



HAL
open science

Problèmes de tournées de bus: une proposition de couplage de méthodes d'optimisation et de simulation

Loïc Yon, Bruno Bachelet

► **To cite this version:**

Loïc Yon, Bruno Bachelet. Problèmes de tournées de bus: une proposition de couplage de méthodes d'optimisation et de simulation. 5ème Conférence Francophone Modélisation et Simulation (MOSIM), Sep 2004, Nantes, France. pp.345-352. <hal-01704383>

HAL Id: hal-01704383

<https://hal.science/hal-01704383v1>

Submitted on 15 Feb 2018

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.



HAL Authorization

PROBLÈMES DE TOURNÉES DE BUS : UNE PROPOSITION DE COUPLAGE DE MÉTHODES D'OPTIMISATION ET DE SIMULATION

Loïc YON et Bruno BACHELET

LIMOS UMR 6158

ISIMA - Campus des Cézeaux – BP 10125

63173 Aubière CEDEX – France

{loic.yon, bruno.bachelet}@isima.fr

RÉSUMÉ : Dans un contexte économique exigeant, les compagnies de transports publics recherchent des outils d'aide à la décision pour les guider dans l'amélioration de leurs offres de transport en réseau urbain. C'est dans cette optique que nous présentons notre modèle. Cependant, face à un problème d'optimisation, deux possibilités principales s'opposent : définir un modèle mathématique et le résoudre avec des techniques avancées d'optimisation, ou alors définir un modèle de simulation et explorer les possibilités pour en dégager une bonne solution. Les deux approches ont leurs défauts : la première trouve souvent une solution optimale, mais sur un modèle trop simplifié ; la seconde considère un modèle beaucoup plus complet, mais l'exploration des possibilités est limitée. Nous proposons ici une tentative de couplage de méthodes d'optimisation avec la simulation dans le but de tirer profit des deux approches. Après une présentation du modèle, nous expliquons la méthode de résolution retenue. Nous proposons ensuite d'utiliser la simulation pour affiner les données de ce modèle afin d'obtenir de bonnes solutions pratiques.

MOTS-CLÉS : transports publics urbains, métaheuristiques, programmation linéaire, simulation.

1. INTRODUCTION

Le problème étudié ici consiste à élaborer des tournées de bus en milieu urbain, afin de satisfaire au mieux les besoins en déplacement des passagers. De nombreux aspects économiques et sociaux doivent être considérés. Nous choisissons de répondre à ce problème par la résolution d'un modèle mathématique, ce qui suppose naturellement quelques simplifications par rapport au problème réel. Cela nous permet d'obtenir une méthode de résolution efficace fournissant de très bonnes solutions (i.e. proches de l'optimum). Cependant, les simplifications nécessaires à l'élaboration de ce modèle font que la solution n'est pas exploitable directement, elle reste éloignée du problème réel.

C'est à ce niveau qu'intervient la simulation qui est supposée fournir une évaluation beaucoup plus réaliste du système. A la différence des approches classiques de couplage optimisation/simulation, ce n'est pas l'estimation de la fonction objectif qui nous intéresse, mais d'autres critères, comme par exemple le temps d'attente des passagers aux arrêts de bus, qui sera utilisé pour modifier le modèle mathématique qui devra alors être réoptimisé à partir de la dernière solution optimale (ou très "bonne" solution) trouvée.

Différents critères d'évaluation peuvent être choisis, notamment en fonction des acteurs considérés. Les compagnies de transport s'attachent avant tout aux critères d'efficacité et de rentabilité, les passagers à la qualité de service. L'état, lui, a d'autres préoccupations comme, par exemple, la sauvegarde de la vocation de service public ou social.

Le modèle proposé ici se limite exclusivement à un seul moyen de transport : le bus. Pour accéder au réseau de bus, nous supposons que les usagers marchent et qu'ils n'empruntent celui-ci que s'ils sont satisfaits de la qualité de service.

Nous considérons un graphe orienté $G = (V, E)$ où V est l'ensemble des nœuds et E l'ensemble des arcs. Chaque nœud correspond à un arrêt possible du bus ou bien à une intersection de rues dans le réseau réel. Chaque arc représente une route entre deux arrêts ou deux intersections.

Nous supposons connus les désirs des usagers potentiels. Ceux-ci se traduisent sous la forme d'un ensemble K de commodités, c'est-à-dire de tuples (o_k, d_k, D_k, T_k) où o_k est l'origine, d_k la destination, D_k la demande maximale et T_k un temps de référence

(comme le temps de trajet de o_k à d_k avec un véhicule personnel ou le temps maximal que les clients s'autorisent pour ce déplacement) pour la commodité k . Si l'on connaît la demande maximale pour une commodité, la demande effective, elle, peut être élastique, c'est-à-dire qu'elle varie en fonction de la capacité du réseau à réduire le temps de trajet.

Nous cherchons un système de transport Γ - une tournée, un ensemble de tournées, ou toute autre topologie prédéfinie - qui respecte les objectifs ou contraintes suivants :

- le coût de Γ doit être soit minimal, soit maîtrisé, c'est-à-dire inférieur à une valeur seuil S (respectueux d'une enveloppe budgétaire). Cette borne supérieure sur le coût peut prendre différentes formes (longueur des tournées, temps).
- Γ doit respecter des contraintes techniques, de forme ou de desserte. Ces dernières contraintes, territoriales, sont liées à la vocation de service public du système envisagé.
- la satisfaction des usagers, perçue par la qualité de service, doit être la meilleure possible.

Pour prendre en compte l'élasticité de la demande, on pondère la demande nominale par une fonction dépendante du temps $\Phi_\alpha(c^k, T^k)$ dite fonction de satisfaction qui permet de prendre en compte l'élasticité de la demande, i.e. la variation de la demande en fonction de l'offre.

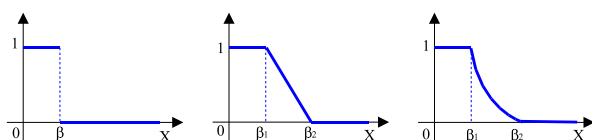


Figure 1. Différentes fonctions de satisfaction

La qualité de service peut être perçue de nombreuses manières (temps de voyage global ou simplement de bus ou de marche, bonne accessibilité : temps d'attente et temps de marche raisonnables, politique de tarification adaptée, ...). Pour la quantifier, nous nous limitons au calcul du temps passé à voyager. Étant donné une commodité k , le nombre maximal de passagers susceptibles d'emprunter Γ est D_k . On note c^k le temps induit par Γ pour se rendre de o_k à d_k . La figure 1 montre différentes modélisations possibles de la fonction de satisfaction. On note X la perception de l'usager (excellente quand X est proche de 0). La première fonction est une simple barrière : l'usager prend le bus ou non si ses critères sont satisfaits ou non. La deuxième, linéaire par morceaux, nuance ce comportement binaire. Cette fonction est facile à intégrer dans un modèle linéaire. La dernière est une fonction plus réaliste encore.

La section 2 présente le modèle d'optimisation retenu

pour la problématique. Une méthode de résolution est expliquée succinctement dans la section 3. La section 4 explique la tentative de couplage entre ces méthodes de résolution et un modèle de simulation. Enfin, nous terminons sur l'avancée de ce travail et les conclusions qui en découlent.

2. MODÉLISATION

Nous allons présenter un modèle pour notre problématique prenant en compte l'élasticité de la demande. Ce modèle s'appuie sur une formulation par multiflot. On cherche une ou plusieurs tournées sous forme de circuits.

2.1. Déplacement des passagers

On considère que les passagers utilisent exclusivement deux modes de déplacement : la marche à pied et le bus. On peut distinguer deux types majeurs de comportement en ce qui concerne leur manière d'emprunter le bus comme moyen de locomotion :

- On suppose que les passagers suivent un plus court chemin (PCC) entre leur origine et leur destination. Les usagers peuvent sortir ou rentrer dans le bus comme bon leur semble. Nous appellerons ce mode, le *mode PCC*.
- L'autre mode de déplacement envisagé est plus proche de la réalité, ou plutôt, rend compte du comportement du passager usuel qui se révèle "paresseux" : les usagers marchent de leur point de départ à l'arrêt de bus le plus proche et ne sortent du bus qu'au plus près de leur destination. On appellera ce mode, le *mode réaliste*.

Nous estimons que le mode PCC est moins réaliste que le second mode même s'il peut s'appliquer aux usagers pressés ou ayant les moyens. Ces passagers sont en effet défavorisés par les politiques de tarification usuelles. Cependant, il est à noter que ce mode engendre de meilleurs temps de parcours pour chaque commodité.

2.2. Notations

L'ensemble des arcs E est partitionné en deux sous-ensembles A et \bar{A} où A représente les arcs rapides, c'est-à-dire les arcs où seuls les bus sont autorisés à circuler et \bar{A} les arcs lents correspondants aux déplacements piétons. A chaque arc $e \in E$, on associe un coût c_e .

A chaque sommet v , on associe une constante b_v^k qui représente le flot à router pour la commodité k : elle vaut 1 si ce sommet est l'origine de la commodité,

–1 s'il s'agit au contraire de la destination, et 0 dans tous les autres cas.

On note $\omega^+(v)$ (respectivement $\omega^-(v)$) le cocycle sortant (respectivement entrant) du sommet $v \in V$, c'est-à-dire l'ensemble des arcs sortants (respectivement entrants).

2.3. Modèle

On cherche un flot entier $F = (F_e)_{e \in A}$ dit véhicule et un multiflot $f = (f_e^k)_{k \in K, e \in E}$ dit usager. Le modèle est donné à la figure 2.

Chaque composante F_e représente la décision de prendre l'arc $e \in A$ comme arc d'une tournée de bus et donc F représente l'ensemble des tournées recherchées.

Le déplacement des usagers est déterminé par le multiflot f . f_e^k représente à la fois la fraction de passagers effectivement transportés (par rapport à la demande initiale pondérée par une fonction élastique pour la commodité k) et le trajet effectué par ceux-ci.

La taille des bus est suffisamment grande pour permettre à tous les usagers de l'emprunter.

$$\text{maximiser } Z = \sum_{k \in K} D_k \Phi_\alpha(c^k, T_k)$$

sous les contraintes

$$\sum_{e \in A} c_e F_e \leq S \quad (1)$$

$$\sum_{e \in \omega^-(v)} F_e - \sum_{e \in \omega^+(v)} F_e = 0 \quad \forall v \in V_A \quad (2)$$

$$\sum_{e \in E} c_e f_e^k - c^k = 0 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{e \in \omega^-(v)} f_e^k - \sum_{e \in \omega^+(v)} f_e^k = b_v^k \quad \forall v \in V, \forall k \quad (4)$$

$$f_e^k \leq F_e \quad \forall e \in A, \forall k \quad (5)$$

$$F_e \in \{0, 1\} \quad \forall e \in A \quad (6)$$

$$f_e^k \in [0, 1] \quad \forall e \in E, \forall k \quad (7)$$

$$c^k \geq 0 \quad \forall k \quad (8)$$

Figure 2. Modèle avec demande élastique

Les contraintes (3) explicitent le calcul du temps de voyage global pour chaque commodité. Ces contraintes peuvent être directement réinjectées dans la fonction objectif. Les contraintes (2) et (4) représentent respectivement les contraintes de conservation du flot F et du multiflot f . Les contraintes (5) sont les

contraintes de couplage entre le flot entier F et le multiflot f . Elles servent à déterminer la vitesse de déplacement d'un usager (rapide lorsqu'il est dans le bus et lente lorsqu'il marche).

Il est à noter que ce modèle peut être enrichi par des contraintes de capacité sur le flot véhicule et même permettre la représentation du déplacement "réaliste" des piétons, malheureusement au prix d'une complexité spatiale supérieure. On peut aussi ajouter des contraintes de desserte (imposer le flot en certains points).

Si on choisit de modéliser la fonction de satisfaction comme une fonction en escalier ou linéaire par morceaux (cf. figure 1), on peut les injecter dans ce modèle et utiliser des outils classiques de résolution de programmes linéaires.

3. RÉOLUTION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

Le problème tel qu'il est formulé, couplage flot entier et flot fractionnaire, est très proche à la fois des problèmes de conception de réseaux et des problèmes de tournées de véhicules et est, de fait, NP-difficile. Pour un état de l'art sur les problèmes de tournées de véhicules, on pourra se référer par exemple à l'ouvrage [8].

La complexité du problème, ainsi que les tailles conséquentes des instances, rendent ce problème très difficile à résoudre de manière frontale avec des solveurs commerciaux. Il faut donc envisager des résolutions heuristiques.

3.1. Principe

Nous avons appliqué des métaheuristiques classiques de type GRASP ([3, 4]) et Tabou ([5]) pour trouver une tournée puis un ensemble de tournées. Il est en effet plus facile d'utiliser ce type de méthodes lorsque la fonction objectif ou certains coûts sont complexes à exprimer (non linéaires par morceaux par exemple). La fonction objectif étant particulièrement lourde à calculer, notamment lorsque le nombre de commodités est important, il a été possible de la remplacer lors des phases d'exploration locale par des fonctions auxiliaires plus rapides à évaluer (voir [9]). Ces méthodes de résolution sont approchées et permettent de prendre en compte les différents modes de déplacement des piétons ou des fonctions de demandes plus réalistes (non linéaires) mais il reste un inconvénient majeur quoique classique pour ce genre d'approche : on ne sait pas évaluer la qualité de la solution par rapport à l'optimum.

Algorithme 1 Schéma général métaheuristique

Générer $x \leftarrow x_0$ solution initiale
 Stop \leftarrow faux
tant que non (Stop) **faire**
 Générer le voisinage $V(x)$
 Prendre $x' \in V(x)$ admissible améliorant Z
 si x' existe **alors**
 $x \leftarrow x'$
 sinon
 diversifier
 fin si
 si critère d'arrêt **alors**
 Stop \leftarrow vrai
 fin si
fin tant que

La diversification permet de faire un saut dans l'espace des solutions et ainsi d'explorer une autre région de cet espace pour sortir d'un extremum local.

La recherche locale se fait sous contrainte forte : l'utilisation d'un ensemble de tournées dont le coût dépasse le budget initial est prohibé.

3.2. Résultats

Nous avons testé les méthodes de résolution sur différentes instances : les plus petites sont des graphes triangulés aléatoires, la plus grande représente le centre de Clermont-Ferrand (voir figure 9).

n est le nombre de sommets du graphe, m le nombre d'arcs, K le nombre de commodités. S représente le coût maximal (longueur des tournées) et Z la fonction objectif.

Nous donnons, lorsque cela est possible, les solutions données par un solveur commercial de problèmes linéaires entiers mixtes comme CPLEX.

Dans un souci d'homogénéité, tous les résultats listés ci-dessous ont été obtenus avec le mode de déplacement PCC et une fonction de satisfaction linéaire par morceaux.

Les temps de calculs des métaheuristiques ne dépassent pas quelques minutes pour les instances les plus importantes, alors que la résolution par CPLEX est impossible (temps de calcul trop important ou insuffisance des ressources mémoire). On donne alors, si elle est disponible, la borne supérieure sur la solution.

Il est très difficile de clore le gap pour les instances testées avec CPLEX. On peut remarquer que le comportement des heuristiques donnent un bon résultat en un nombre très faible d'itérations.

Graphe				Tabou	GRASP		CPLEX	
n	m	K	S	Z	Z	iter	Z	B_{sup}
10	42	30	53000	7.65	7.65	118	7.65	18.40
10	42	30	-	20.79	20.84	164		
10	42	30	100000	18.70	18.70	146	18.70	21.12
20	96	72	-	42.27	42.27	274		
20	96	72	107400	42.27	42.27	218	42.27	62.96
20	96	380	-	198.55	226.15	275		
20	96	380	107400	178.08	179.10	187	202.12	336.96
92	304	992	-	589.24	638.16	338		
92	304	992	1000100	576.57	551.94	327	N.A.	

Figure 3. Résultats des méthodes de résolution

4. COUPLAGE OPTIMISATION ET SIMULATION

4.1. Schéma général

Le modèle présenté dans la section 2 proposent d'importantes simplifications par rapport au système initial à modéliser : la politique de déplacement des passagers est simplifiée (mode PCC, afin de permettre une modélisation linéaire, plutôt que le mode réaliste) et le calcul des temps d'attente aux arrêts de bus ne sont pas considérés. Cependant, le problème ainsi simplifié reste encore très difficile et il n'est pas envisageable d'intégrer tous les aspects dans un même modèle pour le résoudre directement par des techniques d'optimisation.

A l'inverse, la simulation nous permet de prendre en compte de nombreux aspects et d'évaluer ainsi certains critères comme les temps d'attentes aux arrêts de bus, information indispensable pour une optimisation plus réaliste. Pour tenter d'obtenir une bonne solution en considérant un modèle plus complet, différents types de couplage entre des méthodes d'optimisation et un simulateur ont été proposés.

Ces approches consistent à utiliser la simulation pour évaluer la valeur de la fonction objectif à optimiser. Ainsi, une évaluation F par simulations est nécessaire pour chaque solution S dont on souhaite connaître la qualité. Ensuite, diverses méthodes sont utilisées pour se déplacer dans l'espace des solutions du modèle M en tentant d'améliorer la qualité de la solution : approches basées sur le gradient, méthodes heuristiques d'exploration locale, métaheuristiques comme le recuit simulé... Une synthèse et une classification de ces méthodes sont proposées dans [1] et [6]. La figure 4 illustre le schéma global d'optimisation. Il est évident que de telles approches nécessitent beaucoup de simulations et que les méthodes d'optimisation envisageables sont limitées.

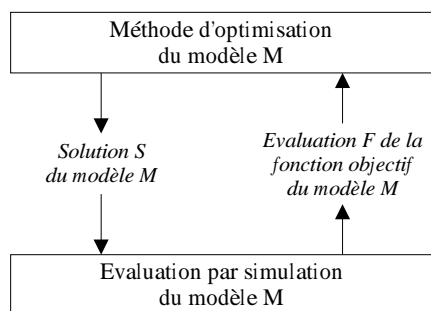


Figure 4. Couplage classique

La proposition de couplage dans cet article vise à éviter la limitation des techniques d'optimisation, de restreindre le nombre d'évaluations d'une solution, et d'utiliser la simulation simplement pour affiner ponctuellement le modèle. On considère donc dans un premier temps un modèle *MO* (e.g. le modèle présenté à la section 2) simplifié, suffisamment représentatif de la problématique générale, optimisé de manière approchée ou exacte avec des techniques d'optimisation avancées. Ensuite, la solution *S* est évaluée par simulations d'un modèle plus complet *MS*. Bien que la fonction objectif évaluée dans le modèle *MS* de la solution soit une donnée intéressante, puisque supposée plus proche de la réalité, c'est plutôt l'évaluation *E* de critères (dans notre cas les temps d'attente aux arrêts de bus) qui n'ont pas été considérés dans le modèle simplifié *MO* qui nous intéressent. L'idée majeure étant de répercuter d'une manière ou d'une autre ces informations (e.g. l'estimation des temps d'attente) dans le modèle simplifié *MO* (cf. figure 5). Une répercussion peut consister à changer des poids, des constantes, dans le modèle *MO* ou alors à y rajouter des contraintes, des coupes. Une fois les modifications *M* apportées au modèle simplifié *MO*, l'optimisation est relancée, soit complètement, soit à partir de la dernière solution si celle-ci reste réalisable.

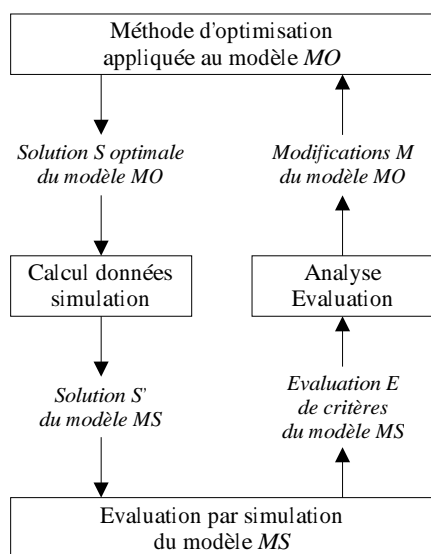


Figure 5. Proposition de couplage

4.2. Simulation

Pour évaluer le système, nous utilisons la simulation à événements discrets. Une analyse de domaine nous a permis de définir un ensemble de composants permettant la modélisation de flux dans divers systèmes, notamment des réseaux urbains où circulent des passagers et des bus, mais également des réseaux de communication où l'on étudie la circulation de paquets.

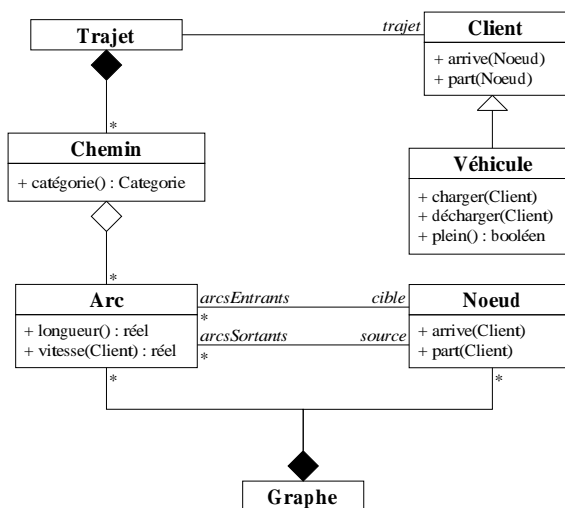


Figure 6. Diagramme de classes du modèle général

Notre objectif à long terme est de fournir un cadre de travail qui permette l'optimisation et la simulation de systèmes de flux variés utilisant la notion fondamentale de graphe. Notre modèle repose donc sur un ensemble de superclasses décrivant de manière générale le système (cf. figure 6, les schémas sont en UML [7]). Elles seront ensuite dérivées pour décrire des systèmes spécifiques (cf. figure 7). Les principaux éléments qui constituent le modèle sont :

- **Client** qui représente un élément de flux, il peut s'agir aussi bien d'un passager que d'un bus dans le cas d'un réseau urbain, ou d'un paquet dans le cas d'un réseau de communication. Cet objet possède des méthodes `arrive()` et `part()` qui l'informent de son arrivée ou de son départ d'un nœud.
- **Vehicule** qui représente un élément de flux pouvant en contenir d'autres, il peut s'agir naturellement d'un bus dans le cas d'un réseau urbain, ou d'une agrégation de paquets dans le cas d'un réseau de communication. Cet élément est également considéré comme un **Client**.
- **Trajet** qui représente un trajet prédéfini dans le réseau. Dans le cas d'un bus, il s'agit de sa ligne ; dans le cas d'un passager, son trajet en considérant les portions à pied et en bus. Dans le cas d'un réseau de communication MPLS, il s'agira du routage des paquets, e.g. un LSP (*Label Switched Path*) [2].

- **Graphe**, **Noeud** et **Arc** qui représentent le réseau supportant le flux. Il est intéressant de noter qu'à l'image d'un **Client**, un **Noeud** est informé de l'arrivée et du départ d'un **Client**. Le dédoublement des méthodes `arrive()` et `part()` dans les classes **Client** et **Noeud** permet à l'utilisateur qui les surchargera de décider de l'approche pour guider les clients : soit ce sont les clients qui sont les acteurs de leur déplacement, soit ce sont les nœuds qui routent les clients.

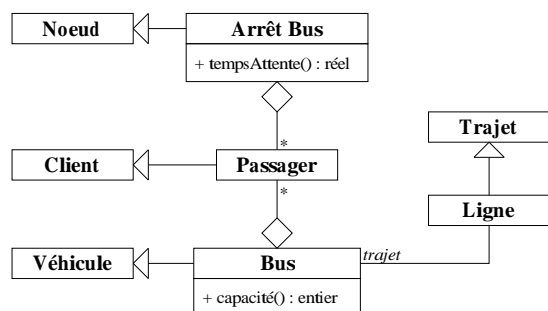


Figure 7. Diagramme de classes du modèle de bus

4.3. Processus de couplage

Dans le modèle (noté ici *MO*) présenté à la section 2, le temps d'attente à un arrêt de bus n'est pas considéré, notamment parce que la fréquence des bus n'est pas prise en compte. Autrement dit, le modèle ne considère aucun temps d'attente. Supposons, à une itération k du processus de couplage, que la simulation fournit le temps moyen w^k d'attente à un arrêt de bus pour chaque commodité. Il est possible de les introduire dans le modèle simplifié *MO* sous la forme de constantes, c'est-à-dire que pour chaque arrêt, les passagers d'une même commodité (ayant émis le même souhait de déplacement) sont supposés attendre exactement le même temps.

Pour cela, le graphe piéton, représentant les rues que peuvent emprunter les piétons, et le graphe bus qui représente les rues susceptibles de supporter le passage du bus doivent être dissociés. Ainsi, lorsqu'un passager se déplace à pied, il emprunte des arcs du graphe piéton, et lorsqu'il est dans le bus, il emprunte des arcs du graphe bus.

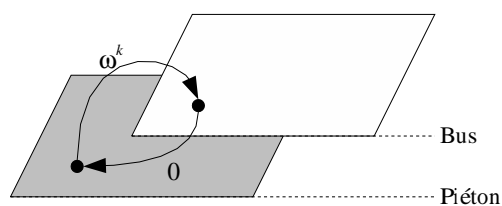


Figure 8. Couches du graphe

Avec cette modélisation (qui n'a qu'un impact limité sur la manière de résoudre le modèle, puisqu'elle suppose simplement une modification de la topologie du graphe et une légère augmentation de complexité liée à l'introduction de nouvelles variables réelles sur le multifatot usager), il est possible d'ajouter des arcs qui traduisent les temps de montée et de descente d'un bus. En effet, entre deux nœuds, l'un dans le graphe piéton et l'autre dans le graphe bus, qui représentent le même arrêt, il est possible d'ajouter un arc montant (du graphe piéton au graphe bus) qui porte le temps de montée dans le bus, et un arc descendant (du graphe bus au graphe piéton) qui porte éventuellement le temps de descente du bus. Dans le temps de montée, il est tout à fait possible de considérer le temps d'attente w^k (cf. figure 8). Ainsi, on propose le schéma général d'optimisation suivant :

Algorithme 2 Schéma général du couplage

```

 $k \leftarrow 0; w^k \leftarrow 0;$ 
optimiser le modèle simplifié MO
soit  $S^k$  la solution optimale et  $z^k$  l'optimum
répéter
  extraire les tournées
  planifier des bus sur ces tournées
  lancer  $n$  simulations du modèle MS
  soit  $w$  l'estimation du temps d'attente
   $k \leftarrow k + 1$ 
   $w^k = w^{k-1} - p(w - w^{k-1})$ 
  introduire  $w^k$  dans le modèle simplifié MO
  optimiser le modèle simplifié MO
  soit  $S^k$  la solution optimale et  $z^k$  l'optimum
jusqu'à  $|z^k - z^{k-1}| < \varepsilon$  ou  $k > N$ 
  
```

Une première solution S^k du modèle simplifié *MO* est trouvée. Avec cette solution, les temps moyen w^k d'attente aux arrêts de bus sont évalués par le modèle de simulation *MS*. Cette donnée est alors réintroduite progressivement (e.g. w^{k+1} est augmenté d'une quantité proportionnelle à p si $w^{k+1} > w^k$, dans le case contraire il sera diminué) dans le modèle simplifié *MO*. Ce dernier doit alors être réoptimisé avec ces nouvelles données. Le processus se répète ainsi jusqu'à trouver une solution satisfaisante. Le pas p est introduit dans ce schéma général comme une constante, mais il n'est pas exclu de déterminer une politique pour le faire varier afin d'améliorer les performances du processus.

Un élément important à noter est que le modèle simplifié *MO* n'apporte pas une solution à tout le problème, notamment il n'indique pas comment sont planifiées les tournées de bus. Cela signifie qu'à partir de la solution S du modèle simplifié *MO* qui permet d'identifier les tournées, il faut ensuite affecter et

planifier des bus sur ces tournées afin de fournir une solution S' évaluable par le modèle MS (cf. figure 5). La politique d'affectation peut être un problème d'optimisation, par exemple minimiser les coûts de fonctionnement des bus, ou alors, en supposant le parc de bus limité, affecter les bus de manière à maximiser globalement leur fréquence.

4.4. Conclusion

Ce processus itératif ne converge pas systématiquement vers une solution. En effet, si l'optimisation fournit une solution peu robuste, alors d'une itération à l'autre la solution sera trop différente et le couplage va osciller ou diverger. Cependant, la méthode de résolution présentée à la section 2 s'avère robuste, ce qui facilite la convergence du processus, bien qu'aucune garantie sur l'optimalité de la solution n'est possible.

La répercussion de l'évaluation de la simulation s'est traduite dans notre étude par la modification de constantes dans les modèles d'optimisation. Mais il est également envisageable de fournir des contraintes supplémentaires à ces modèles. Néanmoins déterminer des coupes au modèle MO à partir de l'évaluation du modèle MS s'avère une tâche plus ardue. Pour illustrer néanmoins l'idée, supposons qu'une planification (issue d'un modèle simplifié MO) sur une chaîne de production s'avère impossible à cause d'interblocages (détectés à la simulation d'un modèle MS). Il serait alors possible de déterminer des contraintes à ajouter au problème simplifié MO qui feraient en sorte qu'une telle solution ne serait plus choisie.

CONCLUSION

Le problème de conception de tournées de bus abordé dans cet article ne peut être traité directement par une méthode basée sur la résolution d'un modèle mathématique. Il s'agit d'un problème fortement combinatoire qui ne pourrait être résolu de manière efficace que sur de petites instances. Pour envisager une résolution d'instances plus importantes, il est nécessaire de simplifier, parfois exagérément, le problème. Les solutions ainsi obtenues ne sont plus applicables sur le système réel. Un couplage avec la simulation permet alors de réintroduire certains aspects d'une manière plus simple dans le modèle mathématique.

Par exemple, nous avons montré qu'il est possible de prendre partiellement en compte les temps d'attente dans le modèle mathématique, sous la forme de constantes. Ce qui conduit à des solutions plus réalistes, non seulement sur le temps de trajet des passagers, mais également sur leur comportement à em-

prunter le réseau de bus. En effet, les temps d'attente rendent un changement de bus coûteux en terme de temps, ce qui diminuera les décisions chez les passagers de prendre un trajet avec plusieurs changements de bus (ce qui semblait à l'origine plus rapide).

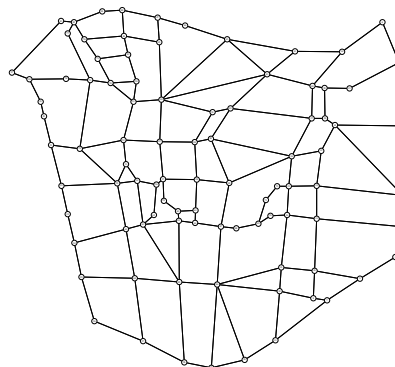


Figure 9. Plan de Clermont-Ferrand centre

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Laurent Fayolle et Nicolas Spiss, élèves-ingénieur à l'ISIMA (Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications), pour avoir développé le simulateur.

REFERENCES

- [1] F. AZADIVAR. A Tutorial on Simulation Optimization. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 198–204, 1992.
- [2] J. COMELLAS, R. MARTINEZ, J. PRAT, V. SALES, and G. JUNYENT. Integrated IP/WDM Routing in GMPLS-Based Optical Networks. In *IEEE Network*, volume 17-2, pages 22–27, 2003.
- [3] T.A. FEO and M.G.C. RESENDE. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *O.R. Letters*, 8 :67–71, 1989.
- [4] T.A. FEO and M.G.C. RESENDE. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6 :109–133, 1995.
- [5] Fred GLOVER and Manuel LAGUNA. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [6] Yuri A. MERKURYEV and Vladimir L. VISIPKOV. A Survey of Optimization Methods in Discrete Systems Simulation. In *Proceedings of the European Simulation Symposium on Simulation*, pages 104–110, 1994.
- [7] J. RUMBAUGH, I. JACOBSON, and G. BOOCH. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley, 1998.

- [8] Paolo TOTH and Daniele VIGO. Models, relaxations and exact approaches for the capacited vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 123 :487–512, 2002.
- [9] Loïc YON, Alain QUILLIOT, and Christophe DUHAMEL. Distance minimization in public transportation networks with elastic demands : exact models and approached methods. In *Conference IFIP 2003 (Sophia-Antipolis) 21-25 Juillet*, 2003.