Planification d'itinéraires en transport multimodal

Fallou Gueye[*]

Directeur(s) de thèse : Christian Artigues et Marie José Huguet

Laboratoire d'accueil :
LAAS-CNRS
7, Avenue Colonel Roche
31770 Toulouse

Établissement d'inscription :
INSA Toulouse
135, Avenue de Rangueil
31077 Toulouse

Résumé

Dans cet article nous nous intéressons à des problèmes de recherche d'itinéraires dans des réseaux de transport multimodaux (transport en commun, véhicule personnel, marche, vélo, etc.). La multimodalité d'un réseau de transport introduit des contraintes spécifiques : temps de trajet dépendant des horaires, restrictions pour l'utilisation de certains modes ou sur certaines séquences de modes. Le problème particulier de notre étude est celui de la recherche d'itinéraires entre une origine et une destination minimisant à la fois les temps de trajet et le nombre de changements de modes de transport. Nous comparons deux algorithmes pour résoudre ce problème en nous appuyant sur un réseau de transport multimodal issu d'un cas réel.

Mots-clés

Transport multimodal, plus court chemin dépendant du temps, plus court chemin bicritère, système d'information géographique(SIG)

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU PROBLEME

Le secteur des transports a connu ces dernières années un accroissement fort du trafic de voyageurs. Pour faire face aux problèmes tels que la pollution, la consommation énergétique et la congestion automobile, le secteur des transports a l'obligation de réduire les impacts environnementaux qu'il engendre. Cela se traduit par le développement de véhicules moins polluants mais aussi par le développement de modes de transport alternatifs (transport collectif, ferroviaire, fluvial etc..). Nous nous situons dans ce contexte de développement de modes de transport alternatifs et nous nous intéressons plus spécifiquement au transport urbain des passagers. Le développement de transports alternatifs au véhicule individuel, longtemps considéré comme le seul moyen de déplacement, pose de nouveaux problèmes pour l'organisation des déplacements de passagers via les modes de transports combinés.

1.2 OBJECTIFS

Dans ce contexte, nous cherchons à évaluer et proposer des informations pertinentes afin d'aider les voyageurs à choisir le ou les modes de transport les plus appropriés (voiture,

[*]fgueye@mobigis.fr

transport en commun, transport à la demande, marche à pied, vélo, etc.) en fonction de leurs besoins de déplacement. Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre de ma thèse CIFRE avec la société Mobigis [1] dont l'objectif est de développer un outil d'aide à la décision pour l'optimisation de la planification d'itinéraires sur des réseaux de transport multimodaux.

2 PRESENTATION DU PROBLEME

Le problème central de ce travail est celui de la *recherche de chemins à coût minimal sur des réseaux de transport multimodaux.* La recherche de chemins de coût minimal recouvre en fait différents problèmes : calcul de trajets point à point, de trajets depuis une origine vers toute destination, de trajets depuis toute origine vers toute destination, calcul d'isochrones (zone accessible à partir d'une origine et respectant un coût donné), calcul de chemins mono ou multi-critères, calcul d'un seul meilleur chemin, ou des k meilleurs chemins, ... Par ailleurs, la prise en compte de la multimodalité des réseaux de transport introduit un certain nombre de contraintes supplémentaires (fréquences et horaires de passage des bus et métro, vitesses de circulation fluctuantes en fonction des horaires ou des conditions de trafic, restrictions propres à chaque mode).

Le problème qui nous intéresse dans ce papier est celui d'un plus court chemin point à point bicritère. Nous cherchons à la fois à minimiser le temps de parcours et le nombre de changements de modes (transferts modaux). Il s'agit d'un problème multiobjectif et dépendant du temps car les temps de trajet sont variables en fonction de l'horaire.

On considère un graphe orienté $G_T(V;E)$ avec V ensemble des noeuds (arrêts de bus, stations de métro, ...) et E ensemble des arcs. A chaque arc (i,j) correspond une origine i, une destination j, un mode de transport m ($m \in \{métro, bus, véhicule, marche, transfert\}$) et une fonction de coût $delai(i,j,m,t)$ représentant le temps de trajet pour aller du nœud i en partant à la date t vers le nœud j en utilisant le mode m.
On cherche l'ensemble des chemins non dominés (solutions Pareto Optimales) pour aller d'une origine à une destination à partir d'une date de départ donnée, satisfaisant les contraintes liées aux différents modes de transport considérés. Un chemin multimodal se doit de respecter un ensemble de contraintes sur les séquences d'utilisation des différents modes de transports. Par exemple, emprunter la voiture après avoir commencé en transport en commun est irréalisable. Un chemin respectant ces contraintes est dit *viable*. La viabilité des chemins peut être représentée par un graphe "états-transitions" comme dans [6] (cf. Figures 1 et 2). On définit l'ensemble $S = \{0,1,2,3,4,5\}$ des états donnés (cf Figure 1) pour caractériser l'ensemble des chemins viables pour les modes considérés dans notre étude.

Etats	Description
0	l'état initial aucun mode n'est encore utilisé
1	les modes métro et véhicule n'ont pas été utilisés
2	le mode véhicule n'a pas encore été quitté
3	le mode véhicule a été quitté et le mode métro n'a pas encore été utilisé
4	le mode métro n'a pas encore été quitté
5	le mode métro a été quitté

FIGURE 1 – *Description des états d'un chemin viable*

1. www.mobigis.fr

Ce graphe permet de modéliser l'ensemble des trajets viables multimodaux dans le cas des modes considérés. La couleur de l'arc indique le passage d'un état à un autre en fonction du mode utilisé. Par exemple, le graphe indique que la voiture peut être utilisée uniquement en début du trajet et que le mode métro ne peut être utilisé uniquement qu'une fois (avec éventuellement des correspondances entre lignes de métro).

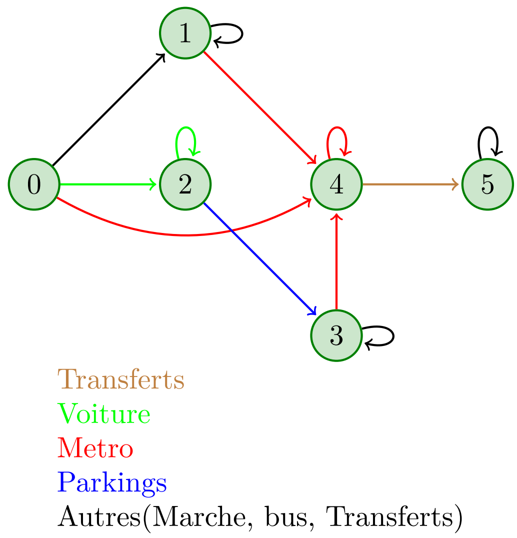

Figure 2 – *Graphe états-transitions*

3 ETAT DE L'ART DES ALGORITHMES DE RECHERCHE D'ITINERAIRES

Les problèmes de calcul d'itinéraires dits statiques, se basent sur des graphes dans lesquels les valuations des arcs n'évoluent pas dans le temps. Les algorithmes de calcul d'itinéraires origine-destination(s) sont de complexités polynomiales et on les répartit classiquement en deux familles : ceux à fixation d'étiquettes (algorithme de Dijkstra) et ceux à correction d'étiquettes (algorithme de Bellman). Malgré leurs complexités polynomiales, ces algorithmes peuvent néanmoins engendrer des temps de calculs importants pour des graphes de grande taille, ce qui a suscité le développement des techniques d'accélération préservant souvent l'optimalité comme l'algorithmme A^*, le parcours bidirectionnel, ainsi que les méthodes de prétraitement [8].

Dans un réseau de transport dépendant du temps, la différence principale avec un problème statique réside dans le fait que la valuation associée à chaque arc est liée au temps. On peut trouver également des temps d'attente aux sommets du graphe [1, 7, 3]. Ces réseaux de transport sont classés selon qu'ils respectent ou non la propriété FIFO : *partir plus tôt d'un point i permet d'arriver plus tôt en un point j*. Les problèmes de plus court chemins dans un graphe dépendant du temps ont été largement étudiés dans la littérature. Dans [3], les auteurs proposent des extensions de l'algorithme de Dijkstra dans le cas FIFO ou non FIFO. L'article de Pallattino et al. [7] présente une extension d'un algorithme de Dijkstra basé sur des buckets en se basant sur une représentation du problème par un graphe espace-temps acyclique. Dans [5], les auteurs considèrent à la fois un réseau dépendant du temps et stochastique dans lesquels les conditions réelles du trafic permettent d'actualiser la fonction de coût (temps de trajet). Ils proposent une extension des méthodes bi-directionnelles existant dans le cas statique ainsi qu'une extension des mécanismes de prétraitement.

Dans un réseau de transport multimodal, les noeuds et les arcs du graphe sont liés aux modes. Les arcs du graphe sont valués par leur coût et par le mode utilisé (le transfert étant un mode particulier). Le problème de calcul de chemin multimodal revient à déterminer un chemin de coût minimal tout en respectant des contraintes sur la composition des trajets (nombre maximum de transferts ou viabilité du chemin parcouru en raison des contraintes sur les modes). Febbraro et Sacone [4] considèrent un problème de plus court chemin classique où le critère à minimiser est le temps de trajet sans prendre en compte de contraintes additionnelles sur la composition des trajets. Ils proposent un algorithme adapté de celui de Dijkstra et le valident sur un graphe de petite taille (80 arcs et 66 noeuds). Lozano et Storchi [6] s'intéressent à la recherche de plus court chemin multimodal viable et respectant une contrainte sur le nombre maximum de transferts. Ils proposent pour cela un algorithme incrémental sur le nombre de modes utilisés basé sur [7]. La validation expérimentale est limitée à un petit graphe (21 noeuds et 51 arcs). Les évaluations d'algorithmes multimodaux et dépendant du temps de [2, 9] proposées par Bielli et Ziliaskopoulos vont jusqu'aux graphes de 1000 noeuds et de moins 3000 arcs.

4 ALGORITHMES DE PLUS COURTS CHEMINS MULTIMODAUX

4.1 ALGORITHMES ETUDIES

Les performances des algorithmes de calcul de recherche d'itinéraires sur des réseaux multimodaux et dépendant du temps de taille conséquente ne sont pas à notre connaissance clairement établies. Nous proposons dans cet article de comparer les performances de deux algorithmes de calcul de plus courts chemins multimodaux dépendant du temps sur un réseau de transport issu d'un cas réel et de plus grande taille que ceux utilisés dans [2] et [9]. Les algorithmes étudiés sont :

- une extension au cas multimodal d'un algorithme de plus court chemins dépendant du temps [2] ;
- une extension au cas dépendant du temps de l'algorithme de plus court chemins multimodal de [6] ;

Les algorithmes que nous présenterons ci-dessous sont des algorithmes d'extension d'étiquettes. Une étiquette est un couple [nœud,état] noté $[j, s]$ et représentant un chemin partiel partant de l'origine et aboutissant à j dans l'état s. A chaque étiquette, on associe le temps de trajet depuis l'origine, le nombre de transferts effectués ainsi que le noeud précédant et son état pour reconstruire le chemin.

Comme classiquement en programmation dynamique, on définit une relation de dominance entre étiquettes. Une étiquette $[j, s]$ est dominée par une étiquette $[j, s']$ si le temps de trajet de $[j, s']$ est inférieur ou égal au temps de trajet de $[j, s]$ <u>et</u> si $s' \prec s$, ou $\prec$ est une relation d'ordre entre les états telle que $e' \prec e$ si et seulement si l'état e' permet d'atteindre tous les états atteignables depuis e. Remarquons que d'après la régle de dominance, il est nécessaire de ne conserver qu'une seule étiquette par couple $[j, s]$.

4.1.1 Algorithme MMTD-SP1

La méthode de résolution utilisée ici est du type $\epsilon-$contrainte qui est une approche transformant le problème en un ou plusieurs problème(s) mono-objectif(s). Ainsi, l'algorithme est itératif sur le nombre de changement de modes. Pour chaque nombre de changement de mode k compris entre 0 et K_{max}, il détermine le plus court chemin. L'algorithme est inspiré de [6] et étendu ici au cas multimodal.

Algorithm 1 Algorithme MMTD-SP1

Require: $K_{max} \in \mathbb{N}$, Q une file de priorité
for $k = 0$ to K_{max} **do**
  Initialisation()
  Ajouter $[Origine, 0]$ dans Q
  $[x, s] \leftarrow$ Q .top()
  while $x \neq$ destination **do**
    Q.pop()
    for $[y, s']$ successeur de $[x, s]$ **do**
      Etendre $[x, s]$ vers $[y, s']$
      Ajouter $[y, s']$ dans Q s'il n'existe pas $[y, s'']$ dans Q tel que $[y, s'']$ domine $[y, s']$ et si le nombre de transferts est inférieur à k
      supprimer de Q les étiquettes dominées par $[y, s']$
    end for
  end while
end for

La complexité de l'algorithme est $K_{max} * O(|E| + (|V| * |S|)\log(|V| * |S|))$.

4.1.2 Algorithme MMTD-SP2

L'algorithme calcule directement les solutions non-dominées de 0 à K_{max} transferts. Il est basé sur l'utilisation de deux files de priorité Q_{now} et Q_{next} contenant respectivement les étiquettes non-dominées de k et $k+1$ transferts. Cet algorithme est proposé par [2] et étendu ici aux graphes dépendant du temps.

Algorithm 2 Algorithme MMTD-SP2

Require: $K_{max} \in \mathbb{N}$, Q_{now}, Q_{next} des files de priorité
Initialisation()
Ajouter $[Origine, 0]$ dans Q_{now}
$Q_{next} \leftarrow \emptyset$
while $Q_{now} \neq \emptyset$ and $k \leq K_{max}$ **do**
  $[x, s] \leftarrow Q_{now}$.top()
  if $x \neq destination$ **then**
    for $[y, s']$ successeur de $[x, s]$ **do**
      Etendre $[x, s]$ vers $[y, s']$
      if $((x, y)$ est un Transfert et $k + 1 \leq K_{max})$ **then**
        Ajouter $[y, s']$ dans Q_{next} s'il n'existe pas $[y, s'']$ dans Q_{next} tel que $[y, s'']$ domine $[y, s']$ et si le nombre de transferts est inférieur à k
        supprimer de Q_{next} les étiquettes dominées par $[y, s']$
      else
        Ajouter $[y, s']$ dans Q_{now} s'il n'existe pas $[y, s'']$ dans Q_{now} tel que $[y, s'']$ domine $[y, s']$ et si le nombre de transferts est inférieur à k
        supprimer de Q_{now} les étiquettes dominées par $[y, s']$
      end if
    end for
  else
    if $Q_{next} \neq \emptyset$ **then**
      $Q_{now} = Q_{next}$
      k=k+1
    end if
  end if
end while

La complexité de l'algorithme est $K_{max} * O(|E| + (|V| * |S|) \log(|V| * |S|))$.

5 EVALUATIONS

5.1 LES DONNEES

Pour tester ces deux algorithmes, nous avons utilisé les données réelles de transport en commun (cf. Figure 3) fournies par Tisséo, l'organisme d'exploitation des transports de la ville de Toulouse et des bases de données Navteq pour les données de la voirie.
Le graphe est ainsi composé de 10507 noeuds, de 22788 arcs et comporte une table horaire d'amplitude 5h à 23h59 avec au minimum 5 horaires par noeud et en moyenne 15 horaires par noeud pour les modes dépendant du temps.
Les modes utilisés pour cette expérimentation sont : Bus, Métro, Marche, Voiture, Transfert.

Mode	Noeuds	Arc
Bus	1228	3190
Metro	38	36
Voirie	6877	18280
Transferts	2364	1282

FIGURE 3 – *Données du réseau*

5.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les algorithmes présentés dans la partie 4 ont été développées en C++ et testés sur un environnement de développement d'un SIG "ARCGIS" avec un PC équipé d'un processeur de 2.39 GHz. Afin de vérifier les performances de ces algorithmes, 50 tests ont été effectués pour chaque valeur de nombre transferts. Le tableau (cf. Figure 4) suivant présente les temps d'exécution des algorithmes en secondes.
Sur les 50 instances, les temps de trajets minimum, moyen et maximum en minutes sont respectivement de 13.56, 30.65 et 189.03.
Les résultas de tests montrent que l'algorithme MMTD-SP2 est plus rapide que l'algorithme MMTD-SP1 (cf Figure 4).

Nombre de transferts	Valeurs	MMTD-SP1	MMTD-SP2
0	Min	2,28	2,27
	Moy	4,82	4,78
	Max	6,69	6,72
1	Min	4,69	3,23
	Moy	9,46	7,13
	Max	13,53	9,66
2	Min	7,05	4,83
	Moy	14,20	9,91
	Max	20,23	17,86

FIGURE 4 – *Temps d'exécution des algorithmes en secondes*

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans l'objectif de planifier des trajets dans des réseaux de transport multimodaux, nous avons développé et testé plusieurs algorithmes qui nous permettent de déterminer le ou les meilleur(s) chemin(s) entre une origine et une destination en termes du temps de trajet et de nombres de changement de modes. Les tests effectués fournissent de bons résultats même si les temps de calculs peuvent être améliorés. L'algorithme utilisant les deux files de priorité améliore les temps de calcul. La suite de ces travaux portera sur les différents points suivants :

– Poursuivre les tests qualitatifs et quantitatifs et améliorer les temps de calculs ;
– Etendre les algorithmes présentés ci-dessus vers un algorithme de type A^* ;
– Etudier le cas des réseaux non FIFO ;
– Prendre en compte des critères supplémentaires comme le coût du trajet, l'écomobilité ou la sécurité ;
– Adapter des méthodes bidirectionnelles ou de prétraitement au cas multimodal.

Références

[1] Ravindra K. Ahuja, James B. Orlin, Stefano Pallottino et Maria Grazia Scutellà. « Minimum Time and Minimum Cost-Path Problems in Street Networks with Periodic Traffic Lights ». *Transportation Science*, 36(3) :326–336, 2002.

[2] Maurizio Bielli, Azedine Boulmakoul et Hicham Mouncif. « Object modeling and path computation for multimodal travel systems ». *European Journal of Operational Research*, 175(3) :1705 – 1730, 2006.

[3] I Chabini. « A new short path algorithm for discrete dynamic networks ». *Proceedings of the 8 th IFAC Symposium on Transport Systems, Chania*, pages 16–17, 1997.

[4] D. Febbraro et S. Sacone. « An on-line information system to balance traffic flows urban areas ». *Proceeding of the 36th IEEE conference on decision and control*, pages 4772–4773, 1995.

[5] G. Nannicini P. Baptiste D. Krob et L. Liberti. « Fast paths on dynamic road networks ». *ROADEF 08*, 2008.

[6] Angelica Lozano et Giovanni Storchi. « Shortest viable path algorithm in multimodal networks ». *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 35(3) :225 – 241, 2001.

[7] S. Pallotino et M. G. Scutellà. « Shortest path algorithms in transportation models : Classical and Innovative Aspects ». *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling*, pages 245–281, 1998.

[8] A. Goldberg H. Kaplan R. Werneck et C.Harrelson. « Efficient Point to Point Shortest Path algorithms ». 2005.

[9] Athanasios Ziliaskopoulos et Whitney Wardell. « An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays ». *European Journal of Operational Research*, 125(3) :486 – 502, 2000.