de stigmergie pour résoudre des problèmes d'optimisation ou dans des situations spécifiques dans de domaine des systèmes de production. Dans la plupart des applications stigmergiques (ex. recherche de nourriture chez les fourmis), le critère temps n'est pas primordial et les essais ne coûtent rien à l'utilisateur ; seule la solution finale est importante. Cependant, dans un contexte de transport l'inefficacité au niveau temps est préjudiciable au système : si trop de solutions doivent être essayées avant de trouver un chemin intéressant (c'est à dire si trop de navettes sont utilisées pour tester des chemins), les performances du système se détériorent rapidement. Par conséquent, il est nécessaire d'élaborer un modèle qui identifiera rapidement des solutions satisfaisantes pour accélérer la convergence des algorithmes de routage. En réponse à ce besoin, nous proposons une architecture fonctionnelle à deux niveaux : « virtuel » et « physique ».

II.2.1 – Approche de modélisation

La figure 5 montre l'architecture proposée avec ses deux niveaux et l'espace de donnée intermédiaire (DS) qui contient les informations manipulées par les deux niveaux.

- Le Niveau Virtuel (VL), où les cybercars virtuels (VCybs) sont en mouvement, est un domaine informationnel dans lequel tout est simulé en temps accéléré;
- Le Niveau Physique (PL) représente le monde réel dans lequel des cybercars physiques (PCybs) se déplacent en temps réel.

Un nœud (divergence ou station) est composé de trois éléments : une image virtuelle (dans le VL), une structure de mémorisation et de traitement (dans le DS) et une infrastructure physique (dans le PL). Comme Depuis le niveau virtuel VL travaille en temps accéléré, le temps d'adaptation se réduit considérablement. Dans le niveau VL, de nombreux VCybs peuvent être utilisés pour découvrir de nouveaux chemins, ce qui permet de garder le nombre de PCybs circulant sur le PL à un niveau très bas. Les entités virtuelles (VCybs) prennent des décisions basées sur des principes stigmergiques, de manière stochastique et permettent un comportement adaptatif apte à traiter les perturbations inattendues. L'historique du déplacement du VCyb est utilisé pour mettre à jour les phéromones (c'est-à-dire les données utilisées pour le routage). D'un point de vue logique, les Vcybs se déplacent sur un modèle du réseau de transport existant dans le niveau physique PL. Dans ce dernier, les routages de PCybs sont déterministes selon le principe du « best effort » et exploitent résultats optimisés du niveau VL.

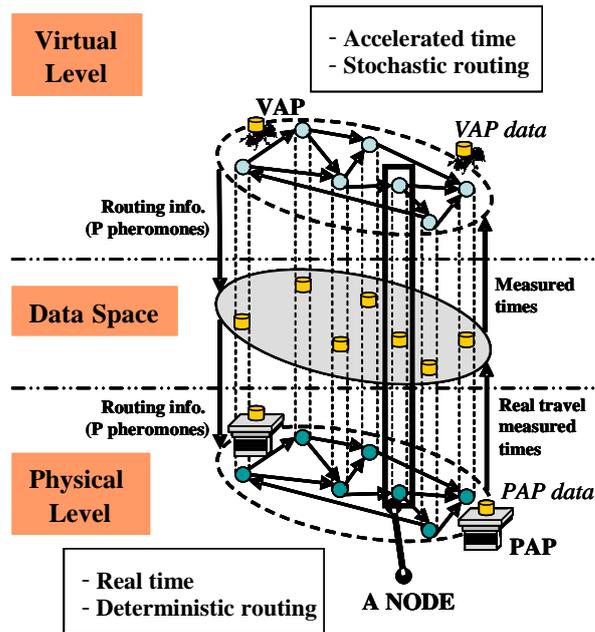


Figure 5. Architecture à 2 niveaux

La section suivante présente les notations utilisées dans ce modèle, qui est décrit plus précisément.

II.2.2 – Notations et variables

La variable $v_{n_i}^w$ désigne le $w^{\text{ème}}$ voisin de n_i et V_{n_i} , l'ensemble des voisins de n_i : $V_{n_i} = \{v_{n_i}^w / \exists \text{arc } n_i \rightarrow v_{n_i}^w\}$, $w \in \{1 \dots \text{card}(V_{n_i})\}$. $N = \{n_i\}$ et V_{n_i} décrivent ainsi la topologie du réseau de transport. Un chemin possible entre le nœud n_i et le nœud n_j s'écrit $u_{ij} = [n_i \dots n_j]$ et correspond à la liste classée de nœuds successifs devant être visités pour transiter de n_i à n_j .

Variables :

- $t_{n_i}(v_{n_i}^w)$ et $t_{n_i}^*(v_{n_i}^w)$ sont, respectivement, le temps de parcours (mesuré par un PCyb) et le temps de référence (pour un Vcyb) entre un nœud n_i et son $w^{\text{ème}}$ voisin.

- P_{n_i} est la matrice de phéromones. Les colonnes de P_{n_i} correspondent à tous les nœuds destinations possibles n_j depuis le nœud n_i et les lignes contiennent tous les nœuds voisins possibles $v_{n_i}^w$. Par analogie avec les systèmes biologiques, cette matrice caractérise le taux de

phéromone sur les différents arcs $n_i \rightarrow v_{n_i}^w$. La valeur $P_{n_i}(v_{n_i}^w, n_j)$ est associé au chemin préféré du nœud actuel n_i au nœud destination n_j , en choisissant le nœud voisin intermédiaire $v_{n_i}^w$. Par normalisation, l'expression suivante est vérifiée :

$$\sum_w P_{n_i}(v_{n_i}^w, n_j) = 1, \forall (n_i, n_j) \in N^2$$

Dans ce document, on considère que le meilleur chemin est le chemin emprunté par les PCybs avec le temps minimal.

La figure 6 donne un exemple de l'utilisation des variables introduites précédemment. On considère un PCyb positionné au nœud courant $n_i = n_3$, provenant du nœud source du nœud n_1 et ayant comme destination le nœud $n_j = n_8$. Dans cet exemple le meilleur voisin se trouve être le nœud n_4 puisque $P_{n_3}(v_{n_3}^1 = n_4, n_8) = .95 > P_{n_3}(v_{n_3}^2 = n_5, n_8) = .05$. Le PCyb transitera alors de n_3 à n_4 , en gardant son nœud de destination n_8 en mémoire. En parvenant à n_4 , le temps de parcours $t_{n_3}(n_4)$ est transmis au nœud n_3 via le nœud n_4 . Ce temps est utilisé par le nœud n_3 pour déterminer si il existe une perturbation (par exemple un ralentissement) entre les nœuds n_3 et n_4 , par comparaison de $t_{n_3}(n_4)$ avec $t_{n_3}^*(n_4)$.

- $\tau_{n_i}^*$ est le vecteur de temps minimal. Ainsi $\tau_{n_i}^*(n_j)$ désigne le temps minimum mesuré pour se déplacer du nœud n_i vers n'importe quel nœud destination possible n_j . Cette variable est mise à jour à chaque fois qu'un temps inférieur est mesuré, selon une fenêtre de temps mobile.

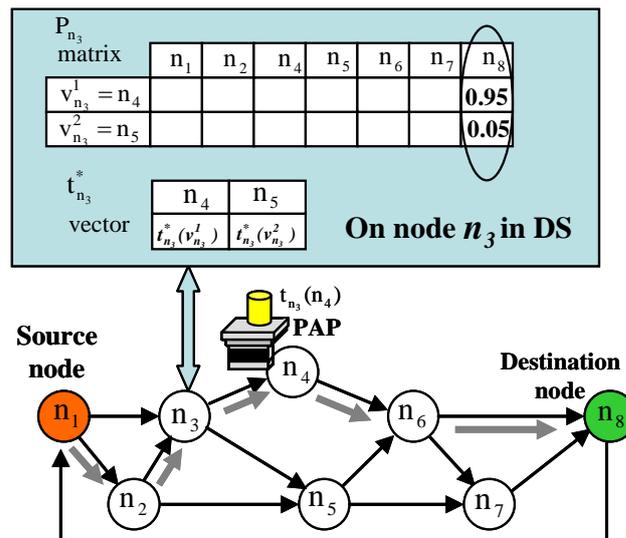


Figure 6. Illustration des variables

- $h_{vap}(n_i, n_j)$ désigne l'historique. Chaque VCyb transitant entre les nœuds n_i et n_j met à jour son historique $h_{vap}(n_i, n_j)$, table utilisée pour mémoriser les nœuds traversés et les dates d'arrivée correspondantes :

$$h_{vap}(n_i, n_j) = ([n_i, n_k, n_m, \dots, n_u, n_j], [d_i, d_k, d_m, \dots, d_u, d_j])$$

où d_i désigne la date d'arrivée au nœud n_i .

Basé sur les notations précédentes, le temps mis pour transiter de n_i à n_j est noté $\tau_{n_i}(n_j) = d_j - d_i$.

II.2.3 – Modélisation du processus de routage

Process de routage nominal

A un instant donné, un PCyb commence à transiter depuis sa station source ns vers la station de destination nd . La paire (ns, nd) est fournie par le système d'allocation des cybercars. Le nœud actuel est désigné nc , ainsi $nc=ns$ quand le PCyb commence à se déplacer. Les valeurs de $P_{nc}(v_{nc}^w, nd)$ sont utilisées pour choisir le prochain nœud voisin nn . Ce choix est déterministe car c'est le voisin ayant la plus grande valeur de P qui est systématiquement choisi $nn = \tilde{v}_{nc}^{nd}$ avec :

$$\tilde{v}_{nc}^{nd} \in V_{nc} / P(\tilde{v}_{nc}^{nd}, nd) = \max_{w \in \{1 \dots \text{card}(V_{nc})\}} P_{nc}(v_{nc}^w, nd)$$

Pendant le parcours réel de l'arc $nc \rightarrow nn$, le temps réel écoulé $t_{nc}(nn)$ est mesuré. Quand le PCyb arrive au nœud nn , il rétro-propage le temps $t_{nc}(nn)$ vers le nœud nc . Une perturbation locale est détectée sur l'arc $nc \rightarrow nn$ si $|t_{nc}(nn) - t_{nc}^*(nn)| > \varepsilon$, ε désignant un paramètre de seuil fixe.

Exploration via les VCybs

Quand une perturbation est détectée, une exploration à l'aide de VCybs est déclenchée. A chaque intervalle de temps T , un VCyb est introduit sur le nœud ns avec comme destination le nœud nd .

Sur le nœud actuel nc , le VCyb doit choisir le nœud voisin suivant nn . Puisque l'aléatoire et la diversité sont des mécanismes d'adaptation importants dans les systèmes biologiques naturels, le choix de nn n'est pas déterministe (contrairement au cas du PCyb) mais est stochastique. La valeur $P_{nc}(v_{nc}^w, nd)$ désigne la probabilité de choisir le voisin v_{nc}^w afin de se rendre du nœud courant nc vers le nœud destination nd . Cependant, si la valeur de $P_{nc}(v_{nc}^w, nd)$ est négligeable, v_{nc}^w est rarement choisi. Pour assurer la diversité, une valeur minimale α est introduite, de façon à vérifier la relation suivante :

$$Prob(nn = v_{nc}^a) = \max \left(\frac{P_{nc}(v_{nc}^a, n_j)}{\sum_w P_{nc}(v_{nc}^w, n_j)}, \alpha \right) = \max(P_{nc}(v_{nc}^a, n_j), \alpha)$$

since $\sum_w P_{nc}(v_{nc}^w, n_j) = 1$

Cette relation exprime la probabilité du nœud v_{nc}^a d'être choisi comme le voisin suivant (désigné nn).

Après avoir atteint le nœud nn , la date d'arrivée d_{nn} est alors enregistrée dans l'historique h_{vap} . Etant donné que le mouvement est virtuel, cette date est calculée en ajoutant le temps de référence $t_{nc}^*(nn)$ à la dernière date dans l'historique.

Le nœud nn devient ensuite le nouveau nœud actuel nc et le VCyb continue à voyager vers le nœud de destination, itérativement de nœud en nœud.

Finalement, quand le VCyb atteint le nœud de destination, le parcours est achevé et l'historique est transmis au nœud destination.

La recherche "du meilleur" chemin alternatif

Comme les fourmis réelles, qui déposent une traînée de phéromones en retournant à leur nid, chaque fois qu'un VCyb atteint son nœud de destination nd , les informations contenues dans l'historique h_{vap} sont transmises à chaque nœud visité pour mettre à jour la matrice de phéromones. Dans notre approche, ce processus de mise à jour des coefficients repose sur une loi de renforcement.

Quand les informations retro-propagées atteignent le nœud nc , $\tau_{nc}(nd)$ et le temps minimum $\tau_{nc}^*(nd)$ sont comparés. Si $\tau_{nc}(nd)$ est inférieur ou égal au temps minimum $\tau_{nc}^*(nd)$ et si nn est le nœud voisin emprunté pour transiter de nc à nd , $P_{nc}(nn, nd)$ est renforcé :

$$P_{nc}(nn, nd) \Leftarrow P_{nc}(nn, nd) + r * (1 - P_{nc}(nn, nd))$$

avec $nn \in V_{nc}$

Les coefficients $P_{nc}(no, nd)$ pour la destination nd des autres voisins sont renforcés négativement par un processus de normalisation :

$$P_{nc}(no, nd) \Leftarrow P_{nc}(no, nd) - r * P_{nc}(no, nd)$$

avec $no \in V_{nc}, no \neq nn$

Le « meilleur » chemin apparaît quand tous les coefficients des nœuds parcourus nc sont supérieurs à un seuil fixe Ω (0.95 dans notre étude). Comme indiqué dans la figure 10a, cet état est atteint après une période transitoire (Zone A). On déclare le chemin comme étant le « meilleur » après une période de vérification (Zone B), laquelle est indispensable pour être certain que le chemin trouvé est suffisamment satisfaisant. Cette dernière période est considérée finie lorsqu'un nombre fixe de VCybs ont atteint le nœud de destination.

II.2.4 – Simulation du système de contrôle DRP

II.2.4.1 – Courte description de l’outil de simulation

Le modèle de pilotage proposé est distribué naturellement, et ne repose sur aucune mémorisation et sur aucun traitement centralisé. Cette propriété a influencé l’adoption d’une plate-forme de modélisation et de simulation à base d’agents fonctionnant en parallèle. Avec NetLogo (Wilensky, 1999), chaque entité modélisée peut être décrite comme un agent indépendant interagissant avec son environnement. Tous les agents fonctionnent en parallèle sur une grille de patches (monde cellulaire), et chaque agent peut lire et modifier certains des attributs associés aux patches dans sa proximité. Les règles comportementales définies pour les agents permettent de décrire l’interaction agent-environnement, qui est très importante, pour simuler le processus de stigmergie.

Dans l’étude de cas suivante, les niveaux tant physiques que virtuels sont simulés. La figure 7 montre l’interface de notre simulateur. Une applet est disponible à l’url : <http://www.univ-valenciennes.fr/sp/routing/>

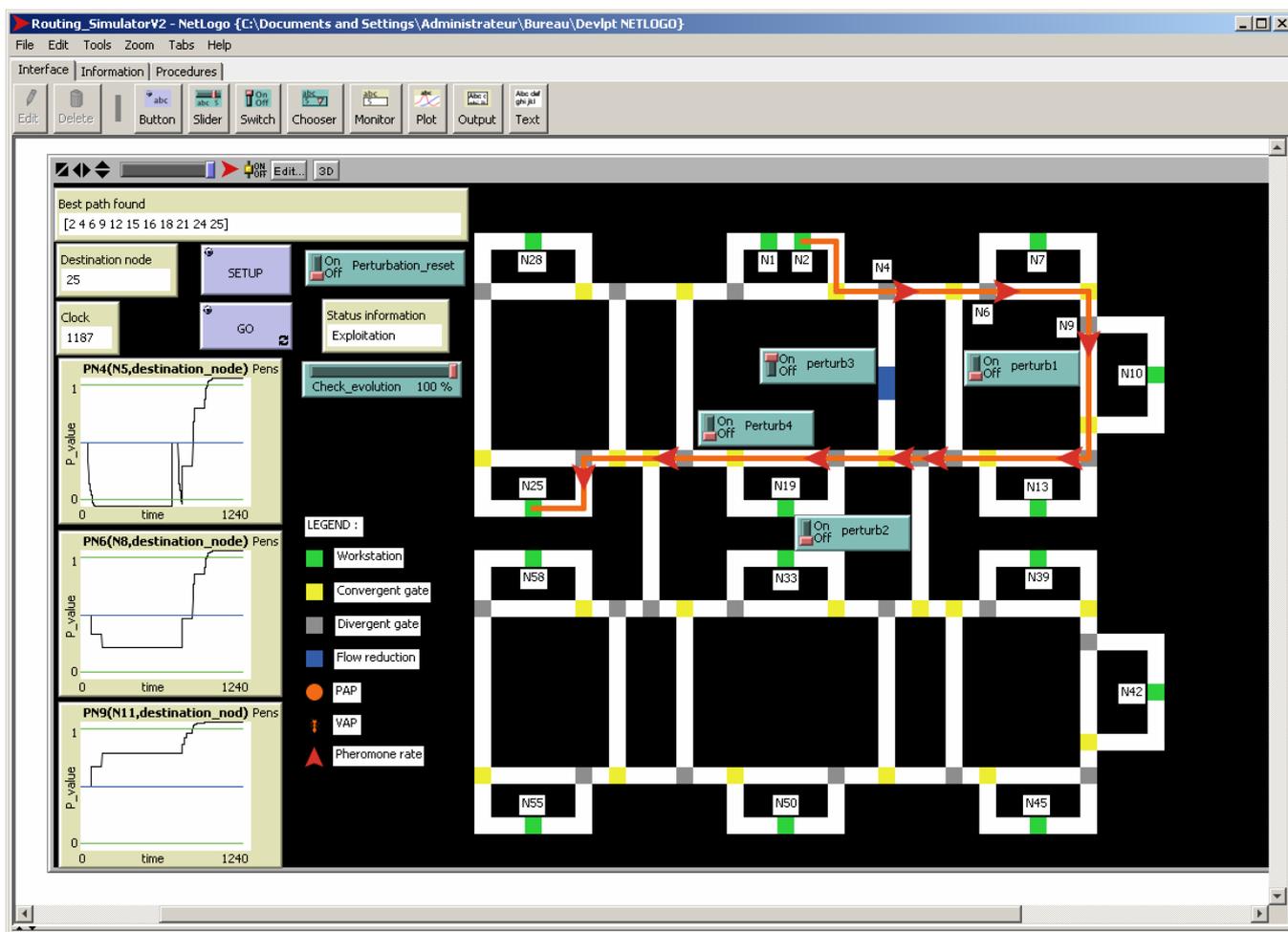


Figure 7. Interface du simulateur

II.2.4.2 – Etude de cas

L'approche proposée est appliquée à un réseau de transport de type PRT basé sur un monorail à sens unique comportant des aiguillages permettant de router les Pcybs vers les différentes stations.

Le réseau, décrit par la figure 8, peut être caractérisé comme suit:

- 15 stations (nœuds en gris avec un carré noir au centre),
- 24 aiguillages divergents (nœuds en gris), où un choix de cheminement entre deux arc adjacents doit être fait,
- 24 aiguillages convergents (nœuds hachurés)

Le réseau est divisé en deux parties – supérieure et inférieure – connectées par deux arcs $n_{16} \rightarrow n_{36}$ et $n_{61} \rightarrow n_{22}$.

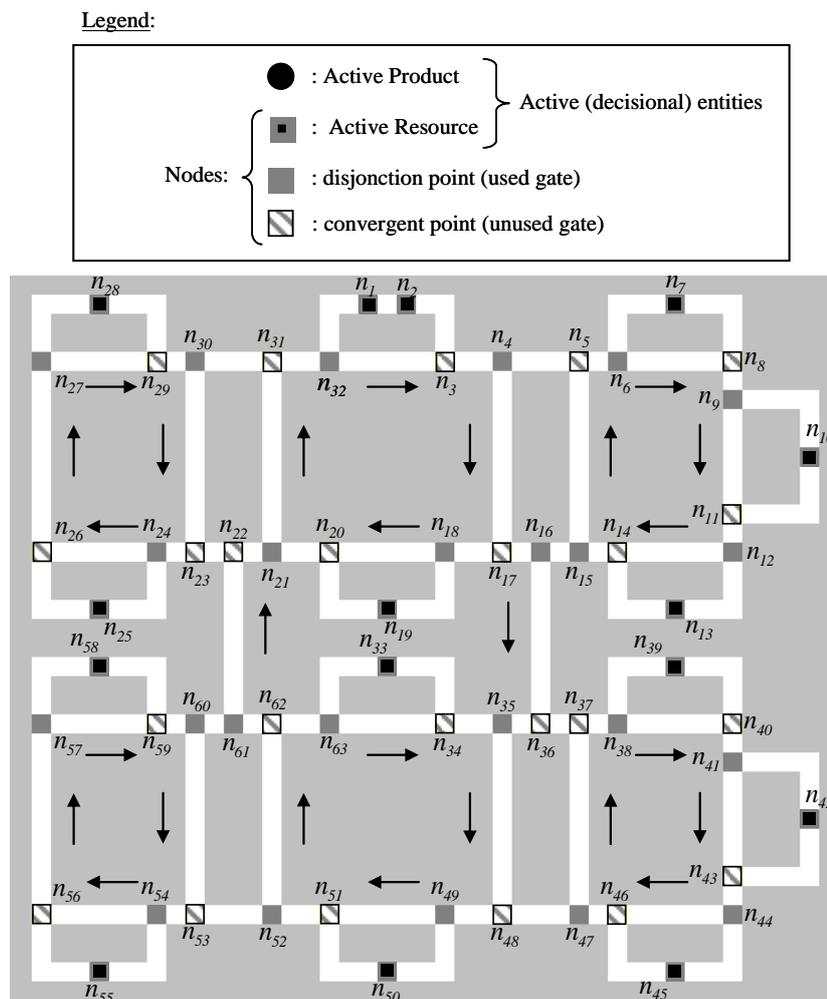


Figure 8. Réseau de type PRT

II.2.4.3 – Résultats

Plusieurs scénarii sont présentés, indiquant les différentes capacités de notre modèle en ce qui concerne l'auto-adaptation aux perturbations. La table 1 récapitule l'ensemble de ces scénarii..

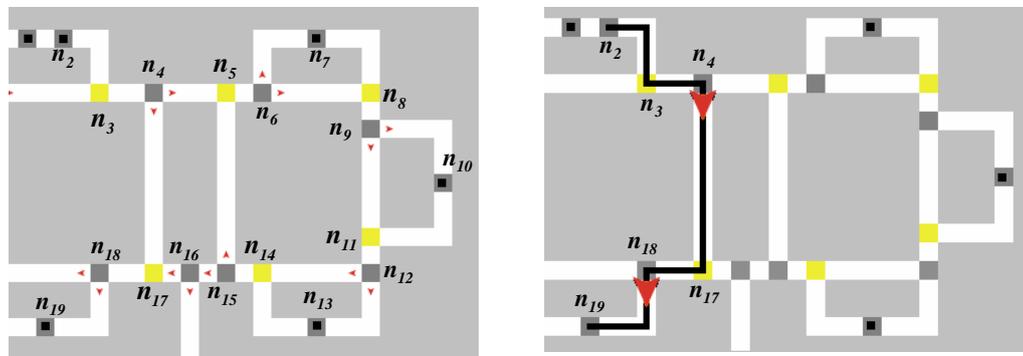
* Scénario 1: Dans le premier scénario, l'impact d'une perturbation sur un arc que l'on peut contourner est étudié. n_2 et n_{19} sont respectivement, les nœuds source et destination. Des résultats qualitatifs et quantitatifs sont présentés ci-après.

Résultats qualitatifs

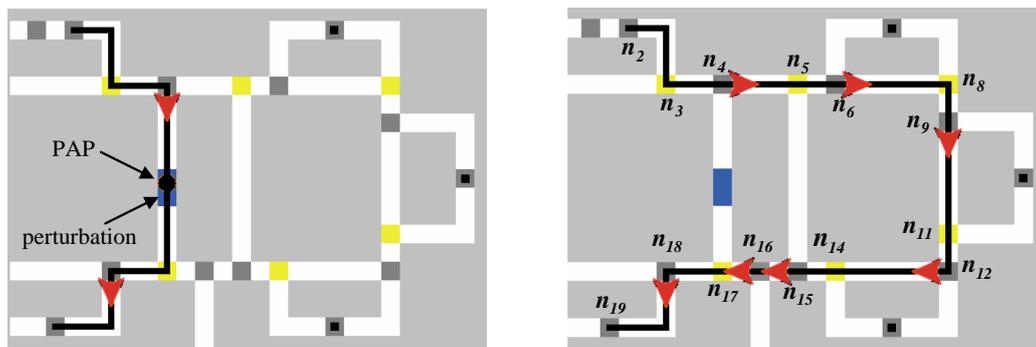
La figure 9a montre le début de la phase d'initialisation. Les flèches (près des aiguillages divergents) représentent le taux de phéromone correspondant aux arcs adjacents. Leur taille est proportionnelle au taux de phéromone (les valeurs sont initialisées à 0.5). Les Vcybs transitent de manière stochastique sur les différents arcs et le chemin $[n_2, n_3, n_4, n_{17}, n_{18}, n_{19}]$ émerge par renforcement. A aiguillage divergent, les plus grandes flèches indiquent les arcs intéressants à emprunter. Le meilleur chemin est alors tracé (en noir) cf. Figure 9b.

Sur la Figure 9c une perturbation sur l'arc $n_4 \rightarrow n_{17}$ est introduite, affectant la fluidité du trafic sur cet arc. (La réduction du flux est représentée en gris sombre).

Quand un PCyb (disque noir) met plus de temps que prévu sur ce chemin, une nouvelle exploration Vcyb est déclenchée via n_4 .



Figures 9a, 9b. Etat initial, « meilleur » chemin trouvé



Figures 9c, 9d. Perturbation présente, chemin alternatif

Les Vcybs transitant via l'arc $n_4 \rightarrow n_{17}$ n'ont pas de bonnes performances et l'intérêt pour ce chemin diminue. Par conséquent, la diminution d'intérêt pour ce chemin perturbé entraîne l'augmentation de l'attrait pour un chemin alternatif $[n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_8, n_9, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19}]$ (figure 9d), bien qu'à l'origine, ce chemin ne soit pas le meilleur. Ce comportement dynamique est un exemple classique de la capacité de reconfiguration naturelle de l'approche stigmergique.

Résultats quantitatifs

La figure 10 montre l'évolution de certains coefficients P_{n_i} . Notez le changement qui arrive après la perturbation à la date $d=350$ (en temps simulé). La figure 11 montre plus précisément l'évolution du coefficient $P_{n_4}(n_{18},n_{19})$ pour une perturbation apparue au $d=902$ et pour sa résolution au $d=1472$. Après avoir résolu la perturbation, le coefficient $P_{n_4}(n_{18},n_{19})$ converge de nouveau vers 1.

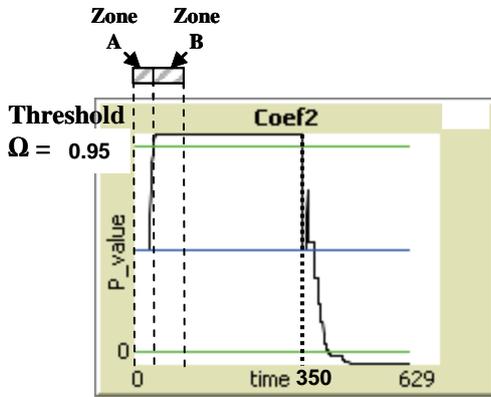


Figure 10a. $P_{n_4}(n_{18},n_{19})$.

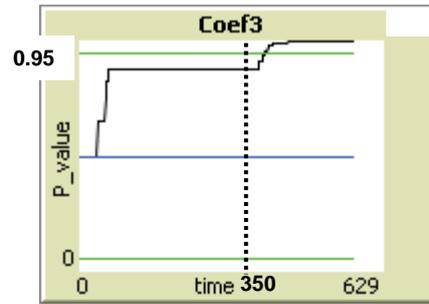


Figure 10b. $P_{n_6}(n_9,n_{19})$.

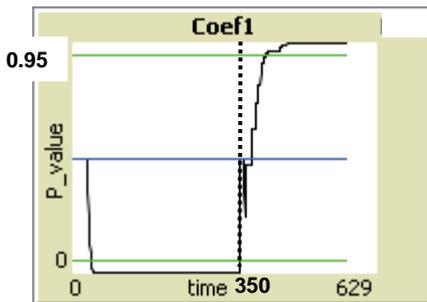


Figure 10c. $P_{n_4}(n_6,n_{19})$.

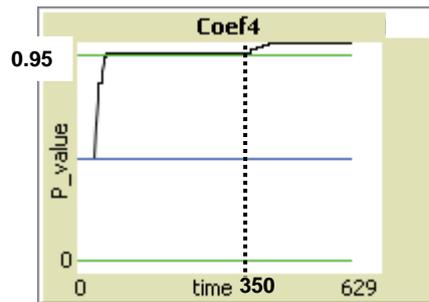


Figure 10d. $P_{n_9}(n_{12},n_{19})$.

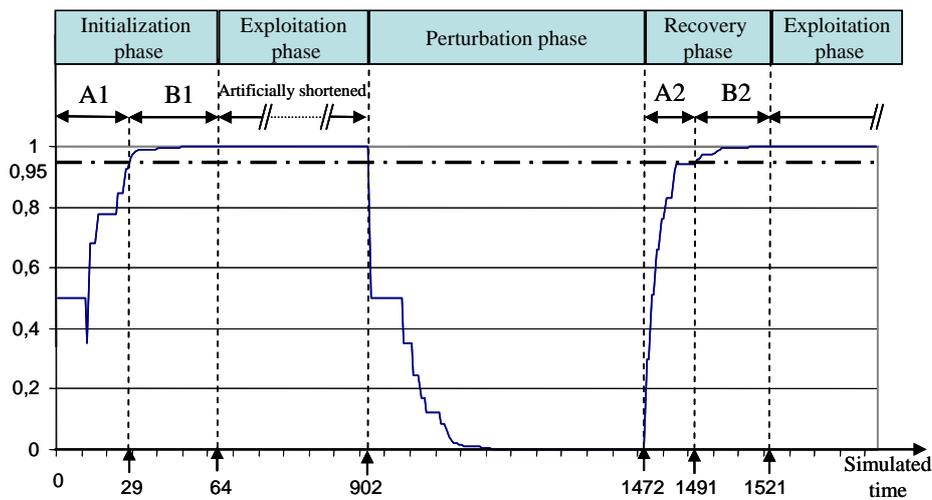


Figure 11. Evolution de $P_{n_4}(n_{18},n_{19})$.

* Scenario 2: Dans le second scénario, une perturbation est introduite sur l'arc $n_{16} \rightarrow n_{36}$. Cet arc est un passage incontournable pour transiter de la section inférieure à la section supérieure du réseau de transport. On peut noter qu'après la perturbation le chemin alternatif trouvé est le même que le chemin initial (cf. tableau 1). Ceci est rendu possible car le temps de référence minimal $\tau_{n_{10}}^*(n_{39})$ a été établi en utilisant une fenêtre de temps mobile construite avec les 20 derniers temps mesurés. Dans ce contexte, la meilleure performance antérieure de $\tau_{n_{10}}^*(n_{39})$ est oubliée et le nouveau temps, bien que plus long, devient le temps de référence.

* Scenario 3: les nœuds n_2 et n_{25} sont respectivement les nœuds source et destination. Dans le cas d'une perturbation affectant l'arc $n_{20} \rightarrow n_{21}$, le chemin initial est remplacé par le chemin alternatif suivant :

$[n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_8, n_9, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{36}, n_{37}, n_{38}, n_{40}, n_{41}, n_{43}, n_{44}, n_{46}, n_{47}, n_{48}, n_{49}, n_{51}, n_{53}, n_{54}, n_{56}, n_{57}, n_{59}, n_{60}, n_{61}, n_{22}, n_{23}, n_{24}, n_{25}]$.

Scenario	Source node	Destination node	Initial path	Perturbed arc	Alternative path identified
1	n_2	n_{19}	$n_2, n_3, n_4, n_{17}, n_{18}, n_{19}$	$n_4 \rightarrow n_{17}$	$n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_8, n_9, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19}$
2	n_{10}	n_{39}	$n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{36}, n_{37}, n_{38}, n_{39}$	$n_{16} \rightarrow n_{36}$	$n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{36}, n_{37}, n_{38}, n_{39}$
3	n_2	n_{25}	$n_2, n_3, n_4, n_{17}, n_{18}, n_{20}, n_{21}, n_{22}, n_{23}, n_{24}, n_{25}$	$n_{20} \rightarrow n_{21}$	$n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_8, n_9, n_{11}, n_{12}, n_{14}, n_{15}, n_{16}, n_{36}, n_{37}, n_{38}, n_{40}, n_{41}, n_{43}, n_{44}, n_{46}, n_{47}, n_{48}, n_{49}, n_{51}, n_{52}, n_{53}, n_{54}, n_{56}, n_{57}, n_{59}, n_{60}, n_{61}, n_{22}, n_{23}, n_{24}, n_{25}$

Table 1. Description des scenarii

II.3 – Architecture Holonique adaptée au transport

Cette partie vient d'être initiée et fait l'objet du travail de thèse de Silviu Raileanu. Il s'agit de définir une architecture opérationnelle de contrôle/pilotage compatible avec le contexte du projet et l'architecture cadre ACTIF. Cette architecture se focalise sur le contrôle/pilotage des cybercars PRT.

II.3.1 – Entités matérielles d'un système PRT

La figure 12 est représentative d'un système de transport type PRT.

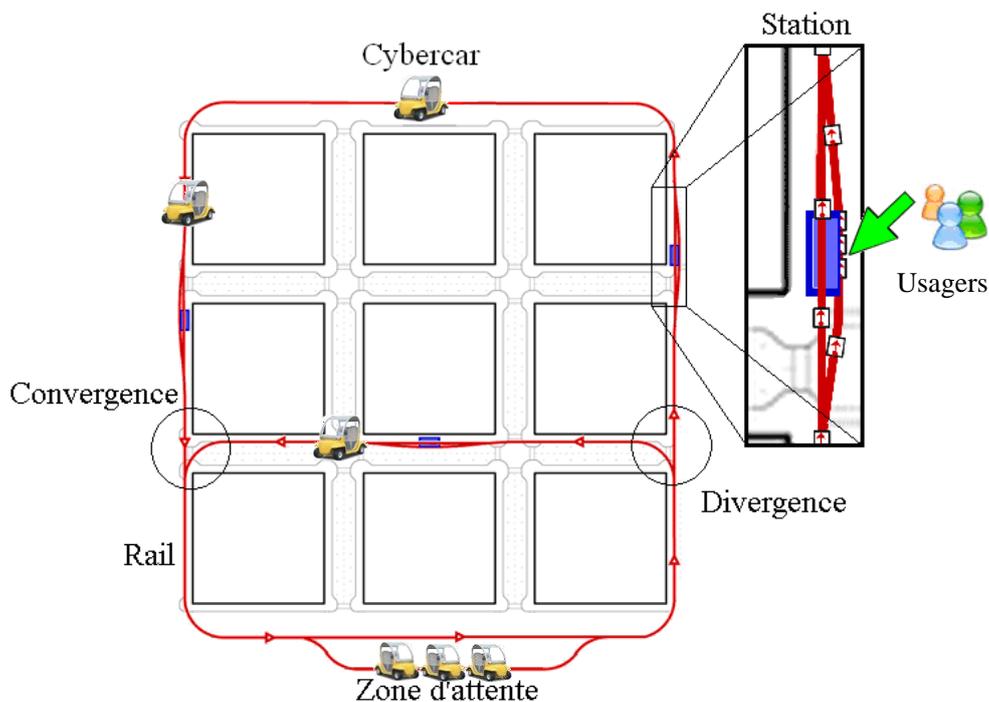


Figure 12. Système PRT

Les entités matérielles majeures du système PRT sont :

- les stations, où les usagers peuvent monter et descendre des cybercars. Les stations correspondent à des nœuds de départ ou de destination.
- les cybercars (PRT), qui permettent effectivement le déplacement des usagers.
- les zones d'attente, qui permettent aux cybercars de stationner lorsque ces derniers ne transportent pas d'usagers et donc ne rendent pas de service.
- l'infrastructure permettant de guider les cybercars, de façon matérielle ou immatérielle, ici nous nous plaçons dans le cadre des PRT avec donc un guidage matériel à base de rails. Cette infrastructure peut ne pas être exclusive et donc traversée ou partagée par/avec d'autres moyens de transport et/ou usagers, i.e. cyclistes, piétons.

La description du système PRT met en évidence le besoin de piloter des entités autonomes (principalement les cybercars) de façon décentralisée afin d'assurer la modularité, l'autonomie et la robustesse aux perturbations (blocage, congestion...). La définition d'une architecture s'appuiera sur le corpus théorique existant sur les architectures de contrôle/pilotage hétérarchiques (Trentesaux 2007, Trentesaux et al. 2008).

II.3.2 – Parallèle PRT-FMS

Un parallèle entre le système PRT (où existe un flux d'usagers à transporter) et un FMS (où existe un flux de produits à transporter) peut être établi. Le système de convoyage d'un FMS correspond à l'infrastructure de guidage du système PRT. Un cybercar PRT correspond à une navette/« shuttle » dans un FMS. Une station du système PRT correspond, dans le cas d'un FMS, à un lieu où se trouvent une ressource de traitement (robot, machine, contrôle qualité...) sur le produit. L'équivalent du produit, sur le système PRT, n'est autre que l'utilisateur. Une demande de déplacement d'un usager correspond à un ordre de fabrication (OF) dans un système FMS.

Finalement, à la nature du système (PRT, FMS) et au facteur d'échelle près (zone urbaine, atelier), une architecture de contrôle/pilotage issues des FMS (Flexible Manufacturing System) peut être envisagée. Il s'ensuit que les systèmes de contrôle/pilotage holoniques (à base d'entités qui ont des degrés divers d'autonomie) issus des FMS (Flexible Manufacturing System) sont des systèmes candidats pour le contrôle du système cybercars PRT.

II.3.3 – Architecture globale

Des travaux de recherches sur les architectures hétérarchiques (Trentesaux 2007, Trentesaux et al. 2008) mettent en avant une architecture globale candidate pour le système PRT. Cette architecture est présentée ci-dessous, figure 13.

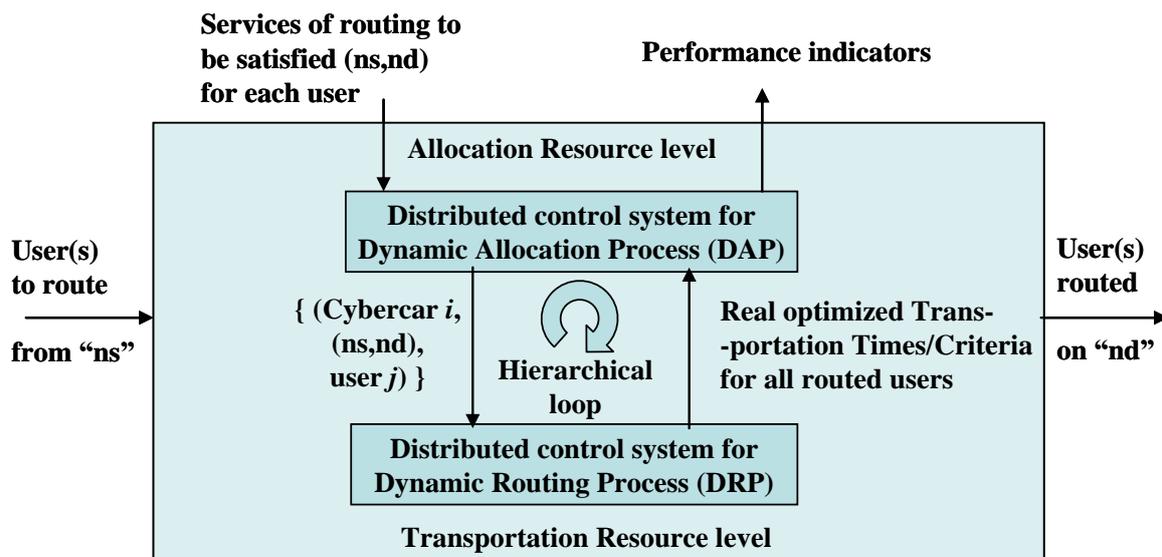


Figure 13. Processus d'allocation et routage

Deux processus interviennent dans le contrôle/pilotage des cybercars PRT (figure **) :

- Le premier DAP (Dynamic Allocation Process) concerne l'allocation, i.e. trouver le cybercar qui rendra le service de déplacement (ns, nd) souhaité par un usager. Le nœud ns étant le nœud de début/départ de course, et le nœud nd celui de destination.
- Le second DRP (Dynamic Routing Process) concerne le routage dynamique du cybercar i prévu, qui transporte l'utilisateur j , de ns à nd au travers du réseau de transport en faisant face aux perturbations du trafic.

Cette architecture globale est semi-hétérarchique, l'allocation étant faite avant le routage.

II.3.4 – Architecture Holonique

Le but de l'architecture holonique est de supporter les deux processus cité précédemment (DAP, DRP) et de permettre ainsi le contrôle/pilotage des cybercars. Un système holonique est composée d'entités autonomes appelée Holon (Köstler, 1990). Toute entité active autonome est un holon potentiel.

Une revue de la littérature fait apparaître plusieurs modèles d'architectures holoniques, par exemple :

- PROSA : Product-Resource-Order-Staff Architecture (Van Brussel et al., 1998),
- HCBA : Holonic Component-Based Approach (Chirn et al., 2000),
- ADACOR : ADAptive holonic COntrol aRchitecture (Leita et al., 2006).

Le travail à venir consistera à étudier les modèles et à en retenir un, ou faire émerger un modèle hybride, adapté à notre contexte PRT.

II.4 – Interaction Homme-Système Cybercars

Ce travail fait l'objet de la thèse d'Oscar Serrate.

A des fins d'interactions homme-machine aisées, pour une gamme très variée d'utilisateurs, le système doit être sensible au contexte. Le système prend alors en compte les choix et préférences de chaque utilisateur, le dispositif d'interaction utilisé, ainsi que l'environnement de l'interaction.

L'utilisateur du système de transport pour les cybercars doit pouvoir appeler ou réserver un cybercar en fonction de son profil, de l'environnement dans lequel il évolue et des dispositifs d'interaction à sa disposition. Le système doit être sensible au contexte (Utilisateur, Environnement, Plateforme d'interaction). Une définition de contexte est donnée par A.K. Dey et collègues (Dey et Abowd, 2000 ; Dey et al. 2001) :

« Le contexte comprend toute information qui peut être utilisée pour caractériser la situation d'une entité. Une entité est une personne ou un objet qui est considéré comme important vis-à-vis de l'interaction entre un utilisateur et une application, y compris l'utilisateur et l'application eux-mêmes. »

Thévenin (2001) décrit le contexte par un triplet {utilisateur, plate-forme, environnement} :

- Utilisateur (Classe d'utilisateurs ou profil)
 - Age
 - Touriste/ Professionnel...
 - Handicap
 - ...
- Plate-forme (support matériel et logiciel qui sous-tend l'interaction)
 - PDA
 - Téléphone Mobile
 - PC
 - ...
- Environnement (milieu dans lequel s'exerce l'interaction homme-machine)
 - Lieu géographique (à domicile, dans la rue...)
 - Jour/Nuit
 - Ambiance (fréquenté, bruyante...)
 - ...

L'objectif de notre système d'Interaction Homme-Machine (IHM) en lien avec les cybercars est de prendre en compte toutes ces informations concernant l'utilisateur, l'environnement physique, les propriétés de la plate-forme, le niveau de bruit, la localisation de l'utilisateur, etc. Une définition des IHM est (Webref8) :

« Une IHM regroupe la façon dont les humaines interagissent avec les ordinateurs ou entre eux à l'aide d'ordinateurs, ainsi que la façon de concevoir des systèmes informatiques qui soient efficaces, faciles à utiliser ou plus généralement adaptés à leur contexte d'utilisation ».

On considère aussi que les interfaces du système doivent pouvoir migrer d'un dispositif d'interaction à l'autre en préservant l'utilisabilité (Calvary et al., 2002 ; Thevenin et al., 1999).

II.4.1 – Proposition d'un Modèle général du système usagers-cybercars

L'utilisateur/usager est un élément majeur du système « cybercars ». L'utilisateur doit pouvoir en fonction du contexte interagir avec le système de manière naturelle ou médiatisée (via une plate-forme d'interaction homme-machine).

Notre domaine d'application est composé d'une part d'une flotte cybercar auto-organisée et d'autre par d'un système de transport.

Notre modèle, qui est adapté de (Coutaz et al., 2007), est composé d'un modèle du domaine, d'un modèle du contexte et d'un modèle de l'interface utilisateur (Figure 14). Le **domaine** décrit les objets métier ayant un sens dans l'application quelque soit le contexte. Le modèle « Cybercar » correspond à tous les cybercars qui sont dans le cœur de ville. Cette modélisation utilise la notion d'auto-organisation. Ainsi chaque cybercar utilise des informations locales pour accomplir une tâche particulière. Les cybercars sont capables de communiquer entre eux, avec le système de transport, avec l'environnement et avec l'utilisateur. Le système de transport est un modèle qui décrit comment les cybercars vont être distribués et comment ils vont arriver à destination selon un protocole de routage. Dans cet article nous ne rentrerons pas dans le détail de ce modèle. La gestion des transports publics et cybercars ainsi que les protocoles de routage sont illustrés dans Melki et al. (2007).

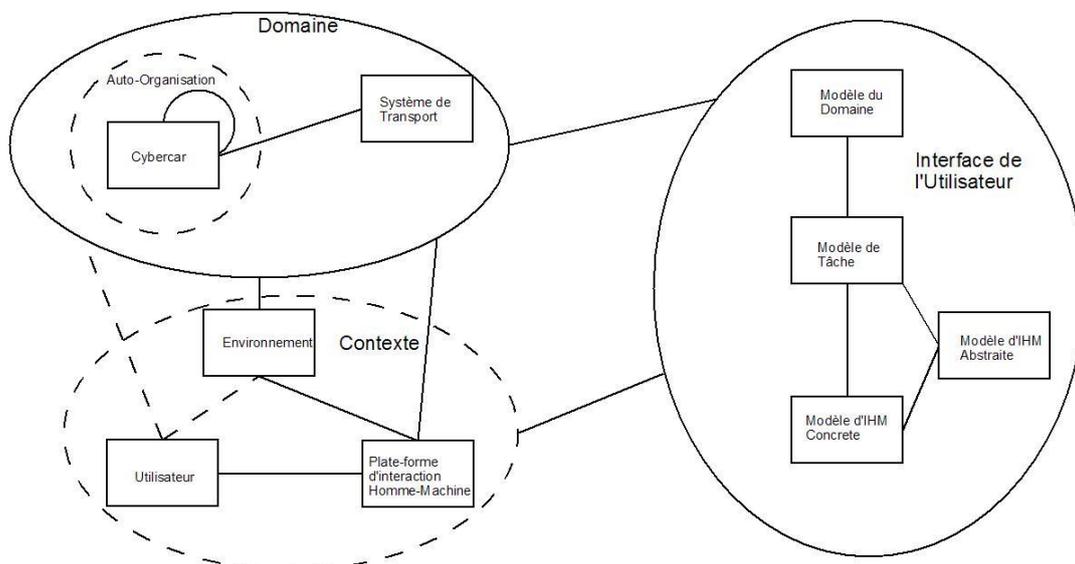


Figure 14. Modèle Général

Le modèle de l'**interface de l'utilisateur** vise à définir les IHM qui seront distribuées sur les plates-formes d'interactions à disposition de l'utilisateur.

Le modèle de Tâche est une transcription formelle ou semi-formelle de l'activité prescrite de l'utilisateur. Le modèle abstrait définit les espaces d'interaction (distribution des tâches entre fenêtres, pages...) et le modèle concret décrit la présentation (widget, layout...). Ce modèle concret devra être distribué, en principe automatiquement, sur la plate-forme cible concernée par le contexte.

Le **contexte** comprend le triplet {utilisateur, plate-forme et environnement}. Le modèle utilisateur définit les différents profils pris en charge comme mentionné dans la section précédente. Le modèle de plate-forme d'interaction homme-machine précise les dispositifs à disposition pour demander un cybercar. L'environnement est important pour les cybercars parce qu'ils doivent prendre en compte s'il pleut, s'il y a beaucoup de bruit...

Ce modèle général permet de prendre en compte l'utilisateur dans son environnement pour adapter l'IHM du cybercar.

Si l'utilisateur est dans le cœur de ville, il peut demander un cybercar en utilisant son PDA ; il peut alors communiquer directement avec le véhicule le plus proche. Si ce cybercar est

occupé, le véhicule doit en informer l'utilisateur et demander à un autre cybercar de prendre en charge l'utilisateur. Les cybercars communiquent avec le « Système de Transport ». Dans le cas d'une réservation préalable faite d'avance par un utilisateur hors de la ville, le système de transport disposant de toutes les informations concernant l'usager passe ces informations au cybercar devant prendre en charge le passager à un endroit et un moment précis.

Dans la section suivante, nous définissons deux scénarios : l'un où l'usager se trouve dans le cœur de ville et l'autre où il est hors de la ville.

II.4.2 – Scénarii

Comme le montre la figure 15, l'utilisateur interagit avec les cybercars selon deux modes d'utilisation. Dans le premier cas, l'utilisateur qui est dans le cœur de ville (où les cybercars sont proches), peut appeler un cybercar pour faire une course. L'utilisateur peut demander ce cybercar en utilisant un dispositif mobile (PDA, Téléphone, ...) ou une borne. Quand l'utilisateur utilise ce dispositif, l'utilisateur s'identifie et est localisé. L'identification permet au système de récupérer le profil de l'utilisateur. La location assure, via le système cybercar, l'arrivée rapide du cybercar disponible le plus proche. Dans le véhicule, l'écran (plate forme particulière) sera configuré en fonction du profil de l'utilisateur et de l'environnement. L'utilisateur pourra par exemple visualiser les musées, les restaurants, les gares à proximité sur un plan de ville.

Dans le second cas, l'utilisateur n'est pas dans le cœur de ville et souhaite faire la réservation d'un cybercar à un endroit précis du cœur de ville et à une date et une heure précises. Dans ce cas, l'utilisateur accède au système de transport en utilisant le site web. Il doit s'enregistrer s'il n'est pas déjà inscrit. Le profil de l'utilisateur permet de personnaliser l'interface.

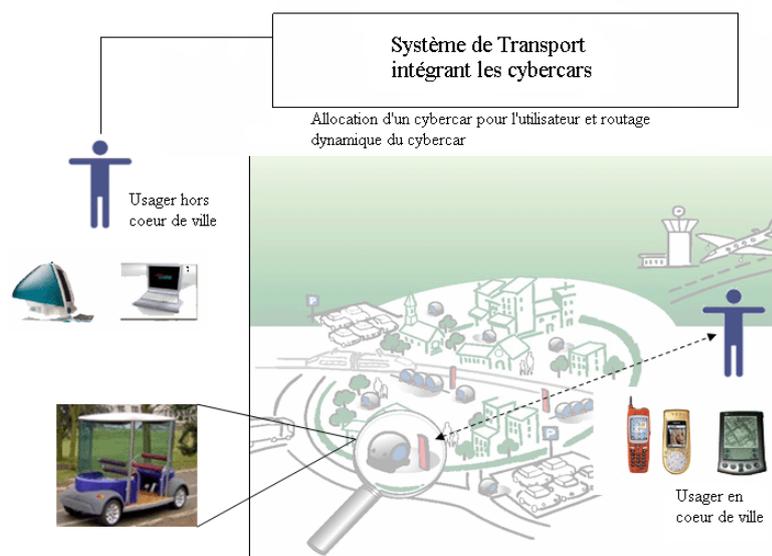


Figure 15. Les principaux types d'interactions

II.4.3 – Application

Des interactions entre cybercars et usagers impliquent potentiellement de nombreuses tâches. On va se contenter ici d'en fournir un exemple représentatif, débouchant sur un extrait de modélisation d'IHM dite sensible au contexte.

A. Contexte et modélisation de la tâche

Le cas d'étude concerne la tâche « demander un cybercar » depuis un dispositif mobile. On suppose que l'utilisateur ne parle pas français et qu'il est dans la ville ; il utilise son PDA pour demander un cybercar. On va dans un premier temps exploiter CTTE (Mori et al., 2002) qui est un environnement de modélisation de tâches interactives basé sur CTT (ConcurTaskTrees)

(Paterno, 2000). Le modèle de tâches joue un rôle très important parce qu'il indique la logique des activités que l'application doit supporter ; chaque tâche représente une activité qui doit être effectuée pour réaliser un but. La Figure 16 montre comment la tâche de demande de cybercar se décompose. Selon ce modèle, pour demander un cybercar, il s'agit de communiquer avec le cybercar (on suppose que plusieurs possibilités existent à ce sujet : via un dispositif mobile ou une borne : l'utilisateur doit s'identifier, se localiser et aussi choisir quel type de service il souhaite. On suppose que le système permet deux types de service :

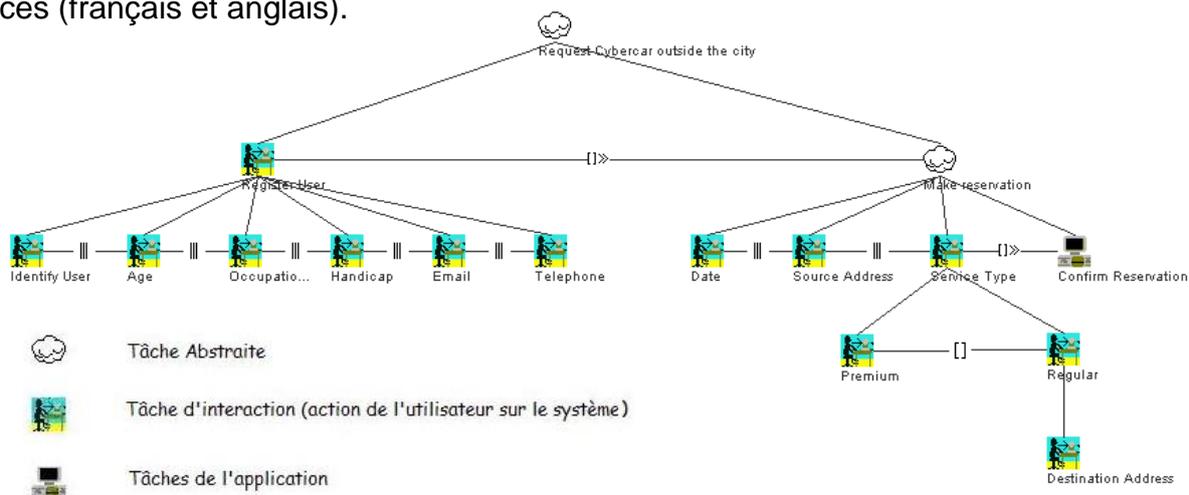
- *Régulier* : Ce service est le plus classique et le moins cher. L'utilisateur ici doit préciser sa destination. S'il y a d'autres usagers qui sont à proximité et qui vont dans la même direction, le cybercar s'arrêtera pour prendre ceux-ci.
- *Premium* : L'utilisateur aura son propre cybercar et le véhicule l'amènera à sa destination en utilisant (en principe) le chemin le plus court.

A partir des informations concernant l'utilisateur, on suppose que le cybercar le plus proche reçoit la demande ; s'il n'est pas disponible, il passe la demande à un autre cybercar. On voit sur la figure que le cybercar disponible le plus proche sera automatiquement sélectionné pour aller vers l'endroit où l'utilisateur se trouve.

B. Modélisation d'IHM sensibles au contexte à l'aide d'UsiXML

Pour développer un prototype d'une telle IHM sensible au contexte, le choix se porte sur UsiXML (User Interface Extensible Markup Language) (Webref7) ; en effet ce langage basé sur XML permet de décrire des IHM capables de considérer différents contextes à travers des différents niveaux des détails et d'abstraction. UsiXML consiste en un langage déclaratif qui capture l'essence d'une interface indépendamment des caractéristiques physiques de la plateforme. Ceci se fait à travers une description abstraite des éléments qui constituent l'interface en question. Ces éléments sont regroupés dans différents modèles (de l'utilisateur, de transformation, de tâches, de concepts, entre autres ; pour plus de détails, cf. (Webref9)).

Il est très important que l'utilisateur s'identifie pour que puisse être générée une IHM adaptée, selon le contexte correspondant. En utilisant UsiXML, un premier prototype très simplifié a été réalisé ; par manque de place dans l'article, on ne va décrire que la partie correspondant à la demande de cybercar dans le cœur de ville. La figure 17 montre comment l'interface simplifiée a été modélisée. Deux langues ont été choisies pour l'instant pour les interfaces (français et anglais).



Légende

- [] : (Choice) les deux tâches sont alternatives.
- >> : (Enabling) lorsque la tâche T1 est terminée, la tâche T2 commence à s'exécuter.
- []>> : (Enabling with info exchange) lorsque la tâche T1 est terminée, elle transmet des informations à la tâche T2 pour qu'elle commence à s'exécuter.

Figure 16. Tâche « Demander un cybercar dans le cœur de ville »

En étudiant le code en figure 17, on voit que la même interface est créée aisément pour les deux différentes langues (par exemple, on retrouve le même bouton appelé « annuler » en français et « cancel » en anglais). De cette même manière, le reste de l'IHM a été créé.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<uiModel xmlns="http://www.usixml.org"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.usixml.org/ http://www.usixml.org/spec/UsiXML ui_model.xsd"
  id="CyberVal3_29" name="CyberVal3"
  ....
<guiModel id="CyberVal3-gui_29" name="CyberVal3-gui"/>
  <cuiModel id="CyberVal3-cui_29" name="CyberVal3-cui">
    <window id="window_component_0" name="window_component_0"
      width="474" height="515">
      <gridBagBox id="grid_bag_box_1" name="grid_bag_box_1"
        gridHeight="25" gridWidth="23">
        <constraint gridx="7" gridy="2" gridwidth="6"
          gridheight="4" weightx="1.0" weighty="1.0"
          fill="both" insets="0,0,0,0">
          <imageComponent id="image_component_2"
            name="image_component_2" isVisible="true"
            isEnabled="true" textColor="#000000"/>
        </constraint>
        <constraint gridx="3" gridy="8" gridwidth="6"
          gridheight="1" weightx="1.0" weighty="1.0"
          fill="both" insets="0,0,0,0">
          <inputText id="input_text_component_3"
            name="input_text_component_3"
            ....
content="/uiModel/resourceModel/cioRef[@ciold='button_component_10']/resource/@content"
          defaultContent="Annuler" isVisible="true"
          isEnabled="true" textColor="#000000"/>
        </constraint>
        <constraint gridx="13" gridy="8" gridwidth="6"
          gridheight="1" weightx="1.0" weighty="1.0"
          fill="both" insets="0,0,0,0">
          <comboBox id="combobox_component_11"
            name="combobox_component_11" isVisible="true"
            isEnabled="true" textColor="#000000">
            <item id="item_19"
            ....
<cioRef ciold="button_component_10">
  <resource content="Annuler" contextId="CyberVal3-context-fr_FR_29"/>
  <resource content="Cancel" contextId="CyberVal3-context-en_US_29"/>
</cioRef>
</resourceModel>
</uiModel>

```

Création
de la fenêtre
principale

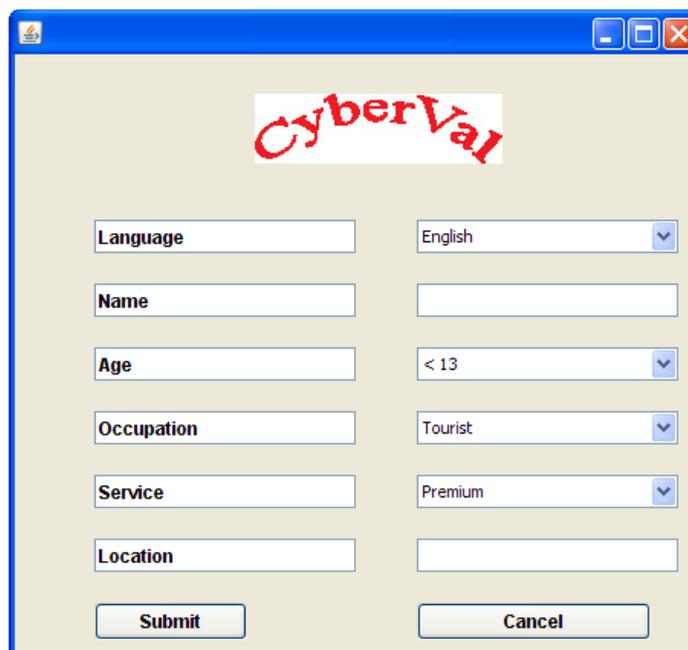
Création
du bouton
« annuler »

Deux langues pour le bouton « annuler »

Figure 17. Code UsiXML de la partie de l'IHM de demande de cybercar (avec possibilité de choix de langue par l'utilisateur)

Dans la figure 18, on distingue le résultat de l'interface simplifié. L'utilisateur choisit sa langue de préférence. Il indique son nom, son âge (par exemple, moins que 13 ans, entre 13-25, plus que 25). Il choisit entre différentes occupations (touriste, professionnel...). Il choisit aussi quel type de service il veut utiliser et l'endroit où il souhaite être récupéré par le cybercar. Ce sont les informations que l'usager doit remplir pour demander un cybercar (ex : Tâche « demander un cybercar dans le cœur de ville »). Le nom, l'âge, la langue et l'occupation sont quelques aspects qui détermineront l'affichage correspondant dans le dispositif utilisé par l'usager. La localisation et la priorité sont des informations qui détermineront quel cybercar se déplacera à destination de l'usager. On a choisi le nom CyberVal pour notre première prototype parce que c'est un système créé par l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et qu'on souhaite tester (simuler) notre système final au cœur de la ville de Valenciennes.

L'IHM visible en figure 18 a été générée à l'aide de GrafiXML (basé en UsiXML) qui est un outil pour développer des IHM pour différents plates-formes d'interaction. Notons que l'environnement de développement exploitant UsiXML offre aussi des plugins pour exporter le code UsiXML en XHTML, Java et XUL. En utilisant ces plugins on va pouvoir tester différentes versions de cette IHM sur des PDA, téléphones mobiles, PC, etc.



The image shows a screenshot of a web-based user interface for 'CyberVal'. The window has a blue title bar with standard minimize, maximize, and close buttons. The main content area has a light beige background. At the top center, the 'CyberVal' logo is displayed in a red, stylized font. Below the logo, there are two columns of form fields. The left column contains text input fields for 'Language', 'Name', 'Age', 'Occupation', 'Service', and 'Location'. The right column contains dropdown menus for 'English', '< 13', 'Tourist', and 'Premium'. At the bottom of the form, there are two buttons: 'Submit' and 'Cancel'.

Figure 18. Extrait du premier Prototype d'IHM

II.5 – Régulation des Transports Publics et interactions avec le système cybercars : « Proposition d'une approche de régulation »

Ce travail fait l'objet de la thèse d'Asma Melki.

Les avantages multiples des cybercars ont fait que son utilisation dans des milieux urbains s'avère très intéressante, en particulier en tant que complément aux autres modes de transport en vue d'une mobilité plus flexible.

Son intégration dans un contexte multimodal est en lui-même un challenge. Il faut en effet, décider de la façon de son déploiement, de la position des flottes dans l'espace urbain ainsi que sa gestion.

Notre objectif est d'intégrer les cybercars dans le système de régulation comme une stratégie d'exploitation supplémentaire pour palier aux défaillances des transports publics.

En effet, en se basant sur le modèle ACTIF intégrant les cybercars Fig.4, il est possible de relier les sous-domaines 4.4 intitulée « superviser et réguler et informer les voyageurs et 4.4 « Organiser les services partagés » pour envoyer un flux de données qui traduit l'appel à une stratégie d'exploitation externe à savoir « Demande d'action de régulation externe ». C'est au niveau de la sous-fonction 4.2.1.2 « Réguler les TP » qui est en étroite liaison avec 4.2.1.3 « Superviser les TP » dans le cadre du travail du Régulateur que ce dernier peut juger utile de faire appel à une aide externe pour résorber momentanément une perturbation survenue sur le réseau.

II.5.1 –Régulation d'un système de transport multimodal

La démarche d'exploitation d'un réseau de transport collectif débute par une phase de planification qui permettra à partir de plusieurs données théoriques (sur les conditions de circulation, l'estimation de la demande et les caractéristiques du réseau) d'élaborer des TM théoriques à diffuser dans les stations et sur lesquelles se basent le fonctionnement du réseau.

Des perturbations peuvent affecter le réseau sous forme d'incidents techniques ou personnels ou une forte variation de la demande, un processus de régulation est donc déclenché dans le but de résorber les perturbations et ramener le Tableau de marche perturbé au TM théorique dans un minimum de temps.

Afin de nous familiariser avec cette thématique récente et originale, nous avons effectué une recherche bibliographique riche dans son contenu et directions, nous donnons quelques références (Alessandrini, 2004), (Malone, 2001), (Parent, 1992, 2001, 2004), (Pickrell, 1993), (Pasquier, 2001), (Harms, 1998).

Avant d'appliquer un processus de régulation, une détermination de l'horizon spatio-temporel de la zone à réguler s'avère primordiale. Dans (Aloulou, 1999), une approche inspirée du principe de la régulation en terminus a été mise au point, afin d'étendre cette approche sur toute la ligne, ensuite, une analyse de la zone (arrêts, pôles d'échanges, nœuds de correspondance) est effectuée pour trouver les lignes concernées et les modes impliquées. L'avantage de cette méthode est de pouvoir traiter plusieurs perturbations à la fois et donc d'inclure plusieurs modes à la fois ce qui réduit considérablement le temps de calcul lors de l'optimisation. Cette zone peut correspondre à des stations de regroupement stratégique des cybercars ou à une distance assez proche et donc, de façon naturelle, ce mode sera intégré dans la boucle de régulation.

II.5.2 –Système multimodal intégrant les cybercars

Une fois la zone ciblée dans le module d'aide à la décision, la complexité majeure réside dans le fait de traiter un problème multicritère: il s'agit de coordonner deux opérations critiques qui sont respectivement la comparaison des alternatives et leur agrégation.

Le principe de notre approche consiste à appuyer le régulateur par la mise en place d'un système de Noria joignant l'endroit où une perturbation a survenue et le prochain nœud de réinjection dans le réseau multimodal. La perturbation détectée devrait être jugée suffisamment critique pour mettre en place ce système via un flux de données envoyé à l'organisme gérant les services partagés.

La mise en place d'un système de Noria est illustrée par la figure (19) suivante :



Figure 19. Illustration de la « Noria »

En effet, lorsqu'une perturbation est détectée, la zone de perturbation est cernée de façon à situer le prochain nœud de réinjection dans le réseau multimodal, le nœud de perturbation et la station de cybercars la plus proche qui va assurer le transfert des passagers.

II.5.3 –Evaluation par l'intégrale de Choquet

Les approches proposées pour atteindre un tel objectif sont basées sur les algorithmes évolutionnaires et la théorie des sous-ensembles et intégrales flous. En effet, ces théories scientifiques du domaine de l'automatique et de l'informatique industrielle ont fait leurs preuves par ailleurs, elles intègrent l'homme dans la boucle de la prise de décision, et elles contribuent à résoudre le problème posé et à améliorer la qualité du service rendu aux usagers des réseaux de transport urbain.

Notre choix de la logique floue est justifié par le fait que, dans les réseaux de transport, on dispose souvent d'un ensemble d'informations pris au sens d'un ensemble d'éléments en relation les uns avec les autres et interférant avec leur environnement. Les connaissances dont nous disposons sur ces systèmes sont parfois entachées d'incertitude et d'imprécision, ce qui perturbe le pilotage et la régulation de ces « systèmes ». De ce fait, il est très important de pouvoir modéliser et représenter ces informations imprécises. En outre, la réalisation d'un système d'aide à la décision pour la régulation du trafic de transport passe nécessairement par l'acquisition des connaissances du poste de régulation. La théorie des sous-ensembles flous a été proposée comme une théorie rationnelle de modélisation et de manipulation de la

connaissance incertaine, présentant un bon compromis entre la souplesse d'emploi et la puissance de représentation.

D'autre part, le choix des algorithmes évolutionnaires est dû à l'échec des méthodes de résolution exactes dans le traitement de la régulation. Ces algorithmes nous aident à trouver des solutions proches de l'optimum pour un problème d'optimisation NP-difficile, en un temps de calcul beaucoup moins important que celui nécessaire à la mise en œuvre des autres méthodes dites exactes.

II.5.4 – L'intégrale de Choquet

L'Intégrale de Choquet est un opérateur d'agrégation de la famille des intégrales floues qui doit tenir compte de l'importance de chaque critère à part mais aussi de l'interaction entre les critères (Grabish, 1996).

Définition 1 : Une mesure floue sur N (ensemble de critères de cardinal n) est une fonction $\mu: P(N) \rightarrow [0,1]$, vérifiant les propriétés suivantes :

1. $\mu(\emptyset) = 0$
2. $A \subset B \subset N \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$

$\mu(A)$: représente l'importance ou le pouvoir de la coalition (groupe de critères) A pour le problème d'agrégation en question. Une mesure floue sur N (ensemble de critères de cardinal n) nécessite $2^n - 2$ coefficients pour être définie, devant vérifier les contraintes de monotonie.

Définition 2 : Soit μ une mesure floue sur N . L'intégrale de Choquet de a_1, \dots, a_n par rapport à μ est définie par :

$$C_\mu(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n (a_{(i)} - a_{(i-1)}) \mu(\{(i), \dots, (n)\}),$$

où (\cdot) est une permutation telle que $a_{(0)} = 0$ et $a_{(1)} \leq \dots \leq a_{(n)}$, a_i est le score du critère i .

L'intégrale de Choquet est idempotente, continue, monotone et stable par le changement d'échelle linéaire.

La validation d'une action de décision reste toujours la tâche du régulateur humain qui apporte son propre jugement en tenant compte des évaluations proposées, il pourra donc choisir sa décision en fonction de la satisfaction d'un critère ou une satisfaction globale.

Le principe de la régulation basée sur l'agrégation par intégrale de Choquet est comme suit (Ould Sidi, 2006).

II.5.5 – Algorithme évolutionnaire de régulation : agrégation par intégrale de Choquet

Etape 0 : Initialisation

Générer population initiale P à la génération $g=0$.

Evaluer les individus de la population initiale en utilisant l'intégrale de Choquet

Etape 1 : Sélection

Sélectionner les meilleurs individus de P à la génération g pour construire population intermédiaire P^* .

Etape 2 : Croisement

Choisir aléatoirement deux parents de P^* .

Effectuer un croisement avec une probabilité de crois.

Mettre les enfants et les parents non croisés dans P .

Etape 3 : Mutation

Effectuer une mutation des individus de P avec une probabilité de p_{mut} .

Etape 4 : Evaluation

Calculer pour chaque individu de P, selon la solution qui lui est associée :
 le Tableau de Marche Régulé résultant,
 la charge résultante des véhicules au départ de chaque arrêt.

Calculer le coût de chaque individu et sauvegarder les n meilleurs.

Etape 5 : Comparaison

Comparaison partielle, à la génération g, entre P et P* pour choisir les meilleurs individus et les mettre dans P.

Etape 6 : Test Arrêt

Si (le nombre spécifié de générations est atteint) ou si (un ordre d'arrêt a été imposé), terminer l'algorithme et donner les solutions atteintes.

Sinon, passer à la génération g+1 et répéter à partir de Etape 1.

II.5.6 – Algorithme évolutionnaire de régulation.

Les critères d'évaluation d'un système multimodal

Nous désignons l'ensemble des stations considérées par S^H et celui des véhicules par V^H .

Notons S_k^r la kème station de la ligne r. De même, V_i^l représente le ième véhicule de la ligne

l. Les décisions de régulation concernent alors tout véhicule $V_i^l \in V^H$ et toute station $S_k^r \in S^H$.

Dans la suite, nous présentons les formulations mathématiques des critères d'évaluations correspondantes aux modes (Bus, tramway).

La ponctualité [RT] :

$$RT = \sum_{V_i^m \in V^H} \sum_{S_j^m \in S^H} a_{ij}^m \times C_{ij}^m \times (td_{ij}^m - td_{ij}^m)$$

La régularité [AT] :

$$AT = \sum_{S_j^l \in S^H} \sum_{V_i^l \in V^H} (a_{ij}^l \times \sum_{S_k^l > S_j^l} \text{attente}(ta_{ij}^l - td_{ij}^l, S_j^l, S_k^l)) \quad \text{avec } \forall V_i^l \in V^H \quad V_i^l = \text{Veh}^+(V_i^l, S_j^l, S_k^l)$$

La correspondance [TT] :

$$TT = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{V_{i'}^l \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} y_{ii'}^l \times \omega_{ii'}^l \times (td_{i'j}^l - ta_{ij}^l)$$

Les kilomètres commerciaux [KM] :

$$KM = \sum_{V_i^l \in V^H} \sum_{S_j^l \in S^H} a_{ij}^l \times a_{ij}^l \times d_i^l(S_j^l, S_j^l) \quad \text{où } d_i^l(S_j^l, S_j^l) \text{ est la distance parcourue par le}$$

véhicule V_i^l entre ces deux stations successives de la même ligne.

Qualité de service [QS] :

$$QS = \max_{V_i^l \in V^H} (n_change(V_i^l), n_trans(V_i^l), n_stat(V_i^l))$$

où $n_change(V_i^l)$, $n_trans(V_i^l)$, $n_stat(V_i^l)$ sont respectivement les nombres d'échanges de véhicules et de conducteurs, de transbordements et de stations non desservies.

II.5.7 – Les critères d'évaluation d'un système Noria

Ces critères sont :

- Kilomètres commerciaux [KM] : ce critère présente la distance parcourue par la flotte de cybercars afin d'assurer les navettes.
- Temps d'attente des voyageurs [TA] : l'objectif d'un système Noria est de réduire le temps d'attente des voyageurs de l'instant où la perturbation est survenue est l'instant de prise en charge de ces voyageurs pour continuer leur parcours.
- Coût environnemental [CE]: Ce critère traduit en effet la prise de conscience des autorités de transport de l'effet négatif de la densité du trafic, les cybercars eux permettent de réduire la consommation d'énergie en adéquation avec le milieu urbain.
- Qualité de service [QS] : le confort des passagers est traduit entre autre par la prise en charge des personnes à mobilité réduite, un facteur est attribué pour favoriser cette catégorie dans les déplacements.

II.5.8 – Résultats de simulation

Scénario : Considérons les lignes : 16 sens 1, ligne 11 sens 1, ligne 17 sens 1 et la ligne tramway sens 1. Nous supposons qu'à 12:44, le véhicule V_{11}^{16} a un retard de 11 minutes à cause d'un problème technique, ainsi il arrivera à la station Gare à 13:07 au lieu de 12:56. Ce véhicule doit assurer trois correspondances à ce nœud de correspondance. La première correspondance est prévue à 13:05 vers le bus V_{20}^{11} de la ligne 11. La deuxième correspondance est prévue à 13:06 vers le bus V_{21}^{17} de la ligne 17 et la dernière vers le tramway V_{62}^T à 13:04. Il est clair que, suite à cet incident si, on ne fait rien, les trois correspondances n'auront pas lieu, obligeant ainsi les voyageurs à attendre plus longtemps que prévu.

Détermination de la zone de régulation

La zone de régulation obtenue pour cet exemple implique 8 stations et 4 véhicules de la ligne 16, 9 arrêts et 5 véhicules de la ligne 17, 16 stations et 4 véhicules de la ligne 11, 6 stations et 3 véhicules de la ligne tramway.

	V_{10}^{16}	V_{11}^{16}	V_{12}^{16}	V_{13}^{16}
S_{18}^{16}	1225	1244	1330	1411
S_{19}^{16}	1227	1246	1332	1413
S_{20}^{16}	1229	1248	1334	1415
S_{21}^{16}	1230	1249	1335	1416
S_{22}^{16}	1232	1251	1337	1418
S_{23}^{16}	1234	1252	1338	1419
S_{24}^{16}	1236	1254	1340	1421
S_{25}^{16}	1238	1256	1342	1423

	V_{10}^{16}	V_{11}^{16}	V_{12}^{16}	V_{13}^{16}
S_{18}^{16}	0	0	0	0
S_{19}^{16}	0	0	2	0
S_{20}^{16}	0	0	0	0
S_{21}^{16}	0	0	0	0
S_{22}^{16}	0	0	2	0
S_{23}^{16}	0	0	1	0
S_{24}^{16}	0	0	0	0
S_{25}^{16}	0	0	0	0

	V_{19}^{17}	V_{20}^{17}	V_{21}^{17}	V_{22}^{17}	V_{23}^{17}
S_0^{17}	1226	1246	1306	1326	1346
S_1^{17}	1231	1251	1311	1331	1451
S_2^{17}	1232	1252	1312	1332	1452
S_3^{17}	1235	1255	1315	1335	1455
S_4^{17}	1236	1256	1316	1336	1456
S_5^{17}	1238	1258	1318	1338	1458
S_6^{17}	1240	1300	1320	1340	1500
S_7^{17}	1241	1301	1321	1341	1501
S_8^{17}	1243	1303	1323	1343	1503

	V_{61}^T	V_{62}^T	V_{63}^T
S_0^T	1251	1257	1303
S_1^T	1252	1258	1304
S_2^T	1254	1300	1306
S_3^T	1255	1301	1307
S_4^T	1257	1303	1309
S_5^T	1258	1304	1310

	V_{19}^{17}	V_{20}^{17}	V_{21}^{17}	V_{22}^{17}	V_{23}^{17}
S_0^{17}	0	0	0	0	0
S_1^{17}	0	0	2	0	0
S_2^{17}	0	1	0	3	0
S_3^{17}	0	0	0	0	0
S_4^{17}	0	0	1	0	0
S_5^{17}	0	0	0	1	0
S_6^{17}	0	2	0	0	0
S_7^{17}	0	0	0	0	0
S_8^{17}	0	0	0	0	0

	V_{61}^T	V_{62}^T	V_{63}^T
S_0^T	0	0	0
S_1^T	0	2	0
S_2^T	0	1	0
S_3^T	0	0	0
S_4^T	0	0	0
S_5^T	0	0	0

	V_{19}^{11}	V_{20}^{11}	V_{21}^{11}	V_{22}^{11}
S_3^{11}	1224	1244	1304	1324
S_4^{11}	1225	1245	1305	1325

S_5^{11}	1228	1248	1308	1328
S_6^{11}	1230	1250	1310	1330
S_7^{11}	1231	1251	1311	1331
S_8^{11}	1233	1253	1313	1333
S_9^{11}	1234	1254	1314	1334
S_{10}^{11}	1235	1255	1315	1335
S_{11}^{11}	1237	1257	1317	1337
S_{12}^{11}	1238	1258	1318	1338
S_{13}^{11}	1240	1300	1320	1340
S_{14}^{11}	1241	1301	1321	1341
S_{15}^{11}	1242	1302	1322	1342
S_{16}^{11}	1243	1303	1323	1343
S_{17}^{11}	1244	1304	1324	1344
S_{18}^{11}	1245	1305	1325	1345

	V_{19}^{11}	V_{20}^{11}	V_{21}^{11}	V_{22}^{11}
S_3^{11}	0	0	0	0
S_4^{11}	0	1	0	0
S_5^{11}	0	0	0	0
S_6^{11}	0	0	3	0
S_7^{11}	0	2	0	0
S_8^{11}	0	0	0	0
S_9^{11}	0	0	0	0
S_{10}^{11}	0	0	0	0
S_{11}^{11}	0	1	0	0
S_{12}^{11}	0	0	1	0
S_{13}^{11}	0	0	0	0
S_{14}^{11}	0	0	0	0
S_{15}^{11}	0	0	0	0
S_{16}^{11}	0	0	1	0
S_{17}^{11}	0	0	0	0
S_{18}^{11}	0	0	0	0

« le haut le pied hors ligne » et la « régulation en ligne » sont réalisables, d'après le module de génération de décisions. Nous appliquons « le haut le pied hors ligne » entre la station courante du véhicule perturbé et le nœud de correspondance touché par la perturbation.

Pour trouver la meilleure solution de type « régulation en ligne », nous avons essayé l'approche agrégative par Choquet.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,27	1	0	0,75	0,3	0,44
REL	0,22	0,86	0,14	1	1	0,61

Nous avons positionné un système Noria entre l'endroit de perturbation supposé du véhicule V_{11}^{16} et le prochain nœud de correspondance et nous avons ensuite évalué cette solution par rapport au « Haut le pied hors ligne et régulation en ligne », SN : désigne Système Noria.

	$\mu(AT)$	$\mu(TT)$	$\mu(RT)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	Score global
HLP	0,27	1	0	0,75	0,3	0,44
REL	0,22	0,86	0,14	1	1	0,61
		$\mu(TA)$	$\mu(CE)$	$\mu(KM)$	$\mu(QS)$	
SN		0,8	1	0,62	0,86	0,74

À travers cet exemple, on constate que l'introduction d'un système Noria peut considérablement améliorer le service fourni aux voyageurs en cas de perturbation touchant plusieurs lignes simultanément. Les perspectives de nos recherches consistent à affiner les critères d'évaluation et étudier profondément l'impact de la mise en place du système Noria au cours du temps nécessaire à résorber la perturbation. Également, la mise en place des stations cybercars doit être stratégiquement fiable pour permettre une utilisation efficace en temps réel.

II.6 – Plateforme expérimentale

Par analogie avec un réseau de transport PRT, le support expérimental du projet est la cellule flexible (FMS) de l'AIP de Valenciennes (figure 20)



Figure 20. FMS AIP-PRIMECA

Sa topologie est représentée sur la figure 21.

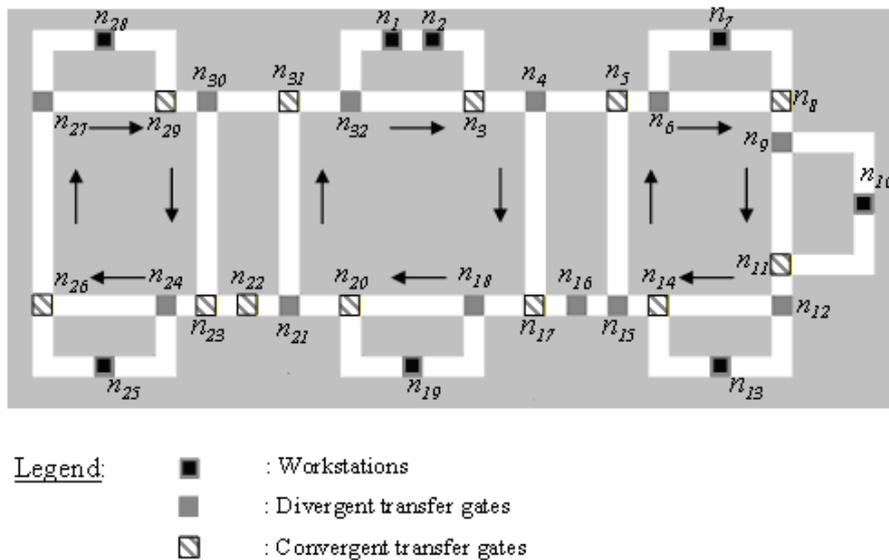


Figure 21. Description du FMS

Trois types d'équipement ont été utilisés:

- Un système de convoyage Basé sur la technologie Montrac (Webref4) ce système de type monorail utilise des navettes autopropulsées (équivalent à des PRT) pour transporter des produits (usagers dans le cas des PRT) sur des rails (figure 22) ;

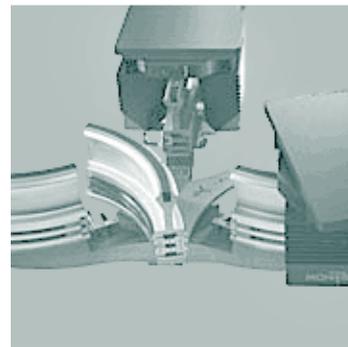
- L'instrumentation des nœuds, (figure 23) Pour chaque nœud, plusieurs éléments sont distingués :
 - o un « contrôleur d'aiguillage » qui assure la commande de l'aiguillage et permet d'éviter les collisions ;
 - o un DS contenant P_{nc}, t_{nc} , les deux variables exigées par le PL;
 - o deux systèmes de transmission de données (Ethernet pour les communications de nœud-à-nœud et IrDA pour la communication de nœud-à-navette (système esb-101 de Clarinetsys (Webref5); et
 - o un système de traitement des données, supporté par un contrôleur Wago 750-841 (Webref6), partagé par les VL et les PL.
- L'instrumentation des navettes Cette instrumentation repose sur un système de traitement de données supporté par un PDA (Personal Digital Assistant incluant une communication IrDA) (figure 24). Avec cet équipement, chaque navette devient un agent actif autonome capable de prendre des décisions de routage.

Pour la communication nœud-navette, nous avons retenu la technologie infrarouge pour :

- sa faible consommation énergétique pour un débit de transfert élevé (plus de 100 Kb/sec.),
- sa courte portée, autorisant la localisation géographique du nœud, et
- son mode de transmission optique, qui est naturellement robuste au bruit électromagnétique.



Navette sur le monorail



Système de transfert

Figure 22. Système de convoyage Montrac

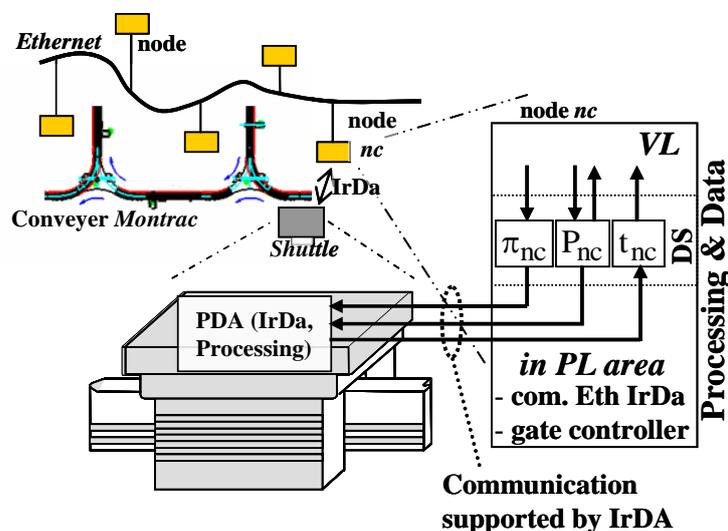


Figure 23. Instrumentation sur un nœud

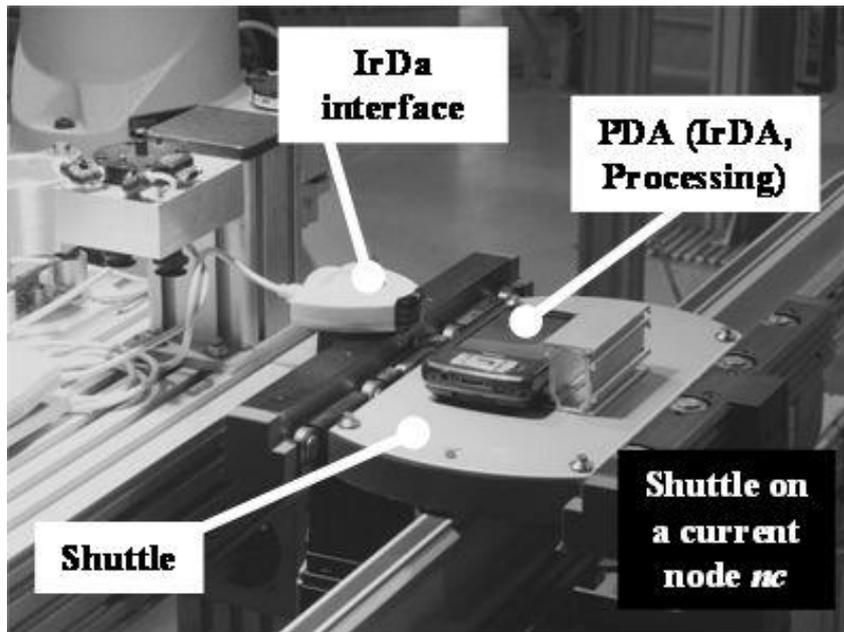


Figure 24. Instrumentation sur une navette

III – Production scientifique – Travaux en cours/Perspectives

III.1 – Production scientifique

Publications

- Berger T., Sallez Y., Tahon C., (2006). "Bio-inspired approach for autonomous routing in FMS". In book "Manufacturing the Future: Concepts, Technologies & Visions". pp 101–124, edited by V. Kordic, A. Lazinica and M. Merdan, A.R.S. Verlag.
- Borangu T., Ivanescu N., Raileanu S., Rosu S., (2008). "Vision-guided part feeding in a Holonic Manufacturing System with networked robots". RAAD 08, Ancona, Italy, September 15-17.
- Daoud R., El Dakoury M.A., Sallez Y. (2007). "Burst Communication for Traffic Control in Light Urban Areas". International Workshop on Logistics and Transportation 2007, IEEE LT, Sousse-Tunis, November.
- Daoud R.M., Amer H.H., Elsayed H.M., El Soudani M., Sallez Y. (2006). "Wireless Vehicle Communication for Traffic Control in Urban Areas". 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON, Paris-France, November.
- Melki A., Hammadi S. (2008). "Intelligent Mobility toward a combined Public Transportation/Intelligent Urban Vehicles transportation system". IEEE IV'08.
- Melki A., Tahon C., Hammadi S. (2007). "Strategic challenges and constraints of the integration of cybercar fleet in a multimodal transportation network". IEEE IV'07.
- Melki A., Dumitrescu F., Berger T., Sallez Y. et Hammadi S., (2007) "Interaction des transports publics et des cybercars dans un contexte urbain", LT 2007, Sousse, Tunisie, 18-20 Novembre.
- Melki A., Tahon C., Hammadi S. (2006). "Hierarchic decision support system approach with evaluation of decision classes of a traffic transportation network". IEEE-SMC'2006.
- Melki A., Hammadi S., Sallez Y., Berger T., Tahon C. (à paraître). Advanced approach for the public transportation regulation system based on Cybercars. RAIRO - Operations Research, accepté en 2009.
- Raileanu S., Sallez Y., Berger T., Tahon C., Trentesaux D. (2009). Personal Rapid Transit in Open Control framework. Int. Conf. On Computer & Industrial Engineering, CIE39, DOI: 10.1109/ICCIE.2009.5223753, Troyes, pp. 1016-1021, juillet, ISBN 978-1-4244-4136-5.
- Raileanu S., Sallez Y., Berger T., Borangiu T., Trentesaux D. (2009). Open-control paradigm: holonic implementation. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Montréal, Canada, mai.
- Raileanu S., Berger T., Sallez Y., Borangiu T., Trentesaux D. (2009). The open-control concept in a holonic manufacturing system. 18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brasov, Romania, mai, ISBN 978-606-521-315-9.
- Sallez Y., Berger T., Trentesaux D. (à paraître). "A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS". Computers in Industry, acceptée en mai 2008.

Serrate O., Berger T., Tabary D., Kolski C., (2008) "Human centred interaction techniques for a self-organized cybercar system", EAM'08, 27th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, 11-13 June, 2008 Delft, The Netherlands.

Serrate O., Tabary D., Berger T., Kolski C., (2008) " Techniques d'interaction centrées usagers en vue de nouveaux systèmes auto-organisés constitués de cybercars ", CIFA08, Bucarest, Roumanie, 3-5 Septembre, 2008.

Trentesaux D., Berger T., Sallez Y. (2008). Product & resource driven control of allocation and routing process in FMS. MOSIM'08, Paris, France, 31 mars-2 avril.

Organisation de session

« Véhicules intelligents et optimisation » pour le workshop international Logistique & Transport " LT' 2007, du 18 au 20 novembre 2007 à Sousse, Tunisie.

III.2 – Travaux en cours/Perspectives

Routage

Actuellement le routage dynamique des PRT se base sur une approche stigmergique. Il s'agit maintenant de passer du travail théorique et de simulation à la mise en œuvre sur la plate-forme expérimentale.

Architecture Holonique appliquée au transport

Cette partie, initiée récemment, se poursuivra en transposant les concepts des systèmes holoniques au cas particulier du système de transport PRT.

Interface Homme Machine

L'aspect plus particulièrement traité concerne les interactions entre cybercars et usagers, à l'aide d'IHM sensibles au contexte ; il s'agit en effet de prendre en compte les utilisateurs, l'environnement et les dispositifs utilisés lors des interactions avec ces véhicules (même si en fait, ces interactions incluent celles entre usagers et cybercars, mais aussi entre cybercars d'une part, entre cybercars et le système de transport au sens large d'autre part). Sous l'angle de l'utilisateur, le système envisagé vise à intégrer différents types d'utilisateur (enfants, adultes, personnes possédant des handicaps sensorielles...), aussi bien en dehors qu'à l'intérieur de la ville. Un premier prototype simplifié, écrit en UsiXML, a été développé.

En termes de perspectives de recherche, outre le fait d'aller plus en profondeur dans le développement et le test du prototype, il s'agit d'envisager d'autres types d'interactions homme-machine (ex. vocaux et sonores) restant sensibles au contexte de l'utilisateur. Des liens avec les autres moyens de transports publics devront aussi être envisagés (ex : informations liées aux autres transports considérées et/ou fournies par le cybercar à l'utilisateur). La validation des concepts d'interactions « sensible au contexte » se fera au moyen de protocoles expérimentaux sur la plateforme en cours de développement.

Régulation

Dans l'immédiat, les perspectives à envisager pour ces travaux sont l'étude plus approfondie des différents cas courants de perturbations pouvant toucher le réseau de transport, et l'amélioration de la réponse du système Noria à la requête de régulation suggérée par le régulateur des services de transports publics. Les travaux futurs pourront s'orienter vers l'optimisation dans le dimensionnement des flottes de cybercars et leurs emplacements dans le milieu urbain afin de réaliser l'adéquation entre offre et demande tout en préservant une qualité de service satisfaisante.

Plateforme expérimentale

Notre approche de pilotage stimergique peut être implémentée de différentes façons entre deux solutions extrêmes : une unité de traitement centrale pour tous les nœuds, et une unité de traitement pour chaque nœud.

Dans une première approche, nous avons opté pour une solution intermédiaire dans laquelle plusieurs nœuds sont supportés par une unité de traitement (figure 25). L'unité de traitement est un contrôleur Wago 750-841, qui supporte des programmes, tâches et données (VL, DS). Par exemple, le contrôleur Wago 4 en zone w4 supporte les nœuds n28, n29 et n30. Le principe d'implémentation des communications entre nœuds exploite des technologies industrielles standards (Tcp/Ip, ModbusTCP, EtherNet/Industrial Protocol). La figure 26 décrit l'architecture de communication globale et détaille la zone W4. Le nœud 29 est un aiguillage convergent et ne nécessite pas de dispositif esb-101.

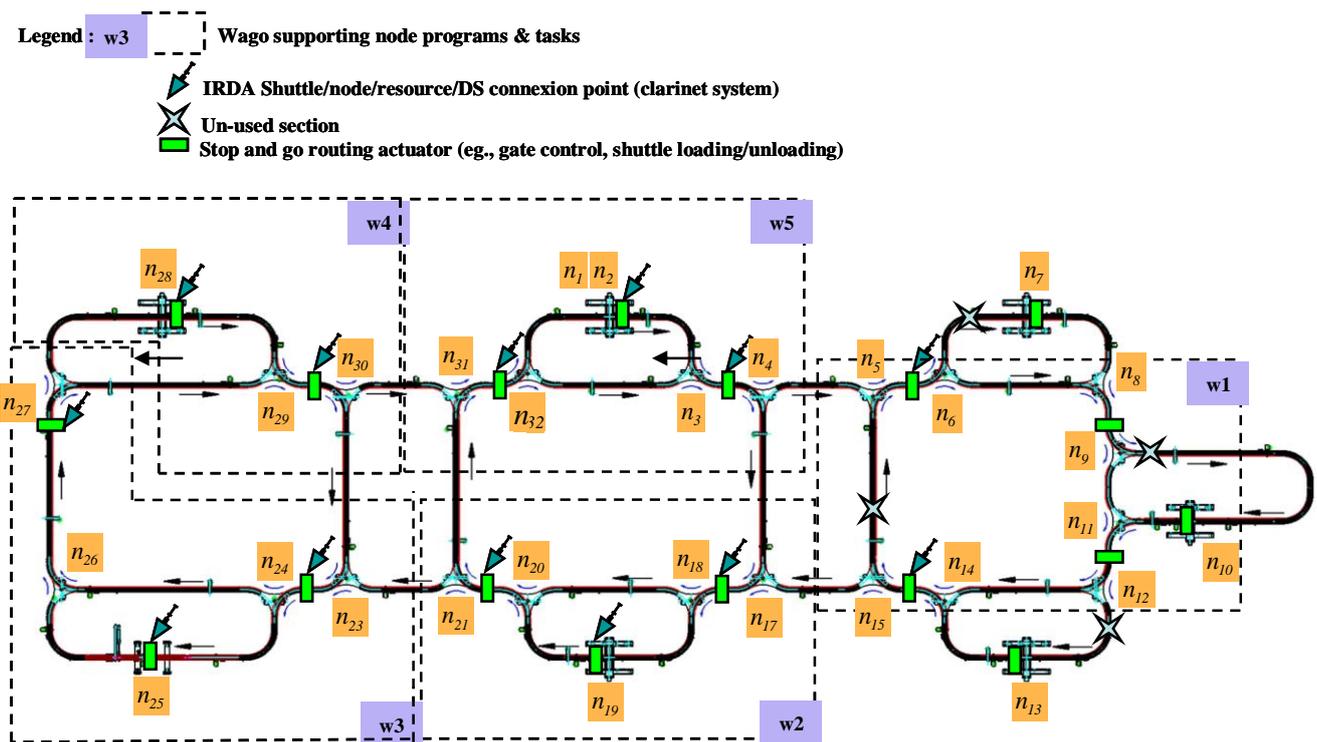


Figure 25. Architecture physique et logique de la cellule AIP-FMS cell.

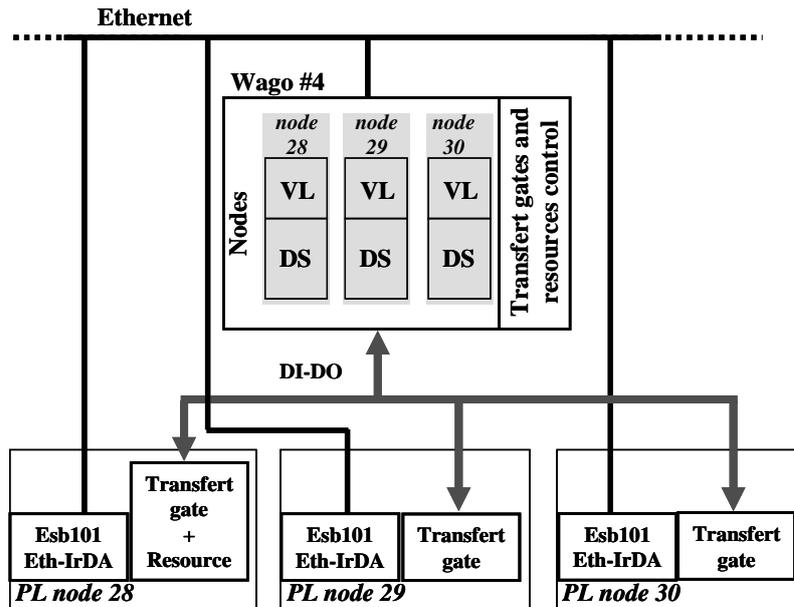


Figure 26. Détails de mise en œuvre de la zone w4

Après des tests préliminaires qui ont été concluant en laboratoire, le déploiement de la plateforme sur la cellule de l'Aip a été initié et se poursuit.

Références bibliographiques

- Alessandrini A., Filippi F, (2004). "Ex-ante Evaluation of Nine Cybernetic Transport Systems". IEEE Intelligent Transportation Conference. Washington, D.C., USA, October 3-6.
- Aloulou A., (1999). "Application des algorithmes génétiques la régulation du trafic des bus". Rapport de DEA en Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille, juin.
- Brückner S., (2000). "Return from the Ant synthetic ecosystems for manufacturing control". Thesis Humboldt-University of Berlin, June.
- Calvary G., Coutaz J., Thevenin D., Limbourg Q., Souchon N., Bouillon L., Vanderdonckt J., (2002). "Plasticity of User Interfaces: A revised Reference Framework". In Proceedings of TAMODIA, Bucharest, Romania.
- Chirn J-L., Duncan C. McFarlane D. C., (2000). "Application of the Holonic Component-Based Approach to the Control of a Robot Assembly Cell". Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, San Fransisco, April.
- Coutaz J., Balme L., Alvaro X., Calvary G., Demeure A., Sottet J.-S., (2007). "An MDE-SOA Approach to Support Plastic User Interfaces in Ambient Spaces". In Proceedings HCI International Volume 6, 63-72.
- Dey A. K., Salber D., Abowd G. D., (2001). "A conceptual framework and a toolkit for supporting the rapid prototyping of context-aware applications". Human Computer Interaction, vol. 16, no. 2-4, pages 97-166.

- Dey A. K., Abowd G. D., (2000). "Providing architectural support for building context-aware applications". Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology.
- Dorigo M, Stützle T., (2004). "Ant Colony Optimization". The MIT Press.
- Grabisch M., (1996). "The representation of importance and interaction of features by fuzzy measures". Pattern Recognition Letters 17 567-575.
- Hadeli T, Valckenaers P, Kollingbaum M, Van Brussel H., (2004). "Multi-agent coordination and control using stigmergy". Computers in industry, 53:75-96.
- Harms S., B. Truffer B., (1998). "The emergence of a nation wide carsharing co-operative in Switzerland: A case study for the project strategic Niche Management as a tool for transition to a Sustainable Transportation System". EAWAG, Switzerland, March.
- Jesty P., (2004). "Why do you need an ITS Architecture? ". ITS in Europe, Congress BUDAPEST, May.
- Köstler A., (1990). "The Ghost in the Machine". ARKANA S.
- Leita P., Restivo F., (2006). "ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control" Computers in Industry 57, 121–130.
- Malone K.M., Van der Wiel J.W., Saugy B.A., (2001). "Cybernetic Transport Systems: Lessons to be learned from User Needs Analysis and Field Experience".
- Melki A., Dumitrescu F., Berger T., Sallez Y., Hammadi S., (2007). "Interactions des transports publics et des cybercars dans un contexte urbain". In Proceedings of Workshop International : Logistique & Transport 07, Sousse, Tunisia.
- Mori G., Paterno F., Santoro C., (2002). "CTTE : Support for Developing and Analyzing Task Models for Interactive System Design". IEEE Trans. Softw. Eng. 28, 8 (Aug.), 797-813.
- Nakanishi Y. J., (2004). "Introduction to ITS". Economic Impacts of Intelligent Transportation Systems: Innovations and Case Studies. Research in Transportation Economics, Volume 8, 3–16.
- Ould Sidi MM., (2006). "Contribution l'amélioration des systèmes d'aide la décision pour la régulation du trafic dans les réseaux de transport collectif". Thèse à l'école centrale de Lille.
- Parent M., (2004). "Automated Urban Vehicles: State of the Art and future Directions", IEEE 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Kunming, China. Systems Conference. Washington, D.C., USA, October 3-6.
- Parent M., (2004). "Cybercars : a Solution for Urban Transport ? ". CODATU Conference. Bucharest. April 22-24.
- Parent M., De la Fortelle A., (2001). "Cybercars: Past, present and future of the Technology". Projet IMARA – INRIA.
- Parent M., Texier P.-Y., (1992). "De la voiture publique au PRT- Le programme DEDALE". In Proc. Communication on Transport Public Urbain, Paris, Dec.

- Parunak H. V. D., Brueckner S., Sauter J., (2001). "ERIM's Approach to Fine-Grained Agents". In: Proceedings of the NASA/JPL WRAC'2001, Greenbelt, MD, Sept.
- Pasquier M., Quek C., Tan B. T., Chee S., (2001). "Opportunistic planning for a fleet of transportation robots". In Proc IEEE, IEEJ, JSAI in Int. Conf. on Volume(issue), pp. 668-672.
- Paterno F., (2000). "Model based design and evaluation of interactive applications". Springer-Verlag, London.
- Peeters P, Van Brussel H, Valckenaers P, Wyns J, Bongaerts L, Heikkilä T, (1999). "Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops". In: Proceedings of IWES'99, Kobe, Japan, Dec.
- Pickrell M., (1993). "Enhancements to Travel Demand Models for ITS and HOV Impact Assessment". Report for US Department of Energy, under DOE Idaho, Field Office, IEEE AES Systems Magazine, November.
- Pietri P., (2005). "SETEC its, AQL - Architecture et formation du projet ACTIF 2". Document de présentation DF4 « Exploiter les transports publics ». Version : 1.0 - Date création : 07/01/05.
- Shaheen S., Sperling D., Wagner C., (2000). "A Short History of Carsharing in the 90's". Carsharing 2000 SUSTAINABLE TRANSPORT'S MISSING LINK. Journal of The Commons, January.
- Theraulaz G., Bonabeau E., (1999). "A brief history of stigmergy". Journal of Artificial Life, Vol. 5, 2:97-116.
- Thevenin D., (2001). "Adaptation en Interaction Homme-Machine : le cas de la plasticité". Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.
- Thevenin D., Coutaz J., (1999). "Plasticity of User Interfaces: Framework and Research Agenda". In Proceedings of IFIP 13th International Conference on Human-Computer Interaction, Interact'99, Edinburgh, United Kingdom, 110-117.
- Trentesaux D., Berger T. et Sallez Y., (2008). "Product & resource driven control of allocation and routing processes in FMS", MOSIM08, Paris, France, 31 Mars au 2 Avril.
- Trentesaux D., (2007). "Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ? ". Journal Européen des Systèmes Automatisés, Lavoisier, ISSN 1269-6935, vol. 41, n°9-10, pp. 1165-1202.
- Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P., (1998). "Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA". Computers In Industry, special issue on intelligent manufacturing systems, Vol. 37, No. 3, pp. 255 - 276.

Webref1, <http://www.frame-online.net/>

Webref2, <http://www.its-actif.org/INTRANET/Fr/index.htm>

Webref3, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>

Webref4, <http://www.montech.com>

Webref5, <http://www.clarinetsys.com>

Webref6, <http://www.wago.com>

Webref7, <http://www.usixml.org/>

Webref8, http://fr.wikipedia.org/wiki/Interface_homme-machine

Webref9, <http://www.usixml.org/index.php?mod=pages&id=15>

Wilensky U., (1999). <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL.

Zhang Q. S., Wu J. P., Yang D. Q., (2002). "Intelligent vehicle location & navigation system and its application". Bei Jing: Science Press.