



Full Length Research Paper

Amélioration des résultats académiques à travers l'optimisation du transport des élèves et étudiants dans les grandes villes.

COULIBALY Kpinna Tiekoura^{1*}, Kamagaté Beman Hamidja¹, Diaby Moustapha¹¹Ecole Supérieure Africaine des Technologies de l'Information et de la Communication, LASTIC, Abidjan, Côte d'Ivoire

Received October 2024 – Accepted December 2024

*Corresponding author. tiekoura77@yahoo.fr

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé :

Le transport scolaire constitue un enjeu majeur dans plusieurs grandes villes d'Afrique Subsaharienne, où la congestion routière et les préoccupations environnementales rendent nécessaire une optimisation des trajets. Ce problème est d'autant plus préoccupant qu'il impacte négativement les résultats scolaires et universitaires. Dans ce travail, nous présentons un algorithme de tournée de véhicule pour améliorer l'efficacité du transport des élèves. Plus précisément nous utilisons une approche exacte monoobjectif d'un Problème de transport à la demande (DARP : Dial a Ride Problem) avec prise en compte de la qualité de service. La résolution de notre problème est basée sur un programme en nombres entiers mixtes (MIP). Notre modèle a l'avantage de minimiser à la fois la distance totale de la tournée, la durée de la tournée ainsi que le coût de parcours (la somme du coût fixe du véhicule et du coût de roulage).

Mots clés: Education, transport, machine learning, DARP, VRP.

Cite this article:

COULIBALY Kpinna Tiekoura, Kamagaté Beman Hamidja, Diaby Moustapha. (2024). Amélioration des résultats académiques à travers l'optimisation du transport des élèves et étudiants dans les grandes villes. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 6(2), pp. 16-22. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

Durant ce dernier siècle, la population africaine s'est accrue à un rythme très rapide, notamment en Afrique subsaharienne où on enregistre un taux de croissance de plus de 2,7% par an. Cette démographie galopante se caractérise surtout par une forte urbanisation : un peu plus du tiers (soit 34 %) de la population du continent africain se trouve en ville [1]. C'est le cas du district d'Abidjan en Côte d'Ivoire avec une population estimée à 6 321 017 habitants (soit 21,5 % de la population du pays), selon le recensement général de la population de 2021,

L'accroissement rapide de la population et sa concentration dans les grandes villes est ainsi à l'origine d'un grand nombre de problèmes socio-économiques dont le transport des élèves et étudiants. Celui-ci représente, en effet une part significative des déplacements urbains dans les grandes villes d'Afrique subsaharienne, du fait du nombre de plus en plus pléthorique des apprenants à transporter ; toute chose

qui engendre des coûts économiques et environnementaux importants.

Plusieurs études ont montré que parmi les nombreux facteurs à l'origine de la contre-performance des apprenants dans le domaine de l'éducation, notamment ceux des grandes villes, se trouve l'épineux problème de leur mobilité entre leurs lieux d'habitation et le lieu de scolarisation.

Dans la pratique, afin de faciliter le déplacement des apprenants, plusieurs établissements louent les services de prestataires de service (compagnies de transport ou particulier) possédant un ou des véhicules de capacité hétérogène (car, bus ou mini-bus communément appelé « Gbaka » à Abidjan). Certains établissements procèdent en utilisant leur propres car ou véhicules. L'inconvénient est que dans les grandes villes, avec la densité du trafic routier, on assiste régulièrement à des embouteillages qui en plus de polluer l'environnement avec l'émission de CO₂, occasionnent de nombreux désagréments chez l'apprenant dont la baisse du rendement scolaire. Aussi, la mauvaise exploitation des circuits de ramassage des apprenants entraîne

d'importants coûts financiers aussi bien pour les apprenants que pour les prestataires.

Pour endiguer ce fléau, plusieurs solutions ont été expérimentées par les pouvoirs publics ou par les responsables d'établissements ou encore par certains prestataires de service de transport. Ces solutions vont de l'augmentation de la flotte de véhicules de transport élèves à l'aménagement des emplois de temps des apprenants. Il est indéniable que ces solutions n'adressent pas de façon holistiques le problème et ne sont pas aussi assez efficace car elles engendrent d'autres problèmes dont, pour le premier cité, l'augmentation des émissions de gaz à effets de serre et l'aggravation des embouteillages.

Pour notre part, l'optimisation des trajets est cruciale pour réduire la congestion, améliorer la sécurité et les performances scolaires des élèves et minimiser l'empreinte carbone en apportant des gains financiers importants aux différents acteurs. Selon Toth et al. [2], les procédures informatisées basées sur des techniques d'optimisation permettent des économies entre 5% et 20% des coûts de transport. Les algorithmes de tournée de véhicule (VRP) notamment les algorithmes de transport à la demande avec prise en compte de la qualité de service offrent une solution prometteuse pour résoudre ce problème complexe.

Dès lors, il importe de se poser les questions suivantes ?

- Quelles peuvent être les conséquences des ramassages sur l'état et le comportement psychologique des apprenants ainsi que sur leurs résultats scolaires et universitaires ?

- Comment peut-on apporter une solution efficace et efficace à ce problème de mobilité des apprenants dans les métropoles subsahariennes, à travers un algorithme d'optimisation de tournée de véhicules ?

La suite de cet article est organisée comme suit : Tout d'abord, nous montrons comment les problèmes de mobilité en milieu urbain impactent négativement le rendement scolaire des apprenants, ensuite nous décrivons formellement le DARP en général puis dans le cas particulier du transport des apprenants en Afrique subsaharienne, notamment en Côte d'Ivoire. Par la suite, nous présentons notre méthodologie ainsi que notre contribution. Nous terminons par la discussion des résultats et une conclusion.

2. Impact des problèmes de mobilité urbaine sur les performances académiques

En Afrique la plupart des grandes villes sont caractérisées par une forte densité des populations entraînant de véritables problèmes de mobilité urbaine. Les élèves et étudiants sont malheureusement une des franges les plus affectées par ce problème. En effet, la modernisation des infrastructures et moyens de transport routiers ne suivent pas nécessairement le rythme d'accroissement de la démographie dans ces villes, si bien que les tournées de véhicules y deviennent des calvaires pour des apprenants devant relier quotidiennement leur lieu d'habitation à leur établissement respectif. Par conséquent, on assiste à une baisse de rendement de ces apprenants notamment

ceux des cycles d'observation, du fait des retards à l'école, les longues attentes aux points d'arrêts et durant le parcours du véhicule, l'anxiété, et le stress du transport. Ces troubles vont donc susciter chez l'apprenant une altération de l'état général voir un état de déséquilibre nerveux et l'empêcher de facto, en classe de fixer son attention sur le cours.

Une étude [3] fait une classification en trois rubriques des symptômes des troubles psychosomatiques subis par les élèves astreints aux longs trajets de ramassage scolaire. Ce sont :

- L'atteinte de l'état général imputable entre autres, à l'insuffisance de sommeil, à la fatigue des longs trajets ;
- La diminution de la résistance aux maladies dû en partie à l'exposition aux intempéries durant les attentes du moyen de transport ;
- Les troubles de l'attention, de la mémoire, du caractère, de l'émotivité, de la turbulence, de l'anxiété, de l'apathie, etc.

Une telle situation est plausible surtout pour un élève qui mettait environs cinq à dix minutes pour se rendre à l'école primaire et qui désormais, en classe de 6ème, au collège, doit effectuer un trajet domicile-école de plus d'une heure de temps et distant de plusieurs dizaines de kilomètres, avec en plus les mauvaises conditions du transport (embouteillage, longue attentes, inconfort du car, etc.). En sommes, il devra supporter quotidiennement, en plus des longues heures de cours, une charge supplémentaire de plusieurs heures (pour le trajet aller et retour), en tant que jeune adolescent. Les circuits des tournées, mal planifiés dans leur ensemble, ne s'adaptent pas toujours parfaitement au rythme du calendrier scolaire et universitaire, ainsi l'apprenant n'a donc pas le temps pour un sommeil réparateur, contraint de se lever très tôt le matin et rentrer souvent tardivement à la maison. Une fois de retour à la maison, le poids de la fatigue ne lui permet pas de réviser correctement ses leçons. Et ce cycle reprend tous les jours ouvrables de la semaine.

Une mobilité effectuée dans de telles conditions ne peut donc que contribuer à une contreperformance ou une baisse de rendement scolaire des apprenants voire un échec scolaire.

3. Le transport à la demande (DARP) et sa pratique dans le transport des apprenants en Afrique subsaharienne

3.1. Origine et travaux sur le DARP

Le Dial-a-Ride Problem (DARP) est un problème d'optimisation combinatoire associé au transport à la demande. Il date des années 1970 dans les pays du nord et consiste à construire des tournées de véhicules satisfaisant plusieurs requêtes de transport de personnes entraînant notamment des contraintes de temps difficiles à résoudre [4]. Dans ce mode de transport, les clients (voyageurs) envoient une demande de transport à un opérateur incluant le lieu de prise en charge (origine), la destination finale, le nombre de personnes à transporter et le temps de passage souhaité.

Le DARP consiste à développer des tournées de véhicules pour répondre aux demandes de transport en minimisant les coûts de ces tournées (distance parcourue, temps de service, nombre de véhicules utilisés), en fournissant une bonne qualité de service aux voyageurs (fenêtres horaires, nombre de stations visitées, etc.) et l'impact environnemental. Le DARP offre un meilleur rapport qualité/coût de service.

En se basant sur les caractéristiques des nœuds de demande pour le DARP, Douglas et al. [5] considèrent que le DARP peut être catégorisé en deux types de problèmes différents : DARP statique et DARP dynamique.

Dans le DARP statique, toutes les demandes sont connues à l'avance. Selon les informations des demandes données, le répartiteur peut concevoir des itinéraires et des horaires appropriés pour servir les clients sous la fonction objectif spécifique. Contrairement au DARP statique, le DARP dynamique ne connaît que des informations partielles sur les demandes et les demandes en temps réel peuvent se révéler pendant le routage des véhicules.

3.2. Le DARP dans le transport des élèves et étudiants en Afrique subsaharienne

On peut classer les élèves et étudiants dans les grandes villes d'Afrique subsaharienne, notamment dans les villes comme Abidjan en Côte d'Ivoire, suivant deux principaux formats de transport :

- Ceux qui effectuent des trajets individuels : ils sont généralement plus proche de leur établissement et effectuent le trajet école-maison à pied, à bicyclette, à Motocyclette ou y sont conduit par un parent en voiture personnelle. À cela, s'ajoute de plus en plus quelques demandes de transport via les applications de transport telle que yango ;
- Ceux qui effectuent des trajets collectifs : Ce sont les plus nombreux. Ces derniers bénéficient de circuits de ramassage, soit organisés spécialement, soit combinés avec des circuits réguliers de transport en commun.

- a) Les transports organisés sont généralement,
 - Soit à l'initiative de l'établissement qui dispose d'une flotte de cars ou mini bus qu'il reparti dans les principales communes de la ville pour le ramassage de ses apprenants moyennant une souscription mensuelle ou annuelle ou même hebdomadaire.
 - Soit à l'initiative d'un prestataire de service qui loue ses services de transport aux établissements en mettant à leur disposition les moyens de transport à savoir bus, mini bus ou véhicule particulier ;

- Soit à l'initiative de parents d'élèves qui s'associent pour louer un véhicule ou mini-bus pour le transport de leurs enfants, le plus souvent dans un système de covoiturage.
- b) Les transports avec circuits réguliers de transports en commun. Il y'en a de plusieurs types mais l'objectif reste le même, celui du transport des usagers sans distinction, d'un point A à un point B. On peut citer dans cette catégorie :
 - Les BUS : Les réseaux de bus publics sont l'un des moyens les plus courants de transport en commun en Afrique subsaharienne [6]. Il s'agit de la SOTRA à Abidjan, la SONUTRI à Niamey, le Bamabus ou Tababus à Bamako ou encore SOTRACO à Ouagadougou. Ils suivent des itinéraires fixes avec des horaires réguliers, permettant aux passagers de se déplacer facilement d'un point à un autre.
 - Les autres moyens de transport en commun : Il s'agit de services de car ou Bus, de minibus (appelés Gbaka à Abidjan ou dala dala à Dar es Salaam), de véhicules, de Taxis collectifs ou VTC (tel que les « wôrô-wôrô » à Abidjan, ou encore, dans certaines zones, des moto-taxi ou tricycle (cas des « salonnis » dans plusieurs capitales en Afrique de l'ouest.). Détenus par des centaines de propriétaires ces services de transport sont exploités dans une logique à but lucratif par laquelle les prestataires de services tentent de maximiser les revenus tout en minimisant les coûts d'exploitation. Pour ce faire, ces prestataires ont recours à une série de stratégies, telles que l'adaptation de leurs itinéraires aux axes à forte demande de déplacements (surtout aux heures de pointe), l'attente jusqu'à ce que le véhicule ait suffisamment de clients avant de démarrer (système « full and go »), et l'évitement des zones de la ville où les routes sont de mauvaise qualité pour ne pas augmenter les coûts d'entretien. Ce système de transport, bien que moins coûteux [7], crée évidemment beaucoup de désagréments aux populations, en particulier chez les élèves et étudiants astreints à des heures de cours bien précis.

La figure 1 ci-dessous résume l'écosystème des prestations de service impliquées dans la demande du transport des élèves et étudiants dans les grandes villes en Afrique subsaharienne. Notre modèle de résolution de Problème de Transport Collectif des Elèves à la Demande est noté PTCED soit en anglais ODSTP (On-Demand Student Transportation Problem).

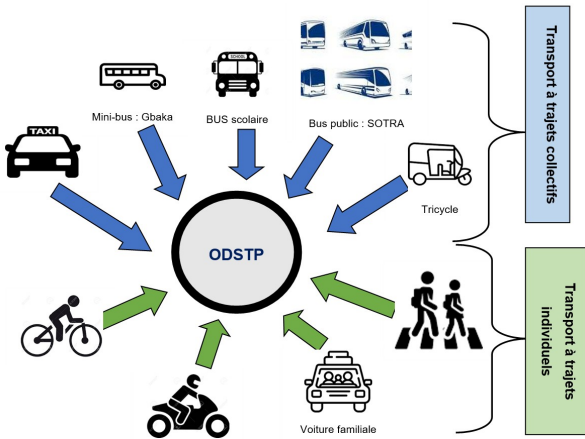


Figure 1 : Ecosystème des prestations de service de demande de transport élèves dans les grandes villes subsahariennes.

Face à la cohabitation de plusieurs modes et types de transport (artisanal et informel ou professionnel et règlementé), ne répondant pas aux mêmes critères règlementaires et qui entraîne une dégradation de la qualité de service et une concurrence déloyale voire sauvage entre les exploitants, il importe de proposer des solutions innovantes pour l'optimisation du transport dans ces grandes villes.

Nous nous intéressons dans le présent travail au format de transport concernant les trajets collectifs (organisés ou non).

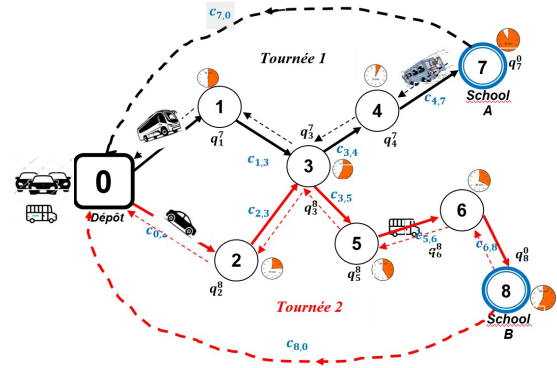
4. Modélisation de notre approche de transport collectif des élèves à la demande (ODSTP)

Dans notre approche, nous cherchons à optimiser le transport des élèves et étudiants de sorte à minimiser considérablement les coûts de transport aux différents acteurs (coût fixe du véhicule et coût de roulage). Plus spécifiquement, notre modèle va faciliter aux prestataires de service de transport ou propriétaires de véhicules, l'affectation optimale des élèves aux véhicules et leur permettra de déterminer la tournée optimale de chaque véhicule, afin d'éviter le gaspillage de ressources. Cette optimisation va également réduire inéluctablement la pollution de l'environnement grâce à la réduction des émissions de CO₂.

Il s'agira dans cette approche de minimiser le temps de parcours, la distance ainsi que le coût des tournées de véhicules.

Pour notre problème, comme représenté à la figure 2 ci-dessous, nous considérons un prestataire (Entreprise, particulier ou établissement) disposant d'une flotte hétérogène de véhicules (Bus, Mini-Bus ou Gbaka, taxi, etc.) positionné dans une station (dépôt 0) et

devant assurer le service de ramassage des élèves et étudiants qui sont positionnés au niveau de différents points d'arrêts. Les élèves émettent des requêtes ou demandes de transport depuis leur position d'arrêt en précisant la fenêtre de temps souhaitée ainsi que la destination.



	: Dépôt de véhicules		: Trajet départ vers l'école
	: Fenêtre de temps de la demande de transport		: Trajet retour de l'école
	: Ecole		: Point d'arrêt (de demande)
c_{ij}	: Coût du parcours entre i et j	q_i^j	: Demande sur le sommet i pour la destination j (localisation-destination-temps)

Figure 2 : Exemple de modélisation de notre problème ODSTP (On-Demand Student Transportation Problem) avec 2 véhicules et 9 sommets dont un dépôt

La tâche du prestataire de service transport revient à faire un ordonnancement des tournées sollicitées en assurant une meilleure allocation des véhicules aux demandes de sorte à minimiser les différents coûts en distance, en temps et aussi en coût fixe des véhicules et coût de roulage.

Pour cela, nous disposons de N_E élèves ou étudiants à transporter et de N_k véhicules.

Chaque élève représente une requête ou demande de transport et est associé à deux sommets : point de départ et point de destination.

Une tournée est effectuée par un véhicule partant du dépôt (point 0) pour l'établissement (point 7 ou 8 sur la fig. 2) et terminer à nouveau au dépôt. Chaque tournée doit obéir à un certain nombre de conditions ou contraintes notamment :

- Le respect des fenêtres de temps $[a_i, b_i]$ de ramassage et de dépôt $[a_{i+n}, b_{i+n}]$ des demandes ;
- La capacité du véhicule ;
- Toutes les demandes de transport sont satisfaites ;
- La durée maximale de la tournée ;
- Le temps de trajet de chaque élève ou étudiant ;
- L'ordre de passage du véhicule sur les points d'arrêt ;

- Le transporteur dispose d'une flotte limitée de véhicules.

La satisfaction d'une demande de transport dans notre approche consiste pour le prestataire à récupérer un nombre n_i et n_j d'élèves aux arrêts i et j , ayant choisi la même destination et la même fenêtre de temps (dans la limite des places disponibles) et à les déposer tous à la même destination $i+n$.

Le nombre de personnes ramassé dans les différents arrêts doit être équivalent au nombre de personne au point de destination $i+n$ (à l'école) : $\sum n_i = n_{i+n}$

Selon ce principe, des personnes provenant d'un même arrêt et ayant des destinations différentes ou des fenêtres de temps différentes ne pourront pas être de la même tournée.

Soit :

- i et j , les points représentant les individus (ou élèves) à transporter ;
- R , l'ensemble des points de ramassage des élèves ;
- Γ , l'ensemble des points de descente des élèves et étudiants (c'est-à-dire les établissements) ;
- Θ , ensemble des dépôts de véhicules ;
- n_D , nombre de dépôts ;
- K , ensemble des véhicules de la flotte ;
- $G = (\mathcal{M}, A)$, un graphe complet orienté avec :
 - \mathcal{M} , l'ensemble comprenant le (ou les) dépôt (s) de véhicules ainsi que les points de ramassage et de descente i, j des élèves. ($\mathcal{M} = R \cup \Gamma \cup \Theta$)
 - A , l'ensemble des trajets ou arcs entre deux points i et j ; $(i, j) \in A$
- N_k , le nombre de véhicule au dépôt ;
- n_s^k , nombre de sommets parcourus dans la tournée du véhicule k , y compris le dépôt ;
- C_k , la capacité du véhicule k ;
- $c_{i,j}$, le coût du parcourt entre i et j ;
- m , le nombre de tournées de la solution S du problème ;
- S , une solution du problème. S est constitué de m tournées $\{t_1, t_1, \dots, t_m\}$ avec t_k , la $k^{\text{ième}}$ tournée de la solution| $k=1, \dots, m$
- T_k , ensemble des tournées réalisables par le véhicule k ;
- $[a_i, b_i]$, la fenêtre de temps pour le ramassage de la demande i ;
- $[a_{i+n}, b_{i+n}]$, la fenêtre de temps pour la descente des passagers à destination ;
- t_{ij} , la durée du plus court chemin entre les sommets i et j ;

- d_{ij} , la distance entre les sommets i et j ;
- q_i^j , la demande sur le sommet i pour la destination j : un client i est caractérisé par sa localisation (i), sa destination (j) et l'intervalle de temps $[a_i, b_i]$ pendant lequel il peut être visité et ramassé ;
- ζ_{ij}^k , la variable de décision

$$\zeta_{ij}^k = \begin{cases} 1: & \text{si le véhicule } k \text{ effectue le trajet } i - j; \\ 0: & \text{sinon} \end{cases}$$
- t_i^k , heure d'arrivée du véhicule sur le sommet i de de la tournée k ;
- h_i^k , heure de début de service du véhicule k sur le sommet i ;
- d_i^k , heure de départ du véhicule du sommet i de la tournée k ;

Fonction Objectif :

La formulation mathématique de la Fonction Objectif de notre problème de transport collectif des élèves à la demande (ODSTP) est la suivante :

$$\min_t \sum_{\substack{k=1 \\ k \in K}}^m \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i, j \in \mathcal{M}}}^{n_s^k - 1} (c_{i,j} + t_{ij} + d_{ij}) \zeta_{ij}^k \right) \quad [\text{Eq. 1}]$$

Sous les contraintes suivantes :

- C1 : Toutes les demandes de transport sont satisfaites ;

$$\sum_{\substack{k \in K \\ j \in \Gamma \cup \Theta}} \zeta_{ij}^k = 1, \forall i \in R \quad [\text{Eq. 2}]$$

- C2 : La charge du véhicule ne doit jamais être supérieure à sa capacité maximale

$$\sum_{i \in R \cup \Gamma} n_i \leq C_k \quad [\text{Eq. 3}]$$

- C3 : La date de début de service sur un sommet i est comprise entre sa date d'arrivée et de départ

$$t_i^k \leq h_i^k \leq d_i^k, \forall i \in \{1, \dots, n_s^k\} \quad [\text{Eq. 4}]$$

- C4 : L'heure d'arrivée à un nœud de ramassage est toujours inférieure à celle du nœud de destination.

$$t_i^k + t_{i,n+1} \leq t_{n+1}^k, \forall i \in R \quad [\text{Eq. 5}]$$

- C5 : Les fenêtres temporelles doivent être respectées

$$a_i \leq h_i^k \leq b_i, \forall i \in R \cup \Gamma \quad [\text{Eq. 6}]$$

- C6 : Assure la cohérence de chaque trajet et l'interdiction des sous-tours.

$$h_i^k + t_{i,j} - M \left(1 - \sum_{k \in K} \zeta_{ij}^k \right) - h_j^k \leq 0; \quad [\text{Eq. 7}]$$

5. Matériel et Méthodologie

Le choix de bonnes instances est important pour la validation d'un modèle. Dans le cadre de notre travail relatif au transport collectif à la demande des élèves et étudiants en Afrique subsaharienne, nous avons réalisé un benchmark pour l'obtention de données locales répondant aux exigences de notre modèle. À défaut d'en avoir obtenu, nous avons généré, à l'aide d'un algorithme approprié, plusieurs instances adaptées à notre problème ODSTP. La spécification du générateur a été paramétrée par un certain nombre de paramètres entiers. Nous avons également pris un certain nombre de paramètres d'entrée tels que l'axe de la zone de routage et la longueur de l'ordonnée puis nous avons construit un référentiel (OIJ) dans le plan et créé aléatoirement dans celui-ci un ensemble de demandes prenant en compte les nœuds de demande et de destination. Nous avons aussi généré un nombre de véhicules avec leur lieu de dépôt et les capacités associés, conformément au nombre de demandes. Enfin l'algorithme calcule également le temps de trajet et la distance euclidienne associés à chaque arc.

Nous avons réalisé notre expérience sur un ordinateur Surface Pro 9, 64 bits avec un processeur Intel(R) Core(TM) i7-1065G7 CPU @ 1.30GHz 1.50 GHz, mémoire vive 16,0 Go,

6. Résultats

Pour la résolution de notre problème ODSTP, nous avons eu recours au programme Mix Integer d'IBM CPLEX Optimization Studio 12.8 et son API Java.

Pour cette première étude sur notre modèle ODSTP, nous avons choisi d'utiliser une méthode de résolution exacte à savoir la programmation en nombres entiers mixtes (MIP) qui est une puissante technique d'optimisation mathématique qui combine des variables de décision continues et discrètes.

Nous avons donc testé notre modèle en générant, avec notre algorithme, des instances comprenant :

- Un nombre $|Rq|$ de requêtes : $04 \leq |Rq| \leq 20$;
- Un nombre $|K|$ de véhicules : $02 \leq |K| \leq 08$;
- Un nombre n_D de dépôts ($01 \leq n_D \leq 03$).

Le nombre de nœuds (point de stationnements) utilisés varie entre 08 et 40 : $08 \leq |N| \leq 40$.

($N=R \cup \Gamma$). Une flotte hétérogène de véhicules a été utilisé pour les différentes instances de l'expérimentation. Les nœuds n'ont pas la même configuration.

Le tableau 1 présente les différents résultats. Les instances sont regroupées en fonction du nombre de requêtes

Tableau 1.: Résultats de notre modèle ODSTP avec l'algorithme MIP

Noms	Instances					CPU
	N	Rq	K	n_D	Temps(s)	Temps moyen (s)
I_{1a}	08	04	02	01	0,0121	0,0423
I_{1b}	08	04	02	02	0,0294	
I_{1c}	08	04	02	03	0,0613	
I_{1d}	08	04	02	02	0,0807	
I_{1e}	08	04	02	01	0,0280	
I_{2a}	12	08	02	03	06,077	92,4276
I_{2b}	12	08	02	03	8,116	
I_{2c}	12	08	04	01	91,314	
I_{2d}	12	08	04	01	125,920	
I_{2e}	12	08	04	02	230,711	
I_{3a}	24	12	04	02	614,043	823,8942
I_{3b}	24	12	04	02	650,522	
I_{3c}	24	12	04	03	803,741	
I_{3d}	24	12	04	03	981,020	
I_{3e}	24	12	07	01	1070,145	
I_{4a}	30	16	07	01	1203,729	1378,804
I_{4b}	30	16	07	02	1344,518	
I_{4c}	30	16	07	02	1228,820	
I_{4d}	30	16	07	03	1514,011	
I_{4e}	30	16	08	03	1602,942	
I_{5a}	40	20	08	01	1830,017	2004,228
I_{5b}	40	20	08	02	1971,161	
I_{5c}	40	20	08	02	2018,732	
I_{5d}	40	20	08	03	1996,013	
I_{5e}	40	20	08	03	2205,221	

7. Discussion

L'analyse du tableau de résultats montre que le temps moyen de résolution augmente de manière exponentielle en fonction du nombre de requête et de nœuds impliqués. Pour les instances de petites tailles, nous avons des temps moyens CPU assez réduits. Cela montre que notre solution est efficace pour les petites instances. Cependant, en tant que méthode exacte, elle est limitée pour les grandes instances (comportant un grand nombre de requêtes élèves et de véhicules) et ne

permet pas d'obtenir une solution optimale en temps raisonnable. Ainsi, la prochaine étape de nos travaux sera l'implémentation de notre modèle ODSTP en utilisant une heuristique.

Notre approche a également le mérite d'améliorer la ponctualité des apprenants voire les résultats scolaires en permettant l'optimisation des transports à travers la réduction des durées de trajets et les coûts de transport scolaires.

8. Conclusion

La mobilité des élèves et étudiants dans les grandes villes d'Afrique Subsaharienne constitue un épineux problème dans la mesure où elle peut impacter négativement les résultats scolaires et universitaires. Dans ce travail, pour aider à résoudre ce problème, nous avons proposé un modèle d'optimisation de transport à la demande adapté au transport scolaire dénommé ODSTP (On-Demand Student Transportation Problem). Pour l'implémentation du modèle, nous avons utilisé une méthode exacte (MIP) qui nous donne un temps d'exécution assez réduit pour les petites instances et reste limitée pour les instances de tailles importantes. Si notre approche permet d'améliorer l'efficacité des trajets scolaires à travers la minimisation à la fois de la distance totale, de la durée ainsi que du coût des tournées, il reste tout de même des défis, notamment la prise en compte des instances de grandes tailles en utilisant une heuristique de résolution.

REFERENCES

- [1] Antoine, Philippe. "L'urbanisation en Afrique et ses perspectives." (1997).
- [2] Toth, P. and Vigo, D. (2002) The Vehicle Routing Problem. Society for Industrial and Applied Mathematics, 44, 1-17. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515>
- [3] Fontanié H. Trajets et ramassages scolaires. Résultats d'une enquête préliminaire. In: *Enfance*, tome 18, n°1-3, 1965. Les conditions de vie et de travail de l'écolier Enseignements élémentaire, secondaire, technique. pp. 285-297. DOI : <https://doi.org/10.3406/enfan.1965.2364>
- [4] Brackers, K. and Kovacs, A.A. (2016) A Multi-Period Dial-a-Ride Problem with Driver Consistency. *Transportation Research Part B Methodological*, 94, 355-377. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.010>
- [5] Santos, D.O. and Xavier, E.C. (2015) Taxi and Ride Sharing: A Dynamic Dial-a-Ride Problem with Money as an Incentive. *Expert Systems with Applications*, 42,6728-6737. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.060>
- [6] Andreasen, M. H., & Møller-Jensen, L. (2017). Access to the city: Mobility patterns, transport and accessibility in peripheral settlements of Dar es Salaam. *Journal of Transport Geography*, 62, 20–29.
- [7] Kiggundu, A. T., Nyakwebara, C., Eriaku, W., & Nakanwagi, O. (2021). An assessment of stage bus transit operations in the greater Kampala, Uganda. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 10(6), 26–50