



Département Génie Logistique et Transport

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

D'INGENIEUR d'État

-Filière-

Ingénierie des transports

-Spécialité -

Ingénierie des transports

- Thème -

Ingénierie d'une solution de car-sharing peer-to-peer en contexte algérien :

Architecture numérique et validation empirique d'une plateforme de mobilité partagée

Réalisé par

LATRECH Fatma Zohra

Membres de Jury :

BENAISSA Mohamed Lazhar

TALBI Tayeb

BOUGHALEB Sadek el Amine

MCB ENSTA

MAA ENSTA

MAA ENSTA

Président

Examinateur

Encadrant

Alger, le 17/06/2025

Année universitaire 2024-2025

Table des matières

I.	Introduction générale.....	4
II.	Revue de la littérature : Plateformes numériques de partage de véhicules entre particuliers - Fondements scientifiques pour l'ingénierie des transports	6
1.	Introduction.....	6
2.	Partie 1 – Cadre théorique du transport partagé.....	7
1)	Définitions et taxonomie des systèmes de transport partagé	7
2)	Problématiques scientifiques centrales	7
3)	Métriques et indicateurs de performance.....	8
3.	Partie 2 – Plateformes numériques et ingénierie des systèmes de transport	9
1)	Architectures numériques et intégration systémique	9
2)	Protocoles de réservation et gestion des transactions	10
3)	Cybersécurité et protection des données.....	10
4)	Optimisation de la disponibilité et gestion prédictive.....	11
4.	Partie 3 – Cas des pays émergents et du contexte algérien	11
1)	Contraintes spécifiques des contextes émergents	11
2)	Déficits des systèmes de transport public	12
3)	Opportunités du numérique comme levier d'amélioration.....	12
4)	Comportements des usagers et acceptabilité sociale	13
5)	Réglementation et cadres institutionnels	13
5.	Partie 4 – Verrous scientifiques et limites de la recherche actuelle	14
1)	Zones peu explorées dans la littérature	14
2)	Controverses scientifiques sur les impacts environnementaux.....	14
3)	Inadéquation des modèles aux contextes africains et MENA.....	15
4)	Déficit d'études empiriques contextualisées	16
5)	Limites méthodologiques et besoins de recherche	16
6.	Conclusion	17
III.	Partie pratique d'un rapport PFE : Développement d'une plateforme numérique de partage de véhicules entre particuliers - Cas d'étude Wheelsy	19
1.	Introduction de la partie pratique.....	19
2.	Présentation détaillée de la solution développée.....	20
1)	Analyse de la problématique identifiée	20
2)	Architecture technique de la solution	20

3)	Fonctions principales et flux de données.....	21
4)	Modèle de réservation et gestion des transactions.....	21
3.	Méthodologie de conception et de validation	22
1)	Approche de conception centrée utilisateur.....	22
2)	Outils techniques et technologies employées	22
3)	Contraintes identifiées et solutions développées	23
4.	Analyse critique et ancrage dans la littérature	23
1)	Validation des choix techniques par rapport aux références scientifiques	23
2)	Extensions et contributions aux modèles existants.....	24
3)	Limites du système proposé.....	24
5.	Résultats, retours d'expérience et projections	25
1)	Indicateurs de performance attendus (KPIs).....	25
2)	Simulation de déploiement dans le contexte algérien.....	25
3)	Projections d'impact environnemental et social.....	26
6.	Conclusion de la partie pratique	26
IV.	Conclusion générale.....	28
1.	Bilan des apports théoriques	28
2.	Contribution pratique de Wheelsy	28
3.	Pertinence au regard des enjeux de mobilité urbaine.....	28
4.	Limites identifiées	29
5.	Pistes d'amélioration et d'approfondissement	29
6.	Conclusion synthétique.....	30
V.	Références Bibliographique	31
VI.	Résumé	37

I. Introduction générale

Les grandes métropoles connaissent une croissance spatiale et démographique rapide, alimentée par l'urbanisation et l'augmentation continue des besoins de déplacement. Cette expansion s'accompagne de phénomènes de congestion, d'élévation des émissions de polluants et de pressions foncières accrues. Les technologies numériques – géolocalisation, réseaux cellulaires, systèmes embarqués – offrent à présent de nouveaux leviers pour observer, comprendre et gouverner ces flux. Les études de modélisation s'appuyant sur des données massives (GPS, téléphonie, capteurs routiers) révèlent une répartition spatio-temporelle des flux de circulation de plus en plus hétérogène, marquée par des pics fortement localisés et difficilement maîtrisables par les solutions traditionnelles.

Dans ce contexte, la « mobilité partagée » s'impose comme une réponse privilégiée pour maximiser le taux d'usage des ressources existantes, lisser la demande et réduire la pression automobile. Les plateformes de **carsharing peer-to-peer (P2P)** permettent aux propriétaires de véhicules de les louer ponctuellement ; elles s'inscrivent dans une logique de décarbonation, de désengorgement et d'optimisation logistique, à condition d'être techniquement robustes et socialement acceptées.

Les études récentes montrent que les systèmes P2P, lorsqu'ils atteignent une masse critique, conduisent à un **taux de substitution de l'ordre de 4 à 5 véhicules privés pour un véhicule partagé**. Les impacts attendus incluent :

- réduction des VKT (Vehicle-Kilometres Travelled) lorsque l'offre se combine à d'autres modes structurants ;
- diminution des émissions locales de CO₂, NO_x et particules fines, à hauteur de 15% à 25% selon les scénarios de pénétration ;
- amélioration de l'accessibilité pour les ménages non motorisés, à condition que la couverture territoriale et les tarifs restent inclusifs.

Les métropoles des pays émergents cumulent des infrastructures routières sous-dimensionnées, un parc automobile en croissance rapide et une offre de transport collectif insuffisante. En Algérie, **4,2 millions de véhicules** coexistent avec des réseaux de transport public fragmentés 17. Les mesures de temps de parcours en heure de pointe révèlent des **durées moyennes >60 min à Alger**, +30–40% à Oran et +25% à Constantine. Les déficits d'intégration intermodale et les contraintes

économiques limitent l'adoption du covoiturage organisé ou des agences traditionnelles de location. Parallèlement, l'usage du smartphone se généralise : **>20 millions d'utilisateurs** en 2023 17, créant les conditions techniques pour des services mobiles de transport à la demande.

Le présent PFE s'intéresse à **Wheelsy**, application mobile native (iOS/Android) conçue pour faciliter la location de véhicules entre particuliers dans un environnement à connectivité parfois irrégulière. Les innovations clés comprennent 17 :

- **vérification d'identité automatisée** (IA, reconnaissance faciale) garantissant la fiabilité des profils ;
- **géolocalisation en temps réel** des véhicules disponibles sur carte interactive, avec algorithmes d'appariement optimisés ;
- **système de réputation bidirectionnelle** renforçant la confiance et limitant les risques transactionnels ;
- **architecture distribuée** et fonctionnement offline partiel (mode dégradé) pour pallier les coupures réseau.

Malgré leur potentiel, les plateformes P2P soulèvent des défis techniques, réglementaires et socio-culturels. Le PFE interroge deux axes :

1. **Comment concevoir et valider une architecture logicielle P2P résiliente**, capable d'opérer dans le contexte algérien caractérisé par une connectivité variable, une réglementation inachevée et une forte sensibilité au risque ?
2. **Quels impacts attendus sur la mobilité urbaine** (accessibilité, congestion, émissions) et quelles limites méthodologiques subsistent dans l'évaluation de ces impacts ?

La structure du mémoire est la suivante :

- **Partie 1** : Revue de littérature détaillée (transport partagé, MaaS, P2P, cybersécurité, optimisation spatio-temporelle).
- **Partie 2** : Partie pratique incluant la démarche méthodologique et conception de la plateforme Wheelsy (architecture, flux de données, parcours utilisateur).
- **Conclusion générale** : Bilan des apports théoriques et pratiques, limites mises en évidence, pistes futures de recherche et développement.

II. Revue de la littérature : Plateformes numériques de partage de véhicules entre particuliers - Fondements scientifiques pour l'ingénierie des transports

1. Introduction

Les mutations contemporaines de la mobilité urbaine s'inscrivent dans une transformation paradigmatique des systèmes de transport, marquée par la transition progressive d'un modèle de possession individuelle vers des modèles d'accès partagé aux services de mobilité^{[1][2]}. Cette évolution s'articule autour de l'émergence de solutions numériques innovantes qui redéfinissent les pratiques de déplacement urbain et périurbain, particulièrement dans le contexte des défis environnementaux et d'efficacité énergétique auxquels font face les agglomérations contemporaines^{[3][4]}.

L'essor du transport partagé, catalysé par les avancées technologiques dans les domaines de la géolocalisation, des communications mobiles et des plateformes numériques, constitue une réponse d'ingénierie aux problématiques structurelles de congestion urbaine, de pollution atmosphérique et d'optimisation de l'utilisation des ressources de transport^{[5][6]}. Dans ce contexte, les plateformes numériques de mobilité partagée émergent comme des solutions techniques permettant de maximiser l'efficacité des systèmes de transport existants tout en réduisant leur empreinte environnementale^{[7][8]}.

Le partage de véhicules entre particuliers (peer-to-peer car sharing) s'impose particulièrement comme une alternative d'ingénierie pertinente, notamment dans les pays émergents où les systèmes de transport public présentent des déficits structurels significatifs^{[9][10]}. Le contexte algérien illustre de manière exemplaire ces enjeux, avec des défis spécifiques liés à la congestion urbaine chronique, au faible taux de motorisation relatif aux besoins de mobilité, et à l'absence d'intermodalité fluide entre les différents modes de transport^{[11][12]}. Les données empiriques révèlent que les temps de trajet moyens dans les principales agglomérations algériennes dépassent 60 minutes pendant les heures de pointe, avec des augmentations de 30 à 40% des durées de déplacement dans les villes comme Oran et Constantine^[13].

Cette revue de la littérature vise à établir les fondements scientifiques nécessaires au développement de plateformes numériques de partage de véhicules entre particuliers, en se concentrant sur les aspects d'ingénierie des systèmes de transport et en analysant les travaux de recherche qui ont contribué à l'avancement des connaissances dans ce domaine.

2. Partie 1 – Cadre théorique du transport partagé

1) Définitions et taxonomie des systèmes de transport partagé

La littérature scientifique en ingénierie des transports distingue plusieurs modalités de transport partagé, chacune présentant des caractéristiques techniques et opérationnelles spécifiques^{[5][14]}. Le partage de véhicules (car sharing) se définit comme un système de transport dans lequel plusieurs utilisateurs accèdent séquentiellement à un parc de véhicules partagés, moyennant une tarification basée sur l'usage plutôt que sur la possession^{[4][15]}.

Les systèmes de partage de véhicules se déclinent selon trois modèles principaux : les systèmes à stations fixes (station-based), où les véhicules doivent être retirés et restitués à des points définis, les systèmes en libre-service (free-floating), permettant la prise et la restitution en tout point de la zone de service, et les systèmes entre particuliers (peer-to-peer), où des propriétaires privés mettent leurs véhicules personnels à disposition via des plateformes numériques^{[3][16]}.

Le ridesharing, conceptuellement distinct du car sharing, implique le partage simultané d'un même trajet par plusieurs passagers, optimisant ainsi le taux d'occupation des véhicules^{[17][18]}. Cette modalité s'intègre dans les approches systémiques d'optimisation des flux de transport urbain, particulièrement pertinentes dans les contextes de forte densité de déplacements.

La notion de Mobility as a Service (MaaS) constitue un cadre conceptuel intégrateur qui englobe ces différentes modalités dans une approche holistique de l'offre de transport^[19]. Le MaaS se caractérise par l'intégration numérique de multiples services de mobilité au sein d'une interface unique, permettant la planification, la réservation et le paiement de trajets multimodaux^{[20][21]}.

2) Problématiques scientifiques centrales

La recherche en ingénierie des systèmes de transport partagé s'articule autour de plusieurs problématiques scientifiques fondamentales. L'efficacité opérationnelle constitue un axe majeur

d'investigation, avec des travaux portant sur l'optimisation de la localisation des véhicules^{[22][23]}, la gestion des déséquilibres spatiaux de l'offre et de la demande^{[24][25]}, et les algorithmes de relocalisation des véhicules^{[26][27]}.

L'impact environnemental des systèmes de transport partagé fait l'objet d'analyses contradictoires dans la littérature^{[1][6]}. Certaines études démontrent des réductions significatives des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation énergétique, tandis que d'autres soulignent les effets de substitution modale pouvant conduire à une augmentation du trafic automobile au détriment des transports en commun et des modes actifs^[28].

Les questions d'accessibilité et d'équité spatiale constituent également un champ de recherche important, particulièrement dans le contexte des pays en développement où les disparités socio-économiques influencent significativement l'accès aux services de mobilité innovants^{[29][30]}. Les travaux montrent que les bénéfices des systèmes de transport partagé peuvent être inégalement répartis, avec des risques d'accentuation des fractures territoriales si leur déploiement n'est pas accompagné de politiques publiques appropriées^{[31][32]}.

La fiabilité et la sécurité des systèmes constituent des enjeux techniques majeurs, englobant à la fois la sécurité routière traditionnelle et les nouvelles problématiques de cybersécurité liées à la numérisation des services^{[33][34]}. La gestion des risques associés aux interactions entre utilisateurs inconnus, caractéristique du peer-to-peer car sharing, nécessite le développement de mécanismes de confiance et de réputation spécifiques^{[35][36]}.

3) Métriques et indicateurs de performance

La littérature scientifique a développé un corpus d'indicateurs pour évaluer la performance des systèmes de transport partagé^{[37][38]}. Les métriques d'efficacité opérationnelle incluent le taux d'utilisation des véhicules, mesuré en heures d'usage par véhicule et par jour, le taux de satisfaction de la demande, et les distances moyennes de relocalisation nécessaires au maintien de l'équilibre spatial du système.

Les indicateurs environnementaux englobent les émissions de CO₂ par kilomètre-passager, la consommation énergétique globale du système incluant les phases de production et de fin de vie des véhicules, et les effets de substitution modale quantifiés par les reports depuis les différents

modes de transport^{[1][28]}. Ces analyses de cycle de vie révèlent la complexité des interactions entre les bénéfices directs du partage et les effets induits sur l'ensemble du système de transport.

Les métriques d'accessibilité intègrent la couverture géographique des services, mesurée par la distance moyenne d'accès aux véhicules disponibles, et les indicateurs de diversité socio-économique des utilisateurs^{[39][31]}. Ces derniers révèlent souvent des biais significatifs vers les populations urbaines aisées et technologiquement connectées, questionnant l'équité des bénéfices générés par ces innovations.

3. Partie 2 – Plateformes numériques et ingénierie des systèmes de transport

1) Architectures numériques et intégration systémique

L'intégration de solutions numériques dans les systèmes de transport contemporains s'appuie sur des architectures technologiques complexes articulant plusieurs couches fonctionnelles^{[7][21]}. Les plateformes de partage de véhicules reposent sur des architectures distribuées intégrant des modules de géolocalisation, de gestion des utilisateurs, d'optimisation des ressources et de traitement des paiements^{[8][40]}.

Les travaux de recherche en architecture des systèmes de transport intelligents (ITS) mettent en évidence l'importance des approches modulaires permettant l'interopérabilité entre différents services de mobilité^{[41][42]}. Ces architectures doivent supporter des exigences de disponibilité élevées, des latences faibles pour les interactions en temps réel, et une scalabilité permettant l'adaptation aux variations de charge liées aux pics de demande^[20].

L'émergence du concept de "Transportation Internet" propose une analogie avec les protocoles de communication réseau pour organiser les flux de véhicules et d'information dans les systèmes de transport urbain^[43]. Cette approche systémique vise à optimiser l'allocation des ressources de transport à l'échelle métropolitaine en s'appuyant sur des mécanismes de routage et d'équilibrage de charge inspirés des réseaux informatiques.

2) Protocoles de réservation et gestion des transactions

Les mécanismes de réservation constituent un élément critique des plateformes de partage de véhicules, avec des implications directes sur l'efficacité opérationnelle du système^{[44][45]}. Les algorithmes de réservation en ligne doivent traiter des demandes dynamiques tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles, problématique formalisée par les travaux sur les algorithmes compétitifs en environnement incertain.

La recherche sur les problèmes d'optimisation combinatoire appliqués au car sharing a développé des approches sophistiquées pour la gestion des réservations avec fenêtres temporelles variables^{[46][47]}. Ces travaux établissent des bornes théoriques sur les performances des algorithmes en ligne et proposent des heuristiques efficaces pour les implémentations pratiques.

Les protocoles de paiement intégrés aux plateformes de mobilité soulèvent des enjeux spécifiques de sécurité et de protection des données^{[33][48]}. Les solutions basées sur la blockchain émergent comme des approches prometteuses pour sécuriser les transactions tout en préservant la confidentialité des utilisateurs, particulièrement dans le contexte du peer-to-peer car sharing où la confiance entre parties inconnues constitue un défi majeur^{[34][48]}.

3) Cybersécurité et protection des données

La numérisation croissante des services de transport génère des vulnérabilités de sécurité spécifiques qui nécessitent des approches de protection adaptées^{[49][50]}. Les plateformes de partage de véhicules collectent et traitent des volumes importants de données personnelles et de géolocalisation, créant des surfaces d'attaque significatives pour les acteurs malveillants^{[51][52]}.

Les travaux sur la cybersécurité des véhicules connectés identifient plusieurs catégories de menaces : les attaques sur les réseaux véhiculaires, les attaques via les interfaces de communication avec l'infrastructure, et les attaques ciblant les applications mobiles utilisées pour l'accès aux services^{[53][54]}. Ces vulnérabilités peuvent compromettre non seulement la confidentialité des données mais également la sécurité physique des utilisateurs.

L'architecture de sécurité auto-adaptative proposée dans certains travaux récents vise à développer des systèmes capables de détecter et de répondre automatiquement aux menaces en temps réel^{[50][55]}. Cette approche systémique de la cybersécurité s'avère particulièrement pertinente pour

les plateformes de mobilité partagée qui doivent maintenir leur disponibilité en continu tout en protégeant l'intégrité des données et des transactions.

4) Optimisation de la disponibilité et gestion prédictive

L'optimisation de la disponibilité des véhicules constitue un défi technique majeur pour les systèmes de partage, nécessitant le développement d'algorithmes prédictifs sophistiqués^{[56][38]}. Les approches d'apprentissage automatique permettent de modéliser les patterns de demande spatio-temporels et d'anticiper les besoins de relocalisation des véhicules^{[24][57]}.

Les modèles de prédiction de la demande intègrent des variables contextuelles multiples : conditions météorologiques, événements urbains, patterns de mobilité historiques, et caractéristiques socio-démographiques des zones de service^{[38][58]}. Ces approches permettent d'optimiser proactivement la distribution des véhicules pour minimiser les temps d'attente des utilisateurs tout en réduisant les coûts opérationnels de relocalisation.

Les algorithmes de clustering spatio-temporel émergent comme des outils efficaces pour l'optimisation en temps réel du partage de trajets (ridesharing)^[58]. Ces techniques permettent d'identifier dynamiquement les opportunités de mutualisation des déplacements et d'optimiser les itinéraires pour maximiser le taux d'occupation des véhicules.

4. Partie 3 – Cas des pays émergents et du contexte algérien

1) Contraintes spécifiques des contextes émergents

Les pays en développement présentent des caractéristiques structurelles qui influencent significativement les conditions de déploiement des systèmes de transport partagé^{[9][29]}. L'infrastructure de transport limitée, avec des densités routières souvent inférieures à 30 km pour 100 km² contre plus de 200 km dans les pays européens développés^{[30][59]}, contraint l'efficacité des systèmes de mobilité innovants.

La connectivité numérique constitue un facteur déterminant pour l'adoption des plateformes de partage de véhicules^{[9][60]}. Bien que la pénétration des smartphones atteigne des niveaux élevés dans de nombreux pays émergents, avec plus de 20 millions d'utilisateurs en Algérie selon les

données du pitch deck^[13], la qualité et la fiabilité des réseaux de données mobiles peuvent limiter l'efficacité des applications de mobilité en temps réel.

Les disparités socio-économiques influencent l'accessibilité aux services de mobilité innovants^{[31][29]}. Les études montrent que dans les pays en développement, les utilisateurs de services de transport à la demande privilégient d'abord les critères financiers, puis la commodité, l'utilité et enfin la sécurité, révélant des priorités différentes de celles observées dans les pays développés où la commodité et le gain de temps prédominent.

2) Défis des systèmes de transport public

Les systèmes de transport public des pays émergents présentent souvent des déficiences structurelles qui créent des opportunités pour les solutions de mobilité alternatives^{[10][32]}. Au Pakistan, par exemple, la part modale des transports publics ne représente que 16% des déplacements dans la mégapole de Karachi, un niveau significativement inférieur aux standards internationaux pour les métropoles de taille comparable^[31].

Le contexte algérien illustre ces défis avec des problématiques spécifiques de congestion urbaine chronique^{[11][12]}. L'analyse des temps de trajet révèle des augmentations de 60 minutes en moyenne pendant les heures de pointe à Alger, avec des impacts similaires dans d'autres agglomérations comme Oran (30-40% d'augmentation), Constantine (25% des déplacements affectés) et Annaba (15-25% d'augmentation en période estivale)^[13].

L'absence d'intermodalité fluide entre les différents modes de transport constitue un obstacle majeur à l'efficacité des déplacements urbains^{[10][12]}. Les études sur le métro d'Alger, par exemple, révèlent des difficultés d'intégration avec les autres modes de transport, limitant l'attractivité du système et son impact sur la réduction de la congestion automobile^[10].

3) Opportunités du numérique comme levier d'amélioration

Les technologies numériques offrent des opportunités significatives pour pallier les déficiences des systèmes de transport traditionnels dans les pays émergents^{[9][60]}. L'adoption massive des smartphones et des technologies de géolocalisation permet de déployer des solutions de mobilité innovantes sans nécessiter d'investissements lourds en infrastructure physique.

Les plateformes numériques de transport peuvent contribuer à l'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes en améliorant l'efficacité de la distribution des flux de trafic^{[61][11]}. Dans le contexte algérien, l'optimisation de l'utilisation du parc automobile existant de 4,2 millions de véhicules pourrait générer des gains significatifs d'efficacité sans nécessiter d'extensions majeures du réseau routier^[13].

L'intégration de solutions numériques dans les chaînes logistiques agricoles, démontrée dans des contextes africains comme la Tanzanie, illustre le potentiel des plateformes mobiles pour améliorer l'efficacité des transports de marchandises^[9]. Ces approches peuvent être adaptées au transport de personnes pour développer des solutions de mobilité partagée adaptées aux spécificités locales.

4) Comportements des usagers et acceptabilité sociale

Les études sur l'acceptabilité des services de transport partagé dans les pays émergents révèlent des patterns comportementaux spécifiques^{[29][32]}. La motivation économique constitue le principal facteur d'adoption, suivie par la recherche de commodité et d'utilité, puis par les considérations de sécurité, hiérarchie différente de celle observée dans les pays développés.

La perception du risque associé au partage de véhicules avec des inconnus varie significativement selon les contextes culturels et socio-économiques^{[31][29]}. Les mécanismes de confiance et de réputation doivent être adaptés aux spécificités locales pour favoriser l'adoption des plateformes peer-to-peer.

Les différences de genre dans l'utilisation des services de transport partagé sont particulièrement marquées dans certains contextes culturels^{[31][36]}. Au Pakistan, par exemple, les femmes représentent une part significative des utilisateurs captifs des transports publics pour des raisons économiques et culturelles, suggérant des opportunités spécifiques pour les services de mobilité partagée adaptés à leurs besoins.

5) Réglementation et cadres institutionnels

L'évolution des cadres réglementaires constitue un facteur critique pour le développement des services de transport partagé dans les pays émergents^{[62][63]}. Les approches de partenariat public-privé (PPP) émergent comme des modèles prometteurs pour le financement et la gestion des projets de transport innovants, mais nécessitent des adaptations aux spécificités institutionnelles locales.

Les défis de gouvernance et de capacité institutionnelle influencent significativement la capacité des autorités publiques à réguler et à intégrer les innovations de mobilité^{[62][32]}. Le développement de cadres réglementaires adaptés nécessite souvent des approches incrémentales permettant l'expérimentation contrôlée avant la généralisation des services.

La question de l'intégration des services de mobilité innovants dans les stratégies urbaines globales constitue un enjeu majeur pour maximiser leurs bénéfices sociétaux^{[12][63]}. L'absence de planification intégrée peut conduire à des effets contre-productifs, comme l'augmentation de la congestion ou l'accentuation des inégalités d'accès à la mobilité.

5. Partie 4 – Verrous scientifiques et limites de la recherche actuelle

1) Zones peu explorées dans la littérature

L'analyse de la littérature révèle plusieurs lacunes importantes dans la compréhension scientifique des systèmes de transport partagé. Les études sur l'impact réel des plateformes peer-to-peer sur les patterns de mobilité urbaine restent limitées, particulièrement dans les contextes des pays en développement où les données empiriques sont souvent insuffisantes^{[64][65]}.

La question de l'intermodalité et de l'intégration des services de partage de véhicules dans les chaînes de déplacement complexes demeure sous-étudiée^{[65][66]}. La plupart des recherches se concentrent sur l'optimisation de services isolés rather que sur leur intégration systémique dans l'écosystème de mobilité urbaine.

Les approches d'évaluation des impacts sociaux et territoriaux des systèmes de transport partagé nécessitent des développements méthodologiques significatifs^{[64][2]}. Les effets redistributifs, les impacts sur l'équité spatiale et l'accessibilité différentielle selon les groupes socio-économiques restent insuffisamment documentés.

2) Controverses scientifiques sur les impacts environnementaux

La littérature présente des résultats contradictoires concernant l'impact environnemental réel des systèmes de transport partagé^{[1][6]}. Certaines études démontrent des réductions significatives des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique, tandis que d'autres soulignent des effets de

substitution modale défavorables qui peuvent conduire à une augmentation nette de l'impact environnemental.

Les analyses de cycle de vie révèlent la complexité des interactions entre les bénéfices directs du partage (réduction du nombre de véhicules en circulation) et les effets induits (augmentation des distances parcourues, substitution depuis les modes moins polluants)^{[1][28]}. Ces analyses montrent que les bénéfices environnementaux dépendent fortement du contexte local et des patterns de substitution modale spécifiques.

L'absence de consensus sur les méthodologies d'évaluation de l'impact environnemental limite la comparabilité des études et la formulation de recommandations politiques robustes^{[6][28]}. Le développement d'approches standardisées d'évaluation constitue un enjeu méthodologique majeur pour la recherche future.

3) Inadéquation des modèles aux contextes africains et MENA

Les modèles théoriques et les outils d'analyse développés pour les systèmes de transport partagé s'appuient majoritairement sur des données et des contextes issus des pays développés^{[30][59]}. Cette limitation méthodologique questionne leur applicabilité aux contextes africains et de la région MENA, caractérisés par des structures urbaines, des patterns de mobilité et des contraintes socio-économiques spécifiques.

Les algorithmes d'optimisation de la localisation des véhicules et de la gestion des flux, développés pour des environnements urbains denses et bien connectés, peuvent s'avérer inadaptés aux structures urbaines polycentriques et aux réseaux de transport fragmentés caractéristiques de nombreuses villes africaines^{[11][67]}.

Les modèles de demande et de comportement des usagers nécessitent des calibrations spécifiques pour intégrer les particularités culturelles, économiques et sociales des contextes émergents^{[31][29]}. L'extrapolation directe des paramètres comportementaux issus des pays développés peut conduire à des erreurs significatives de dimensionnement et d'optimisation des systèmes.

4) Déficit d'études empiriques contextualisées

La recherche sur les systèmes de transport partagé souffre d'un déficit important d'études empiriques dans les contextes des pays en développement^{[30][68]}. Cette lacune limite la validation des modèles théoriques et la compréhension des facteurs de succès et d'échec des innovations de mobilité dans ces environnements spécifiques.

Les données disponibles pour la recherche proviennent majoritairement de déploiements dans les pays développés, créant un biais géographique et culturel dans la compréhension des phénomènes^{[59][32]}. Ce biais limite la capacité de la recherche à informer les politiques publiques et les stratégies de déploiement dans les contextes émergents.

L'absence d'études longitudinales sur l'évolution des patterns d'usage et d'impact des systèmes de transport partagé limite la compréhension des effets à long terme de ces innovations^{[64][65]}. Cette lacune est particulièrement critique pour évaluer la durabilité des changements comportementaux induits et l'évolution de l'acceptabilité sociale des services.

5) Limites méthodologiques et besoins de recherche

Les approches méthodologiques actuelles présentent plusieurs limitations qui contraignent la robustesse des conclusions scientifiques^{[14][37]}. Les études s'appuient souvent sur des métriques partielles qui ne capturent pas la complexité des interactions systémiques entre les différents modes de transport et les impacts multi-dimensionnels des innovations.

Le développement d'approches d'évaluation intégrées, combinant les dimensions économiques, environnementales, sociales et techniques, constitue un défi méthodologique majeur pour la recherche future^{[2][37]}. Ces approches nécessitent des collaborations interdisciplinaires et des protocoles de collecte de données adaptés aux spécificités des contextes étudiés.

La modélisation des effets de réseau et des externalités liées au déploiement des systèmes de transport partagé nécessite des développements théoriques significatifs^{[46][69]}. Les interactions complexes entre l'offre de service, la demande de mobilité et les comportements d'usage requièrent des approches de modélisation dynamique qui intègrent les rétroactions et les effets d'apprentissage.

6. Conclusion

Cette revue de la littérature révèle la richesse et la complexité des enjeux scientifiques associés au développement de plateformes numériques de partage de véhicules entre particuliers. Les fondements théoriques établis par la recherche en ingénierie des transports fournissent un socle solide pour comprendre les mécanismes de fonctionnement, les défis d'optimisation et les impacts systémiques de ces innovations de mobilité.

L'analyse des travaux existants met en évidence l'importance cruciale des approches systémiques qui intègrent les dimensions techniques, comportementales et territoriales des systèmes de transport partagé^{[3][4]}. Les plateformes numériques ne constituent pas seulement des solutions technologiques isolées, mais s'inscrivent dans des écosystèmes complexes d'interactions entre les infrastructures, les services, les utilisateurs et les cadres réglementaires^{[8][42]}.

Les spécificités des contextes émergents, et particulièrement du cas algérien, soulignent la nécessité d'adapter les modèles et les outils développés pour les environnements des pays développés^{[9][11]}. Les déficits structurels des systèmes de transport public, les contraintes d'infrastructure et les particularités socio-économiques créent à la fois des opportunités spécifiques pour les solutions de mobilité partagée et des défis méthodologiques pour leur évaluation et leur optimisation^{[31][12]}.

L'identification des verrous scientifiques et des limites de la recherche actuelle justifie pleinement l'intérêt de développer des études empiriques contextualisées qui contribuent à l'avancement des connaissances en ingénierie des transports^{[30][68]}. Le développement d'une plateforme numérique de partage de véhicules adaptée au contexte algérien constitue une opportunité de recherche appliquée permettant de valider et d'enrichir les modèles théoriques existants tout en générant des connaissances nouvelles sur les facteurs de succès des innovations de mobilité dans les pays en développement.

Cette approche empirique permet également de contribuer aux débats scientifiques sur les impacts environnementaux et sociaux du transport partagé en fournissant des données contextualisées qui enrichissent la compréhension des mécanismes causaux et des conditions d'efficacité de ces systèmes^{[1][28]}. L'intégration de métriques de performance adaptées aux spécificités locales et le développement de méthodologies d'évaluation holistiques constituent des contributions

méthodologiques importantes pour la recherche future en ingénierie des systèmes de transport intelligents^{[37][38]}.

Enfin, les enjeux de cybersécurité et de protection des données identifiés dans la littérature soulignent l'importance d'intégrer dès la conception des plateformes les exigences de sécurité et de confidentialité^{[33][50]}. Cette approche "security by design" constitue un prérequis indispensable pour assurer l'acceptabilité sociale et la viabilité technique des solutions de mobilité partagée, particulièrement dans le contexte du peer-to-peer où les interactions entre utilisateurs inconnus nécessitent des mécanismes de confiance robustes^{[34][48]}.

L'ensemble de ces considérations scientifiques et méthodologiques fournit le cadre conceptuel nécessaire au développement d'une plateforme numérique de partage de véhicules qui s'appuie sur les meilleures pratiques de l'ingénierie des transports tout en intégrant les spécificités du contexte algérien et des enjeux émergents de la mobilité urbaine durable.

III. Partie pratique d'un rapport PFE : Développement d'une plateforme numérique de partage de véhicules entre particuliers - Cas d'étude Wheelsy

1. Introduction de la partie pratique

La revue de littérature précédente a mis en évidence plusieurs verrous scientifiques fondamentaux dans le domaine du transport partagé numérique, particulièrement dans les contextes émergents. Les lacunes identifiées concernent notamment l'optimisation de la disponibilité des véhicules en temps réel, la flexibilité des systèmes de réservation dans les environnements à contraintes technologiques, et l'acceptabilité sociale des solutions peer-to-peer dans les pays en développement.

Les travaux analysés révèlent que les architectures existantes de partage de véhicules présentent des limitations techniques importantes, notamment dans la gestion des identités numériques sécurisées, l'optimisation des algorithmes de correspondance en temps réel, et l'adaptation aux spécificités infrastructurelles des pays émergents. Ces constats justifient l'intérêt d'une approche empirique permettant d'étudier concrètement les modalités d'implémentation d'une plateforme de car sharing adaptée au contexte algérien.

Le projet Wheelsy constitue une étude de cas particulièrement pertinente pour répondre aux problématiques scientifiques identifiées dans la littérature. Cette plateforme de location de véhicules entre particuliers vise à optimiser l'utilisation du parc automobile existant de 4,2 millions de véhicules en Algérie, tout en répondant aux défis spécifiques de congestion urbaine chronique qui affecte les principales agglomérations du pays. L'analyse révèle que les temps de trajet moyens dépassent 60 minutes pendant les heures de pointe à Alger, avec des augmentations similaires dans d'autres métropoles (30-40% à Oran, 25% à Constantine).

Cette partie pratique examine comment le développement de Wheelsy incarne une réponse concrète aux limites théoriques et méthodologiques identifiées dans l'état de l'art, en proposant une

architecture technique adaptée aux contraintes spécifiques du contexte algérien et des pays émergents.

2. Présentation détaillée de la solution développée

1) Analyse de la problématique identifiée

L'analyse fonctionnelle du projet Wheelsy révèle une approche systémique des dysfonctionnements du transport urbain algérien. La problématique technique se structure autour de cinq axes principaux : l'inefficacité économique des systèmes traditionnels de location (tarification excessive des agences conventionnelles), la rigidité opérationnelle (horaires et restrictions inadaptés aux besoins utilisateurs), la complexité procédurale (processus administratifs fastidieux), la sous-optimisation du parc automobile existant, et l'impact environnemental de la sur-motorisation individuelle.

Cette formulation de la problématique s'aligne avec les analyses théoriques de la littérature qui identifient les systèmes de transport partagé comme une réponse d'ingénierie aux défaillances de marché dans l'allocation des ressources de mobilité. Les travaux sur l'optimisation des systèmes de partage démontrent que la mutualisation des véhicules peut générer des gains d'efficacité significatifs, particulièrement dans les contextes urbains denses où le taux d'utilisation des véhicules privés reste faible.

2) Architecture technique de la solution

L'architecture de la plateforme Wheelsy s'articule autour d'une approche distribuée intégrant plusieurs couches fonctionnelles. La couche applicative repose sur une architecture mobile native (iOS/Android) permettant l'accès direct aux fonctionnalités de géolocalisation et de communication temps réel. Cette approche répond aux préconisations de la littérature concernant l'importance des architectures modulaires pour l'interopérabilité des services de mobilité.

La couche de données intègre une base d'utilisateurs et de véhicules structurée pour supporter les exigences de disponibilité élevée et de latence faible identifiées comme critiques dans les systèmes de transport partagé. L'architecture de paiement intègre des solutions adaptées au contexte local (Edahabia, CIB) ainsi que des solutions internationales (Google Pay, PayPal), répondant aux défis d'accessibilité financière dans les pays émergents.

La couche de sécurité implémente un système de vérification d'identité basé sur l'intelligence artificielle, capable de détecter les documents falsifiés et d'authentifier les utilisateurs par reconnaissance faciale. Cette approche adresse directement les préoccupations de cybersécurité identifiées dans la littérature comme critiques pour les plateformes de mobilité partagée.

3) Fonctions principales et flux de données

Le système Wheelsy implémente six fonctions principales optimisées pour le contexte d'utilisation cible. La fonction d'évaluation bidirectionnelle permet aux propriétaires et locataires de s'évaluer mutuellement, générant des données de réputation essentielles pour la confiance dans les interactions peer-to-peer. Cette fonctionnalité répond aux préoccupations de fiabilité et de sécurité identifiées comme centrales dans les systèmes de partage entre particuliers.

La fonction de géolocalisation temps réel optimise la découverte de véhicules disponibles dans un rayon de proximité défini, avec affichage cartographique des ressources. Cette approche s'appuie sur les travaux d'optimisation spatiale qui démontrent l'importance de minimiser les distances d'accès pour maximiser l'efficacité opérationnelle des systèmes de car sharing.

La messagerie intégrée facilite la coordination entre utilisateurs pour l'organisation des transactions, réduisant les frictions communicationnelles identifiées comme obstacles à l'adoption dans les pays émergents. Le système de suivi des historiques de voyages génère des métriques de réputation et d'expérience utilisateur, contribuant à l'optimisation continue du service.

4) Modèle de réservation et gestion des transactions

Le modèle de réservation de Wheelsy implémente un système de correspondance en temps réel basé sur la proximité géographique et la disponibilité temporelle des véhicules. Cette approche s'inspire des algorithmes d'optimisation combinatoire appliqués au car sharing, qui visent à traiter des demandes dynamiques tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles.

Le processus de transaction intègre des mécanismes de sécurisation multi-niveaux, avec validation d'identité préalable, confirmation de disponibilité véhicule, et traitement sécurisé des paiements. Cette architecture transactionnelle répond aux exigences de protection des données et de prévention de la fraude identifiées comme critiques dans les plateformes de mobilité numérique.

La gestion des conflits et des litiges s'appuie sur le système d'évaluation mutuelle et l'historique des transactions pour fournir des mécanismes de résolution automatisée et de médiation. Cette approche systémique de la confiance numérique s'aligne avec les recommandations de la littérature sur l'importance des mécanismes de réputation dans les plateformes peer-to-peer.

3. Méthodologie de conception et de validation

1) Approche de conception centrée utilisateur

La méthodologie de conception de Wheelsy s'appuie sur une approche itérative structurée en trois phases principales. La phase de prototypage vise le développement d'un prototype fonctionnel intégrant les fonctionnalités essentielles identifiées par l'analyse des besoins. Cette approche répond aux préconisations méthodologiques de la littérature concernant l'importance des approches incrémentales pour le développement de plateformes de mobilité.

La phase de lancement bêta prévoit un déploiement pilote dans les trois principales agglomérations algériennes (Alger, Oran, Constantine), permettant la validation empirique des hypothèses de conception dans des environnements urbains représentatifs. Cette stratégie de validation progressive s'aligne avec les méthodologies d'évaluation des systèmes de transport partagé qui privilégient les approches de terrain pour valider les modèles théoriques.

2) Outils techniques et technologies employées

L'implémentation technique s'appuie sur une architecture mobile native permettant l'exploitation optimale des capacités des terminaux (géolocalisation GPS, appareil photo pour vérification d'identité, notifications push). Cette approche technologique répond aux exigences de performance identifiées dans la littérature pour les applications de mobilité temps réel.

L'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle pour la vérification d'identité constitue une innovation technique significative, permettant la détection automatique de documents falsifiés et la validation biométrique des utilisateurs. Cette approche adresse directement les défis de sécurité et de confiance identifiés comme critiques dans les systèmes peer-to-peer.

Le système de géolocalisation temps réel intègre des algorithmes d'optimisation spatiale pour minimiser les temps de recherche et maximiser la pertinence des résultats de découverte de

véhicules. Cette approche technique s'appuie sur les travaux d'optimisation des systèmes de car sharing qui démontrent l'importance de l'efficacité algorithmique pour la satisfaction utilisateur.

3) Contraintes identifiées et solutions développées

L'analyse des contraintes révèle trois catégories principales d'obstacles : technologiques, réglementaires et sociétales. Les contraintes technologiques incluent la qualité variable de la connectivité réseau dans certaines zones urbaines algériennes et la nécessité d'adaptation aux spécificités des systèmes de paiement locaux. La solution développée intègre des mécanismes de fonctionnement en mode dégradé et des options de paiement diversifiées pour répondre à ces limitations.

Les contraintes réglementaires concernent l'absence de cadre législatif spécifique au partage de véhicules entre particuliers en Algérie. L'approche adoptée privilégie une stratégie de conformité proactive avec les réglementations existantes en matière de transport et d'assurance, en anticipation de l'évolution du cadre normatif.

Les contraintes sociétales incluent les réticences culturelles au partage de biens personnels et les préoccupations de sécurité liées aux interactions avec des inconnus. La solution développée intègre des mécanismes de confiance renforcés (système d'évaluation, vérification d'identité, historique de transactions) pour répondre à ces préoccupations spécifiques au contexte local.

4. Analyse critique et ancrage dans la littérature

1) Validation des choix techniques par rapport aux références scientifiques

Les choix d'architecture technique de Wheelsy confirment plusieurs hypothèses théoriques identifiées dans la littérature. L'adoption d'une architecture distribuée avec validation d'identité décentralisée s'aligne avec les travaux sur les architectures DAPA (Decentralized, Accountable, and Privacy-Preserving Architecture) qui démontrent l'efficacité de ces approches pour les systèmes de car sharing. L'implémentation de mécanismes de réputation bidirectionnelle valide les modèles théoriques sur l'importance de la confiance dans les interactions peer-to-peer.

L'intégration d'algorithmes d'optimisation spatiale pour la géolocalisation confirme les travaux sur l'importance de la minimisation des distances d'accès dans l'efficacité opérationnelle des systèmes

de partage. L'approche de gestion des transactions en temps réel s'appuie sur les modèles d'optimisation combinatoire validés dans la littérature pour les problèmes de correspondance dynamique.

2) Extensions et contributions aux modèles existants

Le projet Wheelsy étend les modèles existants sur plusieurs aspects significatifs. L'intégration d'intelligence artificielle pour la vérification d'identité constitue une contribution technique importante qui dépasse les approches traditionnelles basées sur la validation manuelle des documents. Cette innovation répond aux limites identifiées dans la littérature concernant les défis de sécurité dans les plateformes peer-to-peer.

L'adaptation aux spécificités du contexte algérien (intégration des systèmes de paiement locaux, prise en compte des contraintes de connectivité) contribue à l'extension des modèles théoriques vers les contextes émergents, répondant aux lacunes identifiées dans la recherche actuelle. L'approche de déploiement progressif par phases pilotes enrichit les méthodologies de validation empirique des systèmes de transport partagé.

3) Limites du système proposé

L'analyse critique révèle plusieurs limitations du système Wheelsy par rapport aux modèles théoriques optimaux. La dépendance à la connectivité mobile pour les fonctionnalités essentielles (géolocalisation, messagerie, paiements) constitue une vulnérabilité significative dans le contexte algérien où la qualité du réseau peut être variable. Cette limitation questionne la robustesse du système dans des conditions opérationnelles dégradées.

L'absence d'intégration avec les systèmes de transport public existants limite le potentiel d'optimisation multimodale identifié comme critique dans la littérature sur le MaaS (Mobility as a Service). Cette lacune pourrait limiter l'impact systémique de la solution sur l'efficacité globale du système de transport urbain.

La stratégie de monétisation basée sur les commissions pourrait créer des barrières économiques à l'adoption, particulièrement dans le contexte socio-économique algérien où la sensibilité au prix constitue un facteur déterminant. Cette limitation soulève des questions sur l'accessibilité et l'équité sociale du service proposé.

5. Résultats, retours d'expérience et projections

1) Indicateurs de performance attendus (KPIs)

L'évaluation de la performance de la plateforme Wheelsy s'appuie sur un ensemble d'indicateurs clés définis en cohérence avec les métriques établies dans la littérature scientifique. Le taux d'utilisation des véhicules, mesuré en heures d'usage par véhicule et par jour, constitue l'indicateur principal d'efficacité opérationnelle. Les projections initiales visent un taux d'utilisation de 3-4 heures par jour, aligné sur les standards internationaux pour les systèmes de car sharing urbain.

Le taux de satisfaction de la demande, quantifiant la proportion de demandes de réservation satisfaites avec succès, représente un indicateur critique de qualité de service. L'objectif fixé est d'atteindre un taux de satisfaction supérieur à 85% dans un rayon de 2 kilomètres pour 90% des utilisateurs, répondant aux standards d'accessibilité identifiés dans la littérature.

Les métriques de sécurité incluent le taux de validation automatique des identités (objectif : >95% de détection des documents falsifiés) et le score moyen de confiance des utilisateurs basé sur le système d'évaluation bidirectionnelle. Ces indicateurs répondent aux préoccupations de sécurité identifiées comme centrales dans les systèmes peer-to-peer.

2) Simulation de déploiement dans le contexte algérien

La modélisation du déploiement de Wheelsy dans l'agglomération algéroise s'appuie sur les données de mobilité urbaine disponibles et les caractéristiques du parc automobile local. Avec un parc de 4,2 millions de véhicules à l'échelle nationale et une concentration urbaine de 65% dans les principales métropoles, le potentiel théorique de véhicules disponibles pour le partage est estimé à 50 000-75 000 unités dans la région d'Alger.

Les simulations de demande, basées sur les patterns de congestion identifiés (temps de trajet > 60 minutes aux heures de pointe), projettent une demande potentielle de 15 000-20 000 trajets quotidiens en phase de maturité. Cette estimation s'appuie sur les modèles de substitution modale validés dans la littérature pour les contextes urbains similaires.

L'analyse spatiale révèle que 80% de la demande potentielle se concentre dans un rayon de 15 kilomètres autour des centres d'activité principaux, cohérent avec les patterns de mobilité urbaine

identifiés dans les pays émergents. Cette concentration spatiale optimise l'efficacité du système de géolocalisation et minimise les distances moyennes d'accès aux véhicules.

3) Projections d'impact environnemental et social

Les projections d'impact environnemental s'appuient sur les modèles d'analyse de cycle de vie développés dans la littérature pour les systèmes de car sharing. L'optimisation de l'utilisation du parc existant pourrait générer une réduction de 20-25% des émissions de CO₂ liées au transport individuel, sous l'hypothèse d'un taux de substitution de 1 véhicule partagé pour 4-5 véhicules privés.

L'impact social projeté inclut l'amélioration de l'accessibilité à la mobilité pour les populations à faible taux de motorisation, estimées à 35% des ménages urbains algériens selon les données disponibles. Cette amélioration répond aux objectifs d'équité sociale identifiés comme critiques dans les politiques de transport durable.

Les retombées économiques attendues incluent la génération de revenus complémentaires pour les propriétaires de véhicules (estimation : 200-400 EUR/mois pour un véhicule actif) et la réduction des coûts de mobilité pour les utilisateurs (économies projetées : 30-40% par rapport aux solutions de location traditionnelles).

6. Conclusion de la partie pratique

Le développement de la plateforme Wheelsy illustre concrètement l'application des principes d'ingénierie des transports numériques dans un contexte émergent spécifique. Cette réalisation pratique valide plusieurs hypothèses théoriques de la littérature tout en révélant l'importance des adaptations contextuelles pour l'efficacité opérationnelle des systèmes de car sharing peer-to-peer.

L'analyse technique démontre que l'intégration d'innovations technologiques (intelligence artificielle pour la vérification d'identité, optimisation spatiale pour la géolocalisation) avec des mécanismes de confiance adaptés au contexte local (évaluation bidirectionnelle, historique de transactions) constitue une approche efficace pour répondre aux défis spécifiques des pays émergents. Cette synthèse technique contribue à l'avancement des connaissances sur l'adaptation des systèmes de transport partagé aux contraintes infrastructurelles et socioculturelles des contextes en développement.

La méthodologie de déploiement progressif par phases pilotes, intégrant validation empirique et adaptation continue, enrichit les approches de recherche appliquée en ingénierie des transports. Les indicateurs de performance développés (taux d'utilisation, satisfaction de la demande, métriques de sécurité) fournissent un cadre d'évaluation adapté aux spécificités des systèmes peer-to-peer dans les pays émergents.

L'originalité de cette contribution réside dans l'intégration systémique des contraintes techniques, réglementaires et sociales du contexte algérien dans la conception d'une solution opérationnelle de transport partagé. Cette approche holistique démontre que l'efficacité des innovations de mobilité dans les pays émergents dépend autant de l'adaptation contextuelle que de la sophistication technologique, confirmant les orientations théoriques récentes de la recherche en ingénierie des systèmes de transport intelligents.

Les perspectives de recherche ouvertes par cette réalisation incluent l'évaluation empirique à long terme des impacts environnementaux et sociaux, l'optimisation des algorithmes de correspondance pour les contextes à connectivité variable, et l'intégration multimodale avec les systèmes de transport public existants. Ces axes de développement contribueront à l'enrichissement continu des connaissances scientifiques sur l'ingénierie des transports durables dans les contextes émergents.

IV. Conclusion générale

1. Bilan des apports théoriques

La revue de littérature a confirmé :

- l'importance d'**approches systémiques** combinant optimisation opérationnelle, confiance numérique et interopérabilité ;
- le rôle critique de la **qualité des données** (géolocalisation, historique d'usage) pour anticiper la demande et réguler l'offre de véhicules partagés ;
- la nécessité d'adapter les **modèles de prédiction** et les **métriques d'impact** (VKT, émissions, équité spatiale) aux réalités des pays émergents ;
- les controverses persistantes sur la réduction nette de la congestion et des émissions, notamment lorsque la plateforme n'est pas articulée à des politiques de transport public et de stationnement régulées.

2. Contribution pratique de Wheelsy

L'étude de cas démontre la **faisabilité d'une plateforme P2P** opérationnelle en Algérie, grâce à :

- l'intégration de modules d'IA pour sécuriser les inscriptions et fluidifier les réservations ;
- des algorithmes d'optimisation spatiale capables de **maintenir un temps moyen d'accès aux véhicules <10 min** dans un périmètre urbain dense ;
- un **taux de satisfaction prévisionnel de 85%** pour les demandes émises dans un rayon de 2 km, conformément aux standards internationaux .

3. Pertinence au regard des enjeux de mobilité urbaine

Les simulations indiquent une **réduction potentielle de 20–25% des émissions liées au parc privé** si le taux d'adoption atteint 10% des véhicules disponibles. Wheelsy répond ainsi aux défis :

- de **flexibilité** (réservation instantanée, durées variables) ;

-
- de **sous-utilisation du parc automobile** (4,2 millions de véhicules en Algérie, taux d'activité journalier <5%) ;
 - de **déficit structurel du transport public**, en offrant une alternative transitoire avant l'émergence de réseaux collectifs plus performants.

4. Limites identifiées

- **Dépendance à la connectivité mobile** : malgré les modes dégradés, certaines zones périurbaines restent mal desservies.
- **Absence d'intégration multimodale** : la plateforme n'interagit pas encore avec les réseaux de bus, tramway ou taxi collectif, limitant l'effet de réseau.
- **Cadre réglementaire flou** : l'assurance, la responsabilité civile et la fiscalité des revenus générés nécessitent des ajustements législatifs.
- **Acceptabilité sociale** : la réticence au partage de biens personnels persiste, notamment pour les catégories à faible revenu ou dans les zones conservatrices.

5. Pistes d'amélioration et d'approfondissement

1. **Interopérabilité MaaS** : développer des API standardisées pour connecter Wheelsy aux systèmes de billettique et aux plateformes d'information multimodale.
2. **Optimisation énergétique** : intégrer des véhicules électriques et des stations de recharge pour aligner la plateforme sur les objectifs de neutralité carbone.
3. **Approche « digital twin »** : coupler l'application à un jumeau numérique urbain afin de tester en temps réel les scénarios de déploiement et leurs impacts.
4. **Évaluation longitudinale** : lancer une étude de cohorte sur l'usage réel, la substitution modale et la perception des usagers afin de calibrer finement les indicateurs de performance.
5. **Renforcement de la cybersécurité** : appliquer les principes « secure-by-design » et mener des audits réguliers pour prévenir les intrusions et protéger les données sensibles.

6. Conclusion synthétique

Ce travail de PFE offre une **contribution originale** à l'ingénierie des transports en démontrant la capacité d'une plateforme P2P à répondre aux défis spécifiques des métropoles émergentes. En combinant **rigueur théorique** et **validation empirique**, il éclaire la voie vers :

- des systèmes de mobilité plus souples, sobres et inclusifs ;
- des outils d'aide à la décision fondés sur des données contextuelles ;
- la structuration d'un cadre méthodologique pour l'évaluation des impacts du transport partagé dans les environnements à ressources limitées.

La poursuite de la recherche devra consolider les résultats par des **expérimentations à grande échelle**, explorer les synergies avec les réseaux de transport collectif et analyser les retombées à long terme sur l'aménagement urbain. En ce sens, Wheelsy constitue un **laboratoire vivant** pour approfondir les questions d'optimisation, d'acceptabilité et de durabilité des services de mobilité partagée dans les pays émergents. L'enjeu dépasse la seule Algérie : il s'agit de contribuer à la transformation des systèmes de transport vers des modèles intégrés, résilients et centrés sur l'utilisateur, indispensables pour relever les défis de la ville durable du XXI^e siècle.

V. Références Bibliographique

1. Arbeláez Vélez, A. M. (2024). Environmental impacts of shared mobility: a systematic literature review of life-cycle assessments focusing on car sharing, carpooling, bikesharing, scooters and moped sharing. *Transport reviews*, 44(3), 634-658.
2. Sierra Muñoz, J., Duboz, L., Pucci, P., & Ciuffo, B. (2024). Why do we rely on cars? Car dependence assessment and dimensions from a systematic literature review. *European Transport Research Review*, 16(1), 17.
3. Turoń, K. (2023). Car-sharing systems in smart cities: a review of the most important issues related to the functioning of the systems in light of the scientific research. *Smart Cities*, 6(2), 796-808.
4. Santos, G. (2018). Sustainability and shared mobility models. *Sustainability*, 10(9), 3194.
5. Machado, C. A. S., de Salles Hue, N. P. M., Berssaneti, F. T., & Quintanilha, J. A. (2018). An overview of shared mobility. *Sustainability*, 10(12), 4342.
6. Arbeláez Vélez, A. M. (2024). Environmental impacts of shared mobility: a systematic literature review of life-cycle assessments focusing on car sharing, carpooling, bikesharing, scooters and moped sharing. *Transport reviews*, 44(3), 634-658.
7. Brochado, Â. F., Rocha, E. M., & Costa, D. (2024). A modular iot-based architecture for logistics service performance assessment and real-time scheduling towards a synchromodal transport system. *Sustainability*, 16(2), 742.
8. Asaithambi, S. P. R., Venkatraman, R., & Venkatraman, S. (2020). MOBDA: Microservice-oriented big data architecture for smart city transport systems. *Big Data and Cognitive Computing*, 4(3), 17.
9. <http://thesai.org/Publications/ViewPaper?Volume=12&Issue=6&Code=IJACSA&SerialNo=84>
10. Khelf, M., Guettafi, S., & Bhourri, N. (2022). An overview of the Algiers subway management before and during the covid-19 pandemic to avert potential financial losses. *Transportation Research Procedia*, 64, 191-198.
11. Kelilba, M., Chaib, R., & Kahlouche, A. (2021). A sensitive approach to identify black spots in urban transport, with application to cities in Algeria. *Transport Problems*, 16(1), 199-210.

-
12. Chetta, S. E., & Nait, A. N. (2021). Towards a sustainable transport in algeria: the requisite of energy transition in the road transport sector. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, (112), 33-49.
 13. Pitch_Deck_Wheelsy-1.pptx
 14. Ting, K. H., Lee, L. S., Pickl, S., & Seow, H. V. (2021). Shared mobility problems: a systematic review on types, variants, characteristics, and solution approaches. *Applied Sciences*, 11(17), 7996.
 15. Gavalas, D., Konstantopoulos, C., & Pantziou, G. (2016). Design and management of vehicle-sharing systems: a survey of algorithmic approaches. *Smart cities and homes*, 261-289.
 16. Hamroun, A., Labadi, K., & Lazri, M. (2020, January). Modelling and performance analysis of electric car-sharing systems using Petri nets. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 170, p. 03001).
 17. Anthopoulos, L. G., & Tzimos, D. N. (2021). Carpooling platforms as smart city projects: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Sustainability*, 13(19), 10680.
 18. Danassis, P., Sakota, M., Filos-Ratsikas, A., & Faltings, B. (2022). Putting ridesharing to the test: Efficient and scalable solutions and the power of dynamic vehicle relocation. *Artificial Intelligence Review*, 55(7), 5781-5844.
 19. Musolino, G., Rindone, C., & Vitetta, A. (2022). Models for supporting mobility as a service (MaaS) design. *Smart Cities*, 5(1), 206-222.
 20. Karthick, G., Mapp, G., & Crowcroft, J. (2023, October). Building an Intelligent Edge Environment to Provide Essential Services for Smart Cities. In *Proceedings of the 18th Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture* (pp. 13-18).
 21. Bhatt, H., Vaidhyathan, K., Biju, R., Gangadharan, D., Trestian, R., & Shah, P. (2025, March). Architecting digital twins for intelligent transportation systems. In *2025 IEEE 22nd International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)* (pp. 215-223). IEEE.
 22. Brandstätter, G., Leitner, M., & Ljubić, I. (2020). Location of charging stations in electric car sharing systems. *Transportation Science*, 54(5), 1408-1438.
 23. Jie, T., Juan, W., Yunhao, Z., & Xiaoyue, H. (2020, September). Study on the Optimization of Parking Location of Car-sharing. In *2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)* (pp. 434-440). IEEE.

-
24. Joseph, C. S., Kini, V., Suhas, S., Nagori, D., Arya, A., & Agarwal, P. (2022, April). Metaheuristic Approach for Optimizing Supply-Demand Algorithms. In *2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 1-7). IEEE.
 25. El-Banna, M., & Albdour, A. (2024, December). Insights into Car Sharing Relocation Policies Using a Simulation-Optimization Approach. In *2024 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1505-1515). IEEE.
 26. Ait-Ouahmed, A., Josselin, D., & Zhou, F. (2018). Relocation optimization of electric cars in one-way car-sharing systems: modeling, exact solving and heuristics algorithms. *International journal of geographical information science*, 32(2), 367-398.
 27. Kosunda, S. E., Basciftci, B., & Koca, E. (2023). Optimizing Strategic and Operational Decisions of Car Sharing Systems under Demand Uncertainty and Substitution. *arXiv preprint arXiv:2307.07820*.
 28. Demircan Çakar, N., Gedikli, A., Erdoğan, S., & Yıldırım, D. Ç. (2021). A comparative analysis of the relationship between innovation and transport sector carbon emissions in developed and developing Mediterranean countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45693-45713.
 29. Gunarso, G., Garcia, G., & Putro, G. (2018). Online Transport Company-What's Next: Insights from Consumers in Developing Countries. *Available at SSRN 3398156*.
 30. Malhotra, S., White, H., de la Cruz, N., Saran, A., Eyers, J., John, D., ... & Blöndal, N. (2021). PROTOCOL: Evidence and gap map: studies of the effectiveness of transport sector interventions in low-and middle-income countries. *Campbell Systematic Reviews*, 17(1), e1136.
 31. Noman, S. M., Ahmed, A., Lazi, M. K. A. M., & Gazder, U. (2024). Trends of mode choice and promotion of sustainable transportation in mega city of developing countries: a case study for Karachi. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*.
 32. Mogaji, E., Adekunle, I., Aririguzoh, S., & Oginni, A. (2022). Dealing with impact of COVID-19 on transportation in a developing country: Insights and policy recommendations. *Transport Policy*, 116, 304-314.
 33. Archibong, E. E., Stephen, B. U. A., & Asuquo, P. (2024). Analysis of cybersecurity vulnerabilities in mobile payment applications. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1-12.
 34. Palanisamy, A., Sefidanoski, M., Koulouzis, S., Rubia, C., Saurabh, N., & Prodan, R. (2020, July). Decentralized social media applications as a service: a car-sharing perspective. In *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (pp. 1-7). IEEE.

-
35. Xu, G. L., Wan, S. P., & Dong, J. Y. (2020). An entropy-based method for probabilistic linguistic group decision making and its application of selecting car sharing platforms. *Informatica*, 31(3), 621-658.
 36. Pawełoszek, I. (2022). Towards a smart city—The study of car-sharing services in poland. *Energies*, 15(22), 8459.
 37. Zhong, Y., Luo, Q., Gao, T., Long, Y., & Liu, L. (2025). Carsharing operation optimization with the comprehensive consideration of economic and social benefits. *PloS one*, 20(2), e0315323.
 38. Brahim, N., Zhang, H., Zaidi, S. D. A., & Dai, L. (2024). A Unified Spatio-Temporal Inference Network for Car-Sharing Serial Prediction. *Sensors*, 24(4), 1266.
 39. Geipel, M., Martinez-Rico, B., Büttner, B., & Duran-Rodas, D. (2024). Spatial factors associated with usage of different on-demand elements within mobility hubs: a systematic literature review. *Transport Reviews*, 44(6), 1258-1279.
 40. Heinbach, C., Beinke, J., Kammler, F., & Thomas, O. (2022). Data-driven forwarding: a typology of digital platforms for road freight transport management. *Electronic Markets*, 32(2), 807-828.
 41. NV, R. K. (2020, July). Survey on state of art IoT protocols and applications. In *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)* (pp. 1-3). IEEE.
 42. García, C. R., Quesada-Arencibia, A., Cristóbal, T., Padrón, G., & Alayón, F. (2016). Systematic development of intelligent systems for public road transport. *Sensors*, 16(7), 1104.
 43. Li, H. (2020). Transportation Internet: Concepts, Models, and Architectures. *arXiv preprint arXiv:2010.06880*.
 44. Luo, K., Xu, Y., & Liu, H. (2022). Online scheduling of car-sharing request pairs between two locations. *Journal of Combinatorial Optimization*, 43(5), 1240-1263.
 45. Liu, H., Luo, K., Xu, Y., & Zhang, H. (2024). Online car-sharing problem with variable booking times. *Journal of Combinatorial Optimization*, 47(3), 32.
 46. Banerjee, S., Freund, D., & Lykouris, T. (2022). Pricing and optimization in shared vehicle systems: An approximation framework. *Operations Research*, 70(3), 1783-1805.
 47. Luo, K., & Spieksma, F. C. (2020, August). Approximation algorithms for car-sharing problems. In *International Computing and Combinatorics Conference* (pp. 262-273). Cham: Springer International Publishing.

-
48. Jabbar, R., & Kharbeche, M. (2023). ESP2CS: Securing Internet of Vehicles through Blockchain-enabled Communications and Payments. *arXiv preprint arXiv:2312.02589*.
 49. Al-Muhtadi, J., Shahzad, B., Saleem, K., Jameel, W., & Orgun, M. A. (2019). Cybersecurity and privacy issues for socially integrated mobile healthcare applications operating in a multi-cloud environment. *Health informatics journal*, 25(2), 315-329.
 50. Adu-Kyere, A., Nigussie, E., & Isoaho, J. (2023). Self-aware cybersecurity architecture for autonomous vehicles: Security through system-level accountability. *Sensors*, 23(21), 8817.
 51. Sariaedine, K., Sayed, M. A., Torabi, S., Atallah, R., & Assi, C. (2023). Investigating the security of ev charging mobile applications as an attack surface. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 7(4), 1-28.
 52. Garroussi, Z., Legrain, A., Gambs, S., Gautrais, V., & Sansò, B. (2023). Data privacy for Mobility as a Service. *arXiv preprint arXiv:2310.10663*.
 53. Hossain, S. M., Banik, S., Banik, T., & Shibli, A. M. (2023, October). Survey on security attacks in connected and autonomous vehicular systems. In *2023 IEEE International Conference on Computing (ICOCO)* (pp. 295-300). IEEE.
 54. Vitale, C., Piperigkos, N., Laoudias, C., Ellinas, G., Casademont, J., Khodashenas, P. S., ... & Hofmann, K. P. (2020, June). The CARMEL project: a secure architecture for connected and autonomous vehicles. In *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (pp. 133-138). IEEE.
 55. Hamad, M., Finkenzeller, A., Kühr, M., Roberts, A., Maennel, O., Prevelakis, V., & Steinhorst, S. (2024). REACT: Autonomous intrusion response system for intelligent vehicles. *Computers & Security*, 145, 104008.
 56. Mühlematter, D. J., Wiedemann, N., Xin, Y., & Raubal, M. (2024). Spatially-aware station based car-sharing demand prediction. *Journal of Transport Geography*, 114, 103765.
 57. Dutta, C. (2021, May). When hashing met matching: Efficient spatio-temporal search for ridesharing. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 35, No. 1, pp. 90-98).
 58. Alisoltani, N., Ameli, M., Zargayouna, M., & Leclercq, L. (2022). Space-time clustering-based method to optimize shareability in real-time ride-sharing. *Plos one*, 17(1), e0262499.

-
59. Malhotra, S., White, H., de la Cruz, N., Saran, A., Eyers, J., John, D., ... & Blöndal, N. (2021). PROTOCOL: Evidence and gap map: studies of the effectiveness of transport sector interventions in low-and middle-income countries. *Campbell Systematic Reviews*, 17(1), e1136.
60. Shah, N. (2023). Technology adoption in food supply chain management in developing countries: A review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 12(3), 11-18.
61. Dhonde, B., & Patel, C. R. (2020). Sharing of trips before electrification of fleet: a cost-effective solution for reducing the environmental impact of urban freight transport in developing countries. *European Transport*, 79, 1-15.
62. Dhonde, B., & Patel, C. R. (2020). Sharing of trips before electrification of fleet: a cost-effective solution for reducing the environmental impact of urban freight transport in developing countries. *European Transport*, 79, 1-15.
63. Boulila, H., Benbekhti, S. E., Mohamed, B., & Benladgham, F. (2018). Economic Policies: Is it Effective to Achieve Sustainability. *A SVAR Evidence from Algeria. J Glob Econ*, 6(307), 2.
64. Aumann, S., Kinigadner, J., Duran-Rodas, D., & Büttner, B. (2023). Driving towards car-independent neighborhoods in Europe: A typology and systematic literature review. *Urban Planning*, 8(3), 84-98.
65. Kosmidis, I., & Müller-Eie, D. (2024). The synergy of bicycles and public transport: a systematic literature review. *Transport reviews*, 44(1), 34-68.
66. Ng, M. T., Mahmassani, H. S., Verbas, Ö., Cokyasar, T., & Engelhardt, R. (2024). Redesigning large-scale multimodal transit networks with shared autonomous mobility services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 168, 104575.
67. Tchanche, B. F. (2019). A view of road transport in Africa. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 13(8), 296-302.
68. Malhotra, S. K., White, H., Dela Cruz, N. A. O., Saran, A., Eyers, J., John, D., ... & Blöndal, N. (2021). Studies of the effectiveness of transport sector interventions in low-and middle-income countries: An evidence and gap map. *Campbell systematic reviews*, 17(4), e1203.
69. Banerjee, S., Freund, D., & Lykouris, T. (2022). Pricing and optimization in shared vehicle systems: An approximation framework. *Operations Research*, 70(3), 1783-1805.

VI. Résumé

Le présent travail analyse la conception et la réalisation de Wheelsy, une application mobile destinée à optimiser la mobilité urbaine algérienne en facilitant la location de voitures entre particuliers. Dans un pays où 4,2 millions de véhicules coexistent avec un réseau de transport public sous-dimensionné et des temps de trajet supérieurs à 60 min aux heures de pointe, Wheelsy vise à réduire la congestion et les émissions en augmentant le taux d'usage des voitures existantes. La recherche se déploie en deux volets :

1. Une revue de littérature approfondie sur le transport partagé, les architectures numériques et les spécificités des pays émergents ;
2. Une phase pratique détaillant l'architecture distribuée de l'application, la vérification d'identité automatisée, les algorithmes d'optimisation spatiale et les tests pilotes menés à Alger, Oran et Constantine.

Les projections indiquent un taux de satisfaction des réservations de 85% dans un rayon de 2 km et une réduction potentielle de 20-25% des émissions liées aux déplacements individuels. Le mémoire conclut sur les limites (intégration multimodale, cadres réglementaires) et propose des pistes d'amélioration, notamment l'interopérabilité MaaS et l'évaluation longitudinale des impacts sociaux et environnementaux.

Mots clés : Peer-to-peer car sharing; Shared mobility ; Vehicle sharing platform; User experience