



RAPPORT SUR LA MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION

MODÈLE DE TRANSPORT NON URBAIN DE VOYAGEURS POUR LE MAROC

Forum International des Transports

Juin 2024

Le Forum international des transports

Le Forum International des Transports est une organisation intergouvernementale qui regroupe 69 pays membres. Il sert de laboratoire d'idées au service de la politique des transports et organise chaque année un sommet des ministres des transports. Le FIT est le seul organisme mondial qui couvre tous les modes de transport.

L'ITF œuvre en faveur de politiques de transport qui améliorent la vie des gens. Sa mission consiste à favoriser une meilleure compréhension de l'importance des transports pour la croissance économique, la durabilité environnementale et l'inclusion sociale, et à mieux faire connaître la politique des transports auprès du public.

Nous servons de plateforme de discussion et de pré-négociation des enjeux de la politique des transports, tous modes confondus. Nous analysons les tendances, mettons en commun les connaissances et favorisons les échanges entre les décideurs du secteur des transports et la société civile.

Les membres du Forum sont les suivants : Albanie, Allemagne, Arabie saoudite, Argentine, Arménie, Australie, Autriche, Azerbaïdjan, Belgique, Biélorussie, Bosnie-Herzégovine, Brésil, Bulgarie, Cambodge, Canada, Chili, Chine (République populaire de), Colombie, Corée, Costa Rica, Croatie, Danemark, Émirats arabes unis, Espagne, Estonie, États-Unis, Finlande, France, Géorgie, Grèce, Hongrie, Inde, Irlande, Islande, Israël, Italie, Japon, Kazakhstan, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Malte, Maroc, République de Macédoine du Nord, Mexique, République de Moldavie, Mongolie, Monténégro, Norvège, Nouvelle-Zélande, Oman, Ouzbékistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Fédération de Russie, Serbie, République dominicaine, République slovaque, Slovénie, Suède, Suisse, République tchèque, Tunisie, Türkiye, Ukraine et Royaume-Uni.

Forum international des transports
2 rue André Pascal
F-75775 Paris Cedex 16
contact@itf-oecd.org
www.itf-oecd.org

Résultats du projet ITF

Citez ce travail comme suit :

Table des matières

Un modèle stratégique pour le transport non urbain de voyageurs au Maroc	5
Données	5
Approche de la modélisation	7
Génération de déplacements	8
Répartition des voyages	11
Choix du mode	13
Modèle de stock de véhicules privés.....	14
Calculs CO ₂	18
Vue d'ensemble des mesures politiques du scénario	19
Résultats du scénario et évaluation de l'impact d'une mesure politique spécifique	23
Résultats des scénarios	23
Analyse d'impact d'une mesure politique spécifique : nouvelle ligne ferroviaire	26
Annexe	28

Un modèle stratégique pour le transport non urbain de voyageurs au Maroc

L'objectif principal du présent modèle est d'aider les décideurs politiques à définir et à évaluer les voies possibles vers la décarbonisation du secteur du transport de voyageurs au Maroc. Cet outil de modélisation se concentre sur le transport non urbain de voyageurs, un outil de modélisation distinct ayant été développé pour les zones urbaines marocaines. L'outil non-urbain de voyageurs permet d'identifier et de quantifier l'impact des options politiques sur les indicateurs de transport, tels que la répartition modale, l'intensité de carbone et les volumes de voyage.

L'outil développé a été conçu par le Forum international des transports (FIT) de l'OCDE pour être convivial et rapide. Il fonctionne sous Microsoft Excel.

L'outil sera remis au ministère marocain du transport et de la logistique, dans le cadre du projet Decarbonising Transport in Emerging Economies (DTEE)¹, financé par le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature, de la Sécurité Nucléaire et de la Protection des Consommateurs (VBMU).

Données

Cette section décrit les sources de données utilisées pour construire et calibrer le modèle.

Définitions géographiques

Le Maroc est divisé en 12 régions administratives et compte une population totale de 37 millions d'habitants. Rabat est la capitale, tandis que Casablanca est la plus grande ville du pays avec plus de 3,4 millions d'habitants. La zone d'étude de ce modèle comprend l'ensemble du pays, divisé en 12 régions. Le modèle estime l'activité de transport non urbain de voyageurs, y compris le transport intrarégional et interrégional (c'est-à-dire l'activité de transport à l'intérieur et entre les différentes régions) pour l'ensemble du pays. Il exclut le transport urbain de voyageurs dans les 25 plus grandes zones urbaines du pays, pour lesquelles un outil de modélisation distinct a été développé.

Données d'entrée pour la construction et l'étalonnage du modèle

L'ITF a utilisé des données d'entrée provenant de diverses sources pour construire le modèle. Ces sources de données peuvent être regroupées en deux groupes principaux. Les données provenant des statistiques du Maroc et d'autres sources locales ; et les données provenant des modèles de transport mondiaux de l'ITF ou d'autres sources externes.

- Les données provenant des statistiques du Maroc ont été utilisées pour construire le modèle. Il s'agit d'informations sociodémographiques telles que la population par région, la population par groupe d'âge, le revenu moyen et le nombre de véhicules par région. Les informations sur la mobilité, telles que le nombre de déplacements par mode, les taux de déplacement par région et

¹ <https://www.itf-oecd.org/dtee>

le nombre total de voyageurs-kilomètres, proviennent de projets marocains antérieurs, principalement du "Schéma directeur de la mobilité nationale à l'horizon 2035" publié en 2015.

- Des données provenant du référentiel de données de l'ITF ou de sources externes ont également été utilisées. Par exemple, les temps de trajet en voiture privée ont été obtenus en utilisant l'API de Google directions pour les déplacements entre toutes les régions du Maroc. Les données sur la croissance future de la population et la composition par âge ont été tirées de l'UN-DESA, et la croissance future du PIB a été tirée des projections de l'OCDE. Ces données n'étaient disponibles qu'au niveau national ; les mêmes taux de croissance ont donc été supposés pour l'ensemble du pays. D'autres données pertinentes pour le Maroc, telles que les facteurs de charge et les facteurs d'émission pour les différents modes, sont basées sur les sources de données de l'ITF et validées par le consultant local de l'ITF au Maroc.

Le tableau 1 présente un résumé des données d'entrée et de leurs sources.

Tableau 1: Données d'entrée et sources

Ensemble de données	Année	Source	Utilisation
Population par région	2020	Statistiques du Maroc (HCP - Haut Commissariat au Plan)	Variables d'entrée pour la génération de déplacements
Population par groupe d'âge (ensemble du pays)	2020	Statistiques du Maroc (HCP - Haut Commissariat au Plan)	Variables d'entrée pour la génération de déplacements
Revenu moyen par région	2019	Statistiques du Maroc (HCP - Haut Commissariat au Plan)	Variables d'entrée pour la génération de déplacements
Projections de population et de PIB pour le Maroc	2020	UN-DESA et OCDE	Variables d'entrée pour la génération de déplacements
Projections de la population par groupe d'âge	2022	UN-DESA	Variables d'entrée pour la génération de déplacements
Historique des parts de marché des ventes de voitures	2020	Statistiques du Maroc (HCP - Haut Commissariat au Plan)	Module de stock du véhicule
Temps de trajet en voiture	2023	Google Directions API	Calculer les temps de parcours pour les modèles de génération, de distribution et de choix du mode de transport.
Temps de trajet en train	2023	ONCF - données officielles, itinéraires et coûts publiés	Calculer les temps de parcours pour les modèles de génération, de distribution et de choix du mode de transport.
Temps de trajet en avion	2023	Royal Air Maroc - sources publiées	Calculer les temps de parcours pour les modèles de génération, de distribution et de choix du mode de transport.

Voyages interurbains en bus et en train	2023	Sources publiées, calendriers et autres	Calibrer les modèles de distribution et de choix du mode de transport
-----------------------------------------	------	-----------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------

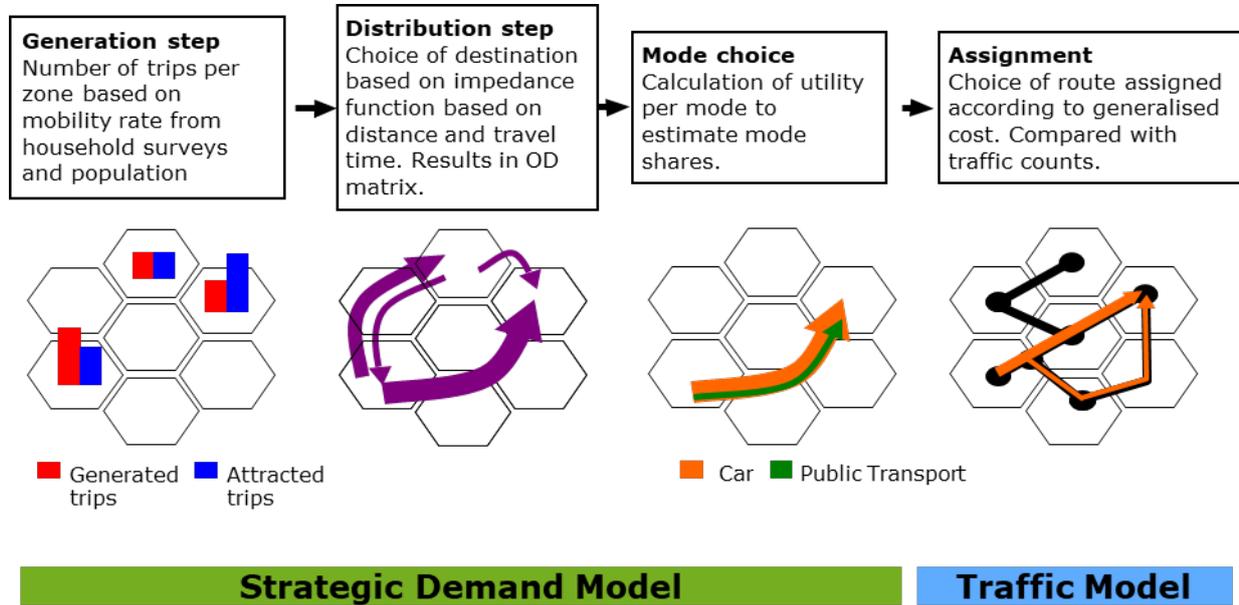
Pour garantir la compatibilité des données provenant des différentes sources, un processus complet de nettoyage des données et d'agrégation/désagrégation a été entrepris. Les données provenant des statistiques du Maroc étaient soit au niveau national, soit au niveau régional. Les données provenant de l'UN-DESA, de l'ITF, de l'OCDE ou d'autres sources externes étaient le plus souvent au niveau national. Lorsque les taux de croissance n'étaient disponibles qu'au niveau national, on a supposé que ces taux étaient les mêmes dans toutes les régions. Certaines des données restantes concernaient des itinéraires spécifiques (ferroviaires ou aériens). Elles ont été agrégées au niveau régional (lorsque cela était nécessaire).

Approche de la modélisation

Ce modèle est utilisé pour estimer les déplacements non urbains de voyageurs au Maroc. Il exclut les déplacements de voyageurs dans les zones urbaines, pour lesquels le FIT a développé et mis à disposition un outil analogue. Le modèle suit l'approche traditionnelle de modélisation des transports en quatre étapes pour déterminer la demande de transport, et ajoute ensuite une étape supplémentaire pour calculer les émissions de CO₂ résultant de la demande de transport. Les résultats de chaque étape alimentent l'étape suivante en tant qu'intrants, comme illustré dans la La figure 2. La première étape est la génération de déplacements. Elle a pour but de déterminer le nombre de déplacements ayant pour origine et destination chaque région. L'étape 2, Distribution des déplacements, répartit les déplacements entre toutes les combinaisons possibles de paires de régions de manière à préserver les origines et les destinations totales des déplacements déterminées lors de la première étape ; le résultat est une matrice origine-destination (OD). La troisième étape, Choix du mode de transport, estime la part des déplacements empruntant chaque mode pour chaque OD.

Le modèle de demande englobe les trois premières étapes. La quatrième étape, l'affectation des déplacements, attribue chaque déplacement, de chaque mode, au réseau disponible, sur un itinéraire donné. Cette dernière étape est nécessaire lors de l'élaboration d'un modèle de trafic. Les modèles de trafic sont utiles pour prendre des décisions relatives à la conception de projets spécifiques. Ils dépassent la portée d'un modèle stratégique tel que celui-ci, qui permet de tester des scénarios politiques de haut niveau. Dans le modèle actuel, les résultats de l'étape du choix du mode de transport sont directement intégrés dans les calculs de CO₂, qui estiment les émissions de CO₂ résultant des différents modes de transport utilisés.

Figure 2 : Méthodologie du modèle en quatre étapes



Génération de déplacements

La première étape, la génération de déplacements, consiste à déterminer le nombre de déplacements en provenance et à destination de chaque région. De nombreux ensembles de données peuvent y contribuer, tels que la population, les données sur l'emploi, le parc automobile, etc. qui influencent le nombre de déplacements générés ou attirés dans une région. Dans le cas de ce modèle, les déplacements générés sont estimés par tranches d'âge. Les différents groupes d'âge ont tendance à avoir des habitudes de déplacement différentes. Par exemple, les personnes âgées ont tendance à moins se déplacer. Les variables utilisées pour calculer les facteurs de génération de déplacements d'une région sont la population P_i , le revenu annuel moyen I_i et la durée moyenne pondérée des déplacements par région tt_i et le rôle de la région en tant que capitale du pays C_i . Le temps de trajet moyen pondéré est estimé en faisant la moyenne du temps de trajet entre une région et toutes les autres régions, pondérée par leur population. Le mode de transport de surface le plus rapide entre les régions est utilisé pour cette estimation. Le nombre de déplacements générés est calculé pour les 5 catégories d'âge et les 12 régions du Maroc à l'aide d'un modèle dit de Poisson (un type spécifique de modèle de régression). Le modèle de Poisson a été calibré en utilisant les données des statistiques marocaines, les études marocaines existantes et certaines hypothèses de l'ITF, comme décrit ci-dessous.

Afin de calibrer le modèle de génération, l'ITF a dû faire quelques hypothèses sur le nombre total de déplacements non urbains qui ont lieu dans l'ensemble du pays. Des données nationales existent pour les déplacements aériens, ferroviaires et routiers totaux pour l'année 2013 dans le "Schéma directeur de la mobilité nationale à horizon 2035" publié en 2015 (à partir de là, SDMN-2015). En outre, le nombre total de déplacements ferroviaires non urbains et de déplacements aériens intérieurs pour l'année 2019 était disponible auprès de l'ONCF et de l'ACI World Traffic Report, respectivement. L'ITF a dû estimer la croissance des déplacements routiers entre 2013 et 2019 pour calculer le nombre total de déplacements

non urbains pour 2019, l'année de référence de la modélisation. Le nombre total de déplacements non urbains dans le pays en 2019 s'élève à 425 millions de déplacements. Les taux de déplacements par région et pour différents groupes d'âge étaient disponibles dans l'étude SDMN-2015.

Les 12 régions correspondent aux régions administratives marocaines et les catégories de groupes d'âge correspondent à 0-14, 15-24, 25-39, 40-59, 60+ ans. Après avoir estimé le nombre moyen de déplacements annuels pour chaque combinaison de groupe d'âge et de région, l'ITF a calibré le modèle de génération en utilisant la formule suivante :

$$T_{i,j} = \log(I_i * M) * e^{(A+P_i*\alpha+I_i*\beta+Age_k*\delta+C_i*\rho+\ln(tt_i)*\gamma)}$$

Où :

- $T_{i,j}$: Facteur de génération de déplacements de la région i et du groupe d'âge j ;
- I_i : Revenu annuel moyen de la région i ;
- P_i : Catégorie de population pour la région i [1 si moins de 1 million, 2 si entre 1 et 3 millions, 3 si entre 3 et 6 millions, et 4 si plus de 6 millions] ;
- I_i : Catégorie de revenu pour la région i [1 si moins de 2500 \$US, 2 si entre 2500 \$US et 3500 \$US, 3 si entre 3500 \$US et 4500 \$US, et 4 si plus de 4500 \$US] ;
- Age_k : Catégorie de groupe d'âge [1 si k=j, 0 si autre] ;
- C_i : Catégorie de capitale pour la région i [1 si région de Rabat-Salé-Kénitra, 0 si autre] ;
- tt_i : Durée moyenne du trajet par le mode de transport de surface le plus rapide entre la région i et toutes les autres régions, pondérée par la population des autres régions.

Les coefficients du modèle de génération sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: Coefficients du modèle de génération

Variable	Classe	Valeur du coefficient (estimée par le modèle de génération)	Notes
A		0.1553	
M		0.0010	
Catégorie de population	1	-0.1504	La population de la région est inférieure à 1 million d'habitants
Catégorie de population	2	0.3589	La population de la région est comprise entre 1 et 3 millions d'habitants.
Catégorie de population	3	1.4590	La population de la région se situe entre 3 et 6 millions d'habitants.

Catégorie de population	4	2.0165	La région compte plus de 6 millions d'habitants
Catégorie de revenus	1	0.9421	Le revenu annuel moyen dans la région est inférieur à 2500 USD
Catégorie de revenus	2	1.4900	Le revenu annuel moyen dans la région se situe entre 2500 et 3500 dollars américains.
Catégorie de revenus	3	2.0165	Le revenu annuel moyen dans la région se situe entre 3500 et 4500 dollars américains.
Catégorie de revenus	4	0.7066	Le revenu annuel moyen dans la région est supérieur à 4500 USD
Groupe d'âge	0-14	0.4664	
Groupe d'âge	15-24	1.8814	
Groupe d'âge	25-39	1.9248	
Groupe d'âge	40-59	0.6895	
Groupe d'âge	60+	-0.2782	
Capitale		1.2358	La région correspond à Rabat-Salé-Kénitra.
Temps de trajet pondéré		-0.1489	

Prévisions pour les années à venir

Pour prévoir le nombre de déplacements générés dans les années à venir, nous utilisons des projections de population et de PIB par habitant provenant de différentes sources. Les projections démographiques sont spécifiques à la région et proviennent du HCP-Maroc et de l'UN DESA pour le Maroc. Les projections du PIB pour le Maroc proviennent de l'OCDE et sont au niveau national. La croissance du PIB est ensuite appliquée aux niveaux de revenus moyens de chacune des régions. Les facteurs de croissance de la population et du PIB sont énumérés dans le tableau 2 par période applicable.

Table 3: Prévisions de population et de PIB pour la zone d'étude

Années	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Croissance du PIB	0.97	1.26	1.29	1.29	1.30	1.31	1.31
Croissance annuelle de la population (facteur à partir de 2019)							
Tanger - Tétouan - Al Hoceïma	1.012	1.068	1.118	1.166	1.209	1.252	1.299
L'Oriental	1.011	1.066	1.123	1.168	1.210	1.253	1.297

Fès - Meknès	1.007	1.036	1.060	1.078	1.092	1.105	1.119
Rabat - Salé - Kénitra	1.010	1.058	1.099	1.137	1.170	1.205	1.241
Béni Mellal - Khénifra	1.006	1.033	1.053	1.069	1.079	1.089	1.100
Casablanca- Settat	1.013	1.076	1.135	1.191	1.244	1.299	1.357
Marrakech - Safi	1.009	1.051	1.087	1.119	1.146	1.174	1.203
Drâa- Tafilalet	1.006	1.032	1.053	1.068	1.078	1.088	1.098
Souss - Massa	1.014	1.086	1.161	1.227	1.291	1.358	1.429
Guelmim - Oued Noun	1.005	1.028	1.047	1.058	1.064	1.070	1.076
Laâyoune - Sakia El Hamra	1.015	1.087	1.157	1.224	1.289	1.357	1.429
Dakhla - Oued Ed-Dahab	1.040	1.265	1.538	1.842	2.197	2.619	3.122

Répartition des voyages

L'étape de génération des déplacements fournit le nombre total de déplacements ayant pour origine et destination chaque région. La distribution des déplacements estime le nombre de déplacements entre chaque paire de régions. L'estimation est basée sur la *méthode de la gravité* qui stipule que l'impédance, ou la difficulté, du voyage entre deux régions est inversement proportionnelle au nombre de voyages entre ces régions. L'impédance est calculée sur la base du *coût généralisé* du voyage entre la région d'origine (O) et la région de destination (D) (c'est-à-dire pour chaque paire de DOM). La matrice des déplacements entre tous les DO possibles qui en résulte est calibrée en combinant les informations sur les distances moyennes des déplacements intrarégionaux et interrégionaux, ainsi que la part du total des déplacements intrarégionaux et interrégionaux. Le nombre total de déplacements par paire de DO est ainsi estimé.

Détermination du coût généralisé pour chaque OD

L'impédance, ou fonction de dissuasion, est basée sur le coût généralisé du voyage entre une région d'origine et une région de destination. Le coût généralisé est une fonction linéaire qui tient compte du temps et du coût moyens nécessaires pour aller de la région i à la région j , exprimés en minutes. Le coût est converti en minutes à l'aide de la valeur du temps (VDT). La valeur du temps (en \$US/min) est l'équivalent financier d'une unité de temps telle qu'elle est perçue par un individu. Dans cette estimation, deux valeurs du temps différentes sont utilisées, l'une pour les déplacements intrarégionaux et l'autre pour les déplacements interrégionaux. Le premier est plus petit, car les gens sont plus susceptibles de voyager dans leur propre région. Pour l'année de référence, le coût du transport est de 2,5 \$US par heure pour les déplacements intrarégionaux (source de données : "Compte transport de voyageurs dans la région du Grand Casablanca", PDU) et de 6 USD par heure pour les déplacements interrégionaux (source de données : estimation des modèles mondiaux de l'ITF).

Temps de trajet et distances

Les temps de trajet et les distances entre les régions sont estimés entre la plus grande ville de chaque région, ces matrices se trouvent dans l'annexe. Le temps de trajet entre une origine i et une destination j pour les voitures est calculé en utilisant l'itinéraire le plus rapide de l'API de Google, pour le train il est basé sur les données de l'ONCF, et pour l'avion il est basé sur les données de Royal Air Maroc. Les services de grands taxis et de bus sont considérés comme disponibles entre toutes les paires d'OD. Le temps de trajet des grands taxis dans les liaisons interrégionales est supposé égal à celui des voitures, et le temps de trajet

des services de bus dans les liaisons interrégionales est calculé en supposant le même itinéraire que les voitures, mais avec une vitesse opérationnelle moyenne de 50km/h.

Frais de voyage

Le coût du voyage en voiture correspond au coût du carburant de 1,38 \$US par kilomètre parcouru, plus un coût moyen de péage de 3,44 \$US par 100 kilomètres (lorsque des péages existent entre les paires de DOM). Le coût du grand taxi par kilomètre et par voyageur voyageant est supposé être 0,25 fois le coût de la voiture, sur la base d'hypothèses de facteurs de charge plus élevés pour les grands taxis intrarégionaux et de considérations relatives aux marges de profit. Les coûts des voyages interrégionaux en bus et en train sont tirés des horaires et des offres de billets disponibles publiquement, en supposant des tarifs de classe économique et des trains TGV - lorsqu'ils sont disponibles -, et les coûts aériens sont tirés de Royal Air Maroc, en supposant également des tarifs de classe économique.

Le coût généralisé est calculé pour chaque mode. Le coût généralisé de la paire OD correspond au coût généralisé du mode ayant la valeur minimale. Les coûts généralisés peuvent changer dans les années à venir en fonction des mesures (politiques) mises en œuvre (qui peuvent améliorer les infrastructures de transport et la disponibilité des services pour certains modes de déplacement).

La fonction de coût généralisée est la suivante, pour une paire de DO donnée, ij , en minutes :

$$Gc_{ij} = time_{ij} + cost_{ij} \div VOT$$

Méthode par gravité et calibrage par distribution des temps de parcours

La méthode gravitaire implique un processus itératif de répartition des origines et destinations totales des déplacements de chaque région (calculées lors de la génération des déplacements) entre toutes les paires de régions, sur la base de l'impédance, de sorte que le nombre total de déplacements dans chaque région soit conservé. Le résultat est une matrice de déplacements. Chaque élément de la matrice des déplacements, T_{ij} , est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$T_{ij} = k_{ij} O_i D_j f(Gc_{ij})$$

Où :

k , est la constante de proportionnalité, calculée sur plusieurs itérations ;

$f(Gc_{ij})$, est la fonction d'impédance, calculée comme suit $f(Gc_{ij}) = \delta_{ij} Gc_{ij}^{-\alpha} e^{-\beta Gc_{ij}}$ où α et β sont des constantes de sensibilité, et δ_{ij} est une constante différente de 1 lorsque $i=j$;

O_i et D_j sont les origines et destinations totales des déplacements calculées dans la génération de déplacements.

Les coefficients du modèle de distribution figurent dans le tableau 4.

Pour calibrer la matrice des déplacements, les distances moyennes des déplacements interrégionaux et intrarégionaux sont calculées à partir de la matrice des déplacements OD modélisée. Les informations sur les distances moyennes des déplacements intrarégionaux et interrégionaux, ainsi que la part du total des déplacements intrarégionaux et interrégionaux, sont utilisées au cours de la procédure de calibrage itérative. Il est supposé qu'un nombre minimum de personnes voyage entre chaque paire de DOM (15 par jour).

Table 4: Coefficients du modèle de distribution

Variable	Valeur du coefficient (estimée par le modèle de distribution)
α	2.8947
β	-0.1857
$\delta_{i=j}$	15.3712
$\delta_{i \neq j}$	1

En outre, pour les années à venir, on suppose que la valeur ajoutée et le coût des déplacements par kilomètre augmentent au même rythme que le PIB par habitant au cours de la période d'étude. Les temps de trajet moyens entre les régions sont influencés par le développement des infrastructures de transport construites au cours de la période d'étude.

Choix du mode

La troisième étape de la modélisation consiste à définir les parts des modes de transport pour chaque paire origine-destination (OD). Un modèle logit est utilisé pour déterminer la probabilité qu'un voyageur choisisse un mode particulier pour un trajet OD donné, sur la base de l'*utilité* relative de chaque mode disponible. L'équation suivante décrit la probabilité, P , de choisir le mode m , parmi tous les modes k , pour une OD, ij . L'utilité, u , de chaque mode est décrite en détail dans la section suivante.

$$P_{ij,m_1} = \frac{e^{\mu_{ij} * u_{ij,m}}}{\sum_{m=1}^k e^{\mu_{ij} * u_{ij,m}}}$$

Dans ce modèle, cinq modes sont disponibles : la voiture particulière, le train, le bus, l'avion et les grands taxis.

Fonctions d'utilité

Les fonctions d'utilité décrivent les facteurs qui influencent la décision d'une personne de choisir un mode. Pour ce modèle, en raison du manque d'informations et de données fiables pour le calibrer, une procédure simple est adoptée. Seuls le temps de trajet et le coût sont considérés comme des facteurs pertinents. Le temps de trajet et le coût des différents modes entre les différentes paires de DO sont obtenus comme expliqué dans l'étape précédente de modélisation de la distribution des déplacements.

Dans la pratique, d'autres facteurs influencent également la prise de décision. Par conséquent, le modèle logit comprend des constantes spécifiques alternatives (CSA) qui sont calibrées, en même temps que les paramètres, afin de garantir que les valeurs modélisées correspondent aux résultats des matrices de déplacement telles que définies dans la section précédente. Ces constantes sont censées tenir compte de tous les autres critères de décision qui ne sont pas pris en compte dans l'une des variables. Ils sont calibrés par rapport à un mode de référence, en l'occurrence l'avion, dont l'ASC est égal à zéro. Les paramètres

estimés pour les variables et les NCP pour chacun des modes sont présentés dans le tableau suivant Tableau 5.

Les fonctions utilitaires pour tous les modes sont similaires et se présentent comme suit :

$$u_{ij,m} = ASC_m + \beta_m travel\ time * travel\ time_m + \beta_m cost * cost_m$$

Table 5: Coefficients du modèle de choix du mode de transport

Variable	Mode	Les estimations des paramètres associés (β)
Constante spécifique à l'attribut	Voiture	0
	Rail	4.649
	Bus	-1.449
	Air	-20
	Grand taxi - Interrégional	1.525
	Grand taxi - Intra-régional	-2.813
Durée du voyage	Voiture	-0.137
	Rail	-0.263
	Bus	-0.142
	Air	-0.241
	Grand taxi	-0.083
Coût	Voiture	-0.879
	Rail	-0.632
	Bus	-0.914
	Air	-1.553
	Grand taxi - Interrégional	-1
	Grand taxi - Intra-régional	-3.566
Facteur d'échelle	$\mu_{i=j}$ - Interrégional	0.75
	$\mu_{i \neq j}$ - Intra-régional	0.50

Modèle de stock de véhicules privés

Le module "stock de véhicules" du modèle estime la composition du parc de véhicules privés en termes de carburant et d'âge. Cela permet d'avoir une représentation réaliste de l'évolution du parc automobile au cours de la période étudiée. Il permet également d'éviter de s'appuyer exclusivement sur des hypothèses

concernant la composition du parc automobile, le rendement énergétique et les émissions de CO₂ qui en découlent et qui sont externes au modèle.

Un modèle de stock estime le nombre de voitures qui entrent et sortent du parc à chaque intervalle de temps de la période d'étude, et retrace les véhicules dans le temps. À partir d'un ensemble d'hypothèses (c'est-à-dire le kilométrage moyen par type de véhicule et l'âge du véhicule), le modèle de stock prévoit le nombre de nouveaux véhicules qui seront nécessaires pour couvrir la demande de transport prévue. Il retrace également le moment où les véhicules quittent le parc - soit parce qu'ils sont mis à la casse, soit parce qu'ils sont exportés vers un marché secondaire qui n'entre pas dans le champ d'application du modèle.

La mise en place d'un modèle de stock de véhicules nécessite un ensemble d'hypothèses d'entrée - telles que l'activité future des véhicules, la durée de vie des véhicules, le parc actuel, les caractéristiques futures des véhicules et l'utilisation future des véhicules. La section suivante fournit de plus amples informations sur les hypothèses spécifiques et les données d'entrée.

Données et hypothèses

La première des données d'entrée requises, l'activité future des véhicules, est un résultat direct des étapes précédentes du modèle. Le modèle en trois étapes produit la demande de transport de voyageurs par mode en voyageurs-kilomètres. En utilisant les hypothèses sur le facteur de charge des voitures particulières du modèle de voyageurs non urbains de l'ITF pour la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) et les idées du consultant local de l'ITF, les pkm sont transformés en vkm. Le facteur de charge moyen pour les voitures particulières en 2019 est de 1,6 voyageurs par voiture pour les zones non urbaines. Le facteur de charge est supposé rester stable tout au long de la période d'étude jusqu'en 2050. Avec les facteurs de charge supposés, la demande future de véhicules non urbains (vkm) peut être dérivée de l'activité de transport de voyageurs prévue (pkm). Pour développer un modèle de flotte, la demande future d'activité de véhicules (vkm) est nécessaire pour l'ensemble du pays. À cette fin, la demande d'activité de véhicules pour les voitures particulières dans le transport urbain et dans le transport non urbain est ajoutée.

Les hypothèses relatives à la durée de vie typique des véhicules constituent un autre élément des données d'entrée. Cela permet de prévoir le nombre de nouveaux véhicules qui devront entrer dans le parc à tout moment, afin de garantir la satisfaction de la demande future en matière d'activité automobile. La figure 3 présente la courbe de survie utilisée pour cette étude. Elle donne des informations sur la probabilité qu'un véhicule reste dans le parc automobile pendant au moins une année supplémentaire après avoir atteint un certain âge. Par exemple, un véhicule de 15 ans a une probabilité d'environ 91 % de rester dans le parc automobile pendant au moins une année supplémentaire. Inversement, la probabilité que ce véhicule soit mis à la casse ou exporté vers un autre marché est de 9 %. Cette courbe a été initialement développée pour un projet européen², et a été utilisée dans un certain nombre de publications de l'ITF³. Elle a été ajustée pour tenir compte de la réalité marocaine. La flotte actuelle de véhicules est utilisée pour créer le point de départ du modèle de stock de véhicules. Dans le cas du Maroc, les données historiques des ventes de véhicules par type de carburant sont disponibles depuis 1975 (les valeurs depuis 1975 sont incluses dans l'outil de modélisation, le tableau 7 représente uniquement les valeurs depuis 2010 pour une meilleure lisibilité) et l'âge moyen du parc de véhicules privés déclaré est de 13 ans. Les hypothèses futures

² Ricardo. (2016). Considération des impacts des systèmes de mise à la casse des véhicules légers. Rapport final pour la Commission européenne, DG Action pour le climat.

³ ITF. (2017). S'alléger : Comment des véhicules moins lourds peuvent contribuer à réduire les émissions de CO₂. Paris

sur les ventes de véhicules par type de carburant sont basées sur les hypothèses de l'ITF et sur les idées des consultants locaux de l'ITF pour les scénarios présentés dans ce rapport, mais peuvent être modifiées par l'utilisateur en tant qu'entrée dans le modèle s'il souhaite définir un scénario différent (Tableau 7).

L'économie moyenne de carburant sur route des véhicules privés neufs au Maroc pour une année et un type de carburant donnés est basée sur le modèle global du parc automobile de e l'ITF pour la région MENA (valeurs depuis 1975 incluses dans l'outil de modélisation, le tableau 6 représente uniquement les valeurs depuis 2010 pour meilleure lisibilité). Ces valeurs historiques et futures sont utilisées pour le scénario de *base*. Les valeurs futures finales des parts de ventes et de l'économie de carburant sont déterminées par les entrées de l'utilisateur dans le modèle.

Tableau 6: Consommation moyenne de carburant sur route des véhicules privés neufs (LGE/100km) - scénario de *base*

Type de carburant	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Essence	8.4	8.3	8.4	7.3	7.0	7.1	6.7	6.3	6.2
Diesel	6.7	6.1	7.2	6.0	5.9	5.9	5.7	5.5	5.4
GPL/GNC	8.5	8.0	8.2	7.3	7.0	6.9	6.6	6.2	6.1
Véhicules à zéro émission	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 7: Part des ventes de véhicules neufs - scénario de *base*

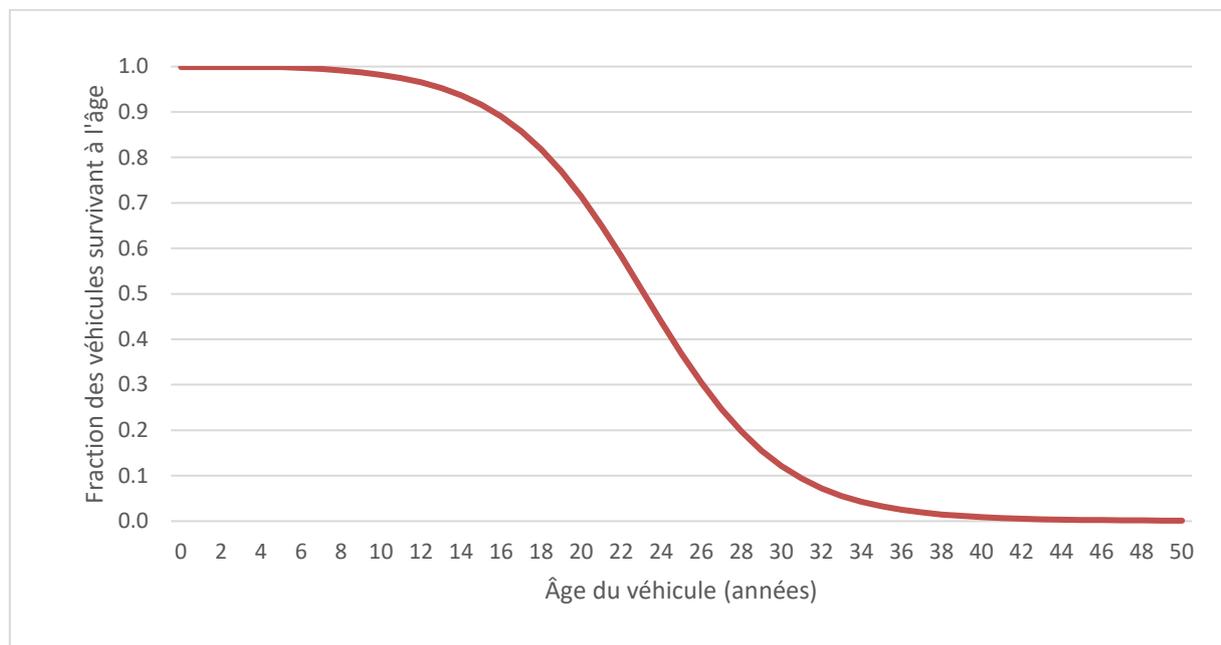
Type de carburant	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Essence	42%	27%	25%	25%	26%	25%	24%	23%	22%
Diesel	58%	73%	75%	72%	69%	67%	64%	61%	58%
GPL/GNC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Véhicules à zéro émission	0%	0%	0%	3%	5%	8%	12%	16%	20%

Enfin, on suppose que l'activité par véhicule diminue avec l'âge du véhicule (voir tableau 8). Les véhicules récents sont davantage utilisés et parcourent plus de kilomètres par an. Le kilométrage des véhicules (par âge du véhicule) est supposé rester constant dans le temps et être indépendant de la technologie du véhicule. Ceci en dépit du fait que certaines technologies automobiles (par exemple le diesel, l'hybride) affichent fréquemment une utilisation des véhicules supérieure à la moyenne. Toutefois, compte tenu de la pénétration supposée des différentes technologies automobiles au fil du temps, l'hypothèse d'un kilométrage des véhicules neutre sur le plan technologique a été jugée la plus appropriée dans le contexte de la présente étude.

Tableau 8: Activité annuelle moyenne des véhicules par groupe d'âge (en km)

Âge du véhicule	Moyenne annuelle de VKM résultante
0-5	15500
5-10	12788
10-15	10550
15-20	8703
20-25	7180
25-50	5924

Figure 3 : Courbe de survie des véhicules privés



Évolution de la flotte et facteurs CO₂

Pour chaque année modélisée, les véhicules qui restent dans le parc automobile sont calculés à l'aide de la courbe de survie. En utilisant l'activité moyenne des véhicules par groupe d'âge, on calcule le nombre total de kilomètres parcourus par ces véhicules. La différence entre ce chiffre et l'activité projetée doit être comblée par de nouveaux véhicules. Cela permet d'estimer le nombre de nouveaux véhicules qui doivent entrer dans le parc. Les nouveaux véhicules suivent les ventes prévues par type de carburant et l'efficacité énergétique équivalente (selon les hypothèses de l'ITF). Ce processus est répété pour l'ensemble de la période d'étude.

Le parc automobile projeté peut maintenant être utilisé pour estimer les facteurs de CO₂. Avec le nombre de voitures par âge et par type de carburant et la consommation moyenne de carburant sur route pour chacune d'entre elles, il est possible d'estimer les émissions moyennes de CO₂ par véhicule-kilomètre parcouru (voir la section suivante sur les calculs de CO₂).

Calculs CO₂

Les émissions de CO₂ sont calculées en fonction de la demande de transport par mode et par type de véhicule. Les résultats en voyageurs-kilomètres par mode obtenus lors de l'étape du choix du mode de transport sont convertis en véhicules-kilomètres à l'aide des hypothèses d'occupation des véhicules figurant dans le tableau ci-dessous. Tableau 9. Les véhicules-kilomètres par mode sont multipliés par les facteurs d'émission de CO₂ par kilomètre et par mode, également énumérés dans le tableau 9, pour obtenir les émissions de CO₂ par mode. Les facteurs d'émission de CO₂ pour les voitures particulières non urbaines sont dérivés du modèle de stock de véhicules spécifiquement développé pour le Maroc dans le cadre de ce projet, tandis que les facteurs d'émission pour les autres modes sont dérivés du modèle de voyageurs non urbains de l'ITF pour la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA). Les facteurs d'émission évoluent dans le temps au fur et à mesure que des véhicules et des carburants plus propres sont adoptés sur la base des hypothèses du scénario.

En ce qui concerne le rail, les lignes ferroviaires électrifiées n'émettent pas de CO₂, tandis que les autres lignes ferroviaires sont supposées fonctionner avec des moteurs diesel.

Tableau 9: Taux d'occupation des véhicules et facteurs d'émission de CO₂ par mode

Mode	Occupation des véhicules (nombre moyen de voyageurs par véhicule)	Facteurs d'émission moyens de CO ₂ pour 2019 (gCO ₂ /véh.km)	Facteurs d'émission de CO ₂ (gCO ₂ /pkm) en 2019
Voiture privée	1.6	181	113
Bus	16	448	28
Rail (diesel)	250	11303	45.2
Air	60	7428	123.8
Grand Taxi (intrarégional)	6	199	33.2
Grand Taxi (interrégional)	1.6	199	124

Vue d'ensemble des mesures politiques du scénario

Le modèle stratégique décrit dans la section précédente permet d'évaluer des scénarios pour la demande de transport non voyageur et les émissions de CO₂ correspondantes au Maroc pour la période d'étude (2019-2050). Pour prendre en compte les changements et les développements qui peuvent survenir au cours de cette période concernant la lutte contre les émissions de CO₂ provenant des transports, plusieurs mesures d'atténuation différentes sont incorporées dans le modèle. De cette manière, l'utilisateur du modèle peut évaluer l'impact des mesures politiques respectives sur la demande de transport, les parts modales, les émissions totales de CO₂ du transport, etc. et peut construire des scénarios politiques respectifs et évaluer leur impact dans le temps.

L'objectif principal de cette section est de présenter les mesures d'atténuation pour trois types principaux de mesures : les mesures d'offre de transports, de demande de transports, et de carburant et technologies de transports. La section explique aussi comment ces mesures ont été intégrées dans le modèle, ainsi que leurs définitions. Les définitions des mesures résument des descriptions, plus détaillées, faites par le FIT dans le cadre de son [Directoire des Actions sur le Transport pour le Climat](#) (TCAD).

En général, le modèle permet d'élaborer deux scénarios en même temps, afin de pouvoir établir des comparaisons directes entre différents scénarios. Ces deux scénarios sont, pour des raisons de simplicité, provisoirement appelés scénario de *base* et scénario *alternatif* dans l'outil de modélisation. Ces scénarios sont utilisés pour cartographier deux voies possibles pour le pays. En utilisant les deux scénarios, l'utilisateur peut voir et comparer les résultats de deux ensembles différents de mesures politiques et de développements d'infrastructures.

Les mesures de politique intégrée peuvent être appliquées au cours de différentes années ; chaque mesure a des effets différents sur l'activité de transport et les émissions. Certaines mesures sont appliquées à l'ensemble du pays, par exemple les changements de prix des carburants. Le développement ou l'amélioration des infrastructures se fait généralement au niveau d'une paire de régions. Par exemple, une nouvelle autoroute affectera principalement l'activité de transport entre les régions qu'elle relie. Enfin, plusieurs mesures et instruments politiques peuvent avoir un impact sur la composition future du parc automobile. Cependant, les effets de ces politiques sur les changements réels des ventes de véhicules sont difficiles à évaluer et dépendent de nombreux facteurs. Par conséquent, dans l'élaboration du scénario, la composition du parc automobile est basée sur des objectifs, c'est-à-dire que des valeurs cibles peuvent être introduites par les utilisateurs du modèle. Ces valeurs cibles se réfèrent à la part des ventes de véhicules à zéro émission pour les véhicules privés, à la part du parc d'autobus à zéro émission et aux objectifs de normes plus strictes en matière d'économie de carburant pour les nouveaux véhicules à moteur à combustion interne.

Chacune des mesures modifie des variables spécifiques du modèle, et ces changements peuvent être définis par l'utilisateur ou avoir été prédéfinis et intégrés dans le modèle en tant qu'hypothèses sous-jacentes. Dans certains cas, des hypothèses éclairées sur l'impact ont été formulées. Les tableaux 10; 11 et 12 présentent un résumé des mesures incorporées dans le modèle et leur niveau d'impact dans la zone d'étude. Les tableaux sont définis par l'approche de modélisation choisie, comme décrit dans l'aperçu de la méthodologie. Ils montrent également quels paramètres ou composants spécifiques du modèle sont affectés par une mesure donnée. Cela donne une indication sur la manière dont l'effet d'une mesure est capturé dans l'environnement du modèle pour évaluer son impact.

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des mesures politiques d'offre des transports incluses dans l'outil de modélisation

Mesures	Descriptions	Niveau d'impact	Paramètres / composants du modèle affectés
Nouvelles autoroutes	Construire de nouvelles autoroutes et améliorer l'infrastructure routière afin d'accroître la connectivité et la capacité entre les régions et à l'intérieur de celles-ci.	Paire OD	Temps de trajet (voiture, bus et grand taxi)
Nouvelles lignes ferroviaires à grande vitesse (LGV) pour le transport de voyageurs	Construire de nouvelles lignes ferroviaires à grande vitesse pour transporter efficacement un grand nombre de voyageurs sur de longues distances.	Paire OD	Durée du voyage, coût, disponibilité du rail
Nouvelles lignes ferroviaires conventionnelles pour le transport de voyageurs	Construire de nouvelles lignes ferroviaires conventionnelles pour transporter efficacement un grand nombre de voyageurs sur de longues distances.	Paire OD	Durée du voyage, coût, disponibilité du rail
Amélioration des lignes ferroviaires existantes	Améliorer les lignes ferroviaires en augmentant la fréquence, la vitesse ou la capacité.	Paire OD (lignes existantes)	Durée du voyage, préférence accrue pour le rail

Table 11: Tableau récapitulatif des mesures politiques de demande des transports incluses dans l'outil de modélisation

Mesures	Descriptions	Niveau d'impact	Paramètres / composants du modèle affectés
Prix des carburants	Imposer des redevances sur les émissions de gaz à effet de serre pour encourager les réductions d'émissions dans le secteur des transports. Cette taxe permettrait de faciliter l'adoption de véhicules à zéro émissions, par exemple en finançant des fonds pour des subventions	Ensemble de la zone d'étude	Frais de déplacement (voiture, bus et grand taxi)

	pour l'achat de véhicules et la construction d'infrastructure de charge.		
Taxe sur les billets d'avion	Introduire des frais ou des taxes sur le coût du billet d'avion pour gérer la demande.	Ensemble de la zone d'étude	Frais de voyage (avion)
Amélioration des services de bus (interrégionaux et intrarégionaux)	Améliorer la qualité des services de bus. Augmentation de la fréquence, du confort, de la fiabilité et de la rapidité.	Toute la zone d'étude (déplacements intrarégionaux et interrégionaux)	Préférence accrue pour le bus dans les déplacements à l'intérieur d'une même région, ainsi qu'entre différentes régions
Covoiturage et partage des trajets (voiture privée et grand taxi)	Augmenter la préférence pour partager les voyages (augmentation des facteurs de charge).	Toute la zone d'étude – intrarégionale et interrégionale	Facteurs de charge (déplacements en voiture ou en grand taxi à l'intérieur d'une même région ou entre différentes régions)

Table 12: Tableau récapitulatif des mesures politiques de carburant et technologies de transport incluses dans l'outil de modélisation

Mesures	Descriptions		
Adoption de véhicules à zéro émission	Introduire des objectifs de parts de marché en 2030 et 2050 pour les véhicules à émissions nulles (électriques ou à hydrogène).	Ensemble de la zone d'étude (sur la base d'objectifs)	Modèle de stock de véhicules (voiture particulière)
Normes plus strictes en matière d'économie de carburant pour les	Introduire des objectifs de réduction des émissions de CO2 des nouveaux véhicules ICE vendus après 2030.	Ensemble de la zone d'étude (sur la base d'objectifs)	Modèle de stock de véhicules (voiture particulière)

nouvelles voitures à combustion interne			
Adoption de flottes d'autobus à zéro émissions (régionaux et interurbains)	Introduire des objectifs de parts de marché en 2030 et 2050 pour les véhicules à émissions nulles (électriques ou à hydrogène).	Toute la zone d'étude – intrarégionale et interrégionale (sur la base d'objectifs)	Calculs CO ₂ (autobus régionaux, interurbains et interrégionaux)
Électrification des chemins de fer	Électrifier les lignes ferroviaires existantes.	Paire OD (lignes existantes)	Facteurs d'émission de CO ₂
L'éco-conduite pour les autobus	Promouvoir des pratiques de conduite économes en carburant auprès des conducteurs de bus afin de réduire la consommation d'énergie.	Toute la zone d'étude -	Calculs CO ₂ (autobus régionaux et interurbains)

Le reste de ce document fournit tout d'abord une vue d'ensemble des résultats pour les voyageurs non urbains au Maroc selon les trois scénarios suivants définis pour cette étude spécifique : "Fil de l'eau", "Ambitions Limitées", "Ambitions Élevées". Le niveau de mise en œuvre supposé pour chacune des mesures politiques énumérées dans chaque scénario est détaillé dans le document " Description des scénarios " qui est remis en même temps que cette " Note méthodologique ".

Deuxièmement, il montre l'évaluation de l'impact du développement d'une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse entre Marrakech et Agadir. L'analyse de ces mesures politiques autonomes a pour but d'illustrer la manière dont les impacts d'une mesure politique spécifique peuvent être testés et évalués dans le cadre de cet outil de modélisation. Une analyse analogue pour toute autre mesure politique listée dans le tableau 10 pourrait être réalisée par l'utilisateur du modèle.

Résultats des scénarios et évaluation de l'impact d'une mesure politique spécifique

Résultats des scénarios

Cette section donne un aperçu des résultats concernant les voyageurs non urbains au Maroc selon les trois scénarios suivants définis pour cette étude spécifique :

- un scénario, "fil de l'eau", qui n'inclut pas des évolutions de politiques entre 2022 et 2050 ;
- un scénario "ambitions limitées", qui inclut certaines des mesures prévues par le gouvernement marocain pour la décarbonation des transports, et
- un scénario 'ambitions élevées', qui augmente l'ambition de ces mesures et en rajoute d'autres afin d'aligner le développement des politiques marocaines avec un sentier qui permette d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris pour le secteur transport dans le pays.

Les hypothèses pour chaque mesure politique proviennent de diverses références, y compris le rapport de Perspectives des transports 2023 du FIT, les documents de politique et de planification pertinents, et les idées des experts présents à un atelier, organisé en Septembre 2023, de main avec des autorités marocaines. Les tableaux 17; 18 et 19, en annexe, présentent les hypothèses derrière chaque mesure pour chacun des scénarios.

La figure 4 montre que les émissions dues aux déplacements non urbains de voyageurs (seuls les déplacements intérieurs entrent dans le champ d'application de cet outil de modélisation) resteront globalement constantes entre 2019 et 2050 dans le cadre des scénarios "Fil de l'eau" et "Ambition Limitée". Bien que le nombre de voyageurs-kilomètres non urbains ait presque doublé entre 2050 et 2019 dans le cadre de ces deux scénarios, les facteurs d'émission de CO₂ s'améliorent considérablement au cours de cette période. Plus précisément, le facteur d'émission de CO₂ pour les voitures particulières (les voitures particulières représentent 74 % des émissions totales de CO₂) en 2050 est inférieur de 36 % à celui de 2019, compte tenu du nombre élevé de nouvelles voitures entrant dans le parc automobile et de l'amélioration du rendement énergétique des véhicules à combustion interne. Les émissions de CO₂ en 2050 dans le cadre du scénario "Ambition Élevée" sont inférieures de 44 % à celles du scénario "Ambition Limitée" en raison du passage à des modes de transport plus durables (figure 5) et de l'adoption de véhicules à zéro émission (figure 6).

La figure 7 montre l'évolution des émissions de CO₂ de 2019 à 2050 par mode de transport dans le cadre du scénario "Ambition Élevée". Même avec l'ambition la plus élevée, les voitures particulières restent la principale source d'émissions d'ici 2050. Cependant, des niveaux d'ambition élevés sont essentiels pour promouvoir le passage à des modes de transport plus propres et réduire l'intensité de CO₂ de tous les modes de transport, mais plus particulièrement des alternatives au transport routier.

Figure 4 : Émissions de CO₂ dues au transport non urbain (domestique) de voyageurs, par scénario

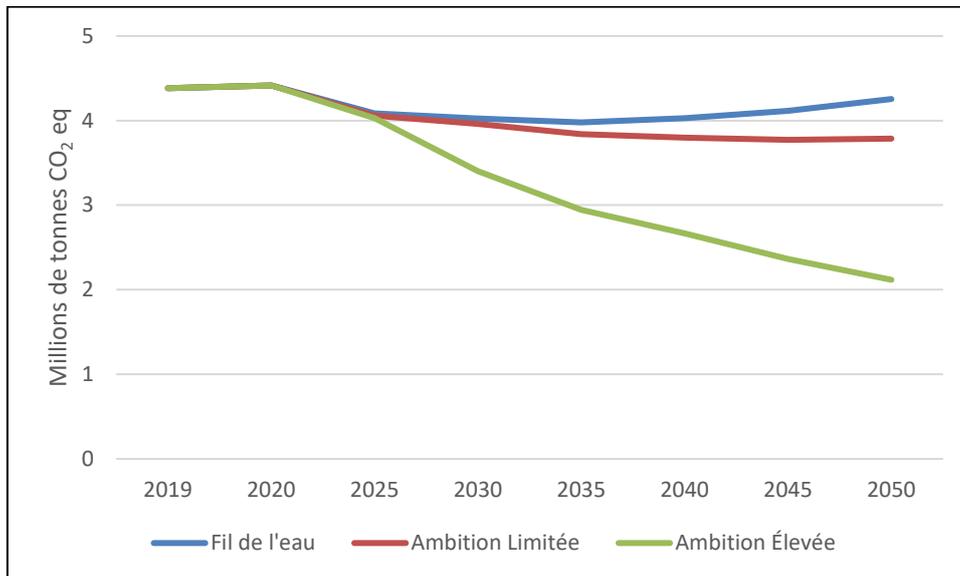


Figure 5 : Parts modales des déplacements de voyageurs non urbains (domestiques) par scénario, en 2019 et 2050

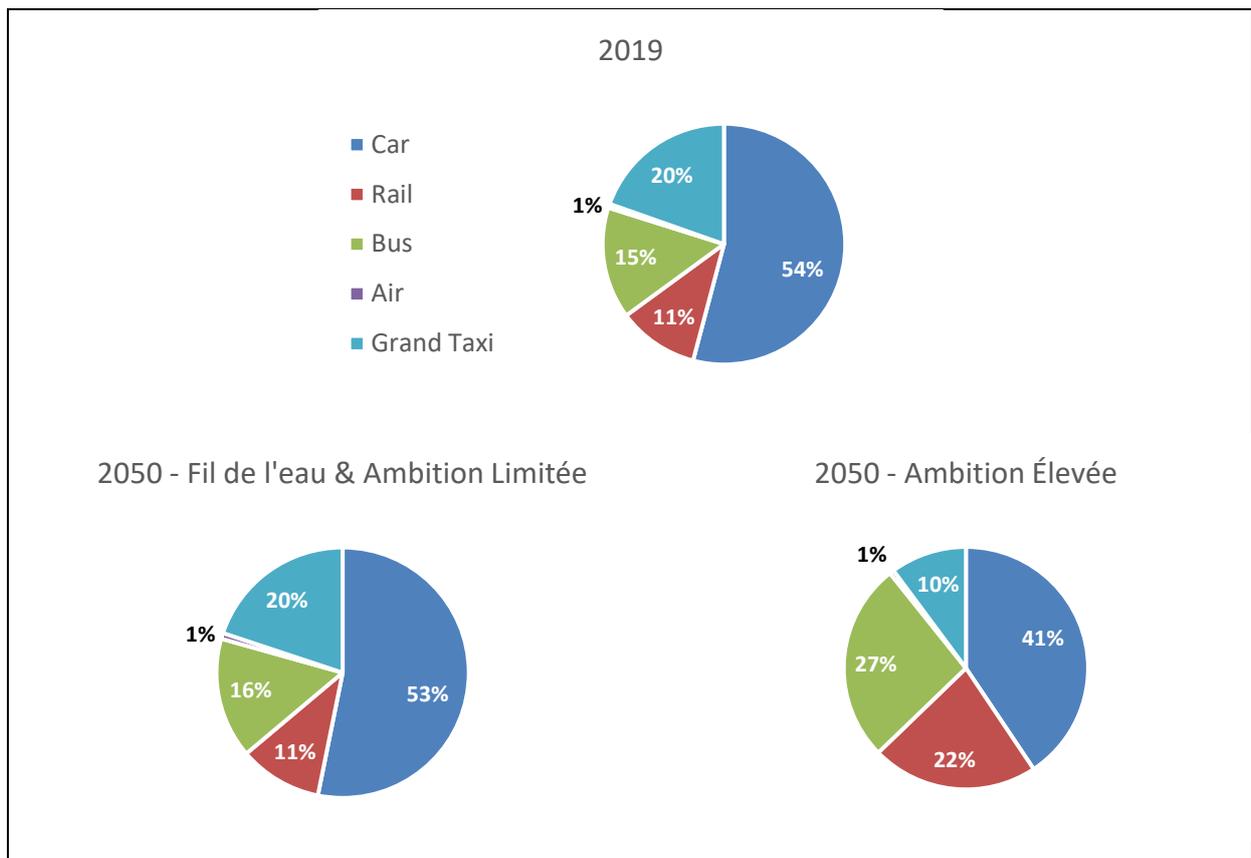


Figure 6 : Parts des ventes de carburants par scénario, en 2019 et 2050

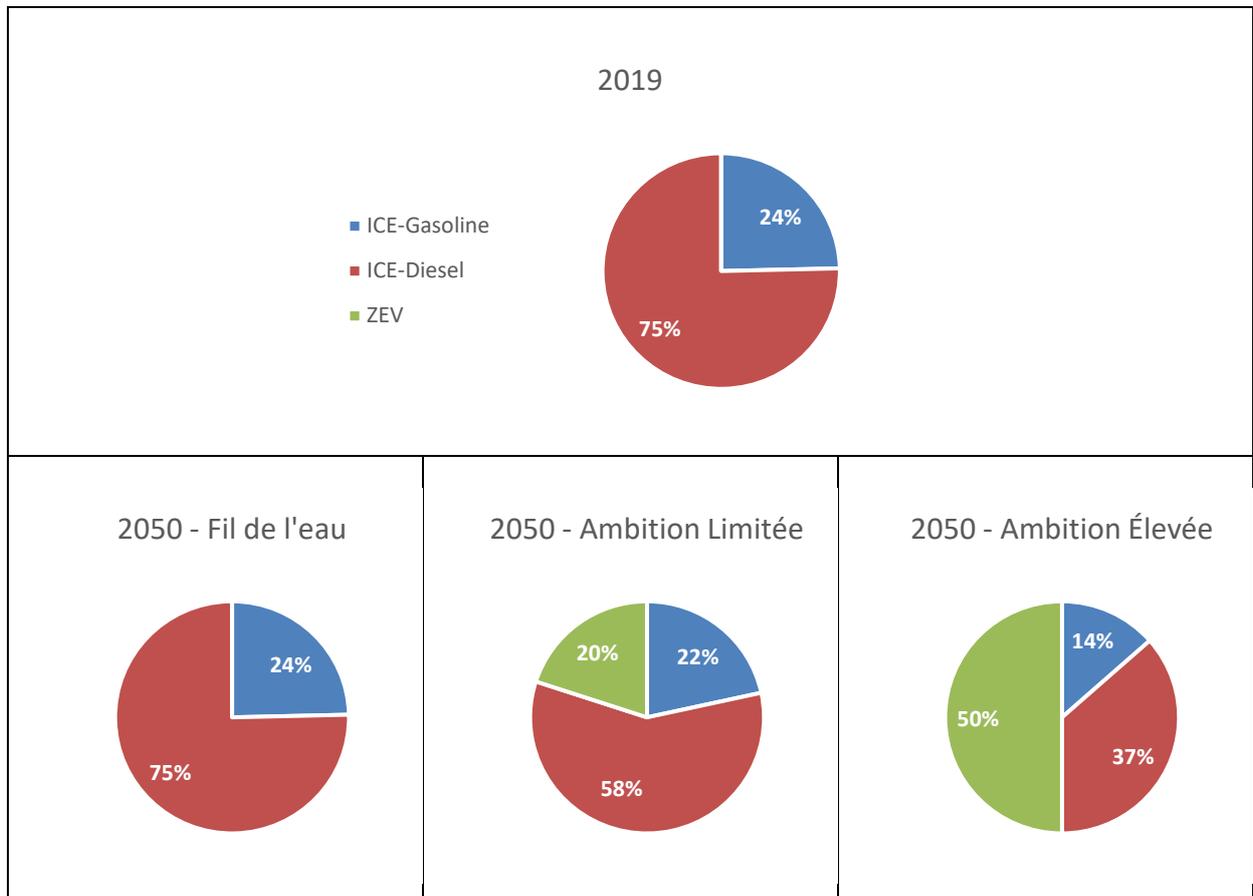
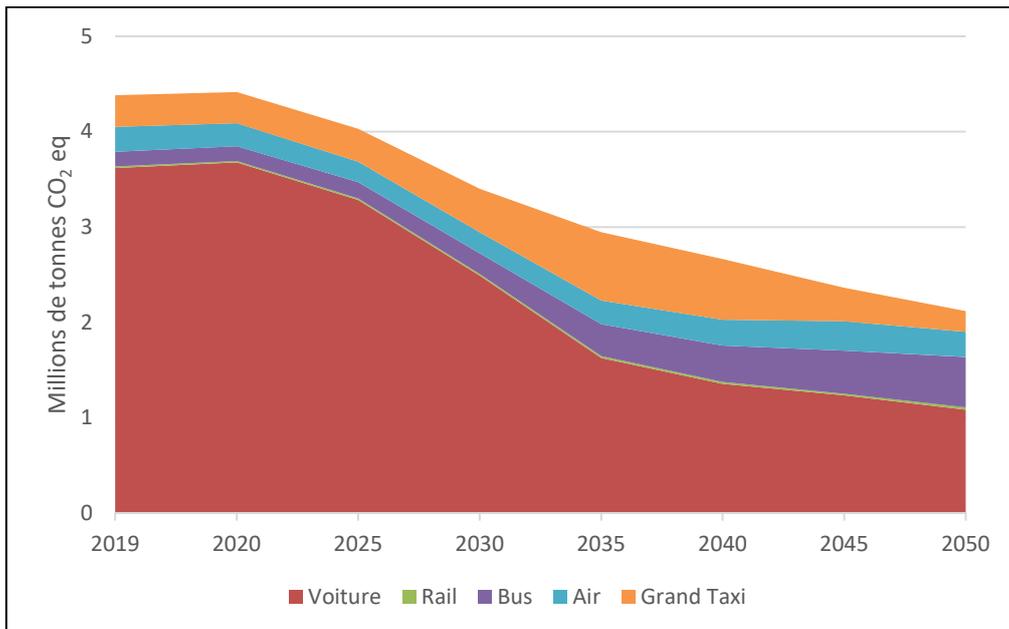


Figure 7 : Émissions de CO₂ dues au transport non urbain (domestique) de voyageurs par mode dans le cadre du scénario "Ambition Élevée".



Analyse d'impact d'une mesure politique spécifique : nouvelle ligne ferroviaire

Cette section présente l'évaluation de l'impact du développement d'une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse entre Marrakech et Agadir. L'analyse de cette mesure politique autonome a pour but d'illustrer la manière dont les impacts d'une mesure politique spécifique peuvent être testés et évalués à l'aide de cet outil de modélisation. Une analyse analogue pour toute autre mesure politique listée dans le tableau 10 pourrait être réalisée par l'utilisateur du modèle.

L'impact de cette mesure autonome est estimé en comparant un scénario fictif dans lequel aucune mesure politique n'est mise en œuvre au cours de la période étudiée (scénario de *base*) avec un scénario dans lequel seule cette mesure spécifique est mise en œuvre (scénario alternatif) au cours d'une année donnée. Cet exercice montre comment chaque mesure en soi (c'est-à-dire sans combinaison avec une autre mesure) affecte l'activité de transport et les émissions de CO₂ selon le modèle et les hypothèses sous-jacentes. La combinaison des mesures ne correspond pas nécessairement à la somme de toutes les mesures individuelles mises en place.

Fonctionnement du modèle

Le modèle permet d'ajouter de nouvelles lignes ferroviaires pour chaque scénario. Pour ajouter une ligne ferroviaire, il faut sélectionner une année de départ, ainsi qu'une région d'origine et une région de destination. L'utilisateur doit également sélectionner une option de vitesse (conventionnelle - 50 km/h ; grande vitesse - 100 km/h ; ou grande vitesse + - 200 km/h) et un coût pour les voyageurs. Une nouvelle ligne ferroviaire aura l'effet suivant dans le modèle :

- Le transport ferroviaire est activé dans les régions concernées si l'option de transport n'était pas disponible auparavant. La durée du voyage est calculée en fonction de la vitesse sélectionnée et de la distance entre les régions concernées (voir l'annexe pour les distances entre les régions).
- Si le transport ferroviaire est déjà disponible dans certaines des régions touchées, les temps de trajet et les coûts sont modifiés pour refléter la situation actualisée.
- On suppose que les nouvelles lignes ferroviaires sont électriques.

Impacts sur l'activité globale des transports et les émissions

Ces changements favorisent l'alternative ferroviaire et/ou la rendent plus attrayante pour les usagers. La part modale du rail augmente donc dans les zones concernées. Comme les nouvelles lignes ferroviaires sont supposées être électriques, les trajets effectués avec les nouvelles lignes ferroviaires n'auront pas d'émissions directes de CO₂. Si les nouvelles lignes ferroviaires réduisent le temps de trajet minimum entre les zones, elles affectent également l'étape de génération et de distribution, augmentant la génération de déplacements dans les zones affectées et attirant plus de déplacements dans ces zones.

Pour tester l'impact de la mesure, une nouvelle ligne ferroviaire est créée entre Marrakech (région 7) et Agadir (région 9). L'année de départ est fixée à 2045 et la nouvelle ligne ferroviaire est à grande vitesse + et avec un tarif de base de 25 \$US. Le tableau 11 et la figure 8 montrent l'impact de cette nouvelle ligne ferroviaire sur certains indicateurs d'activité de transport et sur les émissions de CO₂ pour les deux scénarios. Les résultats montrent que, grâce à la mise en œuvre de cette nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse, le nombre de voyageurs-kilomètres en 2050 est supérieur de 30 % et les émissions de CO₂ sont inférieures de plus de 3 % par rapport à un scénario dans lequel cette ligne n'aurait pas été mise en œuvre.

Lorsque l'on évalue l'impact sur les régions spécifiquement touchées par la mesure, l'impact est encore plus important : la part du mode ferroviaire passe de 0 à 27 % et les émissions de CO₂ diminuent de 26 %.

Figure 8 : Impact de la nouvelle ligne ferroviaire sur l'activité de transport non urbain de voyageurs au départ d'une des zones affectées (région 9 : Souss-Massa)

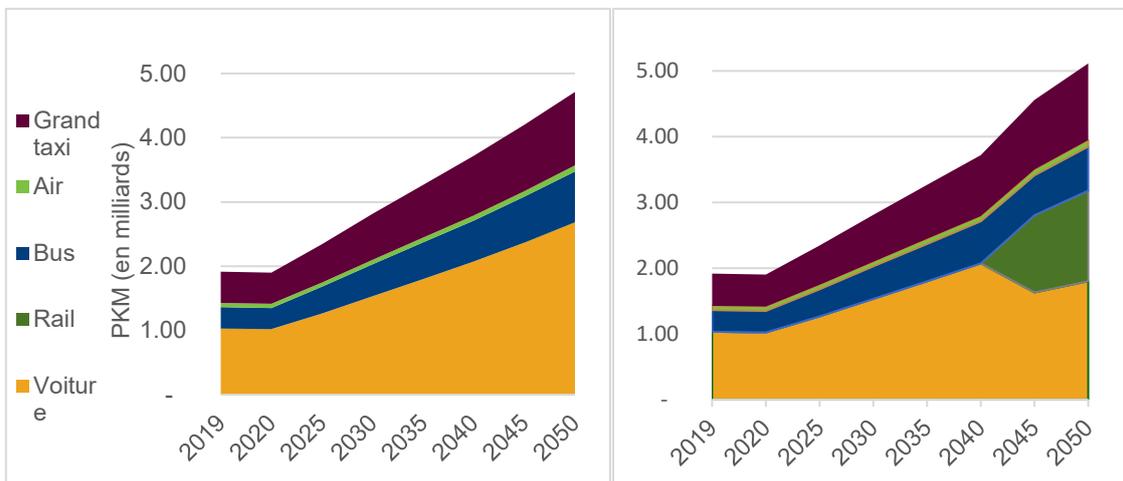


Tableau 11 : Impact de la nouvelle ligne ferroviaire sur l'activité de transport et les émissions de CO₂

Indicateur	Sans mesure (base)	Avec mesure (alternative)	% de différence
Ensemble du pays voyageurs non urbains			
Rail PKM - 2050	10 milliards	13 milliards	+ 30%
Part du mode de transport ferroviaire PKM - 2050	13%	16%	+ 8.7%
CO ₂ émissions	4,42 millions de tonnes	4,28 millions de tonnes	- 3.2%
Voyages au départ de la région 9 (Souss-Massa)			
Rail PKM - 2050	0	1,4 milliard d'euros	
Part du mode de transport ferroviaire PKM - 2050	0	27%	
CO ₂ émissions	0,3 million de tonnes	0,2 million de tonnes	- 26%

Annexe

Table 13: Régions du modèle

Modèle ID	Régions
1	Tanger - Tétouan - Al Hoceima
2	l'Oriental
3	Fès - Meknès
4	Rabat - Salé - Kénitra
5	Béni Mellal- Khénifra
6	Casablanca - Settat
7	Marrakech - Safi
8	Drâa - Tafilalet
9	Souss - Massa
10	Guelmim - Oued Noun
11	Laâyoune - Sakia El Hamra
12	Dakhla - Oued Ed-Dahab

Table 14: Matrice origine - destination en 2019 (milliers de voyages)

ID d'origine / de destination	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2497 4	70	204	624	80	402	135	38	80	37	152	548
2	70	8637	311	179	59	242	110	55	92	154	671	80
3	204	311	26689	740	142	501	171	107	124	100	531	419
4	624	179	740	123765	642	7841	358	129	183	127	364	1835
5	80	59	142	642	10948	2215	323	38	65	23	47	192
6	402	242	501	7841	2215	134853	807	283	239	164	147	152
7	135	110	171	358	323	807	29555	87	228	77	108	295
8	38	55	107	129	38	283	87	2528	64	29	55	113
9	80	92	124	183	65	239	228	64	12214	129	51	65
10	37	154	100	127	23	164	77	29	129	560	6	6
11	152	671	531	364	47	147	108	55	51	6	391	6
12	548	80	419	1835	192	152	295	113	65	6	6	159

Table 15: Temps et coûts de déplacement entre les régions par mode de transport

ID d'origine	ID de destination	Durée du trajet (minutes)					Coût (USD)				
		Voiture	Rail	Bus	Air	Grand Taxi	Voiture	Rail	Bus	Air	Grand Taxi
1	1	41	73	65	-	55	6.0	1.7	1.5	-	4.0
1	2	438	430	862	1113	438	103.9	21.7	29.5	146.0	129.9
1	3	254	210	478	1128	254	57.7	16.9	15.7	174.0	72.1
1	4	161	80	301	-	161	36.3	18.6	8.4	-	45.3
1	5	327	287	555	-	327	66.9	13.5	21.7	-	83.6
1	6	215	135	406	87	215	48.9	24.2	9.8	102.1	61.1
1	7	356	315	689	220	356	83.1	21.3	31.5	188.8	103.9
1	8	516	-	796	-	516	81.7	-	30.0	-	102.2
1	9	489	-	958	705	489	115.5	-	35.9	150.4	144.4
1	10	649	-	1173	-	649	135.3	-	42.8	-	169.1
1	11	975	-	1701	-	975	183.7	-	70.9	-	229.6
1	12	1343	-	2338	1155	1343	242.2	-	93.0	193.7	302.8
2	1	438	430	862	1113	438	103.9	21.7	29.5	146.0	129.9
2	2	83	101	132	-	110	12.1	6.0	4.0	-	3.0
2	3	211	220	396	270	211	47.7	11.4	12.8	120.4	59.7
2	4	320	450	633	-	320	76.3	18.6	28.5	-	95.3
2	5	454	677	777	-	454	93.7	12.0	44.3	-	117.1
2	6	373	525	737	75	373	88.9	21.2	32.5	50.1	111.1
2	7	514	705	1021	289	514	123.1	29.0	41.3	135.1	153.9
2	8	420	-	651	-	420	59.8	-	30.0	-	74.7
2	9	648	-	1290	225	648	155.5	-	54.1	96.7	194.4
2	10	807	-	1505	-	807	175.3	-	64.0	-	219.1
2	11	1133	-	2032	-	1133	223.7	-	84.6	-	279.6
2	12	1502	-	2669	340	1502	282.2	-	106.8	140.0	352.8
3	1	254	210	478	1128	254	57.7	16.9	15.7	174.0	72.1
3	2	211	220	396	270	211	47.7	11.4	12.8	120.4	59.7
3	3	63	88	101	-	96	9.2	3.0	4.3	-	3.3
3	4	135	170	249	-	135	30.0	11.1	7.9	-	37.5
3	5	270	382	394	-	270	47.5	8.9	14.3	-	59.3
3	6	189	230	354	61	189	42.6	15.0	8.9	78.1	53.3
3	7	330	410	637	354	330	76.8	19.2	18.2	163.2	96.1
3	8	318	-	408	-	318	37.5	-	16.2	-	46.9
3	9	463	-	906	375	463	109.3	-	33.5	126.6	136.6
3	10	623	-	1122	-	623	129.0	-	41.8	-	161.3
3	11	949	-	1649	-	949	177.5	-	88.6	-	221.8
3	12	1318	-	2286	750	1318	236.0	-	94.0	168.1	295.0
4	1	161	80	301	-	161	36.3	18.6	8.4	-	45.3
4	2	320	450	633	-	320	76.3	18.6	28.5	-	95.3
4	3	135	170	249	-	135	30.0	11.1	7.9	-	37.5
4	4	42	68	101	-	56	6.2	1.6	3.5	-	1.6
4	5	191	222	275	-	191	33.2	3.9	14.8	-	41.5
4	6	64	70	105	-	64	12.6	4.9	3.4	-	15.8

4	7	205	250	388	-	205	46.8	18.0	17.2	-	58.5
4	8	397	-	567	-	397	52.0	-	26.1	-	65.1
4	9	339	-	657	65	339	79.2	-	31.5	59.0	99.1
4	10	498	-	872	-	498	99.0	-	36.9	-	123.8
4	11	824	-	1400	-	824	147.4	-	64.0	-	184.3
4	12	1193	-	2037	-	1193	205.9	-	86.1	-	257.4
5	1	327	287	555	-	327	66.9	13.5	21.7	-	83.6
5	2	454	677	777	-	454	93.7	12.0	44.3	-	117.1
5	3	270	382	394	-	270	47.5	8.9	14.3	-	59.3
5	4	191	222	275	-	191	33.2	3.9	14.8	-	41.5
5	5	53	-	84	-	70	7.8	-	2.6	-	1.9
5	6	144	152	268	-	144	32.4	1.4	11.8	-	40.5
5	7	183	332	233	-	183	28.0	7.4	7.4	-	35.0
5	8	335	-	432	-	335	39.7	-	41.8	-	49.6
5	9	338	-	542	-	338	65.4	-	44.3	-	81.7
5	10	498	-	757	-	498	85.1	-	44.8	-	106.4
5	11	823	-	1284	-	823	133.5	-	47.7	-	166.9
5	12	1192	-	1922	-	1192	192.1	-	70.4	-	240.1
6	1	215	135	406	87	215	48.9	24.2	9.8	102.1	61.1
6	2	373	525	737	75	373	88.9	21.2	32.5	50.1	111.1
6	3	189	230	354	61	189	42.6	15.0	8.9	78.1	53.3
6	4	64	70	105	-	64	12.6	4.9	3.4	-	15.8
6	5	144	152	268	-	144	32.4	1.4	11.8	-	40.5
6	6	45	80	72	-	60	6.7	1.7	2.2	-	1.7
6	7	160	180	291	61	160	35.1	11.9	8.9	92.9	43.8
6	8	435	-	643	59	435	66.7	-	30.0	40.3	83.4
6	9	293	-	560	60	293	67.5	-	27.1	54.5	84.4
6	10	453	-	775	100	453	87.3	-	33.0	58.5	109.1
6	11	778	-	1302	100	778	135.7	-	67.4	78.1	169.6
6	12	1147	-	1939	130	1147	194.2	-	89.6	100.1	242.8
7	1	356	315	689	220	356	83.1	21.3	31.5	188.8	103.9
7	2	514	705	1021	289	514	123.1	29.0	41.3	135.1	153.9
7	3	330	410	637	354	330	76.8	19.2	18.2	163.2	96.1
7	4	205	250	388	-	205	46.8	18.0	17.2	-	58.5
7	5	183	332	233	-	183	28.0	7.4	7.4	-	35.0
7	6	160	180	291	61	160	35.1	11.9	8.9	92.9	43.8
7	7	63	112	101	-	84	9.3	2.3	3.1	-	2.3
7	8	466	-	597	309	466	54.9	-	33.5	129.2	68.6
7	9	189	-	306	240	189	36.9	-	12.8	139.6	46.1
7	10	349	-	521	744	349	56.6	-	22.6	147.9	70.8
7	11	675	-	1048	264	675	105.1	-	44.3	169.1	131.3
7	12	1044	-	1685	354	1044	163.6	-	62.5	182.9	204.5
8	1	516	-	796	-	516	81.7	-	30.0	-	102.2
8	2	420	-	651	-	420	59.8	-	30.0	-	74.7
8	3	318	-	408	-	318	37.5	-	16.2	-	46.9
8	4	397	-	567	-	397	52.0	-	26.1	-	65.1
8	5	335	-	432	-	335	39.7	-	41.8	-	49.6
8	6	435	-	643	59	435	66.7	-	30.0	40.3	83.4

8	7	466	-	597	309	466	54.9	-	33.5	129.2	68.6
8	8	94	-	150	-	125	13.8	-	4.6	-	3.5
8	9	575	-	795	267	575	73.0	-	26.1	90.8	91.3
8	10	662	-	1012	645	662	93.0	-	63.0	99.2	116.2
8	11	988	-	1540	750	988	141.4	-	90.1	119.4	176.8
8	12	1357	-	2177	1035	1357	199.9	-	112.2	139.1	249.9
9	1	489	-	958	705	489	115.5	-	35.9	150.4	144.4
9	2	648	-	1290	225	648	155.5	-	54.1	96.7	194.4
9	3	463	-	906	375	463	109.3	-	33.5	126.6	136.6
9	4	339	-	657	65	339	79.2	-	31.5	59.0	99.1
9	5	338	-	542	-	338	65.4	-	44.3	-	81.7
9	6	293	-	560	60	293	67.5	-	27.1	54.5	84.4
9	7	189	-	306	240	189	36.9	-	12.8	139.6	46.1
9	8	575	-	795	267	575	73.0	-	26.1	90.8	91.3
9	9	73	-	118	-	98	10.8	-	3.6	-	2.7
9	10	195	-	244	507	195	22.4	-	11.3	109.5	28.0
9	11	521	-	771	255	521	70.8	-	30.5	130.7	88.5
9	12	890	-	1408	333	890	129.3	-	52.2	110.5	161.7
10	1	649	-	1173	-	649	135.3	-	42.8	-	169.1
10	2	807	-	1505	-	807	175.3	-	64.0	-	219.1
10	3	623	-	1122	-	623	129.0	-	41.8	-	161.3
10	4	498	-	872	-	498	99.0	-	36.9	-	123.8
10	5	498	-	757	-	498	85.1	-	44.8	-	106.4
10	6	453	-	775	100	453	87.3	-	33.0	58.5	109.1
10	7	349	-	521	744	349	56.6	-	22.6	147.9	70.8
10	8	662	-	1012	645	662	93.0	-	63.0	99.2	116.2
10	9	195	-	244	507	195	22.4	-	11.3	109.5	28.0
10	10	68	-	109	-	91	10.0	-	3.3	-	2.5
10	11	328	-	528	920	328	48.5	-	21.7	139.1	60.6
10	12	697	-	1165	1413	697	107.0	-	44.3	157.8	133.7
11	1	975	-	1701	-	975	183.7	-	70.9	-	229.6
11	2	1133	-	2032	-	1133	223.7	-	84.6	-	279.6
11	3	949	-	1649	-	949	177.5	-	88.6	-	221.8
11	4	824	-	1400	-	824	147.4	-	64.0	-	184.3
11	5	823	-	1284	-	823	133.5	-	47.7	-	166.9
11	6	778	-	1302	100	778	135.7	-	67.4	78.1	169.6
11	7	675	-	1048	264	675	105.1	-	44.3	169.1	131.3
11	8	988	-	1540	750	988	141.4	-	90.1	119.4	176.8
11	9	521	-	771	255	521	70.8	-	30.5	130.7	88.5
11	10	328	-	528	920	328	48.5	-	21.7	139.1	60.6
11	11	119	-	190	-	159	17.5	-	5.8	-	4.4
11	12	373	-	639	-	373	58.7	-	22.6	-	73.4
12	1	1343	-	2338	1155	1343	242.2	-	93.0	193.7	302.8
12	2	1502	-	2669	340	1502	282.2	-	106.8	140.0	352.8
12	3	1318	-	2286	750	1318	236.0	-	94.0	168.1	295.0
12	4	1193	-	2037	-	1193	205.9	-	86.1	-	257.4
12	5	1192	-	1922	-	1192	192.1	-	70.4	-	240.1
12	6	1147	-	1939	130	1147	194.2	-	89.6	100.1	242.8

12	7	1044	-	1685	354	1044	163.6	-	62.5	182.9	204.5
12	8	1357	-	2177	1035	1357	199.9	-	112.2	139.1	249.9
12	9	890	-	1408	333	890	129.3	-	52.2	110.5	161.7
12	10	697	-	1165	1413	697	107.0	-	44.3	157.8	133.7
12	11	373	-	639	-	373	58.7	-	22.6	-	73.4
12	12	114	-	182	-	152	16.8	-	5.6	-	4.2

Table 16: Matrice des distances entre les régions (en km)

ID d'origine / de destination	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	55	717	398	252	463	338	574	663	798	977	1416	1948
2	717	110	331	528	671	615	851	537	1075	1254	1693	2225
3	398	331	84	208	351	294	530	343	754	934	1373	1904
4	252	528	208	56	230	87	323	471	547	726	1165	1697
5	463	671	351	230	70	223	194	360	452	631	1070	1601
6	338	615	294	87	223	60	243	536	467	647	1086	1617
7	574	851	530	323	194	243	84	498	251	431	870	1401
8	663	537	343	471	360	536	498	125	663	844	1283	1814
9	798	1075	754	547	452	467	251	663	98	203	642	1174
10	977	1254	934	726	631	647	431	844	203	91	440	971
11	1416	1693	1373	1165	1070	1086	870	1283	642	440	159	532
12	1948	2225	1904	1697	1601	1617	1401	1814	1174	971	532	152

Table 17: Hypothèses pour mesures d'offre de transports pour trois scénarios de politiques

Mesures	Fil de l'eau	Ambition limitée	Ambition élevée
Nouvelles autoroutes	Le réseau de routes et autoroutes reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	Le scénario intègre de nouvelles routes et autoroutes en accord avec le SNR 2040: Safi-Marrakech-Béni Mellal-Fès-Tanger (2040)	Même niveau que sous "ambition limitée"
Nouvelles lignes ferroviaires à grande vitesse (LGV) pour le transport de voyageurs	Le réseau ferroviaire reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	Le scénario intègre une nouvelle ligne LGV entre Marrakech et Agadir (2045) en accord avec les plans de l'ONCF.	Le scénario intègre une nouvelle ligne LGV entre Marrakech et Agadir (2045) en accord avec les plans de l'ONCF.
Nouvelles lignes ferroviaires conventionnelles pour le transport de voyageurs	Le réseau ferroviaire reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	Le réseau ferroviaire reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	Aucune nouvelle liaison ferroviaire conventionnelle non urbaine n'est prévue, mais des améliorations aux liaisons existantes.
Amélioration des lignes ferroviaires existantes	Le réseau ferroviaire reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	Le réseau ferroviaire reste statique avec les mêmes valeurs qu'en 2019.	La ligne ferroviaire existante Casablanca - Marrakech est modernisée pour devenir une ligne à grande vitesse (2030). Les lignes ferroviaires régionales dans les régions suivantes améliorent leur fréquence : - Grand Casablanca (2030) - Rabat - Salé - Kénitra (2030) - Tanger - Tétouan - Al Hoceima (2045) - Orientale (2045) - Marrakech - Safi (2045)

Table 18: Hypothèses pour mesures de demande de transports pour trois scénarios de politiques

Mesures	Fil de l'eau	Ambition limitée	Ambition élevée
Prix des carburants	N/A	N/A	Augmentation en pourcentage du prix du carburant par période de 5 ans (augmentation de 0 % à 8 %)
Taxe sur les billets d'avion	N/A	N/A	Augmentation en pourcentage du prix des billets d'avion (augmentation de 3% en 2030 et 8% en 2050)
Amélioration des services de bus interrégionaux	N/A	N/A	Amélioration de la qualité du service de bus (fréquence, du confort, de la fiabilité) en 2035 qui contribue à augmenter de 20 % la préférence pour le choix du bus.
Amélioration des services de bus intrarégionaux	N/A	N/A	Amélioration de la qualité du service de bus (fréquence, du confort, de la fiabilité) en 2035 qui contribue à augmenter de 10 % la préférence pour le choix du bus.
Covoiturage et partage des trajets (voiture privée)	N/A	N/A	Augmentation de 15 % du coefficient de remplissage des déplacements intrarégionaux à partir de 2030. Augmentation de 10 % du coefficient de remplissage des déplacements interrégionaux à partir de 2030.
Covoiturage et partage des trajets (grand taxi)	N/A	N/A	Augmentation de 10 % du coefficient de remplissage des déplacements interrégionaux à partir de 2030.

Table 19: Hypothèses pour mesures de carburants et technologies de transports pour trois scénarios de politiques

Mesures	Fil de l'eau	Ambition limitée	Ambition élevée
Adoption de véhicules à zéro émission	N/A	Objectif de ventes de véhicules zéro émission de 5 % en 2030 et de 20 % en 2050.	Objectif de ventes de véhicules zéro émission (ZEV) de 10 % en 2030 et de 50 % en 2050.
Normes plus strictes en matière d'économie de carburant pour les nouvelles voitures à combustion interne	Les nouveaux véhicules ICE vendus après 2030 sont 5 % plus efficaces en termes d'émissions de CO2 par kilomètre.	Les nouveaux véhicules ICE vendus après 2030 sont 5 % plus efficaces en termes d'émissions de CO2 par kilomètre.	Les nouveaux véhicules ICE vendus après 2030 sont 20 % plus efficaces en termes d'émissions de CO2 par kilomètre.
Adoption de flottes d'autobus à zéro émissions (régionaux et interurbains) plus propres	N/A	N/A	Les ZEV représentent 5% du parc de bus intrarégional en 2030 et 10% en 2050. Les ZEV représentent 2% du parc de bus interrégional en 2030 et 5% en 2050.
Électrification des chemins de fer	N/A	La ligne ferroviaire existante Fès-Oriental est électrifiée (2040).	La ligne ferroviaire existante Fès-Oriental est électrifiée (2040).

L'éco-conduite pour les autobus	N/A	Des techniques d'écoconduite sont mises en œuvre dans les bus interrégionaux et intrarégionaux à partir de 2035, réduisant de 7.5 % les émissions de CO2 par kilomètre.	Des techniques d'écoconduite sont mises en œuvre dans les bus interrégionaux et intrarégionaux à partir de 2035, réduisant de 7.5 % les émissions de CO2 par kilomètre.
---------------------------------	-----	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------