



MODELISATION DYNAMIQUE DE LA GESTION DES EMBOUTEILLAGES DANS LA VILLE PROVINCE DE KINSHASA : APPROCHE BASÉE SUR LA PROGRAMMATION MATHÉMATIQUE MULTICRITÈRE

[DYNAMIC MODELING OF TRAFFIC JAM MANAGEMENT IN THE CITY-PROVINCE
OF KINSHASA: AN APPROACH BASED ON MULTICRITERIA MATHEMATICAL
PROGRAMMING]

Par

KOKA WALENDUA P.¹, KIKOMBA KAHUNGU M.², KAPENGA KAZADI J.M.³,
MAMANYA F.⁴, NGOIE CALEB CALEB⁵

- (1) Institut Supérieur Pédagogique de Boma
- (2) Institut Supérieur Pédagogique de Gombe
- (3) Université Pédagogique Nationale, UPN, Kinshasa.
- (4) Université Pédagogique Nationale, UPN, Kinshasa.
- (5) Centre de Recherche sur l'Enseignement de Mathématique, CREM GOMBE/ KINSSASA.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.19487298>

Résumé

L'objet principal de cet article est de proposer une approche novatrice basée sur la programmation mathématique multicritères pour optimiser la gestion du trafic routier en prenant en compte cinq dimensions interdépendantes : le temps et la distance de parcours, les émissions de CO₂ (dioxyde de carbone), le coût économique et la sécurité routière. En s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse, alliant collecte de données sur terrain, modélisation mathématique avancée et outils de simulation, un modèle a été développé pour analyser et évaluer différents scénarios d'optimisation.

Les résultats démontrent que l'approche multicritères permet de concilier efficacité opérationnelle, durabilité environnementale et accessibilité économique. Ce travail offre ainsi une base pour l'élaboration de politiques publiques de mobilité durable adaptées aux spécificités urbaines de Kinshasa.

Mots-clés : Modélisation dynamique, Embouteillages, Kinshasa, Programmation Mathématique.

Abstract

The main objective of this article is to propose an innovative approach based on multi-criteria mathematical programming to optimize road traffic management by considering five interdependent dimensions: travel time and distance, CO₂ (carbon dioxide) emissions, economic cost, and road safety. Using a rigorous methodology that combines field data collection, advanced mathematical modeling, and simulation tools, a model was developed to analyze and evaluate different optimization scenarios.

The results demonstrate that the multi-criteria approach makes it possible to reconcile operational efficiency, environmental sustainability, and economic accessibility. This work thus provides a basis for developing sustainable mobility public policies adapted to the specific urban characteristics of Kinshasa.

Keywords: Dynamic modeling, Traffic jams, Kinshasa, Mathematical programming.

I. Introduction

La gestion du trafic urbain à Kinshasa représente un enjeu crucial pour le développement économique et la qualité de vie de ses habitants. En tant que capitale de la République Démocratique du Congo, Kinshasa connaît une croissance démographique rapide suite à l'exode rural, l'attraction des activités dans plusieurs domaines de la vie, avec sa population en constante augmentation, attire non seulement des migrants internes mais aussi internationaux; ce qui entraîne une pression accrue sur un réseau routier déjà fragile. La hausse directe du nombre de véhicules sur les routes, c'est ce qui accentue la congestion [4].

Ce phénomène migratoire est souvent lié à des recherches d'opportunités économiques, d'éducation ou de conditions de vie meilleures ainsi que ceux qui fuient les guerres de l'Est de la RDC, mais il affecte également la structure et l'organisation de la ville engendrent aussi des défis considérables en matière de transport. Les embouteillages, la pollution de l'air et les coûts économiques liés aux déplacements sont devenus des problématiques quotidiennes qui nécessitent une attention particulière. Dans ce contexte, la mise en place d'un modèle de la programmation mathématique multicritère apparaît comme une solution efficace afin d'optimiser la gestion du trafic routier [5].

Les embouteillages émergent d'un déséquilibre entre la demande de trafic et la capacité du réseau routier. Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo, fait face à une congestion routière chronique. Les principales causes identifiées sont :

- Croissance démographique rapide (augmentation annuelle de 4,36%), accompagnée d'une explosion du parc automobile et urbanisation non planifiée[10],
- Dégradation des infrastructures routières et insuffisance des voies de contournement,
- Comportements inadaptés des usagers (non-respect du code de la route, stationnement anarchiques),
- Multiplication des véhicules privés sans développement parallèle de transport en commun.

Les embouteillages chroniques qui paralysent Kinshasa ne constituent pas seulement une gêne pour la circulation, *mais affectent profondément divers aspects de la vie quotidienne des habitants de Kinshasa.*

- Comment optimiser la circulation à Kinshasa en tenant compte de plusieurs objectifs contradictoires ?

Nous citons :

- Réduire le temps de trajet ;

- Limiter les émissions des pollutions accrues ;
- Réduire la distance de parcours ;
- Maximiser la sécurité routière et
- Réduire le coût de la consommation du carburant.

Ces interrogations révèlent les tensions entre différents impératifs urbains et mentionnent la nécessité d'une approche équilibrée, propre à la programmation multicritère. Dans cette perspective, nous considérons que le modèle de programmation mathématique multicritère que nous développerons devra s'articuler autour de plusieurs axes principaux : le temps de parcours, les émissions de CO₂, les coûts économiques pour les usagers et la distance.

En réponse aux problématiques identifiées, les hypothèses sont formulées, en rapport avec des relations conditionnelles entre les variables clés du système de transport de la ville de Kinshasa :

- *Fluidité-efficiences économique*

- (1) On devrait mettre en œuvre un modèle à plusieurs critères qui prend en compte le temps de trajet et les coûts d'exploitation, dans le but de trouver une solution optimale qui favorise la fluidité et diminue la perte économique.
- (2) La mise en place d'un modèle mathématique intégrant des critères d'accessibilité spatiale et d'émissions polluantes tout en réduisant la durée.

- *Sécurité routière et flux*

- (3) Le modèle considère simultanément la densité du trafic, la qualité d'infrastructure et les statistiques d'accidents, alors que la solution optimisée pourrait diminuer les accidents sans réduire de plus la capacité globale du réseau.

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle mathématique pour améliorer la fluidité du trafic dans la ville Province de Kinshasa.

II. Cadre théorique sur la modélisation mathématique

La modélisation mathématique constitue une étape importante dans la résolution de la gestion des embouteillages à Kinshasa. Après avoir identifié les critères de performance pertinents, il s'agit de formaliser ces éléments dans un cadre mathématique structuré.

L'objectif est de traduire la problématique réelle en un modèle d'optimisation multicritère, capable d'évaluer et de comparer différentes solutions. Pour ce faire, deux aspects doivent être définis :

- Les variables de décision, qui représentent les leviers d'action sur lesquels il est possible d'agir,
- Les contraintes, qui encadrent les solutions réalisables en tenant compte des limitations physiques, économiques et réglementaires.

Les variables de décision sont les paramètres que le modèle ajuste pour optimiser les critères de performance identifiés [9].

1. Définissons les variables de décision:

- Soit $x_{ij}(t)$ nombre de véhicules circulant sur l'arc (i, j) du réseau routier à l'instant t ,
- $T_{ij}(t)$ est le temps moyen de parcours sur l'arc (i, j) au temps t , fonction de $x_{ij}(t)$.
- $C_{ij}(t)$ est la consommation de carburant associée de l'arc (i, j) ,
- E_{ij} est les émissions polluantes associées de l'arc (i, j) ,
- D_{ij} est la distance de l'arc (i, j) ,
- $S_{ij}(t)$ l'indice de sécurité global (à maximiser, sous forme négative dans la fonction objectif).

2. Contraintes du modèle:

- $x_{ij}(t) \leq$ capacité ij ,
- $T_{ij}(t) \geq T_{\min}$
- $E_{ij}(t) \leq E_{\max}$.
- $C_{ij} \leq$ Budget. (Le coût économique)

- $S_{ij} \geq S_{min}$ (Contraintes de sécurité)

3. Formulation de la fonction objectif

Formulation du problème:

Soit $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ le vecteur des variables de décision, où x_i représente une décision spécifique.

Les objectifs à optimiser sont:

- $f_1(x)$: temps de parcours moyen,
- $f_2(x)$: consommation du carburant,
- $f_3(x)$: émissions polluantes,
- $f_4(x)$: la sécurité routière,
- $f_5(x)$: distance moyen de parcours moyen.

Le problème d'optimisation multicritère peut être formulé comme suit:

- Minimiser $(f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_5(x))$

Maximiser $f_4(x)$.

Ce qui conduit à dire:

$$\begin{cases} \text{Max}(Z) = S_{ij} \\ \text{Min}(Z) = t_{ij} + E_{ij} + C_{ij} + d_{ij} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1 \\ f_2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Z_{min} &= f_2 - f_1 \\ &= t_{ij} + E_{ij} + C_{ij} + d_{ij} - S_{ij} \end{aligned}$$

$$\text{s/c} \begin{cases} t_{ij} \geq 0 \\ E_{ij} \geq 0 \\ C_{ij} \geq 0 \\ d_{ij} \geq 0 \\ S_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

Méthode de pondération combinaison linéaire des objectifs: $Z = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) - \omega_4 f_4(x) + \omega_5 f_5(x)$ où ω_i sont les poids attribués à chaque critères, et $f_i(x)$ sont les fonctions objectifs pour chaque critères. (On maximise la sécurité en la soustrayant) [6].

4. Fonction scalarisante.

En optimisation multicritère, les fonctions scalarisantes sont des fonctions d'agrégations qui permettent de transformer un problème d'optimisation multicritère en un problème d'optimisation monocritère [8].

Les fonctions scalarisantes sont utilisées pour :

- Réduire la dimensionnalité du problème,
- Faciliter la comparaison entre les solutions,
- Permettre l'utilisation d'algorithmes d'optimisation monocritère.

Une information identique s'acquiert souvent progressivement au travers d'un face à face avec le décideur. Elle peut de temps en temps se traduire en termes de paramètres de préférences [11] les plus courants sont :

1. Les poids $\omega_k (k = 1, \dots, n)$ qui reproduisent l'impact relatif de chaque critère (Le plus souvent ils sont normés)

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1, (\omega_k \geq 0);$$

2. Les taux de substitution qui expriment l'idée de contrepartie entre une perte sur un critère et un gain sur un autre.

III. Approche méthodologique

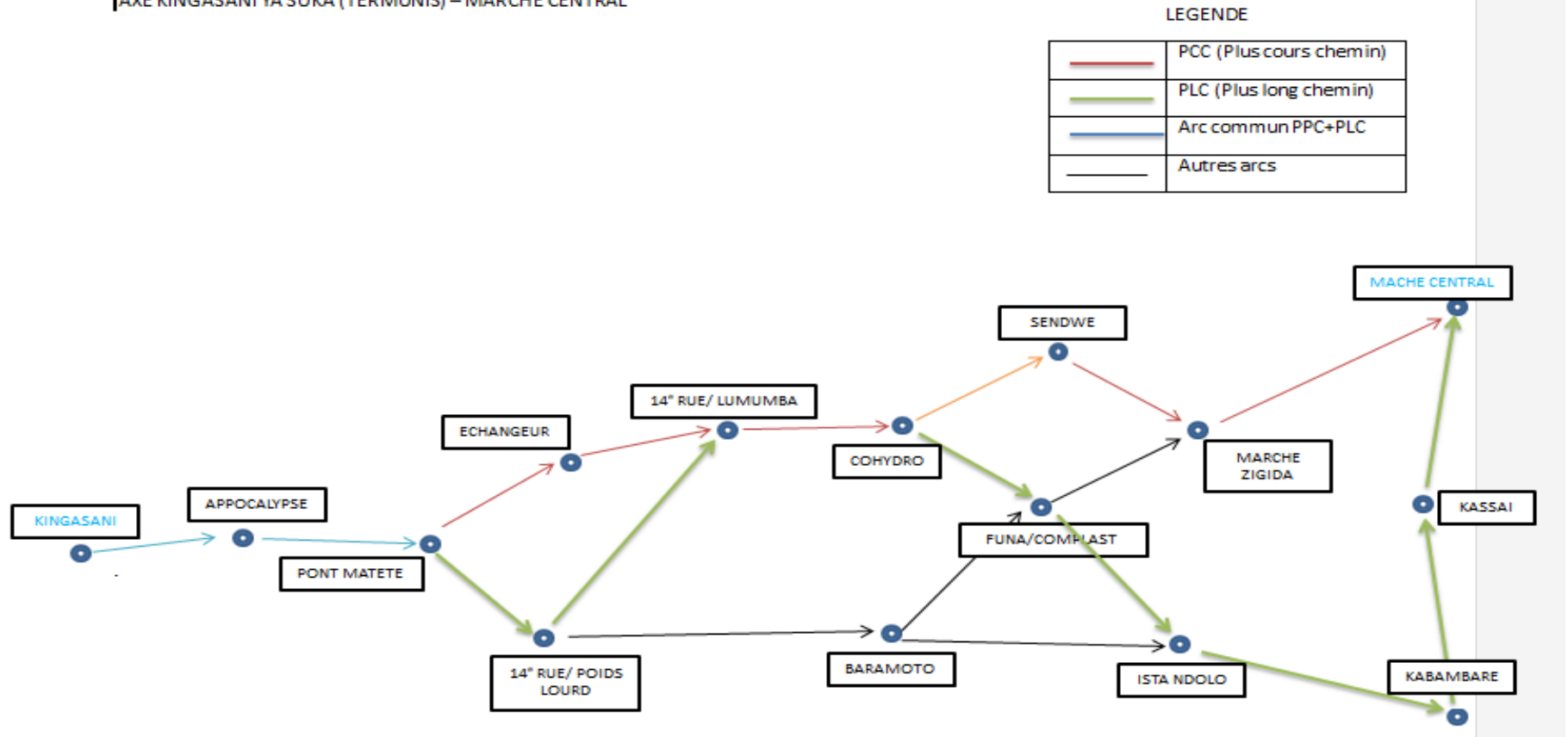
La programmation mathématique multicritère (également appelée optimisation multi-objectif ou encore programmation linéaire multi-objectif) est un domaine de la recherche opérationnelle qui vise à résoudre des problèmes de décision dans lesquels il faut optimiser simultanément plusieurs objectifs (ou critères) souvent contradictoires sur ensemble d’actions (solutions) réalisables.

- Dans le contexte de la circulation urbaine, et plus particulièrement pour la modélisation dynamique de la gestion des embouteillages à Kinshasa [7] , cela peut inclure les objectifs à optimiser ci-après :
 - Temps de parcours: minimiser le temps de trajet moyen des véhicules;
 - Coût économique: minimiser la consommation du carburant;
 - Émission polluants: réduire les émissions de dioxyde de carbone;
 - Indices de sécurité: maximiser les indices de sécurité routière et
 - Distance de parcours: minimiser la distance de parcours.
 - La programmation mathématique multicritère offre un cadre rigoureux permettant :
 - D’optimiser simultanément plusieurs objectifs souvent contradictoires (temps de trajet, la distance, la sécurité routière, coûts et pollution),
 - De fournir des solutions adaptables aux spécificités du contexte de la ville de Kinshasa.
 - Dans la démarche méthodologique poursuivie, nous présentons :
 - Description du système de transport de Kinshasa :
 - Approches multicritères choisies :
 - Modélisation mathématique : formulation du problème d’optimisation en utilisant la programmation mathématique multicritère. Développer un modèle d’optimisation multicritère intégrant les paramètres du trafic routier de la ville de Kinshasa (flux véhiculaires, infrastructures routières, comportements des usagers) pour évaluer différentes solutions de réduction des embouteillages [10].
 - Outils mathématiques et logiciels
- Les méthodes et logiciels utilisés dans la planification, la conception et la simulation :
- Python : formulation et résolution du modèle.
 - MAP : cartographie des itinéraires
 - Excel : traitement des données brutes.
 - Les méthodes et techniques scientifiques utilisées pour la réalisation de ce travail : utilisation d’Algorithmes d’optimisation multicritère tels : Programmation linéaire, Approche de Pareto.
 - L’objectif ultime est de fournir aux décideurs un outil d’aide à la décision permettant d’améliorer la mobilité urbaine tout en répondant aux besoins diversifiés des usagers routiers et aux contraintes infrastructurelles existantes.

IV. Résultats de la recherche

La qualité des résultats d’un modèle dépend directement de la qualité et de la pertinence des données utilisées pour son alimentation et sa validation. Dans le cadre de cette étude, plusieurs types de données sont mobilisés pour assurer une validation rigoureuse du modèle d’optimisation multicritère. En se référant à l’introduction de ce travail, nous allons nous focaliser sur l’axe allant de Kingasani (terminus) vers Marcher central, appelé communément “Zando”

AXE KINGASANI YA SUKA (TERMUNIS) – MARCHÉ CENTRAL



15 sommets et 18 arcs.

1. Temps de parcours sur l'arc (i,j) en heure : (t_{ij})

CHEMIN	Sommet	temps/H	sommet	temps/H	sommet	temps/MIN	sommet	temps/MIN	sommet	temps/MIN	sommet
1	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	6	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
2	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	6	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
3	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	6	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
4	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	10	14e RUE PLD	4	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
5	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	10	14e RUE PLD	4	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
6	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	10	14e RUE PLD	4	14e RUE/LMB	12	COHIDRO
7	KINGASAN I	12	APPOCALYPS E	6	PONT MATETE	10	14e RUE PLD	10	BARAMOTO	4	ISTA/NDOLO

Sommet	temps/MIN	sommet	temps/MIN	sommet	temps/MIN	sommet	Temps	Sommet	Temps	Sommet	TOTAL MIN	TOTALL HEURE
COHIDRO	5	SENDWE	3	MARCHE ZIKIDA	9	MARCHE CENTRAL	0				57	1,0
COHIDRO	4	FUNA	5	MARCHE ZIKIDA	9	MARCHE CENTRAL					58	1,0
COHIDRO	4	FUNA	9	ISTA/NDOLO	11	KABAMBARE	10	KASAI	6	MARCHE CENTRAL	80	1,3
COHIDRO	5	SENDWE	3	MARCHE ZIKIDA	9	MARCHE CENTRAL					61	1,0
COHIDRO	4	FUNA	5	MARCHE ZIKIDA	9	MARCHE CENTRAL					62	1,0
COHIDRO	4	FUNA	9	ISTA/NDOLO	11	KABAMBARE	9	KASAI	6	MARCHE CENTRAL	83	1,4
ISTA/NDOLO	11	KABAMBARE	9	KASAI	6	MARCHE CENTRAL					68	1,1

Tableau 4.8 : temps de parcours Kingasani terminus- Marché central

Le Minimum par rapport au temps de parcours est le chemin 1: $t_{ij} = 57$ minutes soit 1 h et le maximum par rapport au temps est le chemin 6 : $t_{ij} = 83$ minutes soit 1,4 h de durée.

2. Distance de parcours sur l'arc (i,j) en kilomètres : (d_{ij})

CHEMIN	Sommet	Km	Sommet	Km	sommet	Km	sommet	Km	sommet	Km	sommet
1	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	1,5	ECHANGEUR	2,2	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
2	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	1,5	ECHANGEUR	2,2	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
3	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	1,5	ECHANGEUR	2,2	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
4	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	6,5	14e RUE PLD	1,3	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
5	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	6,5	14e RUE PLD	1,3	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
6	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	6,5	14e RUE PLD	1,3	14e RUE/LMB	3,7	COHIDRO
7	KINGASANI	5,3	APPOCALYPSE	2,8	PONT MATETE	6,5	14e RUE PLD	4,7	BARAMOTO	0,5	ISTA/NDOLO

Sommet	Km	Sommet	Km	Sommet	Km	Sommet	km	Km	km		d_{ij} en TOTAL KM	CHEMIN
COHIDRO	0,8	SENDWE	1,2	MARCHE ZIKIDA	2,7	MARCHE CENTRAL					20,2	1
COHIDRO	1,5	FUNA	1,7	MARCHE ZIKIDA	2,7	MARCHE CENTRAL					21,4	2
COHIDRO	1,5	FUNA	2,1	ISTA/NDOLO	2,4	KABAMBARE	2,2	KASAI	1,3	MARCHE CENTRAL	25	3
COHIDRO	0,8	SENDWE	1,2	MARCHE ZIKIDA	2,7	MARCHE CENTRAL					24,3	4
COHIDRO	1,5	FUNA	1,7	MARCHE ZIKIDA	2,7	MARCHE CENTRAL					25,5	5
COHIDRO	1,5	FUNA	2,1	ISTA/NDOLO	2,4	KABAMBARE	2,2	KASAI	1,3	MARCHE CENTRAL	29,1	6
ISTA/NDOLO	2,4	KABAMBARE	2,2	KASAI	1,3	MARCHE CENTRAL					25,7	7

Tableau 4.9 : distance de parcours Kingasani terminus- Marcher central.

Le plus long trajet est le chemin 6 avec $d_{ij}=29,1$ kilomètres et le plus court trajet est le chemin 1 avec $d_{ij} = 20,2$ kilomètres.

3. Nombre des véhicules sur les chemins (i,j) : x_{ij}

CHEMIN	Sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet
1	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	281	ECHANGEUR	316	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
2	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	281	ECHANGEUR	316	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
3	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	281	ECHANGEUR	316	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
4	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	315	14e RUE PLD	44	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
5	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	315	14e RUE PLD	44	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
6	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	315	14e RUE PLD	44	14e RUE/LMB	1817	COHIDRO
7	KINGASANI	2001	APPOCALYPSE	963	PONT MATETE	315	14e RUE PLD	286	BARAMOTO	98	ISTA/NDOLO

sommet	Nbre Véhicules	Sommet	Nbre Véhicules	Sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet	Nbre Véhicules	sommet	TOTAL VEHICULES
COHIDRO	354	SENDWE	77	MARCHE ZIKIDA	934	MARCHE CENTRAL					6743
COHIDRO	110	FUNA	669	MARCHE ZIKIDA	934	MARCHE CENTRAL					7091
COHIDRO	110	FUNA	302	ISTA/NDOLO	250	KABAMBARE	143	KASAI	156	MARCHE CENTRAL	6339
COHIDRO	354	SENDWE	77	MARCHE ZIKIDA	934	MARCHE CENTRAL					6505
COHIDRO	110	FUNA	669	MARCHE ZIKIDA	934	MARCHE CENTRAL					6853
COHIDRO	110	FUNA	302	ISTA/NDOLO	250	KABAMBARE	143	KASAI	156	MARCHE CENTRAL	6101
ISTA/NDOLO	250	KABAMBARE	143	KASAI	156	MARCHE CENTRAL					4212

Tableau 4.10 : nombre de véhicules entre Kingasani terminus- Marcher central.

Le chemin 2 reçoit le plus grand nombre des véhicules, $x_{ij} = 7091$ et celui qui reçoit moins de véhicules est le chemin 7 avec $x_{ij} = 4212$ véhicules.

4. Coût économique (consommation du carburant) : C_{ij}

CH	Nombre total de véhicule : x_{ij}	Répartition de véhicule /consommation : x_{ij} par C_{ij}			Temps moyen T_{ij}		Consommation du carburant en l : C_{ij}			Prix C_{ij} en USD		
		essence 65%	Diesel 34,5%	Électrique 0,5%	En heure	En minute (Min/60)	Essence en l $x_{ij} * 4$	Diesel en l $x_{ij} * 3$	Electrique en l	Essence n litre*1,06	Mazout n litres*1,05	Total
1	6743	4383,0	2326,3	33,7	1	57	17531,80	6979,005	0	18583,7	7327,96	25911,66
2	7091	4609,2	2446,4	35,5	1	58	18436,60	7339,185	0	19542,8	7706,14	27248,94
3	6339	4120,4	2187,0	31,7	1,3	80	16481,40	6560,865	0	17470,3	6888,91	24359,19
4	6505	4228,3	2244,2	32,5	1	61	16913,00	6732,675	0	17927,8	7069,31	24997,09
5	6853	4454,5	2364,3	34,3	1	62	17817,80	7092,855	0	18886,9	7447,50	26334,37
6	6101	3965,7	2104,8	30,5	1,4	83	15862,60	6314,535	0	16814,4	6630,26	23444,62
7	4212	2737,8	1453,1	21,1	1,1	66	10951,20	4359,42	0	11608,3	4577,39	16185,66

Tableau 4.11 : cout économique entre Kingasani terminus- Marcher central.

Le chemin 2 présente la consommation la plus élevée en terme coût économique estimé à 27248,94 USD, tandis que le chemin ayant la consommation la plus basse est le chemin 7 avec $c_{ij} = 16185,66$ USD.

5. Emission du dioxyde de carbone en Tonnes : e_{ij}

CH	Nombre total de véhicule : x_{ij} 100%	Répartition de véhicule /consommation : x_{ij} par C_{ij}			Temps moyen T_{ij}		Consommation du carburant en l : C_{ij}			Emission de CO2		EMISSION TOTAL de CO2	
		Essence 65%	Diesel 34,5%	Électrique 0,5%	En heure	En minute	Essence : n litre*1,06	Mazout : n litres*1,05	Electrique	Essence : n litres x 2,3	Mazout : n litres x 2,6	En Kg	En Tonnes
1	6743	4383,0	2326,3	33,7	1,1	71	17531,80	6979,005	0	40323,1	18145,41	58468,55	58,5
2	7091	4609,2	2446,4	35,5	1,2	69	18436,60	7339,185	0	42404,2	19081,88	61486,06	61,5
3	6339	4120,4	2187,0	31,7	1,5	91	16481,40	6560,865	0	37907,2	17058,25	54965,47	55,0
4	6505	4228,3	2244,2	32,5	1,3	81	16913,00	6732,675	0	38899,9	17504,96	56404,86	56,4
5	6853	4454,5	2364,3	34,3	1,4	81	17817,80	7092,855	0	40980,9	18441,42	59422,36	59,4
6	6101	3965,7	2104,8	30,5	1,7	103	15862,60	6314,535	0	36484,0	16417,79	52901,77	52,9
7	4212	2737,8	1453,1	21,1	1,4	81	10951,20	4359,42	0	25187,8	11334,49	36522,25	36,5

Tableau 4.12 : Emission du dioxyde de carbone entre Kingasani terminus- Marcher central. Le chemin le plus polluant est l'axe 2 avec une émission de 61,5 Tonnes de CO2, tandis que le moins polluant est le chemin 7, avec une émission de 36,5 Tonnes de CO2.

6. Indice de sécurité : S_{ij}

CHEMIN	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	sommet
1	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	5	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
2	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	5	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
3	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	4	ECHANGEUR	5	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
4	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	7	14e RUE PLD	7	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
5	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	7	14e RUE PLD	7	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
6	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	7	14e RUE PLD	7	14e RUE/LMB	7	COHIDRO
7	KINGASAN I	4	APPOCALYPS E	5	PONT MATETE	7	14e RUE PLD	7	BARAMOTO	5	ISTA/NDOLO

Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Sommet	Indice de S	Indice de S	Indice de S	INDICE MOY : S_{ij}	CHEMIN
COHIDRO	7	SENDWE	5	MARCHE ZIKIDA	4	MARCHE CENTRAL						6	1
COHIDRO	6	FUNA	6	MARCHE ZIKIDA	4	MARCHE CENTRAL						5,5	2
COHIDRO	6	FUNA	5	ISTA/NDOLO	4	KABAMBARE	4	KASAI	4	MARCHE CENTRAL		5	3
COHIDRO	7	SENDWE	6	MARCHE ZIKIDA	4	MARCHE CENTRAL						6,1	4
COHIDRO	6	FUNA	6	MARCHE ZIKIDA	4	MARCHE CENTRAL						6	5
COHIDRO	6	FUNA	5	ISTA/NDOLO	4	KABAMBARE	4	KASAI	4	MARCHE CENTRAL		5,5	6
ISTA/NDOLO	4	KABAMBARE	4	KASAI	4	MARCHE CENTRAL						5,4	7

Tableau 4.13 : indice de sécurité entre Kingasani terminus- Marcher central. Le chemin le plus sécurisé est l'axe 4 avec $S_{ij} = 6,1$ et le moins sécurisé avec $S_{ij} = 5$ c'est l'axe 3.

RESULTATS OBTENUS

1. Fonction objectif

Méthode de pondération combinaison linéaire des objectifs: $Z = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) - \omega_4 f_4(x) + \omega_5 f_5(x)$ où ω_i sont les poids attribués à chaque critère, et $f_i(x)$ sont les fonctions objectifs pour chaque critère. (On maximise la sécurité en la soustrayant).

Sachant que: $\omega_1 = 0,4$; $\omega_2 = 0,15$; $\omega_3 = 0,15$; $\omega_4 = 0,20$; $\omega_5 = 0,10$.

Ce qui conduit à conclure :

$$Z_{min} = 0,4 \cdot t_{ij} + 0,15 \cdot C_{ij} + 0,15 \cdot e_{ij} - 0,20 \cdot s_{ij} + 0,10 \cdot d_{ij}$$

CH	TEMPS (H) t_{ij}	COUT ECON EN USD C_{ij}	Émission CO2 (T) e_{ij}	IND SEC S_{ij}	DISTANCE (KM) d_{ij}	SOMME
1	1,0	25911,66	58,5	6,0	20,2	3899,14
2	1,0	27248,94	61,5	5,5	21,4	4100,21
3	1,3	24359,19	55	5,0	25	3666,15
4	1,0	24997,09	56,4	6,1	24,3	3762,07
5	1,0	26334,37	59,4	6,0	25,5	3963,22
6	1,4	23444,62	52,9	5,5	29,1	3529,20
7	1,1	16185,66	36,5	5,25	25,7	2437,38

Tablea 4.22: évaluation de la fonction objectif par rapport aux poids sur axe “Kingasani et Marché Central”.

$$2. \text{ Les contraintes de la fonction: } \left\{ \begin{array}{l} -t_{ij} \geq -1,11 \\ -C_{ij} \geq -26475,67 \\ -e_{ij} \geq -59,75 \\ S_{ij} \geq 5,64 \\ -d_{ij} \geq -24,46 \\ t_{ij} \geq 0 \\ C_{ij} \geq 0 \\ E_{ij} \geq 0 \\ d_{ij} \geq 0 \end{array} \right. \text{ sachant que: } t_{ij}, C_{ij}, e_{ij}, S_{ij}$$

et : d_{ij} sont des fonctions objectifs. Les contraintes ne modifient pas la fonction objectif, mais filtrent les solutions admissibles.

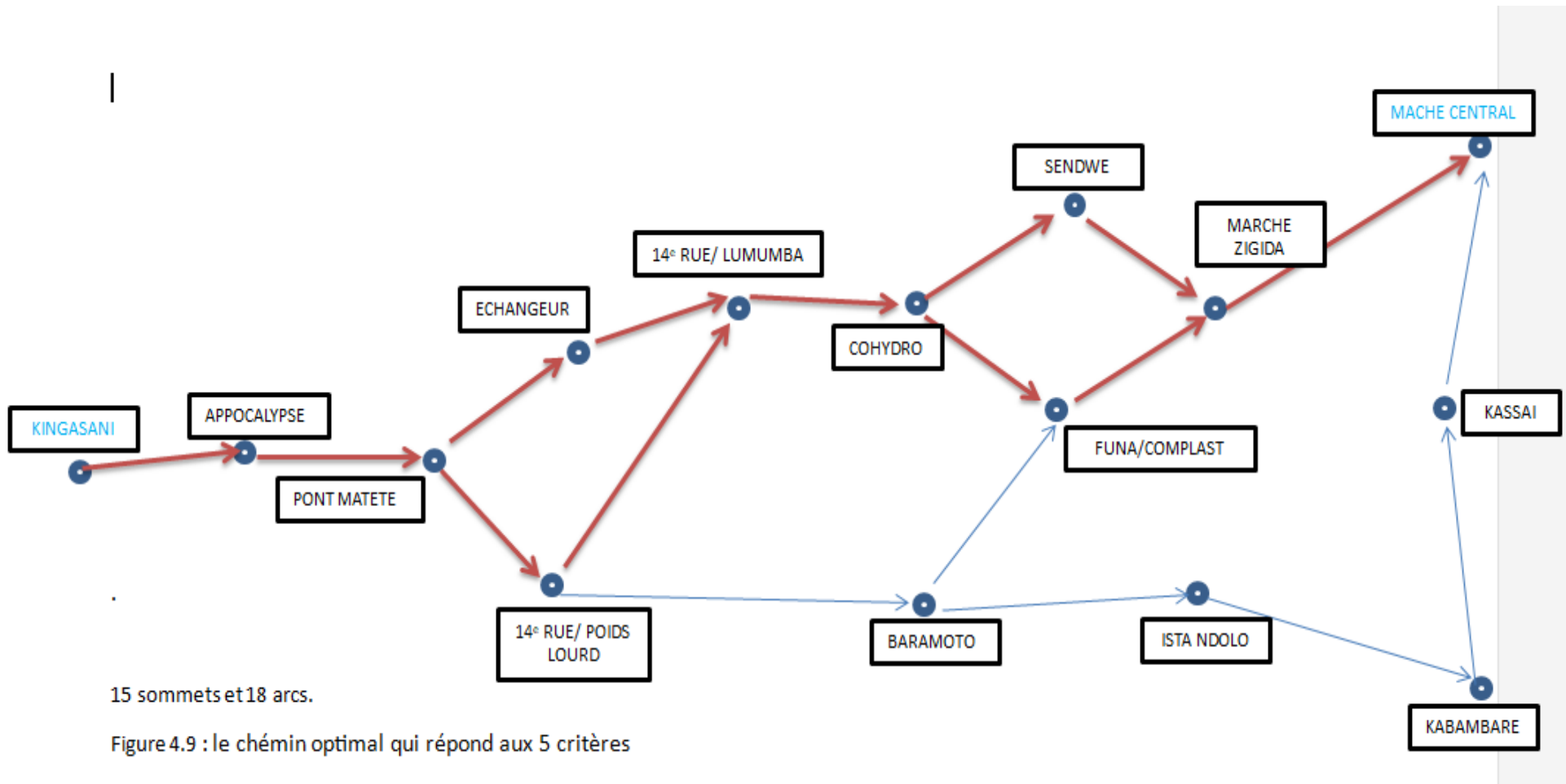
3. Voici les resultats obtenus apres avoir soumis les contraintes dans la fonction objectif :

CH	TEMPS (H) t_{ij}	COUT ECON EN USD C_{ij}	Émission CO2 (T) e_{ij}	IND SEC S_{ij}	DISTANCE (KM) d_{ij}	SOMME
1	1,0	25911,66	58,5	6,0	20,2	3899,14
4	1,0	24997,09	56,4	6,1	24,3	3762,07

Tableau 4.23 : Résultat d' évaluation de la fonction objectif par rapport aux contrainte sur axe Kingasani et Marché central.

Les axes 4 et 5 sont les chemins les plus optimal qui repond a ces 5 critères.

Chémin 5 est le meilleur parmi ceux qui respectent les contraintes.



15 sommets et 18 arcs.

Figure 4.9 : le chemin optimal qui répond aux 5 critères

SIMULATION ET COMPARAISON DES PERFORMANCES DES SCENARIOS

Pour faire notre simulation, nous avons opté le langage python pour sa souplesse. Nous allons trouver le chemin maximal par l'optimum de Pareto en rapport avec nos variables d'études ainsi que le chemin optimal.

Modélisation : formulation mathématique du problème réel.

Méthode de pondération combinaison linéaire des objectifs: $Z = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) - \omega_4 f_4(x) + \omega_5 f_5(x)$ où ω_i sont les poids attribués à chaque critères, et $f_i(x)$ sont les fonctions objectifs pour chaque critères. (On maximise la sécurité en la soustrayant).

CH	TEMPS (H) t_{ij}	COUT ECON EN USD C_{ij}	Émission CO2 (T) e_{ij}	IND SEC S_{ij}	DISTANCE (KM) d_{ij}	SOMME
1	1,0	25911,66	58,5	6,0	20,2	3896,744
2	1,0	27248,94	61,5	5,5	21,4	4098,006
3	1,3	24359,19	55	5,0	25	3664,15
4	1,0	24997,09	56,4	6,1	24,3	3759,63
5	1,0	26334,37	59,4	6,0	25,5	3960,82
6	1,4	23444,62	52,9	5,5	29,1	3527,00
7	1,1	16185,66	36,5	5,25	25,7	2435,28

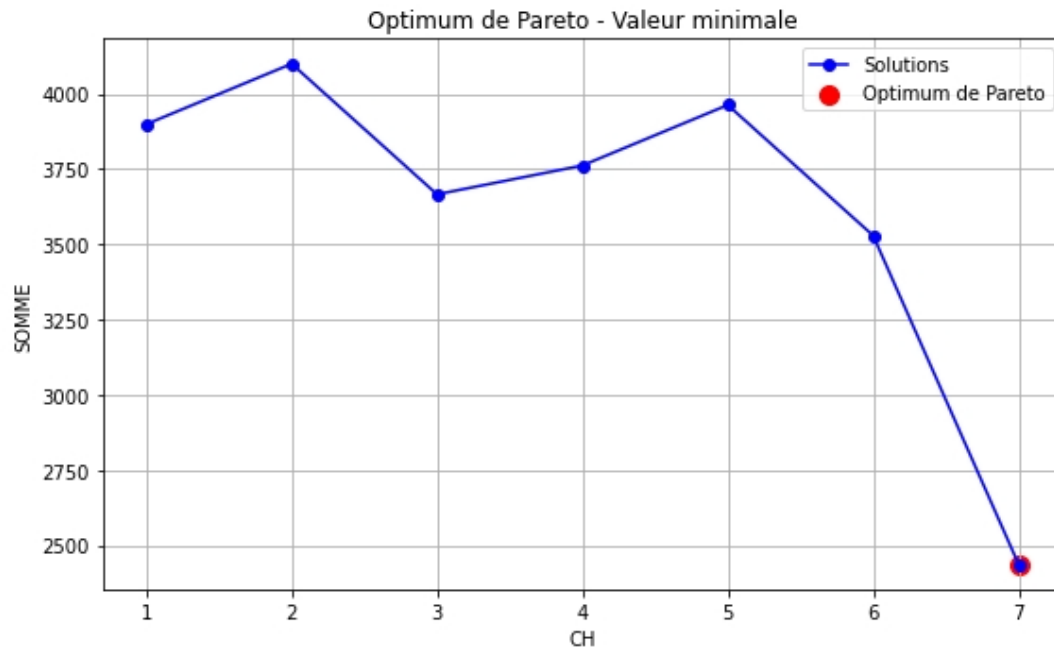
Tableau 4.27: Résultat d'évaluation de la fonction objectif par rapport aux contraintes sur l'axe: Kingasani vers Marché central, appelé communément "zando".

a) Codes source

```
import matplotlib.pyplot as plt
#Données
CH = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
SOMME = [3899.14, 4100.21, 3666.15, 3762.07, 3963.22, 3529.20, 2437.41]
#Tracé simple
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(CH, SOMME, marker='o', linestyle='-', color='blue', label='Solutions')
plt.scatter(7, 2437.41, color='red', s=100, label='Optimum de Pareto') #point
minimum

#Annotations
plt.title("Optimum de Pareto - Valeur minimale")
plt.xlabel("CH")
plt.ylabel("SOMME")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

b) Graphique de l'optimum de pareto pour le chemin favorable par rapport à l'axe KINGASANI (terminus) – MARCHÉ CENTRAL



1. Résolution numérique : approximation de la solution à l'aide d'algorithmes

Code Python

Axe de KINGASANI vers GARECENTRALE

```

print("la fonction objectif defini par : Z = W1F1(x) + W2F2(x) + W3F3(x) - W4F4(x) + W5F5(x)")
# definir les omega
W1 = 0.4
W2 = 0.15
W3 = 0.15
W4 = 0.20
W5 = 0.10
# definir les parametres
F1 = float(input("entrez la valeur de F1"))
F2 = float(input("entrez la valeur de F2"))
F3 = float(input("entrez la valeur de F3"))
F4 = float(input("entrez la valeur de F4"))
F5 = float(input("entrez la valeur de F5"))
#calcul des chemins
Z = W1*F1 + W2*F2 + W3*F3 - W4*F4 + W5*F5
if (F1 <= 1.11) and (F2 <= 26475.67) and (F3 <= 59.75) and (F4 >= 5.64) and (F5 <= 24.46):
    print(" OUI le chemin est Optimal")
else:
    print("Non le chemin ne pas Optimal")
    print("la valeur de Z est égal = ",Z)

```

```

la fonction objectif defini par : Z = W1F1(x) + W2F2(x) + W3F3(x) - W4F
4(x) + W5F5(x)
entrez la valeur de F11.0
entrez la valeur de F225911.66
entrez la valeur de F358.5
entrez la valeur de F46.0
entrez la valeur de F520.2
OUI le chemin est Optimal
la valeur de Z est égal = 3896.744 (chemin 1)
la fonction objectif defini par : Z = W1F1(x) + W2F2(x) + W3F3(x) - W4F
4(x) + W5F5(x)

```

entrez la valeur de F11.0
entrez la valeur de F224997.09
entrez la valeur de F356.4
entrez la valeur de F46.1
entrez la valeur de F524.3
OUI le chemin est Optimal
la valeur de Z est égal = 3759.6335 (**chemin 4**)

la fonction objectif defini par : $Z = W1F1(x) + W2F2(x) + W3F3(x) - W4F4(x) + W5F5(x)$
entrez la valeur de F11.0
entrez la valeur de F227248.94
entrez la valeur de F361.5
entrez la valeur de F45.5
entrez la valeur de F521.4
Non le chemin ne pas Optimal
la valeur de Z est égal = 4098.005999999999 (**chemin 2**)

Perspectives d'avenir et recommandation

Recommandations pour la mise en oeuvre des solutions:

1. Stratégies à court terme

Dans l'immédiat, plusieurs actions peuvent être engagées pour améliorer significativement la fluidité du trafic sans recourir à des travaux lourds d'infrastructure:

- a) L'optimisation des feux de signalisation constitue une priorité.
- b) La gestion des stationnements anarchiques sur les voies de circulation nécessite une intervention urgente. La stricte application des interdictions de stationnement améliorent la capacité résiduelle des artères.
- c) Des unités mobiles seront déployées pour fluidifier les points critiques aux heures de pointe, accompagnées d'une campagne de sensibilisation des conducteurs.
- d) Le développement des transports collectifs peut être accéléré avec des mesures simples,

2. Stratégies à long terme

- a) L'urbanisme doit évoluer pour réduire les besoins de déplacement. [2]
- b) La réussite de ce programme repose sur plusieurs facteurs :
 - une volonté politique soutenue,
 - une coordination efficace entre les différents acteurs, et
- c) La mise en œuvre sera progressive, avec des phases pilotes ajustant les solutions avant leur généralisation.

3. Perspectives d'amélioration continue

- a) L'intégration de technologies avancées comme l'intelligence artificielle anticipera les congestions et ajustera en temps réel la signalisation.
- b) La formation continue des gestionnaires de trafic aux nouvelles méthodes d'optimisation et aux outils numériques garantit une meilleure appropriation des solutions.
- c) Des plateformes permanentes de concertation avec les usagers, les opérateurs de transport et les experts locaux permettent de recueillir des retours d'expérience précieux.

4. Conclusion

La ville de Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo, fait face à une congestion routière chronique qui compromet la mobilité urbaine, la qualité de vie et l'environnement. Cette recherche propose une approche novatrice basée sur la programmation mathématique multicritères pour optimiser la gestion du trafic routier en prenant en compte cinq dimensions interdépendantes : le temps de parcours, la distance du trajet, la sécurité routière, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et le coût économique lié à la consommation du carburant.

En s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse, allant de la collecte de données sur le terrain, modélisation mathématique avancée et outils de simulation, un modèle a été développé pour analyser et évaluer différents scénarios d'optimisation.

Cette recherche démontre que la modélisation dynamique de la gestion des embouteillages à Kinshasa, fondée sur la programmation mathématique multicritère, constitue un outil pertinent pour optimiser simultanément plusieurs dimensions de la mobilité urbaine. L'intégration de ces différents critères confirme la nécessité d'une approche intégrée.

Les résultats démontrent que l'approche multicritères permet de concilier ces différents critères. Cette recherche offre ainsi une base pour l'élaboration de politiques publiques de mobilité durable adaptées aux spécificités urbaines de Kinshasa.

REFERENCES

1. Amani Mushizi Gulain, *Amélioration de la mobilité à l'hyper centre de Kinshasa et stratégies de réduction de la forte centralité*, Institut Supérieur d'architecture et d'urbanisme - Licence 2013, pp. 39.
2. BEAU : « *Schéma national d'aménagement du territoire : villes et infrastructures* », Kinshasa, 2004, p.3.
3. De Saint Moulin Léon, « *Atlas de l'organisation administrative de la RDC* », CEPAS –Kinshasa, 2005, p.18.
4. FATAKI BAZONGA, Jeanot. *Comment résoudre le problème des embouteillages monstres dans la ville de Kinshasa par le truchement du Big Data*. *Revue Global Scientific, Journal, Volume12, Issu7, Juillet 2024*. Pp. 628-643.
5. Hybrechts. A, *Transports et structures de développement au Congo : Etude du progrès économique de 1900 à 1970*, Moutons et Ires, p.8, 1970.
6. KIKOMBA K., *Fondements Mathématiques pour une aide à la décision du réseau de transport aérien. Cas de la République Démocratique du Congo*, édition Africa Vivre, 2018.
7. MUSONGELE KIBANDWA Victor, *Analyse approfondie des congestions routières dans la ville de Kinshasa: causes et pistes de solutions*. *Congo Research Paper, Vol 4, Numéro 3; pp. 14-24. Année ...*
8. NZUZI LELO F, Kinshasa : *Planification et Aménagement*, L'Harmattan, Paris, 381 pages, pp. 229, 2008.
9. Ulungu E. L. and Teghem J.: *Multi-Objective shortest path problem : a survey* in M. cerry et al. (Eds.) *Preceedings of the international Workshop held at Liblice, Czechoslovakia 1991*, pp. 176– 188.
10. ONU (10)
11. Vinck P. : *L'aide multicritère à la décision*, Edition de l'Université de Bruxelles, 1989.
12. Yann Collette & P. Siarry, *Optimisation multiobjectif*, Edition, Eyrolles, Paris, 2002.