

International Journal of
**Technology and
Systems**
(IJTS)

Système De Géolocalisation Des Poubelles Et d'Optimisation Des Tournées De Véhicules Basé Sur l'Internet Des Objets (IoT) et Google Maps : Application à l'Évacuation Des Déchets Dans La Ville Portuaire De Matadi



Système De Géolocalisation Des Poubelles Et d'Optimisation Des Tournées De Véhicules Basé Sur l'Internet Des Objets (IoT) et Google Maps : Application à l'Évacuation Des Déchets Dans La Ville Portuaire De Matadi



Binangu Muanda Jules^{1*}, Ngoie Caleb^{2,3}

¹Institut Supérieur Pédagogique de Matadi, Kongo Central, République Démocratique du Congo

²Centre de recherche sur l'enseignement de la Mathématique, Kinshasa, R.D. Congo.

³Mention de Mathématique, statistique et Informatique, Faculté des Sciences et Technologies, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, République Démocratique du Congo

<https://orcid.org/0009-0001-9042-1508>

Accepted: 19th July, 2026, Received in Revised Form: 7th August, 2026, Published: 11th August, 2026

Résumé

Objectif : Cette étude vise à concevoir un système intelligent de gestion des déchets pour la ville de Matadi, basé sur l'IoT, le GPS, Google Maps et l'optimisation des itinéraires, afin d'améliorer l'efficacité des collectes, réduire les coûts opérationnels et limiter les impacts environnementaux.

Méthodologie : La recherche propose une solution technologique intégrée combinant l'Internet des Objets (IoT) à travers des capteurs installés sur les poubelles pour la collecte des données en temps réel, la technologie GPS pour la localisation précise des conteneurs, Google Maps pour la visualisation et la planification des itinéraires, ainsi que l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACO) pour résoudre le problème d'optimisation des tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem – VRP). Une plateforme de simulation développée en Python a été utilisée afin d'évaluer le système dans des conditions proches de la réalité opérationnelle de Matadi.

Résultats : Les simulations réalisées montrent que le système proposé améliore l'efficacité des tournées de collecte grâce à une meilleure optimisation des trajets, une réduction des distances parcourues par les véhicules, une diminution de la consommation de carburant et des émissions de CO₂, ainsi qu'une meilleure utilisation des ressources et du temps. L'approche intégrée démontre le potentiel des technologies intelligentes pour moderniser la gestion urbaine des déchets.

Recommandations : L'étude recommande l'adoption de solutions intelligentes combinant l'IoT, le GPS, les plateformes cartographiques et les algorithmes d'optimisation dans les systèmes de gestion des déchets, particulièrement dans les villes africaines confrontées à une croissance urbaine rapide. Les futures recherches devraient privilégier des validations sur terrain, des comparaisons avec les systèmes conventionnels de collecte et l'adaptation continue aux contraintes locales telles que les infrastructures limitées et les ressources disponibles.

Mots-clés : Internet des Objets, Géolocalisation, Google Maps, Véhicule, Poubelle, Optimisation, Déchets Urbains, Cité Intelligent.

1. INTRODUCTION

La gestion des déchets urbains constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels sont confrontées les villes du monde entier, en particulier dans les pays en développement. La croissance démographique rapide, combinée à une urbanisation accélérée, entraîne une augmentation significative de la production des déchets solides municipaux. Selon les projections internationales, cette production ne cesse de croître, exerçant ainsi une pression considérable sur les infrastructures urbaines existantes, souvent insuffisantes pour faire face à cette évolution. Dans ce contexte, les systèmes traditionnels de gestion des déchets montrent rapidement leurs limites, notamment en termes d'efficacité, de coût et d'impact environnemental.

Dans les villes africaines, ces difficultés sont davantage accentuées par des contraintes structurelles telles que le manque de ressources financières, l'insuffisance des infrastructures, ainsi que l'absence de technologies adaptées. La ville de Matadi, principal port maritime de la République Démocratique du Congo, n'échappe pas à cette réalité. En raison de sa croissance démographique et de son dynamisme économique, elle connaît une augmentation continue de la production des déchets ménagers. Toutefois, les systèmes de collecte actuellement en place reposent majoritairement sur des tournées fixes, qui ne tiennent pas compte de l'état réel de remplissage des poubelles. Cette approche entraîne des inefficacités notables, telles que des déplacements inutiles, une surconsommation de carburant, ainsi qu'une accumulation de déchets dans certains quartiers.

Dans cette perspective, l'émergence des technologies numériques, notamment l'Internet des Objets (IoT), offre de nouvelles opportunités pour la modernisation des systèmes urbains. L'IoT permet en effet l'interconnexion des objets physiques et la collecte de données en temps réel, ouvrant ainsi la voie à des systèmes intelligents capables de s'adapter dynamiquement aux besoins. Appliqué à la gestion des déchets, ce paradigme permet de surveiller le niveau de remplissage des conteneurs, d'optimiser les opérations de collecte et de réduire les coûts opérationnels.

Ainsi, cette recherche vise non seulement à apporter une contribution scientifique dans le domaine des systèmes intelligents appliqués à la gestion des déchets, mais également à proposer une solution concrète et applicable aux réalités des villes africaines. Elle s'inscrit dans la dynamique des villes intelligentes (smart cities), où l'utilisation des technologies innovantes constitue un levier essentiel pour un développement urbain durable.

La gestion des déchets solides urbains constitue un défi majeur dans les villes africaines en pleine expansion, notamment à Matadi. Malgré l'existence de services de collecte, ceux-ci reposent essentiellement sur des méthodes traditionnelles caractérisées par des tournées fixes et une absence de suivi en temps réel. Cette situation entraîne plusieurs insuffisances, notamment l'accumulation des déchets dans certains quartiers, des déplacements inutiles des véhicules de collecte, une consommation excessive de carburant et une inefficacité globale du système.

Dans ce contexte, l'absence d'un système intelligent capable d'optimiser les tournées en fonction des besoins réels constitue une limite importante. Dès lors, une question centrale se pose :

- Comment améliorer l'efficacité de la gestion des déchets urbains à Matadi grâce à l'utilisation des technologies intelligentes ?
- Comment concevoir un système intelligent permettant d'optimiser la collecte des déchets urbains à Matadi ?

En rapport avec les questions posées nous formulons nos hypothèses de la manière suivante :

L'intégration d'un système intelligent basé sur l'IoT, la géolocalisation et l'algorithme ACO permet d'améliorer significativement l'efficacité de la collecte des déchets à Matadi.

L'utilisation de capteurs connectés permet un suivi en temps réel du remplissage des poubelles et réduit les collectes inutiles. L'optimisation des tournées via l'algorithme ACO diminue les distances parcourues et la consommation de carburant.

L'objectif de cette étude est de :

- Mettre en place un système intelligent de gestion des déchets urbains à Matadi.
- Concevoir une architecture IoT pour la surveillance des poubelles
- Développer un modèle d'optimisation des tournées
- Simuler le système avec Python
- Évaluer les performances du système proposé.

L'étude adopte une approche quantitative et algorithmique, basée sur la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire, assimilé au problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problème – VRP*).

Cette approche consiste à :

- Modéliser les poubelles comme des points géographiques à desservir ;
- Intégrer des contraintes (distance, capacité des véhicules, niveau de remplissage) ;
- Appliquer un algorithme d'optimisation pour déterminer les meilleurs itinéraires.

Les techniques utilisées sont les suivantes :

a) Internet des Objets (IoT)

L'IoT est utilisé pour collecter des données en temps réel à partir de capteurs installés dans les poubelles. Ces capteurs mesurent le niveau de remplissage et transmettent les informations à une plateforme centrale.

b) Géolocalisation GPS

La technologie GPS permet de déterminer la position exacte des poubelles et des véhicules de collecte.

c) Google Maps

Google Maps est utilisé pour : visualiser les emplacements géographiques ; calculer les distances entre les points ; faciliter la planification des trajets.

d) Algorithme des colonies de fourmis (ACO)

L'algorithme ACO est une technique d'optimisation inspirée du comportement des fourmis dans la recherche de nourriture.

e) Simulation sous Python

Le système proposé est implémenté et testé à l'aide du langage Python.

Les données utilisées dans l'étude proviennent :

- des coordonnées géographiques simulées des poubelles ;
- des niveaux de remplissage générés par les capteurs ;
- des distances calculées via Google Maps.

L'analyse des données repose sur :

- la comparaison des distances parcourues ;
- l'évaluation du temps de collecte ;
- l'estimation de la consommation de carburant ;
- la mesure des émissions de CO₂.

1.2 Revue de la littérature

A. Gestion traditionnelle des déchets urbains

La gestion des déchets solides urbains constitue un enjeu majeur dans les villes en développement, caractérisées par une croissance démographique rapide et une urbanisation non planifiée. Dans de nombreuses villes africaines, dont Matadi, les systèmes de collecte reposent essentiellement sur des méthodes traditionnelles basées sur des tournées fixes et des interventions programmées indépendamment du niveau réel de remplissage des poubelles.

Ces approches présentent plusieurs limites importantes. D'une part, elles entraînent des collectes inutiles lorsque les bacs ne sont pas pleins, et d'autre part, elles provoquent une accumulation des déchets dans les zones fortement peuplées lorsque les tournées sont insuffisantes. Par conséquent, ces systèmes manquent d'efficacité, augmentent les coûts opérationnels et contribuent à la dégradation de l'environnement urbain.

Ainsi, la littérature souligne que les méthodes classiques de gestion des déchets ne répondent plus aux exigences des villes modernes, ce qui justifie la recherche de solutions innovantes et intelligentes.

B. Apport de l'Internet des Objets (IoT) dans la gestion des déchets

L'Internet des Objets (IoT) est aujourd'hui considéré comme une technologie clé dans la transformation des villes en « smart cities ». Il permet l'interconnexion d'objets physiques via des capteurs capables de collecter et transmettre des données en temps réel.

Dans le domaine de la gestion des déchets, l'IoT est principalement utilisé pour :

- Surveiller le niveau de remplissage des poubelles,
- Transmettre les données vers un système central,
- Déclencher des collectes uniquement lorsque cela est nécessaire.

Selon les travaux existants, l'utilisation de capteurs intelligents permet de réduire significativement les coûts de collecte, d'améliorer la qualité du service et de limiter les impacts environnementaux. Ces systèmes reposent généralement sur des capteurs à ultrasons, des modules de communication (GSM, Wi-Fi) et des plateformes de traitement de données.

Cependant, malgré ces avancées, l'IoT seul ne suffit pas à optimiser la gestion des déchets. Il doit être combiné avec des techniques d'optimisation pour exploiter efficacement les données collectées.

C. Optimisation des tournées de collecte

L'optimisation des tournées de collecte des déchets s'inscrit dans le cadre du problème classique du Vehicle Routing Problem (VRP), qui consiste à déterminer les itinéraires les plus efficaces pour un ensemble de véhicules desservant plusieurs points.

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème, notamment :

- Les algorithmes exacts (programmation linéaire),
- Les heuristiques,
- Les métaheuristiques.

Parmi ces approches, les métaheuristiques sont particulièrement adaptées aux problèmes complexes et de grande taille.

D. Algorithme des colonies de fourmis (ACO)

L'algorithme des colonies de fourmis (Ant Colony Optimization – ACO) est une métaheuristique inspirée du comportement des fourmis dans la recherche de nourriture. Ces insectes sont capables de trouver le chemin le plus court entre leur colonie et une source de nourriture grâce à un mécanisme de dépôt de phéromones.

Dans le contexte de la gestion des déchets, l'ACO est utilisé pour :

- Optimiser les itinéraires des véhicules de collecte,
- Minimiser les distances parcourues,
- Réduire le temps de collecte et la consommation de carburant.

La littérature montre que l'ACO est particulièrement efficace pour résoudre les problèmes de routage dynamique, notamment lorsque les données (comme le niveau de remplissage des poubelles) varient en temps réel.

D. Intégration des systèmes intelligents (IoT + ACO + SIG)

Les recherches récentes mettent en évidence l'intérêt d'intégrer plusieurs technologies pour améliorer la gestion des déchets :

- IoT pour la collecte des données,
- Algorithmes d'optimisation (ACO) pour le calcul des itinéraires,
- Systèmes d'information géographique (SIG) comme Google Maps pour la visualisation et la navigation.

Cette combinaison permet de développer des systèmes intelligents capables de :

- Adapter les tournées en temps réel,
- Améliorer la prise de décision,
- Offrir une meilleure traçabilité des opérations.

Toutefois, la majorité des études existantes se concentrent sur des contextes urbains développés, ce qui limite leur applicabilité directe dans des villes comme Matadi.

E. Limites des travaux existants

Malgré les avancées significatives dans ce domaine, plusieurs limites persistent :

- Manque d'adaptation aux réalités locales (infrastructures, ressources limitées),
- Coût élevé de déploiement des systèmes IoT,
- Faible intégration entre les différentes technologies,
- Absence de solutions spécifiques aux villes africaines.

Ces lacunes montrent la nécessité de développer des solutions adaptées au contexte local, en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales.

F. Positionnement de l'étude

Face à ces constats, la présente étude se positionne dans une approche innovante visant à :

- Intégrer l'IoT pour la collecte de données en temps réel,
- Utiliser l'algorithme ACO pour optimiser les tournées,
- Exploiter Google Maps pour la visualisation des itinéraires.

Elle vise ainsi à proposer une solution intelligente, adaptée à la ville de Matadi, permettant d'améliorer l'efficacité de la gestion des déchets urbains tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Présentation de la zone d'étude : Matadi

L'étude a été réalisée dans la ville de Matadi, chef-lieu de la province du Kongo Central en République Démocratique du Congo. Située sur la rive gauche du fleuve Congo, à environ 350 km de Kinshasa, Matadi constitue le principal port maritime du pays et un important centre économique et commercial. La ville connaît depuis plusieurs années une croissance démographique soutenue, accompagnée d'une augmentation progressive de la production des déchets ménagers et commerciaux.

L'expansion urbaine, la densification de certains quartiers et l'insuffisance des infrastructures de gestion des déchets rendent particulièrement complexe l'organisation des opérations de collecte. Les difficultés liées à l'accessibilité de certains quartiers, à l'état des infrastructures routières et à l'irrégularité des tournées de ramassage contribuent à l'accumulation des déchets dans plusieurs zones de la ville.

Le choix de Matadi comme zone d'étude se justifie par son importance économique, son caractère portuaire et la nécessité de proposer des solutions technologiques innovantes adaptées au contexte des villes africaines en développement (Kaza et al., 2018 ; World Health Organization, 2018).



Figure 1. Situation géographique de la ville de Matadi dans la province du Kongo Central.

Légende : Cette figure présente une vue aérienne du port de Matadi sur le fleuve Congo, montrant les infrastructures portuaires, les zones de stockage de conteneurs et l'urbanisation environnante.

2.2 Architecture du système IoT proposé

Le système intelligent proposé repose sur une architecture intégrée combinant les technologies de l'Internet des Objets (IoT), la géolocalisation GPS, les services cartographiques de Google Maps et les algorithmes d'optimisation des tournées.

L'architecture comprend quatre principaux modules :

- Les poubelles intelligentes équipées de capteurs de niveau ;
- Le système de géolocalisation GPS ;
- La plateforme centrale de traitement et de stockage des données ;
- Le module d'optimisation des tournées basé sur l'algorithme ACO.

Chaque poubelle intelligente est dotée d'un capteur permettant de mesurer son niveau de remplissage. Les informations collectées sont associées aux coordonnées géographiques obtenues grâce au système GPS, puis transmises vers une plateforme centrale chargée d'analyser les données et de planifier les opérations de collecte.

Cette approche s'inscrit dans le cadre des villes intelligentes où les objets connectés permettent de surveiller et de gérer les infrastructures urbaines en temps réel (Atzori et al., 2010 ; Zanella et al., 2014).

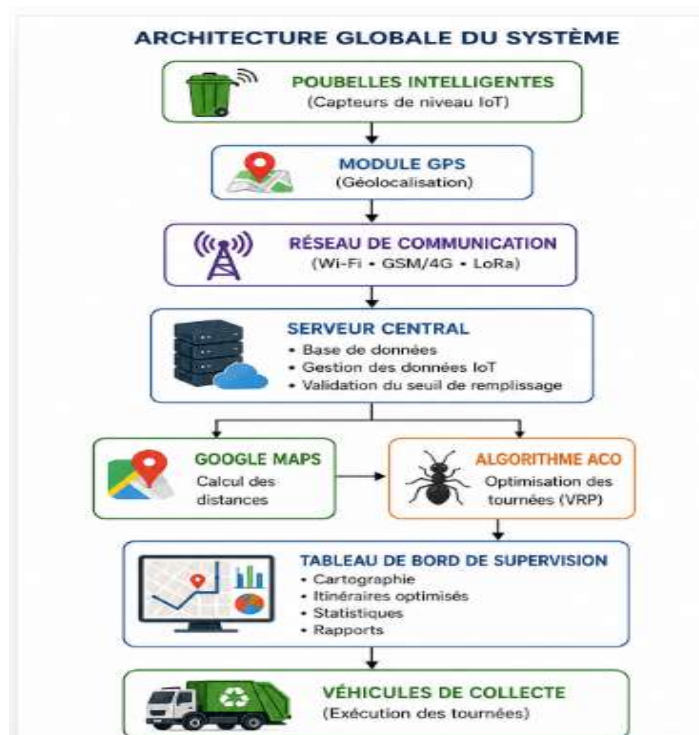


Figure 2. Architecture globale du système intelligent de collecte des déchets basé sur l'IoT.

2.3 Géolocalisation des poubelles et intégration de Google Maps

La géolocalisation constitue une composante essentielle du système proposé. Chaque poubelle intelligente est identifiée par un ensemble de coordonnées géographiques (latitude, longitude) permettant de la localiser avec précision sur le réseau routier de la ville de Matadi.

Les données géographiques sont intégrées à Google Maps afin de :

- Visualiser la position des poubelles ;

- Calculer les distances entre les différents points de collecte ;
- Identifier les itinéraires routiers disponibles ;
- Faciliter la prise de décision lors de la planification des tournées.

L'utilisation des systèmes de cartographie numérique améliore considérablement la précision des opérations de collecte et permet une meilleure représentation spatiale des infrastructures urbaines (Longhi et al., 2012).

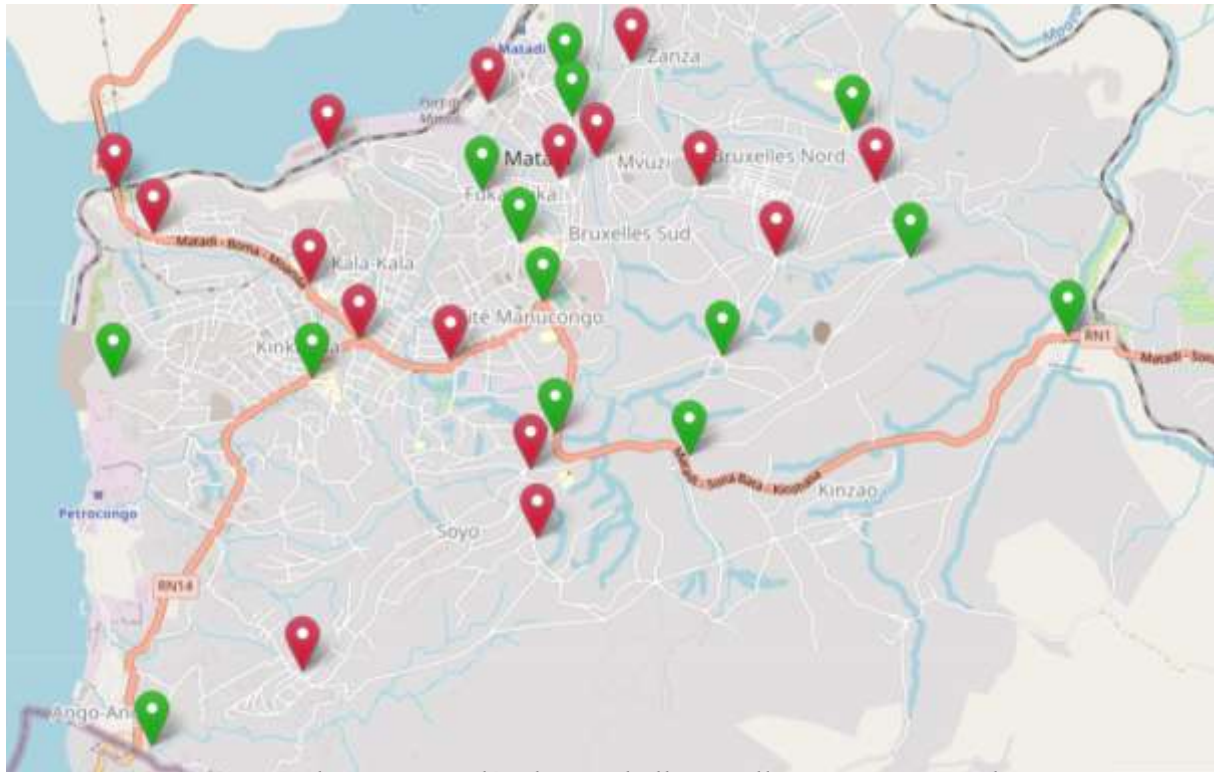


Figure 3. Localisation simulée des poubelles intelligentes sur Google Maps.

Légende : Carte de la ville de Matadi montrant la répartition spatiale des poubelles intelligentes et leur positionnement sur le réseau routier.

2.4 Modélisation mathématique du Vehicle Routing Problem (VRP)

L'optimisation des tournées de collecte est modélisée sous la forme d'un problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem – VRP), introduit par Dantzig et Ramser (1959) et largement utilisé dans les problèmes de logistique urbaine (Toth & Vigo, 2014).

L'objectif consiste à déterminer les itinéraires permettant de minimiser la distance totale parcourue par les véhicules tout en assurant la collecte de l'ensemble des poubelles sélectionnées.

La fonction objective est définie par :

$$\text{Min } z = \sum_{(i,j) \in A} [d_{ij} X_{ij}] \quad (2.1)$$

Où :

- (d_{ij}) représente la distance entre les nœuds i et j ;
- (X_{ij}) est une variable binaire indiquant le déplacement entre ces deux nœuds.

Cette modélisation permet de réduire les coûts opérationnels et d'améliorer l'efficacité globale du système de collecte.

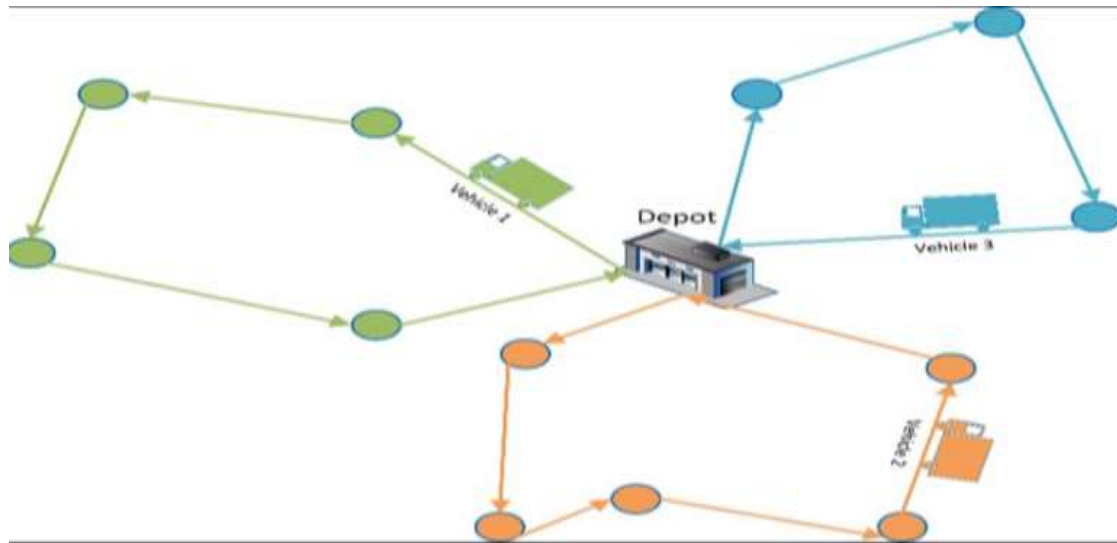


Figure 4. Représentation graphique du problème de tournées de véhicules (VRP).

Légende : Réseau de nœuds représentant le dépôt central et les différentes poubelles géolocalisées desservies par plusieurs véhicules de collecte.

2.5 Algorithme Ant Colony Optimization (ACO)

La résolution du problème d'optimisation est réalisée à l'aide de l'algorithme Ant Colony Optimization (ACO), proposé par Dorigo et Stützle (2004). Cet algorithme s'inspire du comportement collectif des fourmis naturelles qui parviennent à identifier les chemins les plus courts entre leur nid et les sources de nourriture grâce au dépôt de phéromones.

La probabilité de déplacement d'une fourmi est donnée par :

$$P_{ij} = \frac{(\tau_{ij})^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{ij} (\tau_{ij})^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta} \quad (2.16)$$

- où : τ_{ij} : représente la quantité de phéromones ;
- η_{ij} : désigne la visibilité ou l'inverse de la distance ($\frac{1}{d_{ij}}$);
- α : paramètres de pondération des phéromones
- β : paramètres de pondération de la distance

Grâce à un processus itératif de recherche et de renforcement des meilleures solutions, l'algorithme converge progressivement vers des itinéraires de collecte plus performants.

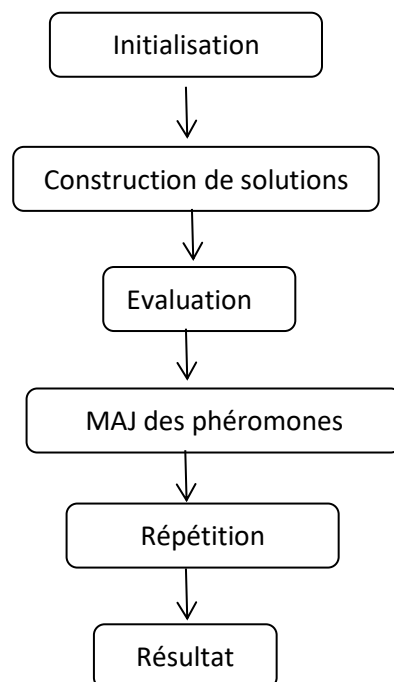


Figure 6. Organigramme de l'algorithme Ant Colony Optimization (ACO). Source : Nous-même à partir des informations exploitées

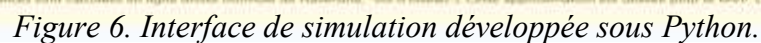
2.6. Paramètres de simulation sous Python

Compte tenu des contraintes financières liées à l'acquisition de capteurs réels et à l'implantation immédiate d'un réseau IoT opérationnel, une plateforme de simulation a été développée sous Python. La simulation repose les paramètres et valeur indiquée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres et valeur de la simulation ACO

Paramètre	Valeur
Nombre de fourmis (poubelles intelligentes)	30
Un dépôt central	1
Nombre d'itérations	50
Niveau de remplissage ou seuil	80%
Alpha	1
Beta	2
Taux d'évaporation	0.5

L'environnement de simulation permet de reproduire des conditions proches de la réalité et d'évaluer la performance du système proposé avant son déploiement réel.



Légende : Interface graphique présentant la localisation des poubelles, les itinéraires optimisés et les indicateurs de performance.

2.7. Indicateurs de performance

L'évaluation du système repose sur plusieurs indicateurs de performance couramment utilisés dans les travaux portant sur la logistique urbaine et la gestion intelligente des déchets (Faccio et al., 2011 ; Anagnostopoulos et al., 2017) :

- Distance totale parcourue ;
- Temps moyen de collecte ;
- Consommation de carburant ;
- Émissions de dioxyde de carbone (CO₂) ;
- Taux de remplissage des véhicules ;
- Coût global des opérations de collecte.

3. RÉSULTATS

3.1 Géolocalisation des poubelles intelligentes

La simulation réalisée dans le cadre de cette étude a permis de géolocaliser trente (30) poubelles intelligentes réparties dans différents quartiers de la ville de Matadi, ainsi qu'un dépôt central servant de point de départ et de retour des véhicules de collecte. Les coordonnées géographiques des poubelles ont été générées de manière à reproduire la configuration spatiale réelle du réseau routier de Matadi et la répartition des principales zones de production des déchets.

La cartographie obtenue met en évidence une distribution non homogène des points de collecte. Certaines zones présentent une forte concentration de poubelles en raison de leur densité démographique et de l'intensité de leurs activités économiques, tandis que d'autres secteurs sont plus faiblement équipés. Cette variabilité spatiale justifie la nécessité de recourir à des méthodes de collecte dynamiques et intelligentes capables de s'adapter aux réalités du terrain.

L'intégration des données de géolocalisation dans Google Maps a permis d'obtenir une représentation visuelle précise des infrastructures de collecte et de faciliter l'identification des trajets potentiels entre les différents points de collecte. Ces résultats confirment l'intérêt de la géolocalisation dans les systèmes de gestion intelligente des déchets, comme l'ont également démontré Longhi et al. (2012) et Zanella et al. (2014).

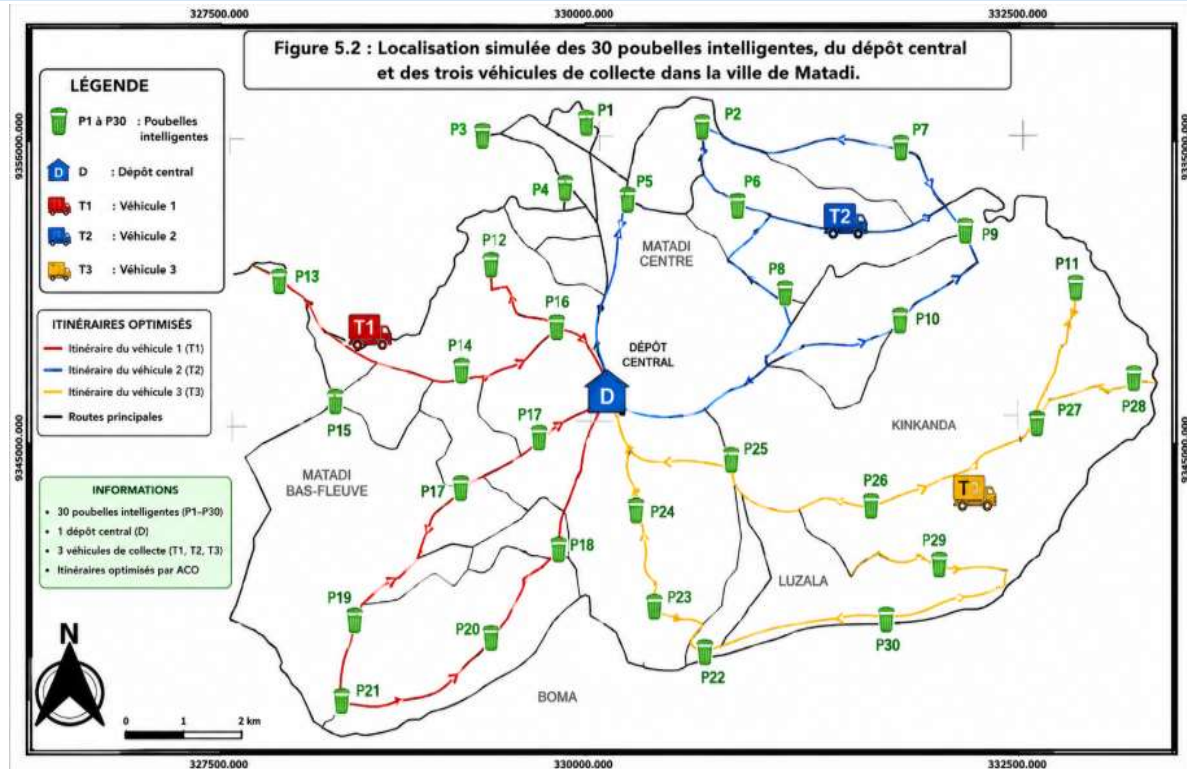


Figure 8. Répartition géographique des 30 poubelles intelligentes et du dépôt central dans la ville de Matadi.

Légende : Carte simulée illustrant la position géographique des poubelles intelligentes et du dépôt central sur le réseau routier de la ville de Matadi.

3.2 Génération des itinéraires optimisés

Après l'acquisition des données géographiques et des niveaux de remplissage des poubelles, l'algorithme Ant Colony Optimization (ACO) a été appliqué afin de déterminer les itinéraires de collecte les plus performants.

Les résultats montrent que l'algorithme est capable d'identifier des circuits optimisés minimisant les distances parcourues tout en assurant la desserte de l'ensemble des points de collecte. Au cours des différentes itérations, les phéromones déposées par les agents virtuels ont progressivement favorisé les chemins les plus courts et les plus efficaces, conduisant à une convergence vers des solutions de haute qualité.

Les itinéraires générés présentent une meilleure répartition des tâches entre les véhicules de collecte et limitent les déplacements inutiles. Ces observations sont conformes aux travaux de Dorigo et Stützle (2004) ainsi qu'à ceux de Toth et Vigo (2014), qui ont montré l'efficacité des métaheuristiques de type ACO dans la résolution des problèmes de tournées de véhicules.



Figure 9. Itinéraires optimisés générés par l'algorithme ACO.

Légende : Représentation des tournées optimisées reliant le dépôt central aux différentes poubelles intelligentes.

3.3 Réduction des distances parcourues

L'un des principaux objectifs du système proposé est la réduction des distances parcourues par les véhicules de collecte. Les simulations effectuées montrent que les tournées optimisées obtenues grâce à l'algorithme ACO permettent de diminuer significativement les trajets par rapport aux méthodes de collecte traditionnelles basées sur des itinéraires fixes.

La diminution des distances parcourues s'explique par la prise en compte simultanée de la localisation des poubelles, de leur niveau de remplissage et des caractéristiques du réseau routier. En éliminant les déplacements vers des poubelles peu remplies ou éloignées, le système améliore l'utilisation des ressources disponibles.

Les simulations indiquent une réduction de la distance totale de **118 km à 83 km**, soit un gain de **35 km (29,7 %)**.

Ces résultats corroborent les conclusions de Faccio et al. (2011), selon lesquelles l'optimisation dynamique des tournées constitue un levier important de réduction des coûts logistiques.

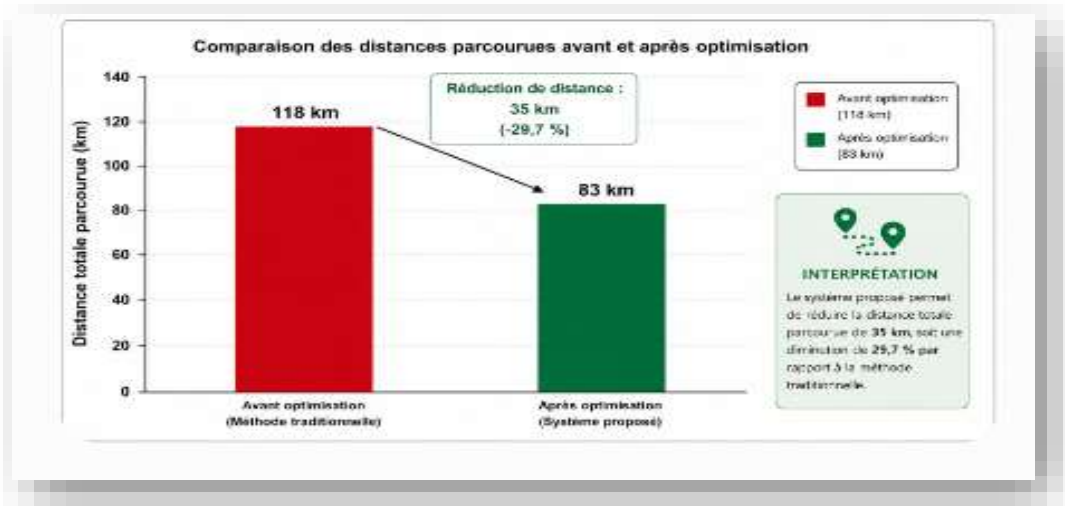


Figure 10. Comparaison des distances parcourues avant et après optimisation.

Légende : Histogramme comparant les distances totales parcourues par les véhicules de collecte avant et après l'application de l'algorithme ACO.

3.4 Réduction de la consommation de carburant

La réduction des distances parcourues se traduit directement par une diminution de la consommation de carburant. Les simulations montrent que les itinéraires optimisés nécessitent moins de déplacements, ce qui entraîne une baisse des besoins énergétiques des véhicules de collecte. En moyenne, la consommation passe de **39,2 litres** à **28,1 litres**, soit une économie d'environ **28 %**.

Cette économie de carburant représente un avantage économique important pour les collectivités locales, particulièrement dans les pays en développement où les coûts d'exploitation des services de collecte constituent une contrainte majeure.

Par ailleurs, la diminution de la consommation énergétique contribue à améliorer la durabilité environnementale des systèmes de gestion des déchets, conformément aux principes de développement des villes intelligentes (Zanella et al., 2014).

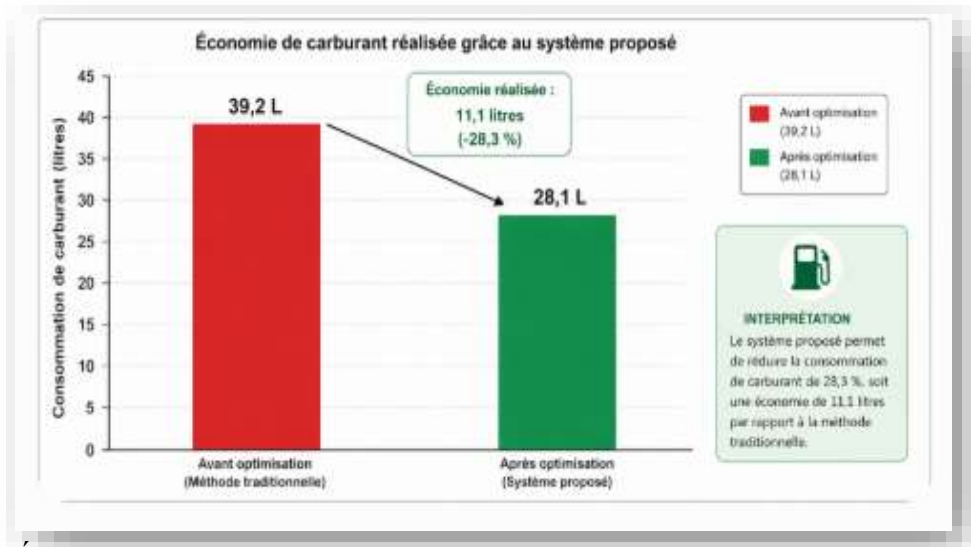


Figure 11. Économie de carburant réalisée grâce au système proposé.

Légende : Comparaison de la consommation de carburant avant et après l'optimisation des tournées.

3.5 Réduction des émissions de CO₂

La baisse de la consommation de carburant engendre également une réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Les simulations réalisées montrent que l'optimisation des tournées contribue à diminuer l'empreinte environnementale des opérations de collecte.

Cette réduction constitue un enjeu majeur dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique et de promotion des politiques de développement durable. En limitant les déplacements inutiles des véhicules, le système proposé participe à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à l'amélioration de la qualité de l'environnement urbain.

Les émissions ont été estimées à partir des facteurs d'émission généralement utilisés pour les véhicules diesel. Les résultats montrent une réduction des émissions de **104 kg à 74 kg de CO₂**, soit une diminution d'environ **29 %**.

Ces résultats mettent en évidence la contribution potentielle du système proposé à une gestion plus durable des déchets urbains, conformément aux objectifs de développement des villes intelligentes (Zanella et al., 2014).

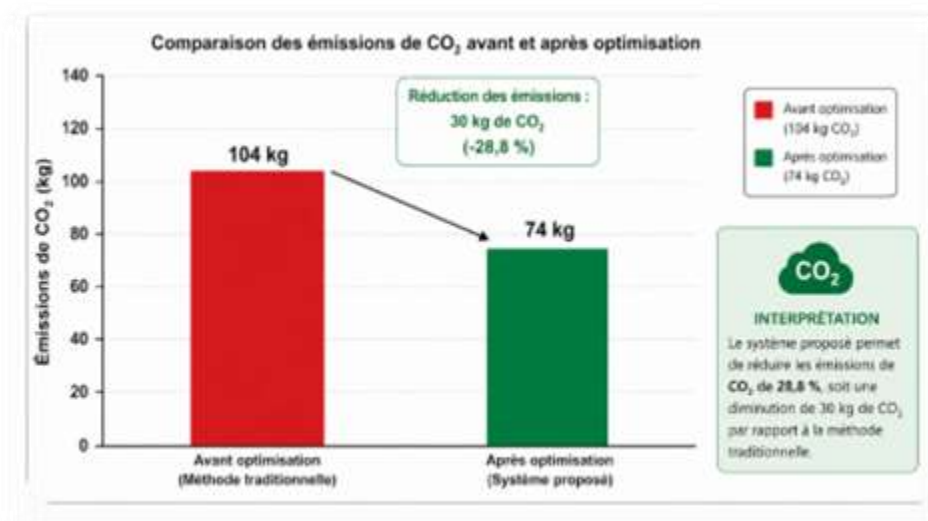


Figure 12. Comparaison des émissions de CO₂ avant et après optimisation.

Légende : Évolution estimée des émissions de CO₂ avant et après l'application du système d'optimisation proposé.

3.6 Temps moyen de collecte

L'optimisation des itinéraires a également permis de réduire le temps global consacré aux opérations de collecte. Avant optimisation, les tournées nécessitaient en moyenne 5 heures 15 minutes. Après application de l'algorithme ACO, ce temps est ramené à 3 heures 55 minutes, soit un gain d'environ 1 heure 20 minutes (25 %).

Cette amélioration permet une meilleure utilisation des véhicules et du personnel, tout en augmentant la fréquence potentielle des collectes.

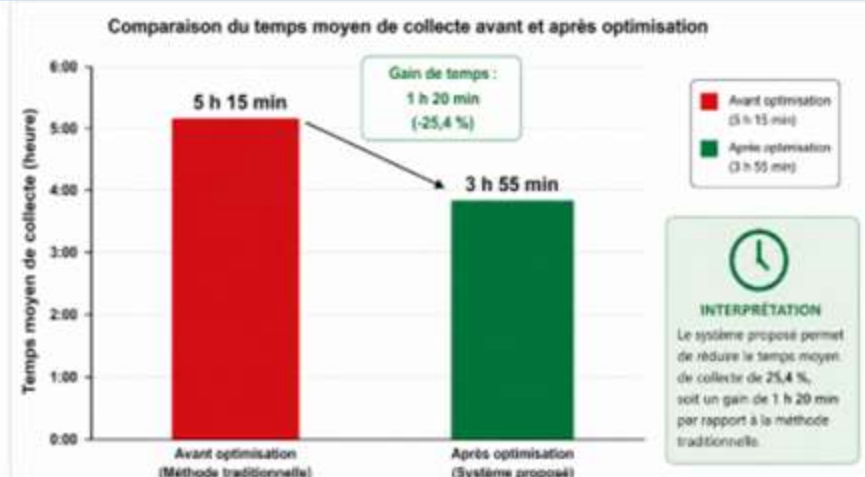


Figure 13. Comparaison du temps moyen de collecte avant et après optimisation.

Légende : Comparaison des durées moyennes de collecte obtenues avec les méthodes traditionnelles et avec le système intelligent proposé.

3.7 Synthèse des performances

L'ensemble des résultats montre que la combinaison des technologies IoT, Google Maps, du Vehicle Routing Problem (VRP) et de l'algorithme Ant Colony Optimization améliore sensiblement les performances des opérations de collecte des déchets à Matadi. Les gains obtenus concernent aussi bien les dimensions logistiques, économiques qu'environnementales. Bien que les expérimentations aient été réalisées dans un environnement simulé, elles démontrent le potentiel de cette approche pour accompagner la modernisation des services d'assainissement urbain.

Tableau 2: Comparaison les performances obtenues avant optimisation et après optimisation.

Indicateurs	Avant optimisation	Après optimisation ACO	Gain obtenu
Nombre de poubelles	30	30	100%
Distance totale parcourue	118 km	83 km	29,7%
Consommation de carburant	39,65 L	8,37 L	28,3%
Émissions de CO ₂	104 kg	74 kg	28,8%
Temps estimé de collecte (minutes)	5h 15 minutes	3h55 minutes	25,4%
Camions utilisés	3	3	100%

4. DISCUSSION

4.1 Analyse des performances obtenues

Les résultats obtenus démontrent que l'intégration de L'Internet des Objets, la géolocalisation GPS et l'algorithme ACO facilitent une meilleure efficacité des opérations de ramassage des déchets. L'optimisation des tournées a permis de réduire les distances parcourues, la consommation de carburant, les émissions de CO₂ ainsi que le temps de ramassage.

Ces améliorations sont principalement dues à une prise de décision fondée sur des données géographiques et des informations en temps réel sur le niveau de remplissage des poubelles.

4.2 Comparaison avec les études antérieures

Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux obtenus par Longhi et al. (2012), Faccio et al. (2011) et Anagnostopoulos et al. (2017), qui ont montré que les systèmes intelligents de gestion des déchets permettent d'améliorer considérablement les performances opérationnelles et environnementales des services de collecte. Toutefois, la présente recherche se distingue par son application au contexte spécifique de la ville de Matadi, où peu de travaux scientifiques ont été consacrés à l'utilisation des technologies intelligentes dans la gestion des déchets urbains.

4.3 Apports scientifiques de l'étude

Cette recherche apporte plusieurs contributions scientifiques : une architecture intégrée combinant l'IoT, le GPS, Google Maps et l'algorithme ACO ; une modélisation du problème de collecte adaptée au contexte urbain de Matadi ; une plateforme de simulation sous Python permettant de reproduire des conditions proches de la réalité ; une évaluation quantitative des gains économiques et environnementaux obtenus grâce à l'optimisation des tournées.

4.4 Limites de la recherche

Malgré les résultats encourageants obtenus, certaines limites doivent être soulignées. L'étude repose sur des données simulées et ne prend pas encore en compte certains facteurs réels tels que : la congestion routière ; les conditions météorologiques ; les pannes de véhicules ; les variations journalières de la production des déchets ; les contraintes budgétaires des collectivités locales. Ces éléments pourraient influencer les performances observées lors d'un déploiement réel.

4.5 Perspectives de déploiement réel à Matadi

À moyen terme, le système proposé pourrait être déployé dans la ville de Matadi à travers l'installation de poubelles intelligentes équipées de capteurs de niveau, de modules GPS et de dispositifs de communication sans fil. L'intégration des données en temps réel avec Google Maps et un centre de supervision municipal permettrait de suivre en permanence l'état des infrastructures de collecte et de générer automatiquement les tournées optimisées. Une telle approche contribuerait à moderniser la gestion des déchets urbains, à réduire les coûts d'exploitation et à améliorer les conditions sanitaires et environnementales de la population.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette recherche a permis de développer un système intelligent de géolocalisation et d'optimisation des tournées de collecte des déchets fondé sur l'Internet des Objets, la géolocalisation GPS, Google Maps et l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis. Les résultats montrent que l'intégration de ces technologies améliore de façon significative l'efficacité des opérations de collecte, réduit les coûts de transport et diminue les impacts environnementaux.

Même si les données utilisées sont simulées, cette étude constitue une preuve de concept solide qui peut servir de base à un déploiement réel à Matadi et dans d'autres villes africaines confrontées aux mêmes problèmes de gestion des déchets.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anagnostopoulos, T. et al. (2017). Collecte prédictive des déchets à l'aide de l'IoT et de l'apprentissage automatique. Gestion des déchets.
- Atzori , L., Iera, A., et Morabito, G. (2010). L'Internet des objets : une étude. Réseaux informatiques.
- Dorigo, M., & Stützle , T. (2004). Optimisation par colonies de fourmis. MIT Press.
- Faccio, M., Persona, A., et Zanin, G. (2011). Modèle multi-objectifs de collecte des déchets avec données de traçabilité en temps réel. Gestion des déchets.
- Kaza, S. et al. (2018). Quel gaspillage 2.0. Banque mondiale.
- Longhi, S. et al. (2012). Architecture de gestion des déchets solides utilisant la technologie des réseaux de capteurs sans fil. International Journal of Communication Systems .
- Organisation mondiale de la santé (2018). Directives sur l'assainissement et la santé.
- Toth, P., et Vigo, D. (2014). Véhicule Routage : Problèmes, méthodes et applications. SIAM.
- Zanella, A. et al. (2014). Internet des objets pour les villes intelligentes. IEEE Internet of Things Journal.



2026 by the Authors. This Article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)