

Couplage Métaheuristique - Modèle de Simulation pour la résolution d'un DARP à véhicules électriques en conditions réelles de trafic

Michelle CHABROL¹, Michel GOURGAND¹, Patrice LECLAIRE¹

¹Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et Optimisation des Systèmes ISIMA, Complexe Scientifique des Cézeaux, 63173 Aubière Cedex, France

{chabrol, gourgand, leclaire}@isima.fr
<http://www.isima.fr/limos/>

Résumé—Ce papier aborde un problème de transport à la demande (Dial-A-Ride) dans des Conditions Réelles de Trafic (DARP-RTC) utilisant une flotte de véhicules électriques. Un tel système possède une double complexité provenant de la complexité algorithmique du problème théorique et de la complexité systémique du réseau routier sous-jacent. En utilisant la méthodologie de modélisation ASCI, nous proposons un modèle de connaissance du système étudié et un modèle d'action basé sur un couplage métaheuristique – simulation, utilisant un modèle de simulation permettant d'obtenir une évaluation fine et réaliste du système. Ce couplage présente des sources de redondance, entre l'évaluation de deux solutions voisines, que nous proposons de réduire en sauvegardant l'état du système lors du dernier événement commun à deux itérations successives.

Mots-clés—DARP, Contraintes d'autonomie électrique, Conditions réelles de trafic, Couplage, Métaheuristique, Simulation.

I. INTRODUCTION

Cette étude se place dans le contexte d'un projet commun à plusieurs laboratoires de recherche clermontois, organisés en Fédération de Recherche : la FR TIMS (Transport, Informatique, Mobilité, Sécurité). Cette fédération a pour but de regrouper les compétences complémentaires et variées de quatre laboratoires :

- le LaMI : Laboratoire de Mécanique et Ingénieries,
- le LASMEA : Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électronique, et d'Automatique,
- le LIMOS : Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes,
- le LISC (entité du CEMAGREF) : Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes.

Le projet V2I (Véhicules et Infrastructures Innovants) de la FR TIMS met en place divers axes de recherche autour du véhicule, concernant, par exemple, la sécurité des véhicules autonomes, le contrôle des trajectoires, la détection et le franchissement d'obstacles ou encore la planification des tournées de ces véhicules dans le cadre d'un service de transport à la demande.

Ce papier aborde un problème de planification de tournées de véhicules électriques autonomes pour un service de transport à la demande sur des voies non réservées, c'est-à-dire utilisées par d'autres types de véhicules (voitures parti-

culières, camions, bus). Un tel système possède une double complexité provenant à la fois de la complexité algorithmique du problème d'optimisation traité (ici, le DARP) et de la complexité systémique du réseau dans lequel les véhicules électriques évoluent parmi d'autres types de véhicules. La méthodologie ASCI [7], qui préconise de séparer la récolte de la connaissance de la construction du modèle d'action, est utilisée pour produire un modèle de connaissance orienté objet du système et un modèle d'action reposant sur un couplage entre une métaheuristique et un modèle d'évaluation des performances par simulation. Le modèle de simulation permet de reproduire un comportement fin et réaliste du système. Le modèle d'action proposé présente quelques sources de redondance au niveau de l'évaluation de deux solutions voisines, que nous proposons de réduire par une technique de sauvegarde du dernier état commun entre ces deux solutions.

Nous suivrons le plan suivant. La partie suivante décrira le système étudié et les sources de double complexité pour une classe de problèmes. Dans la troisième partie, la méthodologie de modélisation utilisée sera présentée. La quatrième partie décrira le modèle d'action proposé, à savoir un couplage entre une métaheuristique et un modèle de simulation, les techniques proposées pour supprimer les sources de redondance identifiées et les premiers résultats.

II. DIAL-A-RIDE PROBLEM AVEC CONTRAINTES D'AUTONOMIE ÉLECTRIQUE (DARP-R)

Le problème étudié est un Dial-A-Ride Problem en Conditions Réelles de Trafic (DARP-RTC), pour lequel la flotte est composée de véhicules électriques autonomes appelés CyCabs. Ceux-ci ne nécessitent aucun conducteur et se positionnent sur les voies grâce à des capteurs GPS, des analyses visuelles des structures des sols et/ou des systèmes d'analyse tridimensionnelle de l'environnement. Ils peuvent transporter jusqu'à quatre personnes simultanément. Ces véhicules sont dotés de batteries électriques, d'une autonomie de trajet de deux heures, qui doivent être rechargées plusieurs fois par jour aux dépôts. Les CyCabs interagissent avec d'autres types de véhicules sur des routes communes, mais possèdent également des voies dédiées. Le problème

est alors d'affecter le plus grand nombre de requêtes de transport aux véhicules, de manière à satisfaire au mieux la demande tout en minimisant les coûts de transport.

A. Problème théorique

Le problème théorique le plus proche du problème étudié se nomme Dial-A-Ride Problem (DARP), que l'on peut exprimer comme suit. Etant donné une flotte homogène de K véhicules de capacité v (en nombre de places assises), un service de transport à la demande a pour but de satisfaire le plus grand nombre de requêtes de transport possible. Une requête est émise par un client $c \in \mathcal{C}$ qui spécifie l'origine o_c et la destination d_c du trajet, ainsi que les fenêtres de temps correspondantes $[e_{o_c}, l_{o_c}]$ et $[e_{d_c}, l_{d_c}]$, durant lesquelles le service en ces points doit débiter. Les contraintes classiques sur DARP sont : les contraintes de capacité du véhicule; les contraintes de couplage qui garantissent que l'origine et la destination d'un client sont servies par un même véhicule; les contraintes de précédence assurant que le service de l'origine d'une requête de transport est effectué avant le service de sa destination; les contraintes de temps de trajet maximum pour un véhicule et pour un client qui limitent respectivement la durée maximum d'un trajet effectué par un véhicule et d'un trajet d'un client dans un véhicule; les contraintes de fenêtres de temps qui assurent que le service est réalisé dans un intervalle de temps spécifié par le client. L'objectif d'un tel problème peut être la maximisation de la satisfaction du client mesurée par le respect des contraintes de fenêtres de temps et de temps de trajet maximum pour un client. Des états de l'art sur le DARP peuvent être trouvés dans [3] et [10].

Le problème spécifique étudié possède une contrainte additionnelle concernant l'autonomie électrique des véhicules, qui peut s'exprimer comme suit. Les véhicules possèdent une autonomie électrique ne permettant pas d'effectuer une tournée sur toute la journée sans recharge. Ils doivent se réapprovisionner plusieurs fois par jour. Les dépôts du problème ne sont plus considérés seulement comme des zones de parking mais également comme des stations de rechargement électrique auxquelles les véhicules peuvent venir se réapprovisionner électriquement. Un véhicule peut visiter un même dépôt plusieurs fois dans une journée. Selon les standards de la littérature, ce problème peut être vu comme une extension du Multidepot Multitrip DARP. Une nouvelle contrainte doit être ajoutée pour modéliser le temps de recharge électrique qui n'est pas négligeable et dépend du temps de trajet effectué depuis le dernier rechargement. Cette contrainte d'autonomie électrique est, à notre connaissance, non considérée dans la littérature. Comme les aspects *multidepot* et *multitrip* sont implicitement contenus dans la définition de la contrainte d'autonomie électrique, on appelle ce problème : Dial-A-Ride Problem à contraintes d'autonomie Electrique (DARP-E).

B. Conditions Réelles de Trafic (RTC)

Certains auteurs ont considéré le trafic en l'intégrant dans les temps de trajets, sans toutefois modéliser de manière précise le comportement des véhicules. [6] propose un modèle de simulation dans lequel les temps de trajet sont fonction de la période de la journée et basés sur des

historiques. Cependant, ce modèle ne considère pas explicitement les flux de véhicules en détail et les délais aux intersections; ces temps sont supposés être déjà intégrés de manière moyenne dans les temps de parcours d'une route.

Dans le cas d'un problème de tournées de véhicules étudié en conditions réelles de trafic, les temps de trajet ne sont plus fixes, mais dépendent des conditions de trafic : interactions avec les autres véhicules, temps d'attente aux intersections, ralentissement et accélération des véhicules. Dans ce papier, on considère un DARP à contraintes d'autonomie électrique en conditions réelles de trafic (DARP-E-RTC) pour lequel les temps de trajet ne peuvent pas être exprimés analytiquement mais via un modèle d'évaluation par un modèle de simulation détaillé et réaliste.

III. ANALYSE DU PROBLÈME EN CONDITIONS RÉELLES DE TRAFIC

Ce problème possède une double complexité et nécessite un couplage entre une méthode d'optimisation et un modèle d'évaluation pour être résolu.

La complexité de ce type de problèmes est le résultat d'une complexité algorithmique inhérente aux problèmes de tournées de véhicules et une complexité systémique du réseau sous-jacent sur lequel le problème a lieu. [9] introduit la notion de double complexité. Les méthodes d'optimisation classiques ne permettent plus de résoudre ce type de problèmes car l'évaluation de l'un ou plusieurs des critères du problème ne peut être réalisée analytiquement, mais seulement par un modèle d'évaluation : modèle de simulation ou modèle Markovien.

A. Double complexité

Les problèmes de tournées de véhicules ont été étudiés par de nombreux auteurs depuis des décennies. Parmi les problèmes étudiés, du plus basique au plus complexe (en termes du nombre de contraintes considérées), il y a le TSP, le VRP, le PDP et le DARP. Un état de l'art de cette classe de Problèmes de Tournées de Véhicules (*Routing Problems* ou RP) peut être trouvé dans [12].

Une autre communauté de recherche importante étudie la classe des Systèmes de Trafic Urbains (STU). Pour ces systèmes, plusieurs modèles peuvent être trouvés permettant de répondre à des décisions d'horizons temporels différents (stratégique, tactique, opérationnel) et différents niveaux d'abstraction (macroscopique, mesoscopique, microscopique).

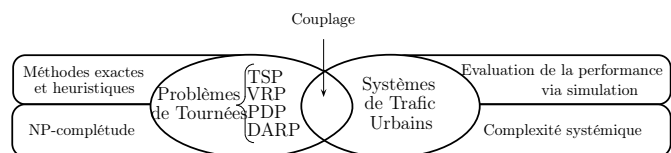


Fig. 1. Double complexité pour les Problèmes de Tournées de Véhicules en Conditions Réelles de Trafic (RP-RTC)

La double complexité de la classe des RP-RTC (figure 1) provient de la complexité algorithmique des problèmes

de tournées de véhicules qui sont connus pour être NP-complets en tant qu'extensions du TSP qui est lui-même NP-complet, et la complexité systémique du réseau routier sur lequel ils ont lieu.

B. Méthodologie de modélisation

La méthodologie utilisée est ASCII (Analyse – Spécification – Conception – Implémentation), développée par [7], dont la contribution principale consiste à séparer la récolte de connaissance du domaine, de la construction d'un modèle d'action pour un système du domaine, de manière à ne pas dépendre d'un langage de programmation particulier et promouvoir au mieux la réutilisabilité des composants logiciels.

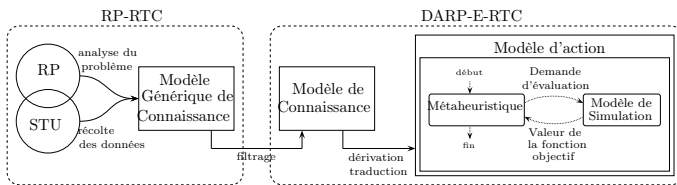


Fig. 2. Méthodologie ASCII appliquée au DARP-E-RTC

La première étape de la méthodologie ASCII (figure 2) est la production d'un modèle générique de connaissance du domaine étudié dans un langage descriptif naturel ou graphique (UML par exemple). Ce modèle utilise une décomposition en trois sous-systèmes :

- le sous-système physique (SSP) qui regroupe les entités du système, leur répartition géographique et leurs relations,
- le sous-système logique (SSP) qui contient les services élémentaires que le système doit traiter,
- le sous-système décisionnel (SSD) qui définit les règles de gestion du système.

Cette étape nécessite des compétences en modélisation du domaine étudié, ici, le domaine des systèmes de trafic urbain (STU) et en recherche opérationnelle afin de pouvoir déterminer les caractéristiques des problèmes d'optimisation, relatifs ici aux problèmes de tournées de véhicules (RP) qui peuvent prendre place dans ces systèmes.

Une fois le modèle générique de connaissance obtenu pour le domaine (*Routing Problems in Real Traffic Conditions* ou RP-RTC), il est possible de spécifier le problème étudié et le système sous-jacent. Cette opération de filtrage pour un système particulier (DARP-E-RTC par exemple) permet d'obtenir la description précise du problème étudié dans son contexte, en réduisant la partie utile du modèle générique de connaissance du domaine aux stricts besoins du problème d'optimisation traité et du fonctionnement du système sous-jacent.

Le modèle d'action est ensuite traduit à partir du modèle de connaissance du système étudié. Pour résoudre des problèmes possédant une double complexité, [9] préconise l'utilisation du couplage d'une méthode d'optimisation et d'un modèle d'évaluation. La partie suivante décrit une proposition de modèle d'action utilisant un couplage entre une métaheuristique et un modèle de simulation.

C. Modèle de connaissance du DARP-E-RTC

Le modèle générique de connaissance des RP-RTC est donné dans [2].

Pour la complexité systémique, les travaux de [11] permettent de décrire le modèle générique de connaissance des systèmes de trafic urbains et de leurs règles de fonctionnement : comportement des conducteurs, règles de priorités aux intersections, fonctionnement des feux de circulation, limitation de vitesse, ...

Pour la complexité algorithmique, on peut étudier des états de l'art couvrant les différents problèmes de tournées tels que celui de [12] qui propose un modèle général pour les Pickup-and-Delivery Problem et de ses extensions possibles. Ce modèle permet également de prendre en compte des problèmes de tournées ne comportant que des services de collecte ou de livraison à effectuer.

De nombreux auteurs tels que [5] et plus récemment [1] et [8] se sont intéressés à recenser et proposer des classifications pour les problèmes de tournées de véhicules. [8] propose une classification à quatre champs $\pi/\alpha/\beta/\gamma$, et leurs valeurs par défaut (les plus fréquemment rencontrées dans la littérature) :

- π – Horizon de planification.
- α – Ressources :
 - Ressources fixes : type de dépôt (backhaul, linehaul), nombre de dépôts, type de graphe (orienté ou non).
 - Ressources mobiles : nombre de véhicules, type de flotte (homogène ou non), nombre de travailleurs (et leurs compétences).
 - Requêtes : localisation (noeuds et/ou arcs), type de client (pickup et/ou delivery), nombre de produits ou de types de clients, nature statique ou dynamique de la demande, coûts de service et de transport (statique ou dynamique).
- β – Contraintes : capacité, autonomie, fenêtre de temps, nombre de clients servis, conditions de trafic, split delivery, multi-trips, retour au dépôt initial, dépôt de départ, fréquence de service, intervalle minimum ou maximum entre deux services, dépôt de départ dans le cas multi-période, couplage, précédence, compatibilités.
- γ – Fonctions objectif : distance totale, nombre de véhicules utilisés, temps d'attente total, nombre de clients non servis, temps total de service, temps total de déplacement, satisfaction du client.

L'étude de modèles généraux pour les problèmes de tournées, de classifications de ces problèmes et de problèmes spécifiques, permettent de produire un modèle générique de connaissance du domaine. Un filtrage de ce dernier permet d'obtenir un modèle de connaissance du DARP-E-RTC. Les figures 3 et 4 représentent les diagrammes de classes UML respectivement des sous-systèmes physique et logique. Les classes grisées représentent les classes propres au problème de tournées de véhicules.

La figure 5 représente quelques relations entre les trois sous-systèmes, relativement au problème de tournées.

R réplifications. Si l'on note \tilde{f}_r l'estimation de la fonction objectif f pour la réplification r , la moyenne F_R de cette estimation sur les R réplifications est

$$F_R(s_i) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \tilde{f}_r(s_i)$$

\mathcal{R} est l'ensemble des R réplifications. Le nombre de réplifications peut par exemple être choisi dans le but d'étudier la robustesse de la solution face à des situations dites critiques. Pour une réplification $r \in \mathcal{R}$ donnée et deux solutions voisines (successives) s_i et s_{i+1} , qui ne diffèrent que par l'affectation d'un client à un véhicule, une partie de l'évaluation de la fonction objectif est commune.

La question est alors de déterminer la partie commune de l'évaluation de ces deux solutions successives pour une réplification donnée. La figure 6 représente la différence entre deux solutions du problème à deux véhicules k and k' . On s'intéresse au premier service requis par le client, à savoir le point de collecte (pickup) qui se situe nécessairement avant le service de desserte (delivery). t_d représente la date de service d'une demande (pickup ou delivery) d'un client c telle que $d \in D_k$ et c est affecté au véhicule k .

Les dates de service possédant une astérisque sont celles pour lesquelles la date de service a été changée suite à la modification des tournées de k et k' en raison respectivement de la suppression et de l'ajout du client c dans la solution s_{i+1} . L'opérateur peut s'exprimer comme suit : le j -ème point de service (qui est un point de collecte d'un client c) du véhicule k est inséré avant le j' -ème point de service du véhicule k' . Le service de livraison du client c est également transféré au véhicule k' . La date de fin de la partie commune aux évaluations de s_i et s_{i+1} pour la r -ème réplification, notée $T_{i,i+1,r}$, peut être calculée comme étant le minimum des dates de service du $(j-1)$ -ème et du $(j'-1)$ -ème point de service respectivement des véhicules k et k' :

$$T_{i,i+1,r} = \min(t_{d_{j-1}}, t_{d_{j'-1}})$$

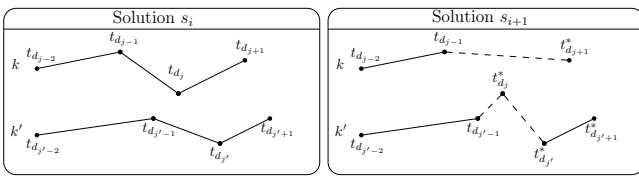


Fig. 6. Exemple de deux solutions successives s_i et s_{i+1}

L'évaluation de la réplification r de la solution s_{i+1} utilise une partie déjà calculée pour l'évaluation de la solution précédente s_i ; les calculs de cette partie commune peuvent être réutilisés d'une itération à la suivante.

D. Implémentation

A chaque instant de la simulation, les éléments suivants sont connus : l'état de chaque véhicule de la flotte ainsi que hors flotte, l'état des feux de circulation et l'état de points de génération des véhicules (entrants dans le réseau).

Ainsi toutes les données sont connues pour réaliser une réinitialisation de l'évaluation de la solution s_{i+1} sans avoir

à recommencer complètement l'évaluation de la partie commune à la solution précédente s_i .

Soit $\gamma_{i,r}$ l'état de départ de la r -ème réplification pour la solution s_i . $\gamma_{i,r}$ est calculé à l'itération précédente ($i-1$) et dépend de la date $T_{i-1,i,r}$ de la fin de la partie commune à l'évaluation des solutions s_i et s_{i-1} .

Algorithme 1

Algorithme d'une descente du couplage métaheuristique – simulation

Soit s_i la solution courante ; s_1 est initialisée par un algorithme de construction.

Soit $\gamma_{i,r}$ la date de départ de la r -ème réplification pour la solution s_i ; $\gamma_{1,r}$ vaut 0.

Soit $F_R^* = F_R(s_1)$ la meilleure valeur de la fonction objectif \tilde{f} .

Pour $i \in \mathcal{I}$ **faire**

Soit s_{i+1} une solution voisine de s_i , construite par l'opérateur de voisinage.

Pour $r = 1..R$ **faire**

Soit $T_{i,i+1,r}$ la date de la fin de la partie commune des évaluations de s_i et s_{i+1} pour la r -ème réplification, calculée comme mentionnée dans la partie IV-C.

Exécuter la r -ème réplification de la solution courante s_i à partir de la date $T_{i,i+1,r}$ et initialisée avec l'état de départ $\gamma_{i,r}$.

Cette réplification fournit l'évaluation $\tilde{f}_r(s_i)$ de la solution courante s_i et l'état de départ $\gamma_{i+1,r}$ de la solution suivante s_{i+1} .

Fin pour

Calculer la valeur moyenne $F_R(s_i)$ comme mentionnée dans la partie IV-C.

Si $F_R(s_i) \leq F_R^*$ **alors**

$F_R^* \leftarrow F_R(s_i)$, $s_i \leftarrow s_{i+1}$, $\gamma_{i,r} \leftarrow \gamma_{i+1,r}$

Fin si

Fin pour

L'algorithme 1 décrit les $I (= |\mathcal{I}|)$ itérations d'une simple descente, qui peut être intégrée dans un algorithme de recherche locale itérative. Hormis pour la première descente, s_1 est dans ce cas initialisée avec la meilleure solution trouvée à la descente précédente. A chaque descente, une nouvelle valeur de \mathcal{I} peut être choisie. L'algorithme peut être adapté, par exemple pour comptabiliser le nombre d'itérations sans amélioration de la meilleure solution connue. Cet algorithme peut aussi être utilisé dans le cadre d'un recuit simulé en choisissant une température initiale, l'évolution de cette température et un nouvel opérateur de voisinage pour la diversification.

Le modèle de simulation réalise la vérification des contraintes du problème. Certaines contraintes, telles que les contraintes de fenêtre de temps, sont souples, et peuvent être violées si les conditions de trafic sont trop fortes. Cela donne lieu à une pénalisation de la fonction objectif.

Le calcul de la date $T_{i,i+1}$ est effectué à l'itération i et est effectué pour les R réplifications de la solution courante s_i pour obtenir les états de départ $\gamma_{i+1,r}$ ($r \in \mathcal{R}$) de la solution s_{i+1} . Le choix de la solution voisine s_{i+1} doit être effectué à l'itération i pour éviter une autre source de redondance dans les calculs.

E. Application

Cette méthode est en phase d'implémentation sur le cas du DARP-E-RTC, dans le but d'étudier le lien entre la répartition temporelle des requêtes et l'économie réalisée sur les temps de calcul, pour le couplage proposé.

Nous travaillons sur une instance académique représentée par le graphe de la figure 7. Les arcs modélisent les mouvements possibles entre les intersections. Pour obtenir une modélisation fine du comportement des véhicules aux intersections, chaque intersection est détaillée au niveau microscopique en termes de jonctions et voies.

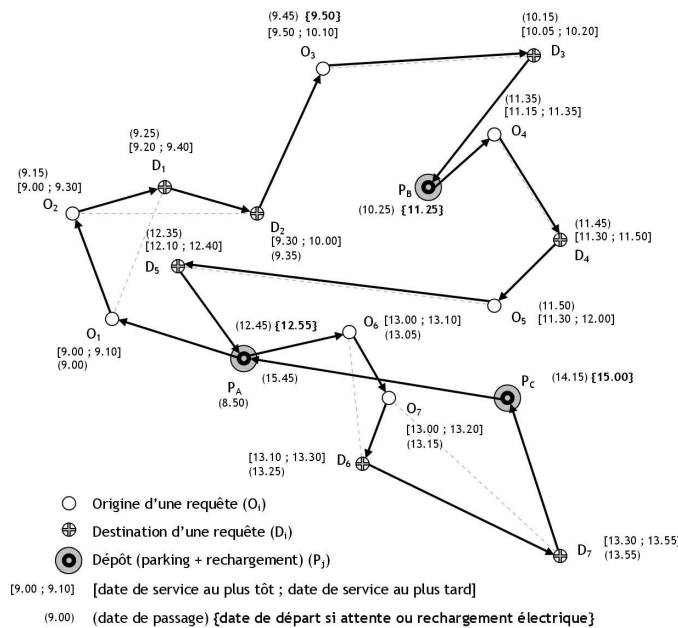


Fig. 7. Tournée réalisable pour une instance de DARP-E

L'exemple de la figure 7 montre une planification réalisable pour l'ensemble des requêtes de transport dans un service à la demande à un véhicule basé au dépôt P_A .

Dans cet exemple, sept requêtes sont à servir par un véhicule situé initialement au dépôt P_A (qui est aussi le dépôt de fin de service). Une requête i est constituée d'un nœud origine O_i et d'un nœud destination D_i (représentée par un trait en pointillés entre l'origine et la destination). Le véhicule est initialement chargé pour pouvoir effectuer un trajet de 3 heures. On suppose ici que le temps de chargement des batteries électriques est égale au temps de déplacement du véhicule.

L'étude d'un tel problème en conditions réelles de trafic comporte les étapes suivantes. La première est la modélisation microscopique du réseau de manière à avoir des distances réalistes et des règles de gestion (priorité, feux) ressemblant à la situation modélisée. La deuxième est la modélisation de la charge de trafic grâce à des points de comptage et des répartitions du trafic aux différentes intersections. Vient ensuite l'étalonnage des fonctions de distance permettant de connaître pour chaque voie, le temps de parcours nécessaire pour un véhicule entrant dans une voie à un instant donné. Ces fonctions sont utilisées pour le calcul de plus courts chemins dépendant du temps sous des hypothèses FIFO (par exemple par l'algorithme proposé par [4]), nécessaires à la constitution de la tournée d'un véhi-

cule en fonction d'une séquence ordonnée de requêtes à servir. La métaheuristique permet, à partir d'une solution initiale construite par exemple par une heuristique respectant les contraintes de précédence et utilisant ces plus courts chemins, de naviguer dans l'espace des solutions possibles. L'admissibilité d'une solution en termes de contraintes de pairage est vérifiée avant d'exécuter l'évaluation d'une solution. Les contraintes de fenêtres de temps peuvent être violées, moyennant une pénalisation de la fonction objectif.

V. CONCLUSION

Dans ce papier est présentée une nouvelle extension du Dial-A-Ride Problem (DARP) pour le cas spécifique d'une flotte de véhicules électriques à courte autonomie, nommée DARP à contraintes d'autonomie électrique (DARP-E). Considéré dans des conditions réelles de trafic, ce problème possède une double complexité provenant à la fois de la complexité algorithmique du DARP-E et de complexité systémique du réseau routier dans lequel il évolue. Pour étudier le DARP-E en conditions réelles de trafic (DARP-E-RTC), la méthodologie de modélisation utilisée (ASCI) permet dans un premier temps de produire un modèle de connaissance orienté objet, qui est ensuite dérivé en un modèle d'action utilisant un couplage entre une métaheuristique et un modèle d'évaluation par simulation de granularité microscopique. Plusieurs sources de redondance sont identifiées et une technique est proposée pour réduire les temps de calcul. Ce couplage est en cours d'implémentation sur des cas d'étude.

RÉFÉRENCES

- [1] G. Berbeglia, J.-F. Cordeau, I. Gribkovskaia and G. Laporte (2007) : "Static pickup and delivery problems : a classification scheme and survey". In : *TOP* **15**, 1–31.
- [2] M. Chabrol, M. Gourgand and P. Leclaire (2008) : "A General Framework for the Routing Problems in Real Traffic Conditions". In : *The 22nd European Simulation and Modelling Conference, ESM'2008*.
- [3] J.-F. Cordeau and G. Laporte (2007) : "The Dial-a-Ride Problem : models and algorithms". In : *Annals of Operations Research* **153**, 29–46.
- [4] B. C. Dean, "Shortest Paths in FIFO Time-Dependent Networks : Theory and Algorithms". Survey paper, 1999.
- [5] M. Desrochers, J. K. Lenstra and M. W. P. Savelsbergh (1990) : "A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems". In : *European Journal of Operational Research* **46**, 322–332.
- [6] L. Fu (2002) : "A simulation model for evaluating advanced dial-a-ride paratransit systems". In : *Transportation Research Part A* **36**, 167–188.
- [7] M. Gourgand and P. Kellert (1992) : "An object-oriented methodology for manufacturing system modelling". In : *Proceedings of the 1992 Summer Computer Simulation Conference*, 1123–1128.
- [8] M. Haj Rachid, W. Ramdane-Chérif, C. Bloch and P. Chatonnay (2008) : "Classification de Problèmes de Tournées de Véhicules". In : *7ème Conférence Internationale de Modélisation et Simulation - MOSIM'08, Paris, France*.
- [9] S. Norre (2005) : "Heuristiques et Métaheuristiques pour la Résolution de Problèmes d'Optimisation Combinatoire dans les Systèmes de Production". HDR.
- [10] S. N. Parragh, K. F. Doerner and R. F. Hartl (2008) : "A survey on pickup and delivery problems – Part II : Transportation between pickup and delivery locations". In : *Journal für Betriebswirtschaft* **58**, 81–117.
- [11] D. Sarramia (2002) : "ASCI-mi : une méthodologie de modélisation multiple et incrémentielle – Application aux systèmes de trafic urbain". Thèse.
- [12] M. W. Savelsbergh and M. Sol (1995) : "The General Pickup and Delivery Problem". In : *Transportation Scienc* **29**, 17–29.