

## Modélisation des systèmes de gestion de transport routier: négociation, planification et coopération.

## Designing Management Systems of Road Transport : Negotiation, Planning and Cooperation

**Abdelaziz Elfazziki**

*Département Informatique Faculté des Sciences Semlalia Université Cadi Ayyad  
Boulevard Pr. My. Abdellah BP. 2390 Marrakech Maroc a.elfazziki@ucam.ac.ma*

**Nejeoui Abderrazzak**

*Département Informatique Faculté des Sciences Semlalia Université Cadi Ayyad  
Boulevard Pr. My. Abdellah BP. 2390 Marrakech Maroc a.nejeoui@ucam.ac.ma*

**Mhamed Sadgal**

*Département Informatique Faculté des Sciences Semlalia Université Cadi Ayyad  
Boulevard Pr. My. Abdellah BP. 2390 Marrakech Maroc m.sadgal@ucam.ac.ma*

### **Résumé**

Dans ce papier, nous proposons l'utilisation conjointe d'une infrastructure multi-agents et des heuristiques de la recherche opérationnelle pour la modélisation des Systèmes de Gestion de Transport Routier (SGTR). Notre apport se situe à trois niveaux. Le premier concerne la modélisation d'un SGTR par un système multi-agents et la modélisation des agents par le langage AUML. Le second concerne la génération des plans initiaux sur la base d'une approche coopérative. Le troisième décrit l'implémentation des différentes heuristiques adoptées et qui influencent la décision des agents dans la structuration et la planification de leurs tâches. En dernier lieu, nous abordons une brève description de l'implémentation du système et nous discutons des résultats expérimentaux qui montrent l'influence des différentes techniques et heuristiques sur le comportement d'un SGTR.

### **Abstract**

In this paper, we propose the joint use of a multi-agents infrastructure and the operational research heuristics to model the Management Systems of Road Transport (MSRT). Our contribution consists in three levels. The first concerns the modeling of MSRT by a multi-agents system and modeling agents by AUML language. The second is interested in the generation of initial plans basing on a cooperative approach. The third describes the implementation of different heuristics adopted which influence the agents' decision in structuring and planning of their tasks. In the last, we present a short description of the system implementation and we discuss the experimental results which show the influence of the various techniques and heuristics on the behavior of a MSRT.

### **Mots-clés**

*Système Multi-Agent, Négociation, coopération, heuristique, AUML*

### **Keywords**

*Multi-agent System, Negotiation, Cooperation, Heuristic, AUML*

## 1. Introduction

La planification des tâches dans les Systèmes de Gestion de Transport Routier (SGTR) est un problème qui peut être considéré comme dynamique, dans la mesure où les ordres ne sont pas tous connus à l'avance. Les compagnies peuvent recevoir de nouveaux ordres de manière asynchrone et dynamique et doivent les inclure dans leur processus de planification. De plus, l'aspect dynamique est induit par les changements que peuvent subir les ordres. La taille réelle d'un ordre, par exemple, peut être corrigée au moment où le véhicule est sur le lieu du ramassage. Les véhicules peuvent avoir du retard, d'autres problèmes imprévus, comme les pannes ou les accidents qui peuvent rendre les véhicules indisponibles temporairement.

Dans ce travail, nous proposons un Système Multi-Agent pour gérer les problèmes de planification des tâches liées au transport routier des marchandises. Dans notre approche, nous visons principalement les objectifs suivants :

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la modélisation d'un SGTR en utilisant une infrastructure multi-agents, en particulier des agents spécialisés, tout en déployant les techniques de coopération (Jensen et al., 2003), négociation (Kraus, 1997), décomposition et affectation des tâches, compétition (Michael et al., 2003) et planification distribuée afin de permettre au système de gérer des ordres qui arrivent de manière asynchrone et dynamique et de réagir en temps réel aux événements imprédictibles qui peuvent survenir au cours de l'accomplissement des ordres.

En second lieu, nous proposons une modélisation des agents, leur coopération et leurs interactions en utilisant l'approche AURL.

En troisième lieu, nous abordons le problème de la planification. Pour cela, nous proposons deux planifications. La première est une planification statique qui concerne la génération des plans de chaque véhicule. A ce niveau, nous proposons une planification coopérative entre les différentes compagnies en vue d'optimiser les plans de chacune d'entre elles. La seconde est une planification dynamique, qui traite de la planification propre à chaque véhicule. Au niveau de cette dernière, nous proposons une approche hybride qui utilise plusieurs heuristiques. Enfin, nous illustrons par une application le fait que l'impact relatif d'une planification coopérative augmente avec la complexité du problème. Nous offrons en même temps des solutions compétitives en temps réel à des problèmes de grandes tailles, grâce aux techniques de coopération et de planification décentralisée et nous montrons que les ordres dynamiques ne présentent aucune difficulté de gestion. Nous montrons dans une série de résultats expérimentaux qu'une augmentation significative des performances est réalisée par les compagnies qui peuvent négocier et coopérer entre elles, par opposition aux compagnies qui utilisent les techniques de planification usuelles.

Le reste de ce papier est organisé comme suit. Dans la deuxième section, nous présentons notre approche. La troisième section donne une description détaillée des différents composants de notre système multi-agents et présente le modèle construit en utilisant les spécifications du langage unifié de modélisation agent (AURL). Dans la quatrième section, nous définissons les protocoles de communication et de négociation entre les différents agents du SGTR. La section 5 décrit la coopération entre compagnies et explique le processus de décomposition des tâches sur les véhicules transporteurs en utilisant les réseaux de neurones de Hopfield. Dans la sixième section, nous introduisons le problème de planification des tournées et nous décrivons brièvement les différentes heuristiques utilisées pour planifier les tournées de chaque véhicule transporteur. Les résultats expérimentaux sont illustrés par une application dans la septième section. Et enfin, nous terminons ce papier par une conclusion et les perspectives de ce travail.

## 2. Aperçu de l'approche proposée

Dans notre approche, nous avons modélisé le SGTR par un système multi-agents basé sur la classification des différents agents en cinq sous-systèmes : sous-système de supervision, sous-système de planification, sous-système client, sous-système ergonomique et sous-système prestataire. Ensuite, nous avons procédé à la modélisation des différents agents par le langage AUML.

La planification se fait en deux phases : une planification statique et une planification dynamique. La première concerne le début du processus de routage. Dans cette phase, la compagnie se charge de distribuer tous les ordres sur ses véhicules transporteurs en résolvant un Problème de Tournées des Véhicules (PTV) statique par l'heuristique Réseaux de Neurones de Hopfield (Hopfield, 1982); il en résulte la génération des tournées initiales. Ensuite, la compagnie subdivise l'ensemble des clients à desservir en plusieurs secteurs (par exemple secteur A, secteur B,...). Les véhicules qui desservent une région spécifique constituent **une caste** (Zhu et al., 2005) qui porte le même nom du secteur (donc on aura caste A, caste B, ...). Les véhicules faisant partie de **la même caste** peuvent coopérer et négocier entre eux des appels d'offre mono caste (au sein de la même caste) pour optimiser leur propre plan ou bien pour résoudre des imprévus qui surviennent au cours de la distribution comme l'embouteillage, les accidents ou les pannes.

La deuxième phase se déroule au cours de la distribution des ordres dynamiques. A ce stade, la compagnie peut recevoir de nouveaux ordres de manière asynchrone et dynamique. Pour chaque nouvel ordre, elle lance un appel d'offre dynamique à l'ensemble des castes. Nous parlons dans ce cas d'appel d'offre multi-caste. Le véhicule ayant décroché l'ordre doit mettre à jour sa tournée de manière dynamique, en déployant plusieurs heuristiques à savoir : les Algorithmes génétiques, l'heuristique de Lin- Kernighan et la Recherche Taboue, de façon à inclure le nouvel ordre.

## 3. Modélisation d'un SGTR

Dans notre approche, nous considérons un système SGTR comme un ensemble de compagnies, de véhicules, de prestataires et de clients (voir Figure 1). Le but de chaque compagnie est de distribuer des ordres qui leur arrivent de manière asynchrone et dynamique d'un ensemble de clients tout en optimisant la planification de ses tâches, ce qui explique l'aspect compétitif et concurrent entre différentes compagnies. Toutefois, il se peut que la complexité ou la taille d'un ordre octroyé à une compagnie excède ses capacités, c'est là où la coopération entre différentes compagnies risque de s'imposer afin de mieux répondre à la demande de manière satisfaisante.

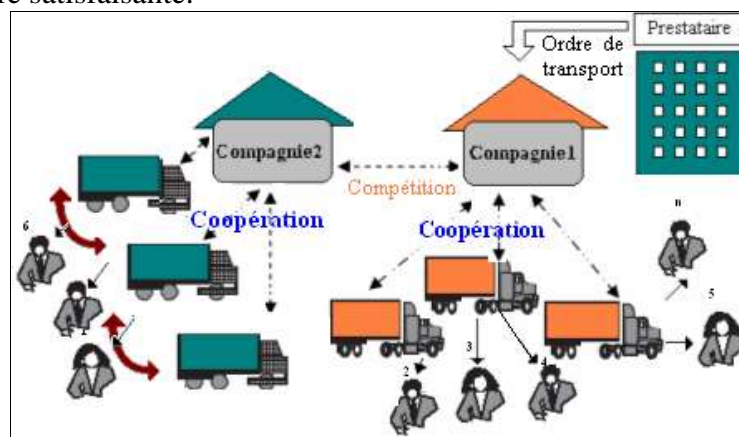


Figure1. Environnement d'un SGTR

Dans notre approche, nous proposons une modélisation d'un SGTR en deux niveaux : le premier concerne la modélisation d'un SGTR par un Système Multi-Agents de Gestion de Transport Rotier (SMAGTR) et le second traite la modélisation des agents par l'approche AUML.

### 3.1 Modélisation des différents composants d'un SGTR par des Agents

Nous proposons de déployer la technologie des agents intelligents pour la modélisation d'un SGTR. Les qualités des agents d'un SMAGTR sont les suivantes :

- L'autonomie : l'agent agit sans l'intervention d'humains ou d'autres intervenants, et a un certain contrôle sur ses actions et ses états internes.
- L'habilité sociale : l'agent interagit avec d'autres agents (pouvant être des êtres humains) à l'aide d'un langage de communication d'agent.
- La réactivité : l'agent perçoit son environnement (pouvant être un monde physique, un utilisateur via une interface graphique, un ensemble d'autres agents ou encore tous ces éléments combinés), et répond de manière opportuniste aux changements qui y surviennent.
- La pro-activité : l'agent n'agit pas simplement aux stimuli de son environnement, il est aussi capable de démontrer des comportements dirigés par des buts en prenant des initiatives.

De plus, ces agents sont équipés de techniques de planification et d'optimisation, de connaissances sur les objets qui utilisent des protocoles de communication et de négociation pour l'interaction et la coopération entre eux.

Le premier objectif de notre travail est la mise en place d'une infrastructure multi-agents sur la base d'une classification d'un SGTR suivant ses différentes tâches. Cette classification permet de regrouper toutes les tâches fortement liées dans un sous-système et celles n'ayant pas ou peu de relations entre elles dans d'autres sous-systèmes différents. Le résultat de cette classification est un ensemble de sous-systèmes caractérisés par une forte cohésion et un faible couplage. Ainsi, toutes les tâches se rapportant à la gestion du fret et du chargement des marchandises seront regroupées dans un sous-système, les tâches se rapportant à la gestion véhicule-conducteur seront regroupées dans un sous-système et enfin les tâches se rapportant à la gestion de la flotte de véhicule seront regroupées dans un sous-système. Un SGTR sera par conséquent composé des cinq sous-systèmes suivants (voir figure 2) :

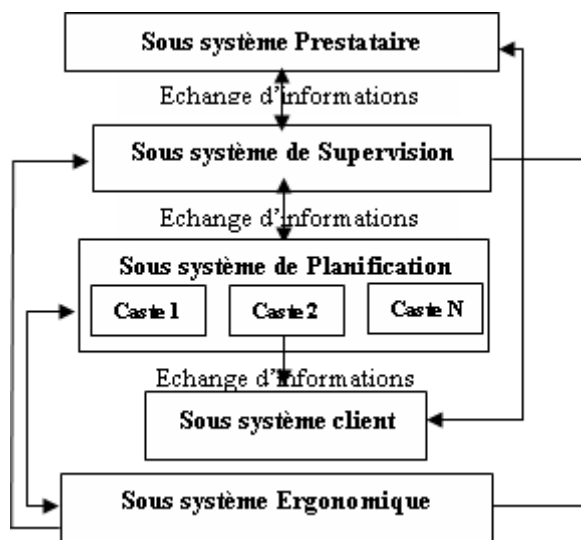


Figure2. Classification d'un domaine de transport

- Un sous-système de Supervision chargé de la supervision du SGTR. Il est constitué d'un seul agent superviseur; il possède une interface de communication et de négociation avec les autres sous-systèmes. Ce sous-système sera modélisé par un agent superviseur.
- Un sous-système de Planification chargé de la gestion du fret, la planification des tournées des véhicules et la planification des opérations de chargement/déchargement. Ce sous-système reçoit des ordres (messages) de la part du sous-système superviseur. Pour servir un ensemble de clients, il doit optimiser les itinéraires (en déployant plusieurs heuristiques) afin de minimiser le coût total. Ce sous-système sera modélisé par un ensemble d'agents (Agents planificateurs).
- Un sous-système Client composé de l'ensemble des clients et chargé de gérer et de suivre ses différentes commandes. Ce sous-système sera modélisé par un ensemble d'agents (Agents Clients).
- Un sous-système Prestataire chargé de gérer les différentes prestations de transport. Ce sous-système sera modélisé par un ensemble d'agents (Agents prestataires).
- Un sous-système Ergonomique chargé de la mise en oeuvre des connaissances relatives à un véhicule et aux itinéraires nécessaires. Il s'occupe aussi de gérer les infrastructures matérielle et logicielle disponibles pour que les missions de transport puissent être accomplies avec un maximum de confort, de sécurité et d'efficacité. Ce sous-système sera modélisé par un ensemble d'agents (agents ergonomiques).

Donc un SGTR sera modélisé par un Système Multi-Agents de Gestion du Transport Routier (SMAGTR). Dans ce qui suit, nous présentons les différents agents qui composent le SMAGTR (voir Figure 3).

### 3.1.1 Agent Prestataire

L'Agent PRestataire (APR) peut représenter une unité de production, un dépôt de produits finis ou encore le département de distribution d'une entreprise, sa tâche principale est d'octroyer des prestations de transport aux **agent Superviseurs** sous forme : « transporter **A** unités de marchandises du dépôt **d** et distribuer les quantités  $q_1, \dots, q_n$  respectivement sur les **Agents Clients**  $C_1, \dots, C_n$ ».

### 3.1.2 Agent Superviseur

L'Agent Superviseur (AS) représente une compagnie de transport, après avoir reçu un ordre de la part d'un APR, le décomposer en sous-ordres qui feront l'objet de négociation avec ses Agents Planificateurs, le mécanisme de négociation est régit par le protocole Contract Net (Smith, 1980).

### 3.1.3 Agent Planificateur

L'Agent PPlanificateur (APL) représente un véhicule transporteur avec son conducteur, sa tâche principale est l'élaboration de ses plans locaux. Il doit être capable d'effectuer des livraisons de commandes pour plusieurs clients, générer des plans locaux et négocier avec les autres agents planificateurs faisant partie de sa caste afin de minimiser le coût de son plan commun. Chaque agent reçoit des sous-ordres sous la forme: " transporter **A** unités de marchandises du dépôt **d** et distribuer les quantités  $q_1, \dots, q_n$  respectivement sur les **Agents Clients**  $C_1, \dots, C_n$ . Après avoir livré toutes les commandes, les agents planificateurs doivent retourner à leur ville de départ.

Chaque ordre reçu par l'agent superviseur est attribué à un groupe d'agents Planificateurs qui constituera une caste. Seuls les agents issus d'une même caste peuvent coopérer et négocier entre eux.

### 3.1.4 Agent Ergonomique (AE)

Il est chargé de la mise en oeuvre des connaissances relatives à un véhicule et aux itinéraires nécessaires. Il s'occupe aussi de gérer les infrastructures matérielle et logicielle disponibles pour que les missions de transport puissent être accomplies avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité.

Les autres fonctions qui seront associées à un agent Ergonomique peuvent également être assez variées :

- La vérification, avant le départ, de la bonne maintenance du véhicule conformément aux interventions planifiées par l'appliquatif.
- Le contrôle automatique de l'état du véhicule et notamment des fonctions électromécaniques et électromotrices et la mémorisation des valeurs dès que le véhicule entre dans une zone d'alerte.
- L'aide à la conduite par la présence d'une série d'outils (destinés à saisir et à analyser les données relatives à l'environnement dans le but de détecter des anomalies (détection d'obstacles, embouteillage...).
- L'assistance au conducteur regroupe des outils et services importés temporairement (via Internet ou par chargement à bord) tels que des cartes géographiques numérisées, des programmes pédagogiques.

### 3.1.5 Agent Client

L'Agent Client (AC) représente les destinataires finaux de la marchandise à distribuer. Cet agent coopère avec l'APL chargé de le servir pour le tenir informé de tout changement concernant les fenêtres de temps ou le temps de service. Après avoir reçu sa livraison, l'agent client envoie un message à l'APR responsable de cette prestation contenant : l'heure d'arrivée, l'heure de départ de l'APL, la désignation et la quantité de marchandise livrée. Un message semblable est transmis par l'APL responsable vers son AS.

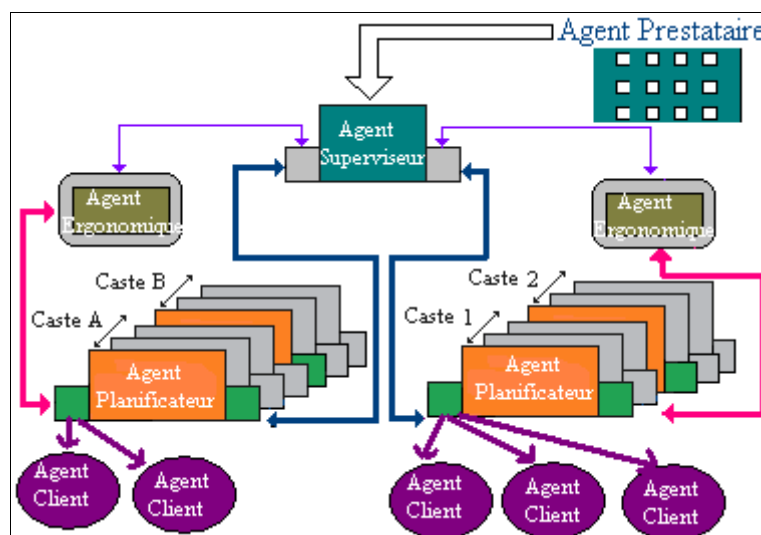


Figure 3. Système multi agents de gestion de transport (SMAGTR)

### 3.2 Modélisation des agents d'un SGTR par AUML

Le langage unifié de modélisation agent (AUML) (Odell and al., 2000) a été développé par le comité technique de modélisation de FIPA (Fondation for Intelligent Physical Agents) comme nouvelle méthodologie capable de traiter les particularités des systèmes multi-agents et de construire des modèles basés sur le concept d'agent comme concept de base.

Le premier niveau de la modélisation AUML définit les classes d'agents qui forment le SMAGTR et les fonctionnalités qu'elles offrent dans les actes communicatifs. La figure 4 représente un diagramme d'agents qui détaille les différentes fonctions des agents en montrant la hiérarchie des classes utilisées pour l'implémentation des agents. L'agent générique de FIPA au sommet du diagramme définit les fonctionnalités basiques qu'un agent doit implémenter afin d'être compatible avec la plateforme du SMAGTR et qui sont limitées à l'enregistrement de l'agent avec la plateforme local FIPA-OS. L'intention derrière la création d'un agent générique est tout simplement de montrer les différentes étapes nécessaires pour créer un agent qui peut être instancié et enregistré dans la plateforme du SMAGTR.

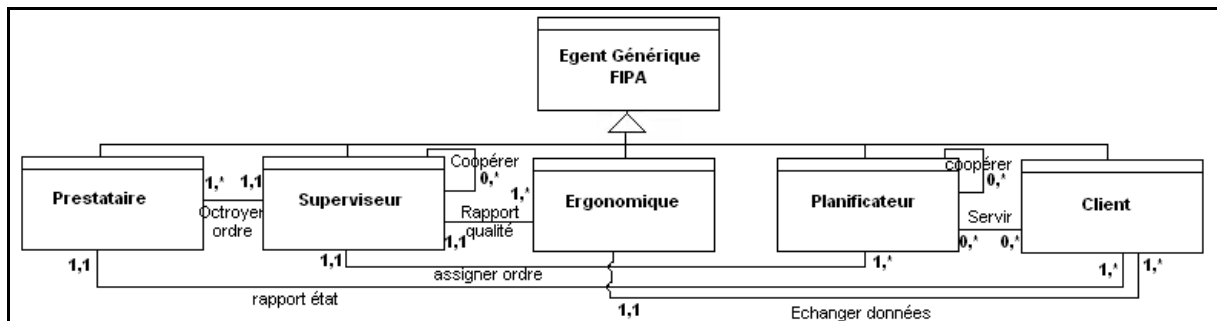


Figure 4. Diagramme d'agents d'un SGTR

Pour donner une représentation plus appropriée que le diagramme de la figure 4, nous détaillons les fonctionnalités et les comportements des agents en utilisant le diagramme d'agent AUML, qui a été proposé par Bauer en 2001 (Bauer, 2001).

Chaque agent est représenté sous la forme d'un rectangle divisé en cinq compartiments. Les figures 5, 6, 7, 8 et 9 décrivent respectivement la modélisation des Agents Superviseur, Prestataire, Ergonomique, Client et Planificateur. Le nom de chaque agent est défini au sommet d'un rectangle; en dessous sont représentés ses attributs relatifs à son état (ses croyances); les actions que l'agent peut exécuter sur son environnement sont représentées dans le troisième compartiment; les autres fonctions énumérées dans le quatrième compartiment sont des méthodes standards Java. Le dernier compartiment représente la librairie des actes communicatifs que l'agent peut exécuter en tant que parties de protocoles spécifiques.

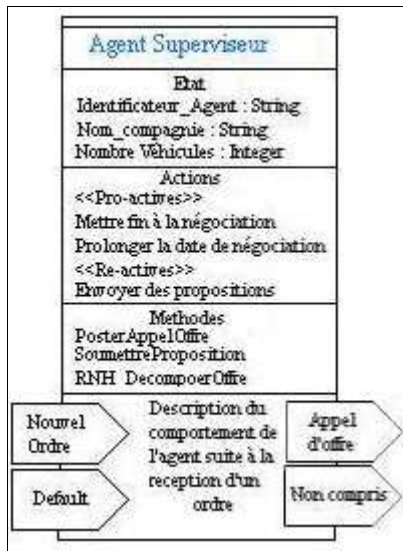


Figure 5. Agent Superviseur

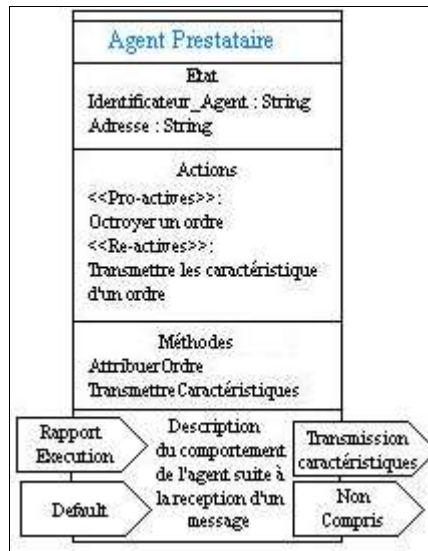


Figure 6. Agent Prestataire

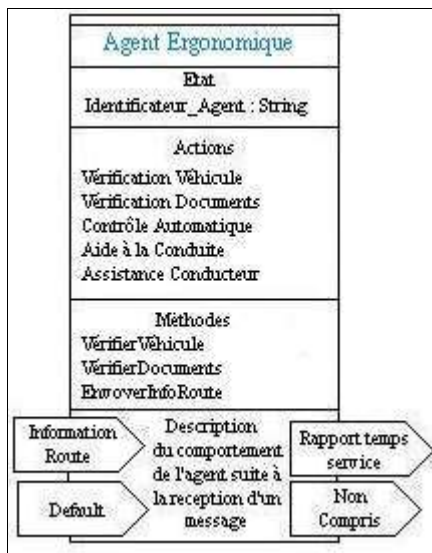


Figure 7. Agent Ergonomique

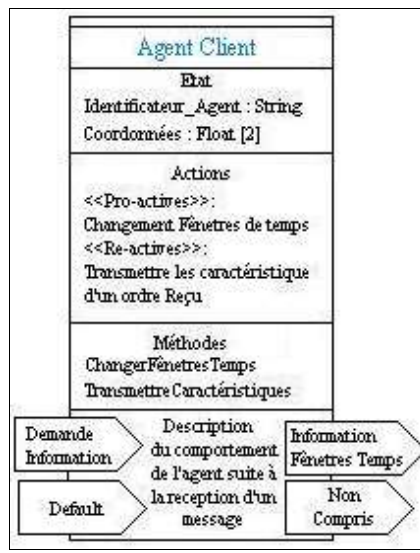


Figure 8. Agent Client

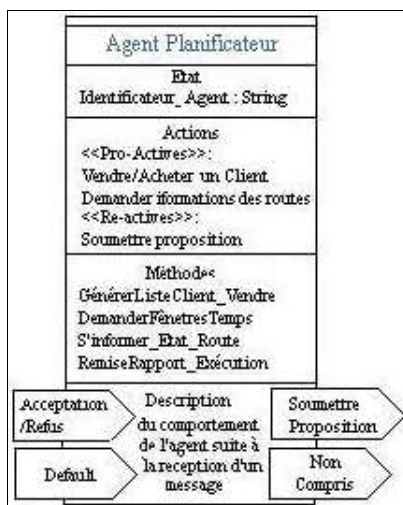


Figure 9. Agent Planificateur



## 4. Communication et négociation

### 4.1 Communication entre agents d'un SMAGTR

Les Agents dans le SMAGTR communiquent par échange de messages. Ces messages expriment les informations qu'un agent émetteur désire que les autres agents prennent en considération. Dans notre approche, nous proposons l'utilisation du langage de Communication agent de FIPA (FIPA TC 2002), que nous décrivons ci dessous de manière succincte:

```
(bid
  :sender (agent-identifiant :name agentSuperviseur1 @SGTR.192.176.68.2)
  :receiver (set (agent-identifiant :name agentPlanificateur2@SGTR.152.255.100.5))
  :contenu “((annonce nouvel ordre élémentaire  $\Gamma(a,d,l)$  avec
     $l=\{(l_1,q_1),(l_2,q_2),\dots,(l_n,q_n)\}$ ))”
:langage fipa-sl
  :ontology auction
  :protocol Contract Net
)
```

Ce message est envoyé par l'agent superviseur à tous ses agents planificateurs pour leur annoncer un nouvel ordre élémentaire  $\Gamma(a,d,l)$ .

Un message est le support d'information pour les ordres de transport. Un agent superviseur octroie un ordre de transport à un agent planificateur via l'envoi d'un message contenant les caractéristiques de cet ordre.

### 4.2 Négociation

Dans notre approche, nous proposons l'utilisation du protocole Contract-Net pour gérer la négociation entre l'Agent Superviseur et ses Agents Planificateurs. C'est un mécanisme de négociation entre deux types d'agents : contractant et gestionnaire. Il permet à un gestionnaire, suite à quelques échanges avec un groupe d'agents, de retenir les services d'un agent appelé contractant pour l'exécution d'une tâche contrat. Ce protocole est qualifié de type « sélection mutuelle » puisque, pour signer un contrat, l'agent élu doit s'engager envers le gestionnaire pour l'exécution de la tâche qui lui sera confiée et le gestionnaire, de sa part, ne sélectionne que l'agent ayant fourni la proposition la plus avantageuse. La version originale du protocole décrite dans ce qui suit comporte trois étapes principales : l'appel d'offre, la soumission des propositions et l'attribution de contrat.

Etant donné un ordre élémentaire, un agent superviseur et une caste d'agents planificateurs :

1. L'agent superviseur envoie un message de type « annonce-ordre-élémentaire » à l'ensemble de ses Agents Planificateurs d'une caste.
2. Chaque agent planificateur évalue l'ordre élémentaire annoncé à l'aide d'une fonction locale "évalue-annonce".
3. L'évaluation précédente permet à certains agents planificateurs de soumettre une proposition à l'aide d'une "soumission-Proposition" à l'Agent superviseur.
4. Si une proposition est jugée satisfaisante (à l'aide de la fonction "évalue-soumission"), alors l'agent superviseur envoie un message de type "acceptation" au propriétaire de la proposition retenue. Il envoie également un message de type "refus" aux autres agents planificateurs dont les propositions n'ont pas été retenues.
5. Après un délai de soumission, l'agent superviseur peut mettre fin à l'appel d'offre si le temps d'expiration est dépassé.

6. Si aucune proposition n'a été retenue, alors l'agent superviseur fait parvenir à tous les Agents Planificateurs un message de type "refus" pour indiquer le rejet de chacune des propositions. Il peut alors se retirer de la négociation, retenir la proposition la plus acceptable, redémarrer un nouvel appel d'offre (nouveau " annonce-ordre-élémentaire ") ou prolonger le délai de soumission des propositions.

7. L'agent planificateur ayant obtenu le contrat, remet un rapport d'exécution lorsque la tâche est accomplie.

### 4.3 Coopération intra caste

Les agents planificateurs appartenant à une même caste peuvent coopérer entre eux afin d'améliorer leurs plans locaux. Ce type de coopération intra-caste est assuré par l'heuristique du commerce simulé (Bachem et al., 1996). Le commerce Simulé est un algorithme qui tire ses origines du mécanisme commercial : les agents planificateurs au sein d'une même caste optimisent leurs plans locaux en effectuant des transactions (achat ou vente) relatives successivement aux différents clients à servir. Chaque Agent Planificateur construit une liste appelée liste des Ventes (LV) contenant les différents clients qu'il désire vendre. En pratique, cette liste contient les clients les plus coûteux relativement au plan local de l'agent planificateur. Cette liste n'est accessible qu'aux Agents Planificateurs appartenant à la même caste de l'agent initiateur de l'offre. Par la suite, chaque APL calcule le coût d'insertion dans son plan local, pour chaque client dans les LV de tous les APL appartenant à sa caste. Un APL n'accepte d'acheter un client que si le coût d'insertion de ce dernier dans son plan local est inférieur au coût proposé par l'APL propriétaire de la LV à qui appartient ce client.

## 5. Planification statique coopérative

### 5.1 Coopération

L'optimisation de l'utilisation des ressources de transport est un but principal pour toutes les compagnies de transport. Ceci est dû à la distribution aléatoire spatio-temporelle des ordres qu'elles reçoivent et qui affecte de manière considérable l'état de disponibilité des ressources. La coopération avec les autres compagnies semble être d'une grande utilité dans le processus de gestion. Par exemple, les compagnies peuvent échanger des informations à propos de leurs ressources disponibles, aussi elles peuvent négocier des ordres offerts par d'autres compagnies. Cependant, contrairement à la coopération interne entre une compagnie et ses APLs qui est gérée par le protocole Contract-Net, la coopération entre compagnies est un processus pair à pair (Peer to Peer) (Rowstron et al., 2001) dans lequel deux compagnies contractantes ne peuvent adopter un consensus que si les deux compagnies à la fois sont d'accord sur toutes les clauses d'un contrat. Nous avons introduit cette modification dans le protocole de négociation initial pour permettre au SGTR de prendre en compte les fluctuations qui surviennent dans les décisions des compagnies durant le temps de négociation.

## 5.2 Génération des plans initiaux (tournées des véhicules)

### 5.2.1 Formalisation des ordres et des plans

#### Définition1 :

Un ordre  $\Gamma(\mathbf{a}, \mathbf{d}, \mathbf{l})$  avec  $\mathbf{l} = \{(c_1, q_1), (c_2, q_2), \dots, (c_n, q_n)\}$ ,  $a = \sum q_i$  et,  $i=1 \dots n$  est équivalent à transporter  $a$  unités de marchandises du dépôt  $\mathbf{d}$  et distribuer les quantités  $q_1, \dots, q_n$  respectivement sur les clients  $c_1, \dots, c_n$ .

**Définition2 :** un ordre  $\Gamma(\mathbf{a}, \mathbf{d}, \mathbf{l})$  avec  $a \leq Q$  est dit élémentaire ou ss-ordre si,  $Q$  étant la capacité maximale d'un agent planificateur.

**Définition3 :** un Plan local  $P_k$  d'un agent planificateur  $k$  représente l'ensemble des ordres qui doivent être accomplis par l'agent Planificateur  $k$ .

$$P_k = \bigcup_i \Gamma_i \text{ avec } \Gamma_i = \Gamma_i(a_i, d_i, l_i) \text{ et } \sum a_i \leq Q$$

### 5.2.2 Génération des plans

A la réception d'un ordre de transport de la part de l'agent prestataire (APR), l'agent superviseur se charge de le structurer afin de générer les plans initiaux qui seront exécutés par ses agents planificateurs. Après décomposition, pour chaque ordre élémentaire, l'AS lance un appel d'offre à l'ensemble de ces APL qui, à leur tour, évaluent cet appel en utilisant plusieurs heuristiques (les Algorithmes Génétiques, l'heuristique de Lin-Kernighan et la Recherche Taboue) et soumettent leurs propositions. Un ordre est décroché par l'APL ayant offert la meilleure proposition. Un APL peut décrocher plusieurs ordres, à chaque fois qu'il reçoit une acceptation finale pour l'exécution d'un nouvel ordre élémentaire, il doit adapter son propre plan à la nouvelle situation et définir à nouveau sa tournée. Après avoir reçu un ordre de la part d'un agent Prestataire, l'agent superviseur doit décomposer cet ordre en un ensemble d'ordres élémentaires afin d'être servi par plusieurs Agent planificateurs tout en minimisant le coût total. Cette décomposition des tâches constitue un problème crucial. Elle consiste à mettre au point des algorithmes et des stratégies performantes pour la résolution du problème d'affectation du trafic dans le transport routier. Ce problème connu dans la littérature sous le nom de problème de tournées des véhicules (PTV) (voir Figure 10) à été largement étudié par les chercheurs. Pour une étude plus détaillée du PTV, voir ( Fukasawa et al., 2004)

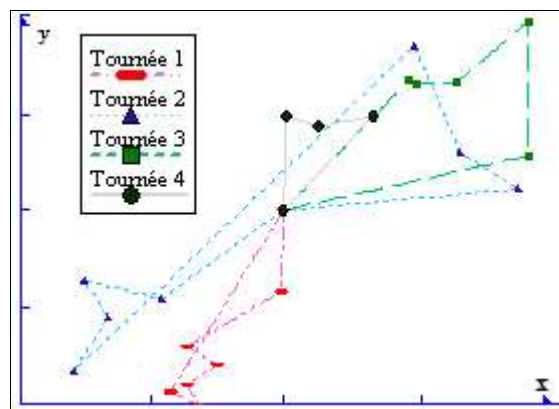


Figure 10. Génération des tournées des véhicules

La plupart des techniques citées dans la littérature fournissent de meilleures solutions même pour de grandes instances du PTV, mais le problème qui persiste toujours, c'est le temps d'exécution prohibitif qui rend le choix d'implémentation de l'une de ces techniques dans le processus de prise de décision d'un SMA une tâche très délicate.

Dans ce travail, nous avons adopté une heuristique basée sur les réseaux de neurones de Hopfield (RNH) afin de permettre aux agents superviseurs de prendre des décisions temps réel face à ce problème combinatoire de génération du plan global.

### 5.3 Réseaux de neurones de Hopfield

Le réseau de neurones de Hopfield (Hopfield, 1982) est un réseau de neurones analogues non linéaires extrêmement interconnectés (voir figure 11).

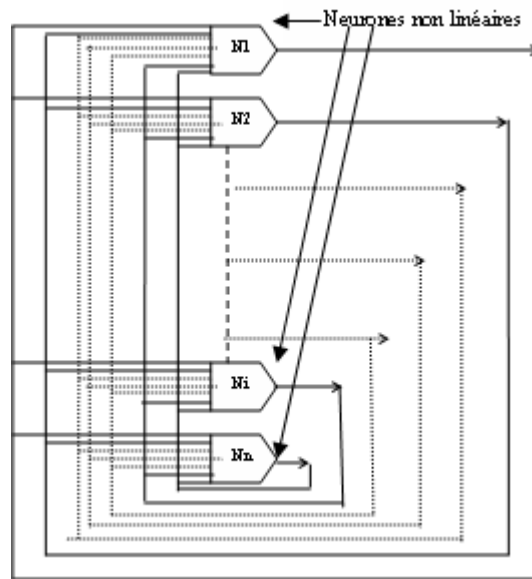


Figure 11. L'architecture du réseau de neurones de Hopfield

La sortie  $V_i$  de chaque neurone est calculée comme suit :

$$V_i = g(h_i) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(\lambda h_i))$$

$$\text{où} \quad : \quad h_i = \sum_j T_{ij} V_j$$

représente l'entrée d'une neurone  $i$ .

La fonction  $\tanh(x)$  représente la tangente hyperbolique de  $x$  et  $\lambda$  est un paramètre constant. Hopfield a prouvé il y'a deux décennies qu'un tel réseau est très effectif en calcul combinatoire et peut fournir rapidement des solutions calculées collectivement à une large classe de problèmes d'optimisation combinatoire (Hopfield, 1984). L'idée de base de l'algorithme d'optimisation combinatoire de Hopfield consiste à incruster la fonction objective et les contraintes du problème d'optimisation combinatoire original à résoudre dans la fonction d'énergie d'un RNH et laisser la dynamique neuronale conduire l'algorithme à un état stable dans lequel toutes les sorties des neurones restent stables.

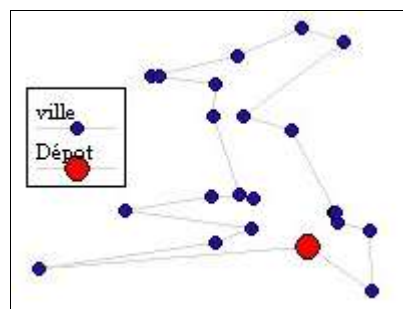
Pour une description plus détaillée de l'algorithme de RNH, se référer à (Hopfield, 1984). Notre implémentation du RNH pour résoudre le problème de génération des plans est décrite dans le papier (Nejeoui, 2006).

## 6. Planification dynamique des tournées

Chaque agent planificateur se charge de planifier sa tournée afin de servir tous les AC inclus dans son plan commun à moindre coût, et à chaque fois qu'il décroche un accord pour l'exécution d'un nouvel ordre élémentaire, ce dernier doit mettre à jour son plan commun et, par suite, planifier à nouveau sa tournée. Cela revient en pratique à résoudre un problème de voyageur de commerce.

### 6.1 Problème de Voyageur de commerce (PVC)

Le PVC est défini comme suit : étant donné un ensemble fini de villes, on associe à chaque couple de villes  $(L_i, L_j)$  un coût de transport  $d_{ij}$ , le problème consiste à trouver le chemin le moins coûteux pour visiter chaque ville une et une seule fois et revenir au point de départ (voir figure 12).



**Figure 12.** Problème du Voyageur de commerce

La résolution de ce problème NP-DUR par des méthodes exactes nécessite des temps de calculs prohibitifs pour les problèmes de taille réelle (Gutin et al., 2002). L'utilisation de méthodes approximatives qui tentent d'exploiter une certaine structure dans l'espace de recherche de solutions, en occurrence les heuristiques, fournissent parfois des résultats de qualité acceptable dans des temps raisonnables.

Par contre, nos expérimentations ont montré qu'aucune heuristique ne fournit à elle seule les meilleurs résultats pour la résolution des problèmes de l'ensemble de test TSPLIB (Reinelt, 1991). Il y'a donc pas d'heuristique universelle mais plutôt un sous-ensemble d'heuristiques qui, prises individuellement, fonctionnent correctement pour certaines instances de PVC. La qualité de la solution produite par les heuristiques dépend non seulement de la méthode de résolution mais est aussi influencée par les paramètres utilisés. Ainsi, un ensemble de paramètres pour une heuristique donnée fonctionnera bien pour un sous ensemble d'instances du PVC mais moins bien pour d'autres. Pour pallier ce problème nous proposons de doter chaque agent planificateur d'un ensemble d'heuristiques basées sur (les Algorithmes Génétiques (AG), l'heuristique de Lin-Kernighan (HLK) et la Recherche Taboue (RT)) qu'il déploie à chaque fois qu'il veut re-confectionner son plan afin d'adopter l'heuristique la plus appropriée dans un environnement coopératif distribué où chaque heuristique utilise différentes configurations de paramètres. Nous allons démontrer que cette combinaison d'heuristiques et de paramètres, en plus d'offrir une plus grande rapidité d'exécution, permet d'offrir une plus grande robustesse de la qualité de solution du PVC en comparaison avec les heuristiques prises individuellement.

## 7. Application

Dans un travail antécédent (Nejeoui et al., 2006) nous avons traité l'aspect dynamique du SGTR, En vue de montrer l'impact de la coopération inter compagnies sur les résultats de la planification statique, nous ne nous intéressons qu'à cette dernière, par application des RNH, et nous insistons plus particulièrement sur la coopération inter compagnie via les agents superviseurs.

### 7.1 Modélisation

Dans le but d'illustrer notre proposition, nous allons considérer un exemple d'une compagnie de transport qui coopère avec une autre. Chacune des deux compagnies est caractérisée par un identificateur, ses coordonnées et sa flotte de véhicules. D'après notre approche, aux deux compagnies seront associées deux agents superviseurs  $AS_1$  et  $AS_2$  caractérisés par :

Identificateur_Agent	$AS_1$	$AS_2$
Nom_Compagnie	Compagnie1	Compagnie2
AdresseCompagnie	$Ad_1 = (-14,77)$	$Ad_2 = (0,0)$
NombreVéhicule	10	10

Chacune des deux compagnies dispose d'une flotte homogène de 10 véhicules de capacité maximale  $Q=1679$ .

Supposons que les deux agents superviseurs reçoivent respectivement les ordres suivants :  $\Gamma_1(a_1,d_1,l)$ ,  $\Gamma_2(a_2,d_2,l)$ ,  $\Gamma_3(a_3,d_3,l)$  et  $\Gamma_4(a_4,d_4,l)$  répartis comme suit :

$\Gamma_1$  et  $\Gamma_2$  sont octroyés à  $AS_1$ ,  $\Gamma_3$  et  $\Gamma_4$  sont octroyés à  $AS_2$

Dans ce qui suit nous présentons les caractéristiques de chaque ordre :

$d_i$  : quantité de marchandises demandée par le client  $i$ ,  $L_i$  : son Numéro,  $(X_i, Y_i)$  : sa position.

$\Gamma_1(a_1,d_1,l)$ $a_1=3321$ $d_1=(-14,77)$				$\Gamma_2(a_2,d_2,l)$ $a_2=4865$ $d_2=(-14,-7)$							
$L_i$	$X_i$	$Y_i$	$d_i$	$L_i$	$X_i$	$Y_i$	$d_i$				
1	-2	7	74	1	-23	-102	44	16	-87	-61	718
2	-7	17	29	2	-12	11	262	17	0	-3	4
3	-2	3	9	3	-26	15	54	18	5	-5	23
4	2	14	391	4	10	-70	9	19	-13	-79	764
5	-1	28	25	5	-33	23	5	20	-35	-8	34
6	-14	24	286	6	-30	15	225	21	10	-16	93
7	-10	31	18	7	11	-104	676	22	-1	-15	3
8	-14	77	822	8	8	-95	22	23	-19	-96	17
9	-11	80	531	9	-12	-101	120	24	-17	-76	21
10	-13	80	181	10	-6	-12	11	25	-3	-8	4
11	-21	74	3	11	-29	7	815	26	-13	9	5
12	-8	12	16	12	6	-113	152	27	-33	20	68
13	-1	7	4	13	1	-3	8	28	-53	-32	13
14	-16	83	884	14	-5	-1	183	29	-7	-11	398
15	0	3	48	15	-78	-2	6	30	-60	-32	52
								31	4	-5	56

$\Gamma_1(a_1, d_1, l)$ $a_1=1677, d_1=(-14,77)$				
Li	Xi	Yi	di	
1	-8	91	45	
2	-23	74	4	
3	-6	88	54	
4	-8	88	10	
5	-25	78	140	
6	-5	88	58	
7	-20	80	185	
8	-25	89	285	
9	-24	79	59	
10	-5	87	11	
11	-6	91	159	
12	-21	90	15	
13	-26	88	637	
14	-25	74	4	
15	-5	82	11	

$\Gamma_4(a_4, d_4, l)$ $a_4=5043, d_4=(0,0)$				
Li	Xi	Yi	di	
1	-3	0	124	
2	4	1	81	
3	3	-1	841	
4	7	2	7	
5	15	-2	406	
6	10	2	37	
7	-4	1	4	
8	-2	-5	1066	
9	3	0	687	
10	-20	-2	588	
11	-26	0	480	
12	7	-3	175	
13	-36	2	518	
14	-2	-4	29	

## 7.2 Génération des plans initiaux

La première étape consiste à générer les plans initiaux en décomposant chacun des ordres  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$  et  $\Gamma_4$  en ordres élémentaires. Pour cela, chaque agent superviseur structure ses ordres en utilisant l'algorithme des réseaux de neurones de Hopfield. Après cette étape, nous obtenons la structuration des plans suivante :

A5 <sub>1</sub>					A5 <sub>2</sub>			
Ordres					Ordres			
$\Gamma_1$	$\Gamma_2$			$\Gamma_3$	$\Gamma_4$			
Structuration des ordres								
$\Gamma_1^1$	$\Gamma_1^2$	$\Gamma_2^1$	$\Gamma_2^2$	$\Gamma_2^3$	$\Gamma_3$	$\Gamma_4^1$	$\Gamma_4^2$	$\Gamma_4^3$
clients concernant chacun des ordres								
2,3, 7, 9,10, 11, 13, 14	1, 4, 5, 6, 8, 12, 15	2, 3, 5, 6, 11, 14, 26, 27	15,16, 17, 19, 20, 22, 28, 30	1, 4,7, 8, 9,10, 12,13, 18,21, 23,24, 25,29, 31	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	7,10, 11,13	9	2, 3,4, 5, 6, 12

Agents Planificateurs		Ordres	Plans Attribués	Coût	
AS <sub>1</sub>	Caste1-1	<sup>1</sup> API_1	$\Gamma_1$	14.11.7.2.3.13.9.10	256.02
		<sup>1</sup> API_2	$\Gamma_2^1$	8.5.4.15.1.12.6	237.76
	Caste1-2	<sup>1</sup> API_3	$\Gamma_2^1$	14.11.6.27.5.3.26.2	313.09
		<sup>1</sup> API_4	$\Gamma_2^2$	17.22.19.16.30.28.15.20	551.39
		<sup>1</sup> API_5	$\Gamma_2^3$	25.29.10.24.23.1.9.12.7. 8.4.21.18.31.13	506.20
AS <sub>2</sub>	Caste2-1	<sup>2</sup> API_1	$\Gamma_3$	2.14.5.9.7.13.8.12.1.11. 4.3.6.10.15	230.00
Caste2-2	<sup>2</sup> API_2	$\Gamma_4^1$	7.13.11.10.	78.14	
	<sup>2</sup> API_3	$\Gamma_4^2$	9	11.38	
	<sup>2</sup> API_4	$\Gamma_4^3$	3.12.5.6.4.2	37.77	

Après cette étape, chaque agent superviseur aura deux plans initiaux à négocier et à attribuer à ses agents planificateurs

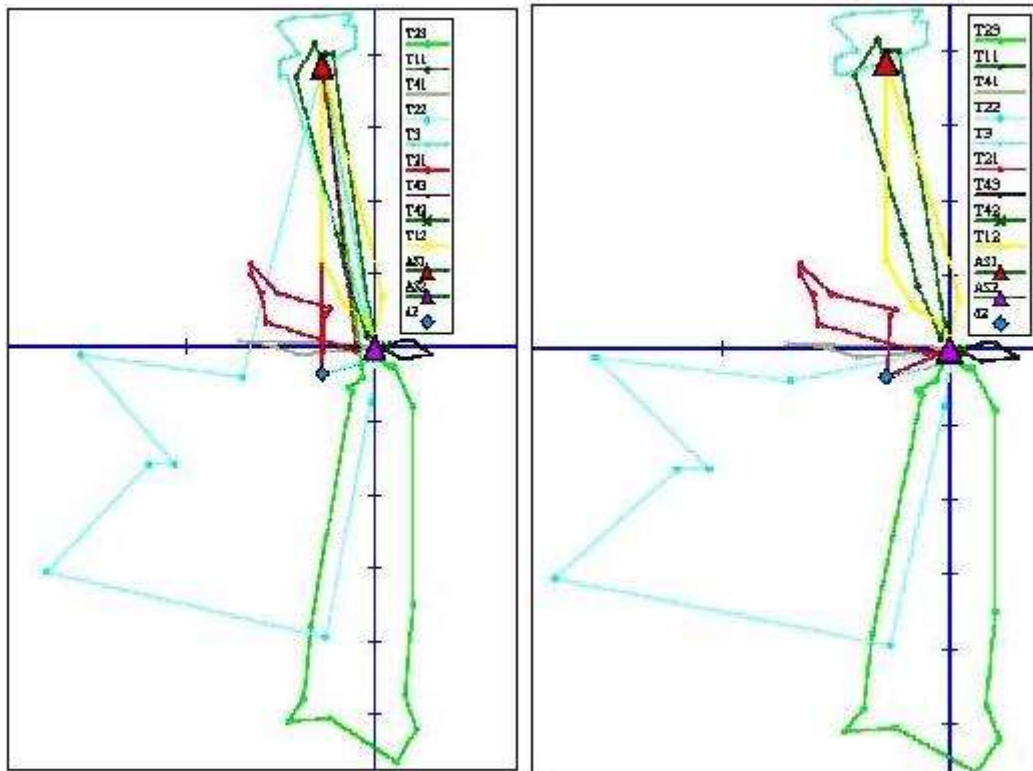
### 7.3 Négociation et attribution des plans sans et avec coopération entre AS1 et AS2

Chaque agent superviseur négocie ses ordres élémentaires avec ses agents planificateurs en incluant l'autre agent superviseur dans le processus de négociation.

La figure 13.a montre la solution pour distribuer les 4 ordres sans prendre en compte la coopération entre les deux AS et la figure 13.b montre la solution avec prise en charge de la coopération entre les deux AS.

	AP	Ordres élémentaires	Plans Attribués (tournées)	Coût	
AS <sub>1</sub>	Caste1-1	<sup>1</sup> API_1	$\Gamma_1$	14.11.7.2.3.13.9.10	256.02
		<sup>1</sup> API_2	$\Gamma_2^1$	8.5.4.15.1.12.6	237.76
AS <sub>2</sub>	Caste1-2	<sup>1</sup> API_3	$\Gamma_3$	15.10.6.3.4.11.1.12.8.13.7.9.5.1 4.2	230.00
	Caste2-1	<sup>2</sup> API_1	$\Gamma_4^1$	7.13.11.10.	78.14
		<sup>2</sup> API_2	$\Gamma_4^2$	9	11.38
		<sup>2</sup> API_3	$\Gamma_4^3$	3.12.5.6.4.2	37.77
	Caste2-2	<sup>2</sup> API_4	$\Gamma_2^1$	14.11.6.27.5.3.26.2	117.28
		<sup>2</sup> API_5	$\Gamma_2^2$	20.15.28.30.16.9.22.17	327.46
		<sup>2</sup> API_6	$\Gamma_2^3$	25.29.10.24.23.1.9.12.7.8.4.21.1 8.31.13	224.06





**Figure 13.a.** Distribution des ordres sans coopération **Figure 13.b.** Distribution des ordres avec coopération

Les paramètres qui influencent la qualité de la solution sont la distance totale (mesurée par une unité de mesure de distance arbitraire) parcourue par l'ensemble des APLs pour servir toutes les commandes des ACs ainsi que le nombre des APLs nécessaires pour accomplir la mission de transport (ce paramètre représente un critère important du point de vue économique). La figure 13 montre les résultats qui comparent les performances relatives de la solution obtenue par le SMAGTR avant et après l'intégration des techniques de coopération entre compagnies. Les résultats montrent que l'ordre élémentaire  $\Gamma_2^1$  dont le coût d'accomplissement minimum par les APLs de  $AS_1$  est 313.0958 (itinéraire rouge, Fig. 13.a) a été affecté par effet de coopération à  $AS_2$  avec le coût 117.2835 (itinéraire rouge, Fig. 13.b). De même l'ordre élémentaire  $\Gamma_2^2$  dont le coût d'accomplissement minimum par les APLs de  $AS_1$  est 551.3949 (itinéraire turquoise, Fig. 13.a) a été affecté par effet de coopération à  $AS_2$  avec le coût 327.4671 (itinéraire turquoise, Fig. 13.b). De même l'ordre élémentaire  $\Gamma_2^3$  dont le coût d'accomplissement minimum par les APLs de  $AS_1$  est 506.2059 (itinéraire vert brillant, Fig. 13.a) a été affecté par effet de coopération à  $AS_2$  avec le coût 224.0676 (itinéraire vert brillant, Fig. 13.b). L'agent superviseur  $AS_2$  a aussi sous-traité l'ordre  $\Gamma_3$ , dont le coût d'accomplissement par ses propres APLs est estimé à 230.0052 (itinéraire vert d'eau, Fig. 13.a), à  $AS_1$  avec le coût 72.6308 (itinéraire vert d'eau, Fig. 13.b).

On constate que l'introduction des techniques de planification coopérative entre compagnies a permis au SMAGTR de passer d'un coût total de 2221.7981 pour servir les 4 ordres sans prise en compte de la coopération entre  $AS_1$  et  $AS_2$  à un coût de 1505.3596 avec la prise en compte de la coopération, soit un gain de performance égal à 716.4385, c'est-à-dire un taux de 32.24%.

Réaliser une telle performance permet de justifier l'intégration d'une planification coopérative dans la démarche de prise de décision des compagnies de transport routier.

## 8. Conclusion et perspectives

Dans ce papier, nous avons présenté une approche basée sur la classification des agents pour la modélisation des SGTR. Nous avons couplé les techniques de l'IAD notamment la décomposition et l'allocation des tâches d'une part, la planification décentralisée et la négociation, d'autre part et enfin les heuristiques de la Recherche Opérationnelle, afin de gérer des ordres de transport reçus par les compagnies de manière asynchrone et dynamique.

Au niveau de la planification des tâches, nous avons adopté une stratégie à deux niveaux. Le premier prend en compte la génération des plans initiaux en se basant sur une approche coopérative. Le second prend en charge la planification locale des agents planificateurs. Cette planification est basée sur plusieurs heuristiques, dont seule la plus appropriée est adoptée.

Dans ce travail, nous avons prouvé que l'approche multi-agent a des avantages certains, elle fournit une flexibilité accrue en permettant de varier dynamiquement le nombre d'agents. De plus, alors que la portée des algorithmes de la recherche opérationnelle reste limitée aux problèmes de routage statique, l'approche multi-agent permet de concevoir des systèmes temps réel capables de faire face à des problèmes de planification dynamiques et de prendre en charge l'évolution de l'environnement au cours de l'exécution. Elle assure une meilleure adaptabilité du système à son environnement.

L'approche proposée est très prometteuse dans le domaine de la conception et de l'analyse des systèmes distribués (caractérisés par une inhérente distribution des connaissances et des contrôles). Mais c'est le cas également dans tous les modes de transport : routier, maritime, ferroviaire et aérien. Actuellement, nous sommes en train d'étudier l'intégration du raisonnement à base de cas au niveau de la planification dynamique. Dans un futur travail, nous projetons d'adopter cette approche pour englober les autres modes de transport, dans le but de modéliser un système multi-agents de gestion de transport intermodal (SMAGTI). En vue de compléter la conception d'un SMAGTI, nous visons l'implémentation du sous-système Ergonomique selon les spécifications de la plate-forme FIPA-OS afin de permettre au SMAGTI de gérer, dans un environnement ergonomique, les prestations de transport incidentes indépendamment du moyen de transport utilisé (camions, bateaux, trains, avions).

## Références

- Bachem, A., Hochstattler, W. and Malich, M. (1996). The Simulated Trading Heuristic for Solving Vehicle Routing Problems. *Elsevier journal of Discrete Applied Mathematics*, 65, 13, 47-72.
- Bauer, B. (2001). Uml class diagrams revisited in the context of agent-based systems. In Ciancarini, P. and Weiss, G. *Proceedings of Agent-Oriented Software Engineering (AOSE 01)*. Montreal : LNCS 2222 Springer-Verlag, 1-8.
- Elfazziki, A., Nejeoui, A., Sadgal, M. (2006). Une approche multi-agents pour la modélisation et l'optimisation des Systèmes de gestion de transport maritime. [Revue d'Information Scientifique et Technique](#).
- Fukasawa, R., Lysgaard, J., Aragao, M.P., Reis, M., Uchoa, E. and Werneck, R.F. (2004). Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem. In D. Bienstock and G. Nemhauser. *LNCS 3064. Springer-Verlag. IPCO* , 1-15.
- Gutin, G., Yeo, A. and Zverovitch, A. (2002). Exponential Neighborhoods and Domination Analysis for the TSP. In Gutin, G. and Punnen, A. *The Traveling Salesman Problem and its Variations*. Dordrecht, Kluwer.
- Hopfield, J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceeding of National Academic Science. USA*, Vol.79, 2554-2558.

- Hopfield, J. (1984). Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *Proceeding of National Academic Science*. (USA), vol.81, 3088-3092.
- Kraus, S. (1997). Negotiation and cooperation in multi-agent environments. *Artificial Intelligence*, 94,12, 79-98.
- Michael, P. W., Greenwald A., Stone P., and Wurman P. R. (2003). The Trading Agent Competition, *Electronic Markets*, 13,1.
- Muller, P. A. (2000). *Modélisation objet avec UML*. Eyrolles.
- Nejeoui, A., Ait Ouahman, A., Elfazziki, A. (2005). A Genetic model to deal with The Vehicle routing Problem. *International Conference on Modelling and Simulation*, Marrakech : 22-24 November.
- Nejeoui, A., Elfazziki, A., Sadgal, M., Aitouahman, A. (2006). A Hopfield-Neural Network to Deal with Tasks Planning in a Multi-Agent System of Transport. *Wseas Transactions On Systems*. 5, 1, 180-187.
- Odell, J., Parunak, V.D., and Baue, B. (2000). Extending uml for agents. *AOIS Workshop at AAAI*, 3-17.
- Reinelt, G. (1991). TSPLIB, A Traveling Salesman Problem Library. *ORSA Journal on Computing*. 3, 376-384.
- Rowstron, A. and Druschel, P. (2001). Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. *Proceedings of the 18th IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms*.
- Smith, R. G. (1980). The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*. 29, 12.
- Zhu, H. and Shan, L. (2005). Caste-Centric Modelling of Multi-Agent Systems: The CAMLE Modelling Language and Automated Tools. In Beydeda, S. and Gruhn, V. *Model-driven Software Development, Research and Practice in Software Engineering*. Springer, 57-89.