

Modèle d'optimisation multi-objectif prenant en compte le rayon de courbure des virages et l'inclinaison des pentes des routes

Coulibaly Kpinna Tiekoura¹

¹ LaSTIC, Ecole Supérieure Africaine des TIC, Abidjan, Côte d'Ivoire, tiekoura77@yahoo.fr

Abstract. La croissance économique en Afrique a entraîné une augmentation significative du trafic routier et singulièrement du transport public. Cette situation entraîne malheureusement des effets néfastes sur le plan environnemental et économique dans les zones urbaines. Pour y remédier, de nombreuses études ont été menées afin d'optimiser ce mode de transport. Dans cet article, nous proposons un système de gestion optimal pour le transport public, visant à minimiser divers critères tels que la distance parcourue, le temps de service des véhicules et les contraintes de sécurité (rayon de courbure des virages et inclinaison des pentes). Pour la résolution de notre modèle, nous avons utilisé une méthode exacte qui donne de bons résultats pour les instances de petites tailles.

Keywords: Smart-city, optimisation, graphe, intelligence artificielle, transport urbain, transport en commun

1 Introduction

Une gestion efficace des transports contribue à assurer un environnement sain en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en maîtrisant l'empreinte carbone liée au transport de biens et de services. Sur le plan économique, optimiser les déplacements des véhicules permet de diminuer les coûts énergétiques associés à l'utilisation de combustibles fossiles, dont les réserves s'amenuisent et dont les prix augmentent de manière

insoutenable pour les consommateurs. Par exemple, dans un rapport, la Banque Mondiale [1] indique que les habitants d'Abidjan, la capitale économique de la Côte d'Ivoire,

effectuent 10 millions de trajets par jour et qu'en 2017, la perte de temps et de productivité, ainsi que le désordre et les coûts liés aux déplacements quotidiens dans cette ville, représentaient près de 5 % du PIB. L'un des types de transport les plus pratiqués dans les villes africaines demeure le transport urbain. Ainsi l'amélioration de ce transport représenterait une solution efficace pour assurer un développement durable tout en répondant aux attentes des usagers. Cette optimisation permet d'obtenir un meilleur rapport qualité-prix en établissant un équilibre entre le coût d'exploitation et la qualité du service proposé aux utilisateurs.

Dans ce travail, nous nous intéressons au transport à la demande (TAD) qui est considéré comme un mode de transport collectif, individualisé et activé selon les besoins. Notre approche d'optimisation prend en compte, en plus de la minimisation du coût de transport et du temps de parcours, la minimisation du rayon de courbure

des virages et d'inclinaison des pentes au niveau des routes, afin de garantir les meilleurs itinéraires aux usagers.

Notre étude se structurera en quatre sections principales. La première section présentera une description de l'état de l'art. Dans la deuxième section, nous définirons la problématique. La troisième section sera dédiée à l'analyse conceptuelle et à l'implémentation de notre système. Enfin, la quatrième section portera sur la discussion des résultats obtenus. Nous concluons par une synthèse et des perspectives de recherche.

2 État de l'art

La plupart des algorithmes d'optimisation des transports en commun se focalisent principalement sur la réduction de la distance parcourue par les véhicules. Dans les études existantes, on fait la distinction entre les algorithmes à critère unique et ceux à critères multiples. Nous allons ici exposer quelques recherches académiques importantes sur ce thème.

L'un des algorithmes fondateurs à la base des différentes recherches de plus court chemin dans un graphe est celui de Dijkstra [2].

L'algorithme de Dijkstra est utilisé pour créer un arbre des plus courts chemins à partir d'une source x dans un graphe, permettant d'atteindre tous les autres nœuds accessibles. Il convient de souligner que la complexité des algorithmes d'optimisation pour les transports en commun, selon la littérature, dépend du nombre de critères ou d'objectifs considérés. Ainsi, on distingue dans les travaux existants des approches d'optimisation à un critère, à deux critères et multicritères.

Tomhave et al. [3] ont également développé un modèle d'optimisation qui prend en compte les profils des utilisateurs plutôt que de se concentrer uniquement sur le chemin le plus court. Ils partent du principe que de nombreux usagers préfèrent éviter le chemin le plus court en distance pour se déplacer d'un point A à un point B, en raison des longs temps d'attente qu'il peut engendrer. Dans un premier temps, les auteurs identifient le chemin le plus court parmi plusieurs itinéraires pertinents générés à l'aide de l'algorithme de Dijkstra. Ce chemin est ensuite utilisé pour calculer d'autres trajets en supprimant certains nœuds et arcs qu'il emprunte. Après plusieurs étapes de suppression et d'exploration de nœuds et d'arcs, le nombre souhaité de résultats est atteint. Enfin, les résultats sont filtrés afin d'éliminer les doublons et les trajets jugés trop longs par rapport au chemin le plus court.

Par ailleurs, Zidi et ses collègues [4] présentent une approche dynamique multicritères en recourant à l'algorithme de recuit simulé multi-objectif. Cette méthode intègre également la gestion des profils utilisateurs afin de personnaliser l'offre de services grâce à un Système Multi-Agents.

3 Objectif et Problématique

La majorité de ces études ne tiennent pas compte des contraintes de circulation dans leur approche d'optimisation des trajets. En effet, il est logique que les usagers préfèrent généralement des itinéraires qui soient à la fois sûrs et qui

minimisent le nombre de détours. Ainsi, un trajet peut être court en distance, mais comporter des risques en raison de certains obstacles, tels que le rayon de courbure des virages ou l'inclinaison des pentes. Cela peut amener un usager à opter pour un chemin plus long, mais avec moins d'obstacles [5].

Ce choix peut être justifié par le gain de temps qu'il permet, car plus un virage est serré, plus le conducteur doit ralentir pour le négocier, comme l'indique une étude menée par Khoo et al [6].

Aussi, contrairement à certaines recherches présentées dans cet état de l'art, une optimisation efficace du transport en commun nécessite de prendre en compte plusieurs critères. L'objectif de notre étude est donc de développer un système de gestion optimal pour le transport public, visant à minimiser divers critères tels que le coût du trajet, le temps de service des véhicules et les risques sécuritaires (angle des virages et degré des pentes).

4 Méthodologie

4.1 Modélisation du problème

Dans cette section nous présentons la modélisation mathématique de notre proposition.

○ Variables du problème :

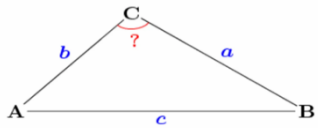
- P = pente de l'arc emprunté de i vers j
- θ = angle de virage ou de courbure entre deux arcs du trajet de i vers j
- D = matrice indiquant la distance euclidienne entre deux nœuds de
- C = nœud courant visité, ($C \in \mathcal{N}$)
- A = avant-dernier nœud du chemin liant le point de départ I à C ($A \in \mathcal{N}$)
- B = nœud voisin de C n'ayant pas été visité ($B \in \mathcal{N}$)
- \mathcal{A} : Ensemble des arrêtes ou arcs du graphe
- n : Nombre de demandes de transport.
- \mathcal{U} : ensemble de points d'arrêt des usagers à transporter
- \mathcal{V} : Ensemble de points d'arrivée des usagers.
- \mathcal{S} : Ensemble des points de stationnement (ou dépôts) des véhicules.
- \mathcal{L} : Ensemble des points limitant les arrêtes du graphe
- \mathcal{N} : Ensemble de tous les nœuds du graphe (\mathcal{N})
- \mathcal{V} : Ensemble des véhicules destinés au transport des usagers.
- c_v : Capacité du véhicule v .
- $u_{i,v}$: Nombre d'usagers pris par le véhicule v à la station i tel que $i \in \mathcal{U}$.
- $t_{i,v}$: Intervalle de temps associé au départ $i \in \mathcal{U}$.
- $t_{i+n,v}$: Intervalle de temps associé à l'arrivée $i+n \in \mathcal{U}$.
- $c_{i,j,v}$: Coût d'utilisation du véhicule v au kilomètre.
- $c_{i,j,v}$: Coût de transport de i vers j avec le véhicule v tel que
- $t_{i,j,v}$: Durée de transport de i vers j avec le véhicule v .
- $t_{i,v}$: Heure de début de service pour la demande i avec le véhicule v .
- $t_{i,v}$: Heure d'arrivée de la demande i à destination avec le véhicule v .

- : Nombre de passagers dans le véhicule v après avoir visité le point i tel que i .
- : Nombre de passagers dans le véhicule v à la sortie d'un dépôt
- : Variable de décision du problème, = 1 si le véhicule emprunte un chemin direct de i vers j , sinon 0.
- = coordonnées (x,y,z) des nœuds de l'ensemble
- = vecteur indiquant la longueur des arcs de l'ensemble

○ *La Fonction Objectif :*

Notre fonction objectif globale F est composé de la somme du coût de transport (C_{ij}) , du temps de service (t_i) et de la sécurité de la route (S_{ij}) .

+	(E.1)
	(E.2)
	(E.3)
	(E4)
	(E5)

La courbure de virage (CV) représentée par l'angle de courbure (fig. 1) se calcule selon la formule d'Al Kashi, comme suit :	 <p style="text-align: center;">Figure 1. Angle de courbure</p>
	(E6)
C'est-à-dire :	
	(E7)
Ainsi :	

	(E8)
avec	
	(E9)
Par conséquent, la fonction objectif global est :	
	(E10)

○ *Notre modèle mathématique :*

La modélisation du problème consiste à minimiser la fonction objectif F , sous différentes contraintes que nous précisons ci-dessous.

	(E11)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un véhicule v ne commence le service en j qu'après avoir fini le service en i et emprunté l'arc (i, j) : 	
	(E12)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Afin de réaliser le service d'embarquement à l'heure, chaque véhicule v se doit de respecter l'intervalle de temps de demande à un nœud de départ i : 	
	(E13)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Afin de réaliser le service à l'heure, chaque véhicule v se doit de respecter l'intervalle de temps d'arrivée à un nœud de d'arrivée $i+n$: 	
	(E14)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le nombre d'usager dans un véhicule v après avoir quitté un nœud de départ i est supérieur à celui collecté en i et inférieur à la capacité maximale du véhicule : 	
	(E15)

5 Expérimentation et évaluation

5.1 Cadre expérimental

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons eu recours aux données provenant du benchmark établi par Cordeau et Laporte en 2003 [7]. Ce benchmark comprend 20 instances présentant des problèmes de tailles variées, allant de 24 à 144 demandes de transport (voir tableau 1). De plus, entre 3 et 13 véhicules homogènes ont servis ces demandes de transport. Nous avons également enrichi ces données avec des informations simulées concernant les arcs et les nœuds des routes, afin de simplifier le calcul des pentes et des angles de courbure des virages.

Tableau 1 : Caractéristiques des instances de test

Instance s	Nombre de requêtes ou demandes	Nombre de véhicules k1 (a)	Nombre de véhicules k2 (b)
I ₁	24	1	2
I ₂	48	2	3
I ₃	72	3	4
I ₄	96	3	6
I ₅	120	5	7
I ₆	144	5	8
I ₇	36	2	2
I ₈	72	3	3
I ₉	108	3	5
I ₁₀	144	5	6
I ₁₁	24	3	-
I ₁₂	48	5	-

I ₁₃	72	7	-
I ₁₄	96	9	-
I ₁₅	120	11	-
I ₁₆	144	13	-
I ₁₇	36	4	-
I ₁₈	72	6	-
I ₁₉	108	8	-
I ₂₀	144	10	-

Dans la présente étude, nous avons évalué notre méthode sur cinq instances du benchmark proposé par Cordeau et Laporte (2003) à savoir : **I_{1b}** (24 demandes et 2 véhicules), **I_{2b}** (48 demandes et 3 véhicules), **I_{4b}** (96 demandes et 6 véhicules), **I_{19a}** (108 demandes et 8 véhicules) et **I_{20a}** (144 demandes et 10 véhicules)

La résolution du modèle a été faite avec une méthode exacte. Nous avons utilisé le solveur CPLEX 12.10. La figure 2 présente le schéma du système de résolution par cette méthode.

Notre approche a été exécutée sur un ordinateur portable Surface pro 7, de processeur 3,1 GHz x64 Intel, Core i7 quatre cœurs avec une mémoire vive de 16 Go 2133 MHz avec Système d'exploitation 64 bits.

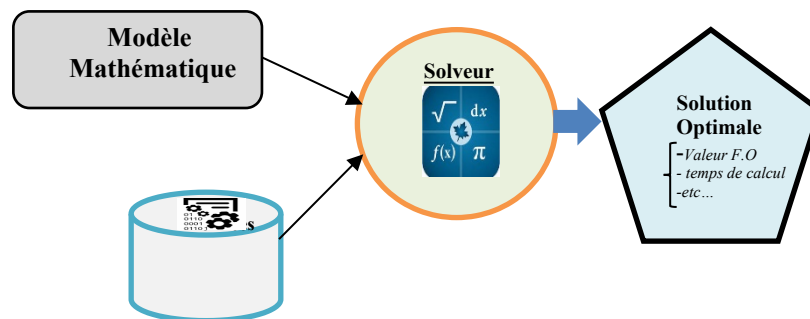


Figure 2 : Schéma du système de résolution par CPLEX.

5.2 Résultats et discussion

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus à l'issue des tests

Tableau 2. Résultats obtenus avec la méthode exacte.

Instances	Distance parcourue	Durée du trajet (min)	Temps d'exécution (min)
I _{1b}	245,15	608,44	0,11
I _{2b}	812,56	2710,95	0,35
I _{4b}	1028,07	2929,42	2,28
I _{19a}	1776,32	3876,30	3,84
I _{20a}	2011,14	4118,77	6,16
TOTAL	5 873,24	14243,88	12,74

L'analyse du tableau de résultats montre que la durée des trajets ainsi que le temps d'exécution de l'algorithme augmentent exponentiellement en fonction de la taille de l'instance. Plus l'instance comporte un grand nombre de demandes et de véhicules, plus le temps d'exécution augmente. Ainsi, pour des tailles d'instances plus grandes, le problème deviendra impossible à résoudre de façon exacte en un temps raisonnable. Cependant, avec de petites tailles d'instances (telles que les instances I_1b et I_2b), on obtient une solution optimale en des temps assez raisonnables. Cela montre que pour la résolution des problèmes NP-difficile comme le présent problème d'optimisation des trajets, il est judicieux d'utiliser une heuristique. Ainsi, la prochaine étape de nos travaux sera l'implémentation de notre modèle en utilisant une heuristique telle que la recherche taboue.

Par ailleurs, il est important de souligner qu'avec notre approche, l'algorithme ne privilégie pas la distance du trajet en termes de longueur, mais tiens compte des contraintes de circulation (pente et angle de virage) qui en pratique augmentent le temps de parcourt. Avec notre approche, un véhicule empruntera donc un itinéraire long et comportant moins de virage et pente par rapport à un itinéraire court avec plus de virages et pentes.

6 Conclusion et futures travaux

Ce travail de recherche vise à améliorer la qualité des transports en commun, dans le but de fournir aux prestataires service de transport et aux usagers des services de qualité, alliant sécurité, économie et respect de l'environnement. Nous avons proposé un modèle d'optimisation du transport permettant de déterminer le trajet le plus

court, tout en prenant en compte des contraintes qui influencent la sécurité et la durée du trajet, telles que les angles de virage et les pentes des routes.

Après la présentation de quelques recherches de la littérature concernant le problème des transports en commun, nous avons élaboré notre propre approche. Notre modèle mathématique intègre la minimisation de divers critères, tels que le coût du trajet, le temps de service des véhicules, ainsi que les contraintes de sécurité, notamment les angles de virage et les pentes.

Nous avons ensuite utilisé une méthode exacte pour la résolution de notre problème. Cela nous a permis d'obtenir des résultats avec un temps d'exécution assez réduit pour les instances de petites tailles, contrairement aux grandes instances.

En perspectives à ce travail nous comptons utiliser une heuristique telle que la recherche tabou afin de permettre une bonne exploration de l'espace de recherche ainsi que la réduction du temps de calcul. Concernant les données, il serait intéressant d'utiliser de réelles données sur le réseau routier avec des mesures sur les pentes et les angles de virage.

References

1. Oxford Business Group, The Report: Cote d'Ivoire 2019, <https://oxfordbusinessgroup.com/news/pourquoi-la-c%C3%B4te-d%E2%80%99ivoire-besoin-de-moderniser-ses-infrastructures-de-transport> [consulté le 7/09/2023]
2. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, vol. 1, no 1, p. 269-271, 1959.
3. Tomhave B., Khani A. (2022). Refined choice set generation and the investigation of multi-criteria transit route choice behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 155. pp 484-500, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.005>.
4. Zidi I. Zidi K. , Ghedira K. , Mesghouni K. (2010), A Multi-Objective Simulated Annealing for the Multi-Criteria Dial a Ride Problem 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Valenciennes France, 2010.
5. Akgol K., Guany B., Eldemir F., Samasti M. (2020). A new method to measure the rationalities of transit route layouts. *Case Studies on Transport Policy*, Vol. 8, pp. 1518-1530. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.11.002>
6. Khoo H. L., Ahmed M. (2018). Modeling of passengers' safety perception for buses on mountainous roads. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 113. Pp 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.01.025>
7. Cordeau J-F, Laporte G (2003) A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem, *Transportation Research B* 37:579–594