

المملكة المغربية
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵍⴰⴽⴷⴰ ⵏ ⵎⴰⵔ
Royaume du Maroc



وزارة الانتقال الطاقوي والتنمية المستدامة
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵍⴰⴽⴷⴰ ⵏ ⵎⴰⵔ ⵏ ⵍⴰⴽⴷⴰ ⵏ ⵎⴰⵔ
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ÉLECTRIFICATION DU TRANSPORT PUBLIC SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Préparé par

M. ABDERAZAK HSAINI

Sujet de Stage d'Application
Science de Décision et Recherche Opérationnelle
Institut National de Statistique et d'Économie Appliquée, MA

Juillet 2024

Encadré par Mme. Hanaa CHABINI

Résumé

Le présent rapport de stage analyse l'impact de l'électrification des transports publics sur la consommation énergétique, dans une démarche d'innovation et de transition énergétique. Ce projet s'appuie sur des concepts de modélisation et d'optimisation pour évaluer et améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de transport public. La méthodologie adoptée repose sur l'utilisation du diagramme de Gantt pour une gestion et une mise en œuvre efficaces des différentes phases du projet. La solution proposée inclut la collecte et l'analyse des données énergétiques, la modélisation prédictive de la consommation et l'optimisation. Les résultats obtenus montrent une réduction significative de la consommation énergétique et des coûts opérationnels, tout en diminuant les émissions des gaz à effet de serre. Ce projet ouvre la voie à d'autres applications des technologies de data science et de machine learning pour promouvoir des solutions de transport durables et efficaces.

Dédicace

À mon oncle,

Aucun mot ne peut exprimer pleinement ce que je ressens pour toi. ton amour inconditionnel, ton soutien, tes sacrifices et tes encouragements m'ont toujours poussé à me dépasser. Aucune expression n'est suffisante pour te remercier. Merci d'avoir fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. Je te dois tout et je t'aime profondément. Que Dieu te garde à mes côtés.

À Oumayma, Zakariyea, Anass et Douae,

Merci de m'avoir encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles. Merci pour tous les moments de bonheur que nous avons partagés. Je vous souhaite un avenir radieux.

À ma grande famille,

C'est grâce à vous que j'ai pu réussir. Mille mercis pour votre amour et votre soutien. Que votre affection et vos bénédictions me protègent toujours.

À mes amis,

Peu importe les mots que j'assemble, ils ne suffiront jamais à exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien, votre complicité et toutes les belles valeurs que nous partageons.

Remerciements

Au terme de ce projet de stage d'application, je tiens à adresser mes sincères remerciements à Mme. CHABINI Hanaa, mon encadrante au sein du Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable. son suivi régulier, ses précieuses directives et sa disponibilité ont grandement contribué à la bonne progression de ce travail.

Après deux années agréables à l'INSEA, je souhaite également exprimer ma gratitude envers l'ensemble du corps professoral et administratif pour leur engagement continu dans la formation des futurs ingénieurs.

Je profite de cette occasion pour remercier chaleureusement toute l'équipe de la direction de la Stratégie, des Prévisions, de la Prospection et de la Coopération au sein du ministère pour leur accueil chaleureux, leur soutien et leur expertise durant mon stage. Leur bienveillance et leur professionnalisme ont grandement facilité mon travail, me permettant de vivre une expérience professionnelle enrichissante. Je suis profondément reconnaissant pour cette opportunité et je les remercie infiniment pour leur contribution à la réussite de ce projet.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.

Table des matieres

	Page
1 Cadre Général et Méthodologie du Travail	1
1.1 Introduction	1
1.2 Contexte général du projet	5
1.3 Problématique	6
1.4 Méthodologie de travail	7
1.4.1 Définition des Phases du Projet	7
1.4.2 Détail des Tâches et Estimation des Durées	7
1.4.3 Création du Diagramme de Gantt	9
1.4.4 Outils Utilisés	9
1.5 Conclusion	10
2 Revue de Littérature et Fondements	11
2.1 Introduction	11
2.2 État des Lieux de l'Électrification des Transports Publics	11
2.2.1 Électrification des Transports : Avantages et Défis	11
2.2.2 Études de Cas Internationaux	12
2.3 Techniques de Data Science et Machine Learning pour l'Analyse de la Con-	
sommation Énergétique	12
2.3.1 Algorithmes de Prédiction	12
2.3.2 Analyse de Séries Temporelles	12

2.4	Optimisation et Recherche Opérationnelle	13
2.4.1	Techniques d'Optimisation pour l'Allocation des Ressources	13
2.4.2	Algorithmes de Recherche Opérationnelle	13
2.5	Implications Environnementales et Économiques	13
2.5.1	Réduction des Émissions de CO ₂	13
2.5.2	Coûts et Bénéfices Économiques	14
2.6	Outils et Environnements de Travail	14
2.6.1	Python et Bibliothèques Utilisées	14
2.7	Conclusion	15
3	Le Transport et la Consommation Énergétique	16
3.1	Introduction au Transport	16
3.2	Le Transport Public (Collectif)	16
3.3	Le Transport Public au Maroc	17
3.3.1	Les Modes de Transport Public au Maroc	17
3.3.2	Situation Énergétique du Transport au Maroc	18
3.4	Le Rôle du Transport Public dans la Consommation Énergétique au Maroc .	21
3.4.1	Initiatives et Mesures Réalisées	22
3.4.2	Objectifs Futurs	23
3.5	Conclusion	23
4	Modélisation du Coût Total de Transport	25
4.1	Introduction des Modes de Transport	25
4.2	Variables de Décision	26
4.3	Paramètres	26
4.4	Frais d'Infrastructure	27
4.5	Frais d'Acquisition et de Maintenance	27
4.6	Autres Frais	27

4.7	Modèle Complet du Coût Total de Transport	28
4.8	Contraintes	28
5	Analyse Exploratoire des Données du Transport Public	29
5.1	Train	29
5.1.1	Caractéristiques du Mode de Transport	29
5.1.2	Consommation et Frais Associés	30
5.1.3	Analyse Exploratoire des Données	30
5.2	Tram	32
5.2.1	Données Fournies	33
5.2.2	Hypothèses Additionnelles	33
5.2.3	Calculs	33
5.2.4	Formule Complète	34
5.3	Autobus	35
5.3.1	Données Fournies	35
5.3.2	Hypothèses Additionnelles	36
5.3.3	Calculs	36
5.3.4	Formule Complète	37
5.4	Autocar	38
5.4.1	Données Fournies	38
5.4.2	Hypothèses Additionnelles	38
5.4.3	Calculs	39
5.4.4	Formule Complète	39
6	Calcul du Coût de Transport Annuel et Optimisation pour Différents Scénarios	42
6.1	Introduction	42
6.2	Scénario Actuel	42

6.2.1	Train	43
6.2.2	Tram	43
6.2.3	Autobus	44
6.2.4	Autocar	44
6.2.5	Coût total pour le scénario actuel	44
6.3	Scénario avec Électrification du Transport	45
6.3.1	Train	45
6.3.2	Tram	45
6.3.3	Autobus	46
6.3.4	Autocar	46
6.3.5	Coût total pour le scénario avec électrification	47
6.4	Optimisation	47
6.4.1	Fonction objectif	47
6.4.2	Contraintes	47
6.5	Résultats de l'Optimisation	48
6.5.1	Valeurs des Variables de Décision	48
6.5.2	Valeur de la Fonction Objectif	49
6.5.3	Discussion des Résultats	49
6.6	Conclusion	50
7	Conclusion	51

List of Figures

1.1	Organigramme du Ministère de la Transition Énergétique et du Développement durable	3
1.2	Diagramme de GANTT	9
3.1	Consommation finale totale par secteur, Maroc, 2021	18
3.2	Consommation finale totale des transports par source, Maroc, 2021	19
3.3	Consommation finale d'électricité par secteur, Maroc, 2021	20
3.4	Émission CO2 par secteur, Maroc, 2021	20

List of Tables

6.1	Valeurs optimales des variables de décision pour chaque mode de transport et source d'énergie.	48
-----	--	----

Chapter 1

Cadre Général et Méthodologie du Travail

1.1 Introduction

Ce chapitre vise d'abord à présenter l'organisme d'accueil, le département de transition énergétique du ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable, en détaillant son histoire et ses activités, ainsi que la direction de stage "Direction de la Stratégie, des Prévisions, de la Prospection et de la Coopération". Ensuite, une description du projet sera fournie, incluant la problématique et les objectifs, suivie par l'explication du planning prévisionnel pour sa réalisation.

Historique

Le Département de la Transition Énergétique a été créé dans le cadre des efforts du gouvernement pour répondre aux défis énergétiques contemporains et pour promouvoir un développement durable. Il s'inscrit dans une longue tradition de gestion des ressources naturelles du pays, avec une attention particulière portée à l'adaptation aux évolutions technologiques et environnementales. Depuis sa création, il a constamment évolué pour intégrer les nouvelles exigences en matière de durabilité, d'innovation et de sécurité énergétique.

Missions et Activités

Le Département de la Transition Énergétique est chargé de plusieurs missions clés :

- **Élaboration et mise en œuvre de la politique énergétique** : Le Département définit et applique les politiques gouvernementales dans les domaines de l'énergie, des mines et de la géologie.
- **Tutelle et contrôle** : Il assure la supervision des entreprises et des établissements publics sous sa juridiction et contrôle les secteurs dépendant de son autorité conformément à la législation en vigueur.
- **Gestion et développement des ressources** : Le Département veille à la bonne gestion et au développement du patrimoine géologique, énergétique et minier du pays.
- **Recherche et prospection** : Il met en œuvre les orientations relatives à la recherche géologique et à la prospection des ressources du sol et du sous-sol.
- **Sécurité des approvisionnements** : Le Département prend les mesures nécessaires pour garantir la sécurité des approvisionnements énergétiques et généraliser l'accès aux services énergétiques.
- **Stockage stratégique et mesures d'urgence** : Il met en œuvre la politique de stockage stratégique et prend des mesures d'urgence en cas de crise.
- **Vision stratégique et prospective** : Le Département assure une vision stratégique pour le développement harmonieux des secteurs énergétique, minier et géologique.
- **Organisation des marchés énergétiques** : Il veille à l'organisation et au bon fonctionnement des marchés de l'électricité, du gaz et du pétrole, en favorisant l'intégration régionale et internationale.

- **Renforcement des échanges et concertation** : Le Département anime les actions de concertation avec les administrations, organismes et partenaires concernés.
- **Base de données et analyses stratégiques** : Il établit les bases de données nécessaires pour les analyses économiques et stratégiques et pour les études d'impact.
- **Promotion de l'ingénierie nationale et formation** : Il promeut l'ingénierie nationale dans les domaines énergétique, minier et géologique, et veille à la formation des capacités humaines et à la préparation des structures d'encadrement nécessaires.

Directions et Départements

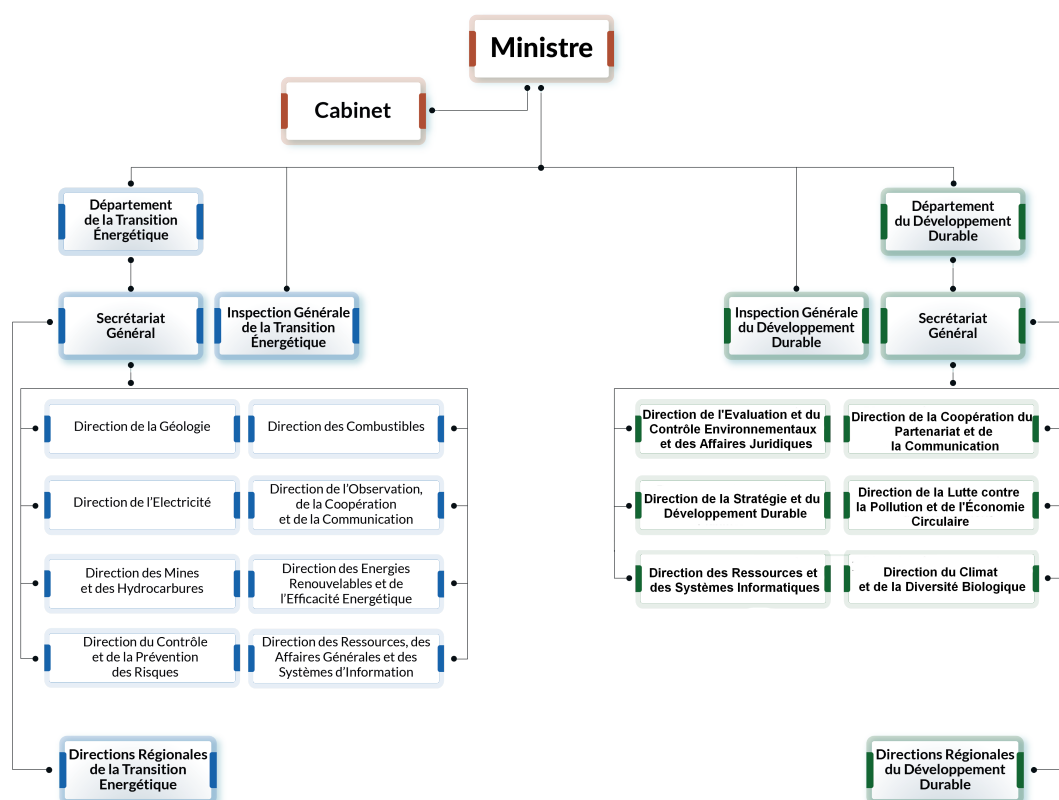


Figure 1.1: Organigramme du Ministère de la Transition Énergétique et du Développement durable

Projets et Initiatives

Le Département de la Transition Énergétique est impliqué dans plusieurs projets et initiatives visant à améliorer l'efficacité énergétique, promouvoir les énergies renouvelables et renforcer les infrastructures énergétiques. Parmi ces projets, on peut citer :

- **Électrification des zones rurales** : Programme visant à généraliser l'accès à l'électricité dans les zones rurales.
- **Transition vers les énergies renouvelables** : Projets de développement de l'énergie solaire, éolienne et hydraulique.
- **Modernisation des infrastructures énergétiques** : Initiatives pour moderniser les réseaux de distribution d'énergie.
- **Recherche et développement** : Programmes de recherche pour explorer de nouvelles technologies énergétiques.

Engagement International

Le Département de la Transition Énergétique est également engagé sur la scène internationale. Il participe activement aux forums et aux conventions internationales sur l'énergie et le climat. Il collabore avec divers organismes internationaux pour échanger des connaissances et des technologies, et pour aligner ses politiques avec les objectifs globaux de développement durable. Parmi les engagements internationaux, on peut citer :

- **Participation aux conférences des Nations Unies sur le climat** : Engagement à réduire les émissions de CO₂ et à adopter des énergies renouvelables.

- **Coopération régionale** : Partenariats avec les pays voisins pour le développement des interconnexions énergétiques.
- **Projets de coopération technique** : Collaboration avec des organisations internationales pour des projets de développement énergétique.

1.2 Contexte général du projet

Le Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable (MTEDD) du Maroc joue un rôle crucial dans la promotion des politiques énergétiques durables et la protection de l'environnement, visant à positionner le pays comme un leader en matière de transition énergétique. Avec l'émergence des préoccupations climatiques mondiales et l'importance croissante de l'innovation technologique, le Maroc s'engage à transformer ses infrastructures de transport public pour réduire son empreinte carbone et améliorer l'efficacité énergétique.

L'électrification du transport public est un pilier central de cette transformation. En exploitant des connaissances de modélisation mathématique et d'optimisation, le MTEDD cherche à analyser et optimiser la consommation énergétique des systèmes de transport public. Cette initiative vise à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre, à diminuer les coûts opérationnels et à améliorer la qualité de l'air dans les zones urbaines.

L'impact attendu est une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique des transports publics, tout en ouvrant la voie à de nouvelles applications des technologies de data science et de machine learning dans le secteur énergétique. Le succès de cette initiative pourrait également servir de modèle pour d'autres pays et régions cherchant à adopter des solutions de transport durable et innovante, renforçant ainsi le rôle du Maroc en tant que pionnier de la transition énergétique mondiale.

1.3 Problématique

Afin de maximiser l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre, le ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable - Département de Transition Énergétique envisage l'électrification des transports publics. Cependant, cette transition pose plusieurs défis, notamment en termes de collecte et d'analyse des données énergétiques, de modélisation prédictive, et de gestion des coûts opérationnels et environnementaux.

Pour répondre à cette problématique, plusieurs questions clés se posent :

- Quels types de données sont nécessaires pour analyser efficacement la consommation énergétique des systèmes de transport public, et comment peuvent-elles être collectées de manière exhaustive et fiable ?
- Comment peut-on modéliser et optimiser la consommation énergétique des transports publics électrifiés afin de minimiser les coûts et les émissions de CO₂, tout en assurant une efficacité opérationnelle et une fiabilité maximales ?
- Quels sont les impacts environnementaux et économiques à court et à long terme de l'électrification des transports publics, et comment peuvent-ils être quantifiés et atténués ?

En abordant ces questions, le projet vise à proposer des solutions concrètes et pragmatiques pour la mise en œuvre de l'électrification des transports publics au Maroc. L'objectif ultime est de réduire la consommation énergétique, de diminuer les émissions de CO₂, et de promouvoir des pratiques de transport durable, tout en assurant une efficacité opérationnelle accrue et une gestion optimisée des ressources.

1.4 Méthodologie de travail

Pour la planification et la gestion efficace de ce projet d'électrification du transport public, nous avons adopté la méthode Gantt. Cette approche nous permet de visualiser l'ensemble des tâches à accomplir, leurs dépendances, et les délais associés, sur une période de six semaines. La méthode Gantt est particulièrement adaptée pour les projets complexes impliquant de multiples phases et activités interdépendantes. Voici comment nous avons structuré notre planification :

1.4.1 Définition des Phases du Projet

Le projet est divisé en six phases principales :

- **Phase 1** : Préparation et Planification Initiale
- **Phase 2** : Collecte et Analyse des Données
- **Phase 3** : Modélisation Prédictive
- **Phase 4** : Optimisation et Scénarios
- **Phase 5** : Résultats et Évaluation
- **Phase 6** : Ajustements Finaux et Rapport

1.4.2 Détail des Tâches et Estimation des Durées

Chaque phase est décomposée en tâches spécifiques avec des estimations de durées :

- **Semaine 1** : Préparation et Planification Initiale

- Identification des parties prenantes (1 jour)
- Organisation de la réunion de démarrage (1 jour)
- Définition des objectifs du projet (2 jours)
- Établissement des indicateurs de performance (2 jours)
- **Semaine 2 : Collecte et Analyse des Données**
 - Collecte des données énergétiques actuelles (2 jours)
 - Collecte des données de consommation des transports publics (3 jours)
 - Analyse préliminaire des données collectées (2 jours)
- **Semaine 3 : Modélisation Prédictive**
 - Développement du modèle prédictif initial (3 jours)
 - Validation et ajustement du modèle (2 jours)
- **Semaine 4 : Optimisation et Scénarios**
 - Identification des variables d’optimisation (2 jours)
 - Simulation de différents scénarios d’optimisation (3 jours)
- **Semaine 5 : Résultats et Évaluation**
 - Sélection d’un secteur pilote pour l’implémentation (1 jour)
 - Implémentation pilote du modèle optimisé (3 jours)
 - Collecte et analyse des résultats de l’implémentation pilote (2 jours)
- **Semaine 6 : Ajustements Finaux et Rapport**
 - Ajustement du modèle et des stratégies basés sur les résultats de l’évaluation (3 jours)
 - Rédaction et présentation du rapport final du projet (3 jours)



Figure 1.2: Diagramme de GANTT

1.4.3 Création du Diagramme de Gantt

Un diagramme de Gantt est créé pour visualiser les phases et les tâches du projet, en indiquant les délais et les dépendances entre les tâches.

1.4.4 Outils Utilisés

- **Logiciel de Gestion de Projet** : Utilisation du logiciel "Trello" pour créer et gérer le diagramme de Gantt.
- **Communication** : Outils de communication et de collaboration "Outlook" pour assurer une coordination efficace entre les membres de l'équipe.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de dresser une présentation générale de notre projet d'électrification du transport public. Dans un premier temps, nous avons contextualisé notre travail au sein du Ministère de la Transition Énergétique et du Développement Durable - Département de la Transition Énergétique, en soulignant ses missions et son rôle crucial dans la promotion des politiques énergétiques durables. Ensuite, nous avons défini le cadre général du projet en formulant la problématique principale, identifiant les questions clés auxquelles nous devons répondre et fixant nos objectifs. Enfin, nous avons détaillé la méthodologie de travail, en particulier l'utilisation de la méthode Gantt pour la planification du projet sur six semaines, assurant ainsi une gestion rigoureuse et structurée. Cette méthodologie inclut la division du projet en phases, la définition des tâches spécifiques, et l'utilisation d'outils de gestion de projet pour suivre et ajuster les progrès réalisés. Cette approche nous prépare à aborder les prochaines étapes du projet de manière organisée et efficace.

Chapter 2

Revue de Littérature et Fondements

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature pertinente et établit les fondements théoriques nécessaires pour comprendre et aborder la problématique de l'électrification du transport public. Cette revue de littérature est structurée autour des thèmes principaux suivants : l'état actuel de l'électrification des transports publics, les techniques utilisées pour l'analyse de la consommation énergétique, et les méthodes d'optimisation et de recherche opérationnelle appliquées aux transports.

2.2 État des Lieux de l'Électrification des Transports Publics

2.2.1 Électrification des Transports : Avantages et Défis

L'électrification des transports publics est une tendance mondiale visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer la qualité de l'air. Plusieurs études montrent que les véhicules électriques (VE) présentent des avantages significatifs en termes de réduction des coûts d'exploitation et d'entretien comparés aux véhicules à combustion interne. Toutefois, des défis subsistent, notamment en matière de coûts initiaux élevés, d'infrastructure de recharge et de gestion des batteries.

2.2.2 Études de Cas Internationaux

Des villes comme Oslo, Shenzhen et Paris ont déjà entrepris des initiatives d'électrification des transports publics avec des résultats variés. Ces études de cas fournissent des insights précieux sur les meilleures pratiques, les erreurs à éviter et les impacts mesurables sur la consommation énergétique et les émissions de CO₂.

2.3 Techniques de Data Science et Machine Learning pour l'Analyse de la Consommation Énergétique

2.3.1 Algorithmes de Prédiction

La prédiction de la consommation énergétique des véhicules électriques peut être réalisée à l'aide de divers algorithmes de machine learning, tels que la régression linéaire, les forêts aléatoires, et les réseaux de neurones. Ces techniques permettent de modéliser les relations complexes entre les variables influençant la consommation énergétique, telles que les conditions de conduite, les caractéristiques des véhicules et les conditions météorologiques.

2.3.2 Analyse de Séries Temporelles

Les méthodes d'analyse de séries temporelles, telles que ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), sont utilisées pour capturer les tendances et les patterns dans les données de consommation énergétique sur des périodes prolongées. Ces méthodes sont cruciales pour anticiper les fluctuations et planifier la demande énergétique.

2.4 Optimisation et Recherche Opérationnelle

2.4.1 Techniques d'Optimisation pour l'Allocation des Ressources

L'optimisation des itinéraires et des horaires des véhicules électriques est essentielle pour maximiser l'efficacité énergétique. Des techniques comme la programmation linéaire, la programmation par contraintes et la programmation non linéaire sont couramment utilisées pour résoudre ces problèmes complexes.

2.4.2 Algorithmes de Recherche Opérationnelle

Les algorithmes de recherche opérationnelle, tels que l'algorithme du plus court chemin, l'algorithme de Dijkstra et les problèmes des flots, sont utilisés pour optimiser les itinéraires en tenant compte des contraintes de temps, de distance et de consommation énergétique. Ces algorithmes permettent de développer des solutions pratiques pour les réseaux de transport public.

2.5 Implications Environnementales et Économiques

2.5.1 Réduction des Émissions de CO₂

L'électrification des transports publics a un impact direct sur la réduction des émissions de CO₂, contribuant ainsi aux objectifs climatiques nationaux et internationaux. Des études montrent que les VE peuvent réduire les émissions de CO₂ de 30% à 50% par rapport aux véhicules à combustion interne.

2.5.2 Coûts et Bénéfices Économiques

L'analyse coûts-bénéfices de l'électrification des transports publics inclut l'évaluation des coûts initiaux d'acquisition des VE, des infrastructures de recharge, et des économies réalisées grâce à la réduction des coûts d'exploitation et d'entretien. Les bénéfices économiques sont également évalués en termes de gains de productivité et de santé publique.

2.6 Outils et Environnements de Travail

2.6.1 Python et Bibliothèques Utilisées

Pour ce projet, Python a été choisi comme langage de programmation principal en raison de sa flexibilité, de sa puissance et de sa large adoption dans les domaines de la data science et du machine learning. Les bibliothèques suivantes ont été utilisées :

- **NumPy** : pour les opérations mathématiques et le traitement de tableaux.
- **Pandas** : pour la manipulation et l'analyse des données.
- **Matplotlib** et **Seaborn** : pour la visualisation des données.
- **Scikit-learn** : pour les algorithmes de machine learning.
- **TensorFlow** : pour la construction et l'entraînement de modèles de réseaux de neurones.
- **Statsmodels** : pour l'analyse de séries temporelles.
- **CPLEX** : pour les problèmes de programmation linéaire.
- **AMPL** : pour les problèmes de programmation non linéaire.

- **NetworkX** : pour l'analyse et la visualisation de graphes et de réseaux.

Ces outils et bibliothèques nous ont permis de mener à bien les différentes étapes du projet, de la collecte et l'analyse des données à la modélisation, l'optimisation et la visualisation des résultats.

2.7 Conclusion

Cette revue de la littérature met en lumière les avantages, les défis et les méthodologies associées à l'électrification des transports publics. Les techniques de data science et de machine learning, ainsi que les méthodes d'optimisation et de recherche opérationnelle, jouent un rôle crucial dans l'analyse et l'amélioration de la consommation énergétique. Les implications environnementales et économiques soulignent l'importance de cette transition pour le développement durable. Les enseignements tirés de cette revue guideront les étapes ultérieures de notre projet, en nous fournissant une base solide pour développer des solutions efficaces et innovantes.

Chapter 3

Le Transport et la Consommation Énergétique

3.1 Introduction au Transport

Le transport est une composante essentielle de la vie moderne, jouant un rôle crucial dans le développement économique et social des nations. Il englobe divers modes de déplacement, tels que les transports terrestres, maritimes et aériens, permettant la circulation des biens et des personnes. En raison de son importance, le secteur du transport est également un grand consommateur d'énergie et un contributeur significatif aux émissions de gaz à effet de serre (GES).

3.2 Le Transport Public (Collectif)

Le transport public, ou transport collectif, désigne les services de transport offerts au grand public, habituellement sur une base régulière, incluant les bus, les trains, les trams, les métros et les taxis collectifs. Ce type de transport offre une alternative économique et écologique aux véhicules individuels, permettant de réduire la congestion routière et les émissions de GES.

Le transport public joue un rôle crucial dans l'aménagement du territoire et le développement durable. En optimisant les déplacements et en améliorant l'accessibilité, il contribue à la réduction de la consommation énergétique globale et à la limitation de l'empreinte carbone des déplacements quotidiens.

3.3 Le Transport Public au Maroc

Au Maroc, le transport public est un secteur clé pour la mobilité des citoyens, particulièrement dans les grandes villes comme Casablanca, Rabat et Marrakech. Le réseau de transport public comprend les bus, les tramways, les autocars et les trains. Le développement du transport public au Maroc vise à répondre à la demande croissante de mobilité urbaine et à réduire la dépendance aux véhicules privés.

3.3.1 Les Modes de Transport Public au Maroc

Au Maroc, le transport public est principalement assuré par les bus, les taxis collectifs, les tramways et les trains. Chaque mode a ses spécificités :

- **Bus** : Le réseau de bus est vaste, couvrant les zones urbaines et rurales. Les bus sont un moyen de transport crucial pour de nombreuses personnes, bien que le réseau souffre parfois de surpopulation et de retards.
- **Autocars** : Les autocars transportent des passagers sur des itinéraires fixes et sont populaires dans les zones où les lignes de train sont moins fréquentes.
- **Tramways** : Les villes comme Rabat et Casablanca ont investi dans des systèmes de tramway modernes, offrant une alternative efficace et moins polluante aux bus et aux

taxis.

- **Trains** : L'Office National des Chemins de Fer (ONCF) gère le réseau ferroviaire marocain, qui comprend des trains régionaux et à grande vitesse, comme l'Al Boraq, reliant les principales villes.

3.3.2 Situation Énergétique du Transport au Maroc

Le secteur des transports au Maroc est un des principaux consommateurs d'énergie et contribue significativement aux émissions de gaz à effet de serre. La consommation énergétique du secteur est principalement dominée par les énergies fossiles, notamment le diesel et l'essence.

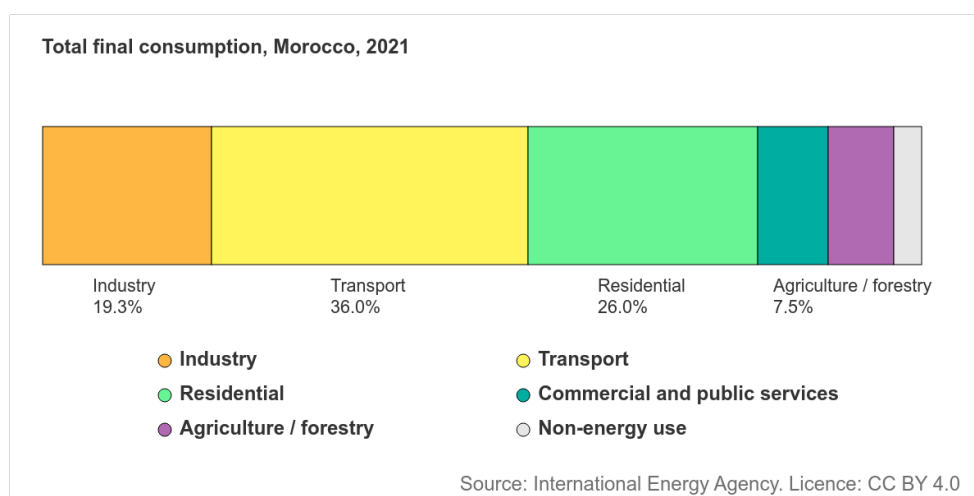


Figure 3.1: Consommation finale totale par secteur, Maroc, 2021

Voici quelques éléments clés sur la situation énergétique :

- **Dépendance aux Combustibles Fossiles** : La majorité des véhicules de transport public au Maroc, notamment les bus et les taxis, fonctionnent au diesel. Cette

dépendance aux combustibles fossiles entraîne une forte consommation d'énergie et des émissions de CO2 élevées.

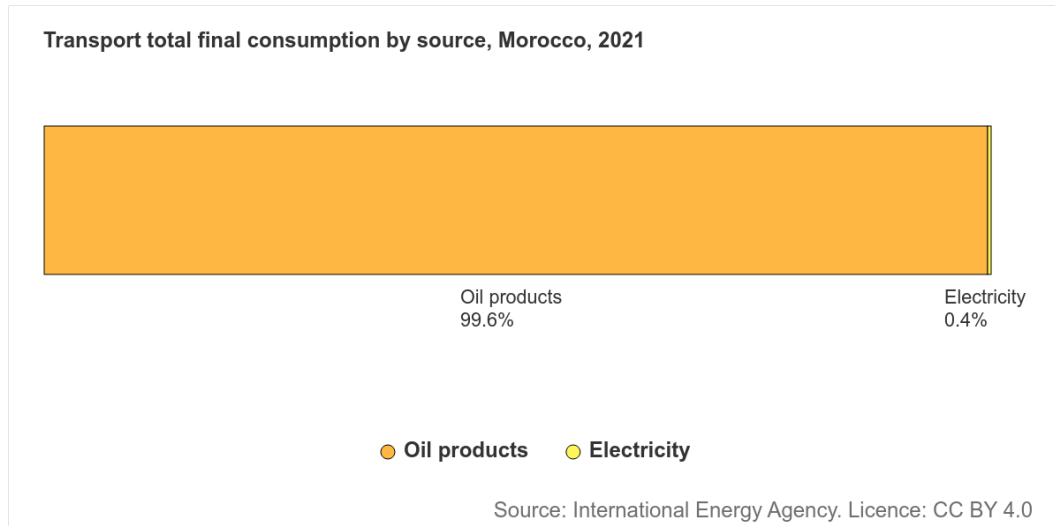


Figure 3.2: Consommation finale totale des transports par source, Maroc, 2021

- **Électrification des Transports :** Le Maroc a commencé à investir dans l'électrification de certains modes de transport, comme les tramways à Rabat et Casablanca, et les trains à grande vitesse. Ces initiatives visent à réduire la consommation de combustibles fossiles et les émissions associées.

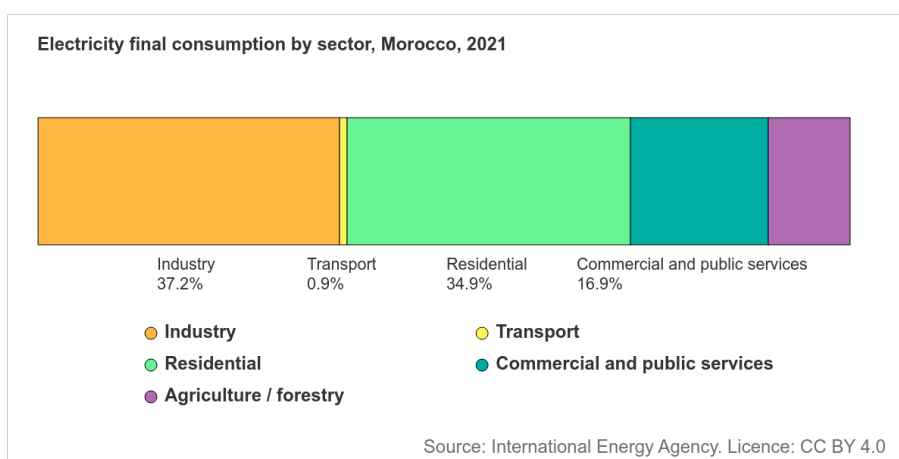


Figure 3.3: Consommation finale d'électricité par secteur, Maroc, 2021

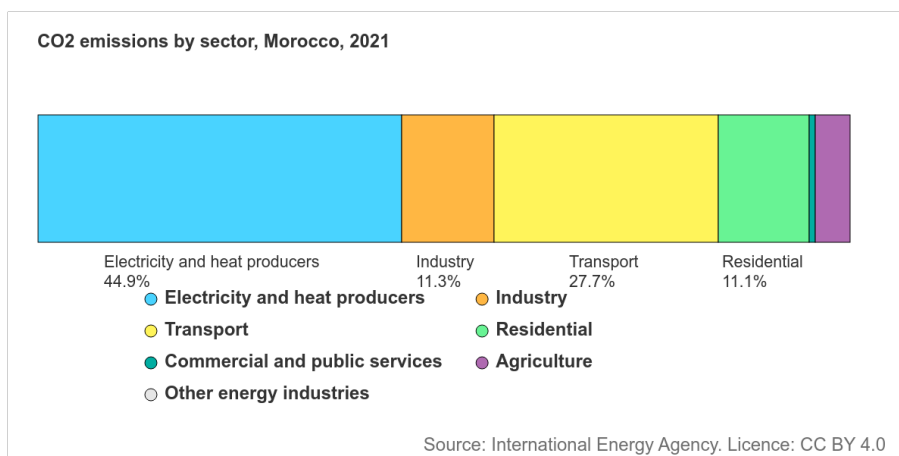


Figure 3.4: Émission CO2 par secteur, Maroc, 2021

- **Efficacité Énergétique :** Les véhicules électriques, tels que les tramways et les trains électriques, offrent une meilleure efficacité énergétique par passager-kilomètre comparé aux véhicules fonctionnant aux combustibles fossiles. Toutefois, leur adoption reste limitée et nécessite des investissements importants en infrastructures.
- **Initiatives pour les Énergies Renouvelables :** Le Maroc mise sur le développement des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et éolienne, pour alimenter en partie ses systèmes de transport électrique. Ceci fait partie d'une stratégie plus large pour diversifier ses sources d'énergie et réduire sa dépendance aux importations de combustibles fossiles.
- **Politiques et Stratégies :** Le gouvernement marocain a mis en place plusieurs politiques et stratégies pour promouvoir un transport plus durable. Cela inclut des incitations pour les véhicules électriques, des investissements dans les infrastructures de transport public et des campagnes de sensibilisation pour encourager l'utilisation du transport public.

3.4 Le Rôle du Transport Public dans la Consommation Énergétique au Maroc

Le transport public, en particulier, joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la consommation énergétique nationale pour plusieurs raisons :

- **Efficacité Énergétique :** Les véhicules de transport public, en transportant de nombreux passagers, consomment moins d'énergie par passager-kilomètre par rapport aux véhicules privés. Par exemple, un bus ou un tramway peut transporter l'équivalent

de plusieurs dizaines de voitures individuelles, réduisant ainsi la consommation totale d'énergie.

- **Réduction des Émissions de CO₂ :** En remplaçant les trajets en voitures particulières, le transport public contribue à réduire les émissions globales de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres polluants.
- **Transition vers des Énergies Renouvelables :** Le Maroc a entrepris des initiatives pour intégrer des sources d'énergie renouvelable dans le secteur des transports publics. Les tramways électriques, par exemple, bénéficient indirectement de la production croissante d'électricité à partir de sources renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne.
- **Développement d'Infrastructures Durables :** Les investissements dans des infrastructures de transport public modernes et durables, telles que les systèmes de tramway et les lignes de train à grande vitesse, sont essentiels pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et promouvoir une mobilité plus verte.

3.4.1 Initiatives et Mesures Réalisées

Pour faire face à ces défis, le Maroc a entrepris plusieurs initiatives pour promouvoir la mobilité électrique et durable :

- **Infrastructure de Recharge:** 20 points de recharge sont désormais disponibles pour les utilisateurs de véhicules électriques dans différentes stations des autoroutes du Maroc, couvrant plus de 1200 km dans les deux sens du trafic.
- **Production Locale:** Inauguration d'une nouvelle ligne de production de bornes de recharge pour véhicules électriques 100% marocaine.

- **Études de Faisabilité:** Réalisation d'études de faisabilité pour le développement de la mobilité durable et l'utilisation de transports électriques.
- **Accompagnement des Institutions Publiques:** Accompagnement des institutions publiques dans la mise en œuvre de mesures de rationalisation énergétique dans le secteur du transport.
- **Normes Antipollution:** Entrée en vigueur de la norme antipollution Euro 6 à partir de janvier 2022.
- **Formations et Sensibilisation:** Organisation de sessions de formation sur l'éconduite pour les chauffeurs professionnels et des campagnes de sensibilisation sur la mobilité durable.
- **Exonérations Fiscales:** Exonération de la taxe annuelle sur les voitures électriques et hybrides.

3.4.2 Objectifs Futurs

Le Maroc s'oriente résolument vers une mobilité électrique et durable, en tant qu'alternative efficace à la mobilité conventionnelle. L'objectif est de réduire la dépendance aux énergies fossiles, diminuer les émissions de GES et promouvoir l'utilisation de sources d'énergie renouvelable dans le secteur du transport.

3.5 Conclusion

Le transport public au Maroc joue un rôle crucial dans la gestion de la demande de mobilité et la réduction de la consommation d'énergie. En investissant dans des systèmes de transport

public efficaces et durables, le Maroc peut non seulement améliorer la qualité de vie de ses citoyens, mais aussi contribuer de manière significative à la réduction de son empreinte carbone et à la protection de l'environnement. La transition vers des modes de transport plus écologiques, soutenue par des politiques et des infrastructures appropriées, est essentielle pour un développement durable à long terme.

Chapter 4

Modélisation du Coût Total de Transport

4.1 Introduction des Modes de Transport

Le transport public au Maroc comprend divers modes de transport, chacun ayant ses propres caractéristiques et secteurs d'opération. Dans le cadre de cette étude, Les principaux modes de transport considérés sont :

- **Train** : Utilisé principalement pour les trajets interurbains. Les trains peuvent être électriques ou fonctionner au carburant.
- **Autocar** : Utilisé pour les trajets interurbains, principalement alimenté par du carburant.
- **Tram** : Utilisé dans les zones urbaines, alimenté par l'électricité.
- **Autobus** : Utilisé pour les trajets urbains, peut être alimenté par de l'électricité ou du carburant.

4.2 Variables de Décision

Les variables de décision sont les nombres de véhicules pour chaque mode de transport et chaque source d'énergie :

$$N_{train,elec}, N_{train,carburant}, N_{autocar,carburant}, N_{tram,elec}, N_{autobus,elec}, N_{autobus,carburant}$$

4.3 Paramètres

Les paramètres nécessaires pour modéliser le coût total du transport comprennent :

- **Distance totale parcourue** (D_t) : La distance totale annuelle parcourue par chaque type de véhicule. Elle peut être estimée en multipliant le nombre de véhicules par la distance moyenne parcourue par véhicule par an.
- **Consommation unitaire** (C_u) : La quantité d'énergie consommée par kilomètre pour chaque type de véhicule. Cette donnée est souvent disponible à partir des spécifications techniques des véhicules.
- **Nombre de passagers** (P_t) : Le nombre total de passagers transportés par an pour chaque type de véhicule.
- **Prix de la source d'énergie** (P_e) : Le coût par unité d'énergie (kWh pour l'électricité, litres pour le carburant).

4.4 Frais d'Infrastructure

Les véhicules électriques nécessitent des infrastructures spécifiques, comme des stations de recharge. Les frais d'infrastructure (F_i) sont donc un paramètre important à considérer pour les véhicules électriques :

$$F_{i,tram}, F_{i,autobus_elec}, F_{i,train_elec}$$

4.5 Frais d'Acquisition et de Maintenance

Les frais d'acquisition (F_a) et de maintenance (F_m) pour chaque type de véhicule doivent également être pris en compte :

$$F_{a,train}, F_{a,autocar}, F_{a,tram}, F_{a,autobus_elec}, F_{a,autobus_carburant}$$

$$F_{m,train}, F_{m,autocar}, F_{m,tram}, F_{m,autobus_elec}, F_{m,autobus_carburant}$$

4.6 Autres Frais

Les autres frais peuvent inclure les frais opérationnels, les frais de personnel, les frais d'assurance, etc. (F_o).

4.7 Modèle Complet du Coût Total de Transport

L'objectif est de minimiser le coût total annuel de transport, C_{total} , défini comme :

$$C_{total} = \sum_t (N_{v,t,elec} \times C_{u,t,elec} \times D_t \times P_{e,elec} + N_{v,t,carburant} \times C_{u,t,carburant} \times D_t \times P_{e,carburant}) \\ + \sum_{t,elec} (F_{i,t} \times N_{v,t,elec}) + \sum_t (F_{a,t} + F_{m,t} + F_{o,t})$$

4.8 Contraintes

- Satisfaction de la Demande :

$$\sum_{t \in \text{urbain}} (N_{v,t,elec} \times P_t + N_{v,t,carburant} \times P_t) \geq D_{urbain} \\ \sum_{t \in \text{interurbain}} (N_{v,t,elec} \times P_t + N_{v,t,carburant} \times P_t) \geq D_{interurbain}$$

- Nombre Minimum de Véhicules :

$$N_{v,t,elec} + N_{v,t,carburant} \geq N_{min,t} \quad \forall t$$

- Nombre Maximum de Véhicules Disponibles :

$$N_{v,t,elec} + N_{v,t,carburant} \leq N_{max,t} \quad \forall t$$

- Non-négativité :

$$N_{v,t,s} \geq 0 \quad \forall t, \forall s$$

Les paramètres et les frais associés doivent être annualisés sur leurs durées de vie ou bien sur l'horizon de l'investissement. En guise de simplicité, cet horizon sera fixé sur 20 ans.

Chapter 5

Analyse Exploratoire des Données du Transport Public

Introduction

Ce chapitre présente une analyse exploratoire des données relatives aux différents modes de transport public. L'objectif est de comprendre les caractéristiques uniques de chaque mode, estimer leur consommation d'énergie et identifier les frais associés. Cette analyse nous permettra de déterminer les valeurs des paramètres nécessaires pour le modèle de coût total de transport public.

5.1 Train

5.1.1 Caractéristiques du Mode de Transport

Le transport ferroviaire est un pilier essentiel du réseau interurbain. Les trains, fonctionnant soit à l'électricité, soit au carburant, jouent un rôle crucial dans le transport de passagers sur de longues distances.

5.1.2 Consommation et Frais Associés

- **Consommation Énergétique** : Calculée en fonction du pourcentage de lignes électrifiées, du nombre de trains, de la longueur totale des lignes, et du volume de transport (voyageurs-km).
- **Frais d'Infrastructure** : Les trains électriques nécessitent des infrastructures coûteuses comme les caténaires et les sous-stations.
- **Frais de Maintenance et d'Acquisition** : Dépendent de la fréquence d'utilisation et de la technologie embarquée.

5.1.3 Analyse Exploratoire des Données

Les données fournies par l'ONCF (Office National des Chemins de Fer du Maroc) nous permettent d'effectuer une analyse approfondie de la distance totale parcourue par les trains et de la consommation énergétique associée. Voici comment nous pouvons utiliser ces informations pour calculer la consommation totale annuelle de transport en fonction de divers facteurs.

Données de base de l'ONCF

- **Volume de transport** : 6,12 milliards de voyageurs-km
- **Places offertes** : 38,75 millions
- **Nombre de trains circulés** : 77 097
- **Locomotives Diesel** : 105
- **Locomotives Électriques** : 156

- **Longueur des lignes Électriques** : 1473 km
- **Longueur des lignes Thermiques** : 822 km

Calcul de la distance annuelle parcourue par chaque train

En utilisant les données ci-dessus, nous avons calculé la distance totale parcourue par tous les trains :

$$\text{Distance totale parcourue} = \frac{\text{Volume de transport (voyageurs-km)}}{\text{Nombre total de voyageurs}} \times \text{Nombre total de trains}$$

La distance moyenne parcourue par chaque voyageur est d'environ 158 km. Ainsi, en multipliant cette distance moyenne par le nombre total de trains circulés, nous obtenons la distance totale parcourue :

$$\text{Distance totale parcourue par tous les trains} = 158 \text{ km/train} \times 77\,097 \text{ trains} \approx 12\,180\,326 \text{ km}$$

$$\text{Distance annuelle parcourue par chaque train} = \frac{12\,180\,326}{108 \text{ trains}} \approx 112\,780 \text{ km}$$

Consommation unitaire par type de train

Supposons les consommations unitaires suivantes :

- **Trains électriques** : 0,25 kWh/km
- **Trains thermiques** : 3 litres/km

Prix de l'énergie

- Électricité : 1 MAD/kWh
- Carburant thermique : 12 MAD/litre

Frais d'acquisition

- Prix d'acquisition d'une locomotive électrique (annualisé) : 4 MMAD
- Prix d'acquisition d'une locomotive Diesel (annualisé) : 2 MMAD

Frais d'infrastructure

- Coût de construction des lignes électriques (annualisé) : 1,6 MMAD/km
- Coût de construction des lignes thermiques (annualisé) : 0,4 MMAD/km

Frais de maintenance

- Coût de maintenance d'une locomotive électrique (annualisé) : 1 MMAD
- Coût de maintenance d'une locomotive Diesel (annualisé) : 1,25 MMAD

5.2 Tram

Pour calculer le coût de consommation des trams en utilisant les informations fournies et en suivant le modèle déjà élaboré, nous allons procéder en plusieurs étapes. Nous devons calculer la distance totale parcourue par les trams, puis utiliser cette distance pour déterminer

la consommation énergétique annuelle en fonction de la consommation unitaire et du prix de l'électricité.

5.2.1 Données Fournies

- Longueur totale des lignes : 74,5 km (2,5 rames par kilomètre)
- Nombre de rames : 190
- Fréquentation : 131,3 millions de passagers par an
- Vitesse moyenne : 20 km/h

5.2.2 Hypothèses Additionnelles

- Consommation unitaire électrique : $C_{u,\text{tram}, \text{électrique}}$ (en kWh/km)
- Prix de l'électricité : P_e (en MAD/kWh)
- Distance totale parcourue : basée sur les heures d'opération annuelles et la vitesse moyenne

5.2.3 Calculs

Distance Totale Parcourue Pour estimer la distance totale parcourue par les trams en une année, nous devons estimer le nombre d'heures d'opération par jour et le nombre de jours de service par an.

Supposons :

- Nombre d'heures d'opération par jour : 16 heures (de 6h à 22h)

- Nombre de jours de service par an : 365 jours

La distance totale parcourue par un tram en un jour est :

$$\text{Distance quotidienne} = \text{Vitesse moyenne} \times \text{Heures d'opération}$$

La distance totale parcourue par un tram en une année est :

$$\text{Distance annuelle} = \text{Distance quotidienne} \times \text{Nombre de jours de service}$$

5.2.4 Formule Complète

Intégrons les hypothèses pour obtenir les formules complètes.

Distance Quotidienne

$$\text{Distance quotidienne} = 20 \text{ km/h} \times 16 \text{ heures/jour} = 320 \text{ km/jour}$$

Distance Annuelle par Rame

$$\text{Distance annuelle par rame} = 320 \text{ km/jour} \times 365 \text{ jours/an} = 116800 \text{ km/an}$$

Consommation unitaire par rame

Supposons la consommation unitaire suivante :

- **Trams électriques** : 2,5 kWh/km

Prix de l'énergie

- **Électricité** : 1 MAD/kWh

Frais d'acquisition

- **Prix d'acquisition d'une rame électrique (annualisé) : 1,5 MMAD**

Frais d'infrastructure

- **Coût de construction des lignes électriques (annualisé) : 6 MMAD/km**

Frais de maintenance

- **Coût de maintenance d'une rame électrique (annualisé) : 0,7 MMAD**

5.3 Autobus

Pour calculer le coût de consommation des autobus en utilisant les informations fournies et en suivant le modèle déjà élaboré, nous allons procéder en plusieurs étapes. Nous devons calculer la distance totale parcourue par les autobus, puis utiliser cette distance pour déterminer la consommation énergétique annuelle en fonction de la consommation unitaire et du prix de l'électricité ou du carburant.

5.3.1 Données Fournies

- Nombre de véhicules électriques : 0
- Nombre de véhicules à diesel : 3203
- Vitesse moyenne : 20 km/h

5.3.2 Hypothèses Additionnelles

- Consommation unitaire électrique/carburant : $C_{u,\text{autobus}, \text{électrique/carburant}}$ (en kWh/km ou en l/km)
- Prix de l'électricité ou du carburant : $P_{e,\text{elec/carburant}}$ (en MAD/kWh ou en MAD/l)
- Distance totale parcourue : basée sur les heures d'opération annuelles et la vitesse moyenne

5.3.3 Calculs

Distance Totale Parcourue Pour estimer la distance totale parcourue par les autobus en une année, nous devons estimer le nombre d'heures d'opération par jour et le nombre de jours de service par an.

Supposons :

- Nombre d'heures d'opération par jour : 16 heures (de 6h à 22h)
- Nombre de jours de service par an : 365 jours

La distance totale parcourue par un autobus en un jour est :

$$\text{Distance quotidienne} = \text{Vitesse moyenne} \times \text{Heures d'opération}$$

La distance totale parcourue par un autobus en une année est :

$$\text{Distance annuelle} = \text{Distance quotidienne} \times \text{Nombre de jours de service}$$

5.3.4 Formule Complète

Intégrons les hypothèses pour obtenir les formules complètes.

Distance Quotidienne

$$\text{Distance quotidienne} = 20 \text{ km/h} \times 16 \text{ heures/jour} = 320 \text{ km/jour}$$

Distance Annuelle par Autobus

$$\text{Distance annuelle par autobus} = 320 \text{ km/jour} \times 365 \text{ jours/an} = 116800 \text{ km/an}$$

Consommation unitaire par autobus

Supposons la consommation unitaire suivante :

- **Autobus électriques** : 1,6 kWh/km
- **Autobus thermiques** : 0,6 l/km

Prix de l'énergie

- **Électricité** : 1 MAD/kWh
- **Carburant** : 12 MAD/kWh

Frais d'acquisition

- **Prix d'acquisition d'un autobus électrique (annualisé)** : 0,64 MMAD
- **Prix d'acquisition d'un autobus à diesel (annualisé)** : 0,32 MMAD

Frais d'infrastructure

- **Coût de construction des lignes électriques (annualisé)** : 0,4 MMAD/km (pour une proportion de 5 km de lignes par autobus)

Frais de maintenance

- **Coût de maintenance d'un autobus électrique (annualisé)** : 0,25 MMAD
- **Coût de maintenance d'un autobus à diesel (annualisé)** : 0,4 MMAD

5.4 Autocar

Pour calculer le coût de consommation des autocars en utilisant les informations fournies et en suivant le modèle déjà élaboré, nous allons procéder en plusieurs étapes. Nous devons calculer la distance totale parcourue par les trams, puis utiliser cette distance pour déterminer la consommation énergétique annuelle en fonction de la consommation unitaire et du prix du carburant.

5.4.1 Données Fournies

- Nombre de véhicules à diesel : 2400
- Vitesse moyenne : 60 km/h

5.4.2 Hypothèses Additionnelles

- Consommation unitaire carburant : $C_{u, \text{autocar, carburant}}$ (en l/km)

- Prix du carburant : P_e (en MAD/l)
- Distance totale parcourue : basée sur les heures d'opération annuelles et la vitesse moyenne

5.4.3 Calculs

Distance Totale Parcourue Pour estimer la distance totale parcourue par les autocars en une année, nous devons estimer le nombre d'heures d'opération par jour et le nombre de jours de service par an.

Supposons :

- Nombre d'heures d'opération par jour : 8 heures
- Nombre de jours de service par an : 365 jours

La distance totale parcourue par un autocar en un jour est :

$$\text{Distance quotidienne} = \text{Vitesse moyenne} \times \text{Heures d'opération}$$

La distance totale parcourue par un autocar en une année est :

$$\text{Distance annuelle} = \text{Distance quotidienne} \times \text{Nombre de jours de service}$$

5.4.4 Formule Complète

Intégrons les hypothèses pour obtenir les formules complètes.

Distance Quotidienne

$$\text{Distance quotidienne} = 60 \text{ km/h} \times 8 \text{ heures/jour} = 480 \text{ km/jour}$$

Distance Annuelle par Autocar

$$\text{Distance annuelle par autocar} = 480 \text{ km/jour} \times 365 \text{ jours/an} = 175200 \text{ km/an}$$

Consommation unitaire par autocar

Supposons la consommation unitaire suivante :

- **Autocar thermique** : 0,8 l/km

Prix de l'énergie

- **Carburant** : 12 MAD/kWh

Frais d'acquisition

- **Prix d'acquisition d'un autocar à diesel (annualisé)** : 0,32 MMAD

Frais d'infrastructure

- -

Frais de maintenance

- **Coût de maintenance d'un autocar à diesel (annualisé)** : 0,4 MMAD

Conclusion

Cette analyse détaillée permet de mieux comprendre les spécificités de chaque mode de transport public et fournit les éléments nécessaires pour estimer les paramètres du modèle de coût total. Ces informations sont essentielles pour élaborer une stratégie de transport durable et économique.

Chapter 6

Calcul du Coût de Transport Annuel et Optimisation pour Différents Scénarios

6.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'estimation du coût annuel de transport public sous différents scénarios. Nous allons d'abord calculer le coût annuel pour le scénario actuel, puis pour un scénario avec l'électrification du transport. Ensuite, nous présenterons une optimisation basée sur les variables de décision élaborées précédemment, afin de minimiser le coût total tout en répondant aux contraintes opérationnelles et environnementales.

6.2 Scénario Actuel

Dans le scénario actuel, les modes de transport utilisent principalement des véhicules fonctionnant aux carburants fossiles sauf pour le tram et le transport ferroviaire qui est électrifiée à 70 . Nous considérons les coûts de consommation énergétique, les frais d'infrastructure, les frais d'acquisition, et les frais de maintenance pour estimer le coût total annuel.

6.2.1 Train

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{fuel,train}} = N_{\text{train,fuel}} \times C_{u,\text{train,fuel}} \times D_{\text{train}} \times P_{\text{fuel}}$$

$$C_{\text{elec,train}} = N_{\text{train,elec}} \times C_{u,\text{train,elec}} \times D_{\text{train}} \times P_{\text{elec}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,train}} = F_{\text{acq,train}} + F_{\text{maint,train}} + F_{\text{other,train}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,train}} = C_{\text{fuel,train}} + C_{\text{elec,train}} + F_{\text{total,train}}$$

$$C_{\text{total,train}} \approx \mathbf{4\ 610\ 370\ 900\ MAD}$$

6.2.2 Tram

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{elec,tram}} = N_{\text{tram,elec}} \times C_{u,\text{tram,elec}} \times D_{\text{tram}} \times P_{\text{elec}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,tram}} = F_{\text{acq,tram}} + F_{\text{maint,tram}} + F_{\text{other,tram}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,tram}} = C_{\text{elec,tram}} + F_{\text{total,tram}}$$

$$C_{\text{total,tram}} \approx \mathbf{920\ 538\ 823\ MAD}$$

6.2.3 Autobus

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{fuel,autobus}} = N_{\text{autobus,fuel}} \times C_{u,\text{autobus,fuel}} \times D_{\text{autobus}} \times P_{\text{fuel}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,autobus}} = F_{\text{acq,autobus}} + F_{\text{maint,autobus}} + F_{\text{other,autobus}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,autobus}} = C_{\text{fuel,autobus}} + F_{\text{total,autobus}}$$

$$C_{\text{total,autobus}} \approx \mathbf{4\,999\,754\,880\,MAD}$$

6.2.4 Autocar

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{fuel,autocar}} = N_{\text{autocar,fuel}} \times C_{u,\text{autocar,fuel}} \times D_{\text{autocar}} \times P_{\text{fuel}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,autocar}} = F_{\text{acq,autocar}} + F_{\text{maint,autocar}} + F_{\text{other,autocar}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,autocar}} = C_{\text{fuel,autocar}} + F_{\text{total,autocar}}$$

$$C_{\text{total,autocar}} \approx \mathbf{884\,018\,880\,000\,000\,MAD}$$

6.2.5 Coût total pour le scénario actuel

$$C_{\text{total,actuel}} = C_{\text{total,train}} + C_{\text{total,tram}} + C_{\text{total,autobus}} + C_{\text{total,autocar}}$$

$$C_{\text{total,actuel}} \approx \mathbf{884\,020\,538\,845\,780\,MAD}$$

6.3 Scénario avec Électrification du Transport

Dans ce scénario, nous considérons l'usage accru de véhicules électriques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux énergies fossiles. Les calculs suivent la même logique que précédemment, mais les véhicules thermiques seront remplacés par les véhicules électriques.

6.3.1 Train

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{elec,train}} = N_{\text{train,elec}} \times C_{u,\text{train,elec}} \times D_{\text{train}} \times P_{\text{elec}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,train}} = F_{\text{acq,train}} + F_{\text{maint,train}} + F_{\text{other,train}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,train}} = C_{\text{elec,train}} + F_{\text{total,train}}$$

$$C_{\text{total,train}} \approx \mathbf{4\,254\,396\,840\,MAD}$$

6.3.2 Tram

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{elec,tram}} = N_{\text{tram,elec}} \times C_{u,\text{tram,elec}} \times D_{\text{tram}} \times P_{\text{elec}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,tram}} = F_{\text{acq,tram}} + F_{\text{maint,tram}} + F_{\text{other,tram}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,tram}} = C_{\text{elec,tram}} + F_{\text{total,tram}}$$

$$C_{\text{total,tram}} \approx \mathbf{920\,538\,823\,MAD}$$

6.3.3 Autobus

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{elec,autobus}} = N_{\text{autobus,elec}} \times C_{u,\text{autobus,elec}} \times D_{\text{autobus}} \times P_{\text{elec}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,autobus}} = F_{\text{acq,autobus}} + F_{\text{maint,autobus}} + F_{\text{other,autobus}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,autobus}} = C_{\text{elec,autobus}} + F_{\text{total,autobus}}$$

$$C_{\text{total,autobus}} \approx \mathbf{7\,292\,846\,640\,MAD}$$

6.3.4 Autocar

- Consommation énergétique :

$$C_{\text{fuel,autocar}} = N_{\text{autocar,fuel}} \times C_{u,\text{autocar,fuel}} \times D_{\text{autocar}} \times P_{\text{fuel}}$$

- Frais d'acquisition, de maintenance et autres frais :

$$F_{\text{total,autocar}} = F_{\text{acq,autocar}} + F_{\text{maint,autocar}} + F_{\text{other,autocar}}$$

- Coût total :

$$C_{\text{total,autocar}} = C_{\text{fuel,autocar}} + F_{\text{total,autocar}}$$

$$C_{\text{total,autocar}} \approx \mathbf{884\,018\,880\,000\,000\,MAD}$$

6.3.5 Coût total pour le scénario avec électrification

$$C_{\text{total,électrification}} = C_{\text{total,train}} + C_{\text{total,tram}} + C_{\text{total,autobus}} + C_{\text{total,autocar}}$$

$$C_{\text{total,électrification}} \approx \mathbf{884\,017\,814\,853\,480\,MAD}$$

6.4 Optimisation

D'après les résultats précédents, on remarque qu'une transition vers un transport électrique va réduire la facture énergétique par un montant de **2 723 992 300 MAD** sur l'horizon de 20 ans. Dans cette section, on souhaite réduire le coût total à ses limites tout en tenant compte des contraintes. L'optimisation donc vise à minimiser le coût total du transport public en choisissant le nombre optimal de chaque type de véhicule pour chaque source d'énergie.

6.4.1 Fonction objectif

$$\min_{N_{v,t,s}} C_{\text{total}} = C_{\text{elec}} + C_{\text{fuel}} + F_{\text{infra}} + F_{\text{acq}} + F_{\text{maint}} + F_{\text{other}}$$

6.4.2 Contraintes

- Nombre minimum et maximum de véhicules :

$$N_{\text{min},t} \leq N_{v,t,s} \leq N_{\text{max},t}$$

- Satisfaction de la demande de passagers :

$$\sum_t (N_{v,t,\text{elec}} + N_{v,t,\text{fuel}}) \times Cap_t \geq D_{\text{passagers}}$$

- **Limitation des émissions de GES :**

$$\sum_t (N_{v,t,\text{fuel}} \times E_{u,t,\text{fuel}} \times D_t) \leq Lim_{\text{GES}}$$

6.5 Résultats de l'Optimisation

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à partir de l'optimisation du modèle de coût total de transport public. Les valeurs des variables de décision, la valeur de la fonction objectif, ainsi qu'une discussion des résultats sont fournis. Les valeurs des paramètres des contraintes (Émission, limite de GES, et capacité de véhicule et demande passagers) sont prises à titre illustratif à fin de tester le modèle.

6.5.1 Valeurs des Variables de Décision

Les variables de décision optimales pour chaque mode de transport et chaque source d'énergie sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Mode de Transport	Source d'Énergie	Nombre de Véhicules
Train	Électrique	300
Train	Carburant	300
Tram	Électrique	1000
Autobus	Électrique	2350
Autobus	Carburant	0
Autocar	Carburant	4000

Table 6.1: Valeurs optimales des variables de décision pour chaque mode de transport et source d'énergie.

6.5.2 Valeur de la Fonction Objectif

La valeur minimale de la fonction objectif, représentant le coût total annuel de transport public optimisé, est :

$$C_{\text{total,optimisé}} = 1\,473\,365\,415\,108\,790 \text{ MAD}$$

6.5.3 Discussion des Résultats

Les résultats de l'optimisation montrent une répartition équilibrée entre les véhicules électriques et ceux utilisant des carburants fossiles. Les points suivants résument les principales observations issues de l'analyse des résultats :

- **Électrification significative** : Une proportion importante de trains, tramways et autobus est électrifiée, ce qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer la dépendance aux énergies fossiles.
- **Équilibre entre coûts et efficacité** : L'optimisation a permis de trouver un équilibre entre les coûts de consommation énergétique, les frais d'infrastructure, et les coûts de maintenance. Les véhicules électriques, bien que nécessitant des frais d'infrastructure initialement plus élevés, permettent des économies substantielles sur le long terme en termes de consommation énergétique.
- **Réduction des émissions** : En intégrant une proportion plus élevée de véhicules électriques, le modèle optimise non seulement les coûts mais également les impacts environnementaux, alignant ainsi les objectifs économiques avec les objectifs de durabilité.

- **Conformité aux contraintes** : Les contraintes opérationnelles et environnementales ont été respectées dans les solutions optimisées. Cela inclut la satisfaction de la demande de passagers et la limitation des émissions de gaz à effet de serre.
- **Frais d'infrastructure** : Les résultats soulignent l'importance des frais d'infrastructure pour les véhicules électriques, justifiant ainsi la nécessité de politiques de soutien et de subventions pour faciliter la transition vers des systèmes de transport plus durables.

En conclusion, l'optimisation montre qu'il est possible de réduire les coûts de transport public tout en adoptant des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement. Les résultats suggèrent également que des investissements dans les infrastructures pour les véhicules électriques sont cruciaux pour maximiser les bénéfices économiques et environnementaux à long terme.

6.6 Conclusion

Ce chapitre a détaillé la méthodologie pour calculer le coût total annuel du transport public sous différents scénarios et pour optimiser ce coût en tenant compte des variables de décision. Les scénarios analysés montrent les différences de coûts entre le maintien du système actuel et l'adoption d'une électrification plus poussée. L'optimisation permet de déterminer le nombre idéal de chaque type de véhicule afin de minimiser les coûts tout en respectant les contraintes opérationnelles et environnementales.

Chapter 7

Conclusion

Résumé du Projet

Ce projet s'est concentré sur l'optimisation du coût total du transport public au Maroc en tenant compte de divers modes de transport (trains, tramways, autobus et autocars) et de leurs sources d'énergie (électrique et carburant). Le secteur des transports, en particulier au Maroc, représente une part significative de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, la transition vers des solutions de transport plus durables est essentielle pour atteindre les objectifs de développement durable du pays.

Recommandations

Sur la base des résultats obtenus, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **Investissements en infrastructures** : Augmenter les investissements dans les infrastructures nécessaires pour les véhicules électriques, telles que les bornes de recharge, afin de faciliter la transition vers des transports plus durables.
- **Politiques de soutien** : Élaborer des politiques de soutien et des subventions pour encourager l'adoption de véhicules électriques, tant pour les opérateurs de transport public que pour les utilisateurs individuels.

- **Sensibilisation et formation** : Mettre en place des programmes de sensibilisation et de formation pour promouvoir les pratiques de conduite éco-responsables et informer sur les avantages de la mobilité durable.

Travaux Futurs

Bien que ce projet ait fourni une base solide pour l'optimisation des coûts de transport public, plusieurs avenues peuvent être explorées pour des recherches futures :

- **Modélisation plus détaillée** : Intégrer des modèles plus détaillés qui tiennent compte des variations temporelles et spatiales dans la demande de transport et les coûts énergétiques.
- **Disponibilité des données** : Avoir des données de transport correctes va compléter les travaux de modélisation. Des algorithmes de machine learning peuvent être utilisés afin d'avoir des estimations plus rigoureuses.
- **Scénarios alternatifs** : Examiner une gamme plus large de scénarios, y compris des politiques de tarification dynamique et des innovations technologiques dans les transports.
- **Évaluation de l'impact social** : Étudier l'impact social des différentes configurations de transport, y compris l'accessibilité et l'équité des services de transport public.

Conclusion

En conclusion, ce projet a démontré qu'il est possible d'optimiser les coûts du transport public tout en adoptant des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.

Les résultats suggèrent que des investissements stratégiques dans les infrastructures pour les véhicules électriques, soutenus par des politiques appropriées, peuvent apporter des bénéfices économiques et environnementaux significatifs. Le Maroc, en s'orientant vers une mobilité électrique et durable, peut non seulement réduire sa dépendance aux énergies fossiles mais également améliorer la qualité de vie de ses citoyens tout en contribuant à la lutte contre le changement climatique.

Bibliography

- [1] Haut Commissariat au Plan, *Annuaire statistique du Maroc 2023*, Rabat, Maroc, 2023.
- [2] Office National des Chemins de Fer (ONCF), *Rapport d'activité 2022*, Rabat, Maroc, 2022.
- [3] Ministère du Transport et de la Logistique, *Chiffres clés du transport routier*, Rabat, Maroc.
- [4] Office of Rail and Road, *Rail Emissions 2020-21*, London, UK.
- [5] Transport Urbain - l'Essentiel, *LE COUT DES PROJETS DE TRANSPORTS EN COMMUN ET DES AMENAGEMENTS DE VOIRIE 2006*.
- [6] Auteurs Thomas Delahais et Juliette Alouis (Quadrant Conseil), Philippe Bossard (Systra), *Évaluation ex post des impacts des tramways de Casablanca et de Rabat-Salé – 2020*, Rabat, Maroc.
- [7] International Energy Agency, <https://www.iea.org/>.
- [8] Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Transports_au_Maroc.