

RAPPORT MÉTHODOLOGIQUE

MODÈLE DE DÉPLACEMENTS URBAINS DE VOYAGEURS POUR LE ROYAUME DU MAROC

Forum International des Transports

Juin 2024

The International Transport Forum

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.

International Transport Forum
2 rue André Pascal
F-75775 Paris Cedex 16
contact@itf-oecd.org
www.itf-oecd.org

ITF Project deliverable

Sommaire

Un modèle stratégique de déplacements urbains pour le Maroc.....	4
Objectifs	4
Périmètre du modèle	4
Structure du modèle	6
Model caveat.....	Error! Bookmark not defined.
Les entrants du modèle.....	7
Les données 2015-2023	7
Projections jusqu'en 2050.....	8
Scénario.....	8
Évolution des aires urbaines	9
Caractéristiques géographiques.....	9
Distance de déplacement.....	10
Offre de transport	11
Caractéristiques modales	17
Génération de déplacements et choix modal.....	19
Génération de déplacements.....	19
Choix modal.....	20
Principaux résultats.....	21
Activité de voyageurs et de véhicules	21
Emissions de CO ₂	22
Mesures et scénarios	22
Measures overview	Error! Bookmark not defined.
Infrastructure Measures.....	Error! Bookmark not defined.
Innovation / Research and Development (R&D) Measures.....	24
Regulatory Measures	25
Economic Measures	26
Operational Measures.....	Error! Bookmark not defined.

Un modèle stratégique de déplacements urbains pour le Maroc

Objectifs

L'objectif du modèle est de fournir aux décideurs politiques un outils permettant d'identifier et d'évaluer les potentielles trajectoires de décarbonation du secteur du transport urbain de voyageurs dans les villes marocaines jusqu'en 2050. Cet outil facile à prendre en main permet aux usagers de tester librement différents paquets de politiques via la création de scénarios.

Ce modèle basé sur Microsoft Excel est accessible aux planificateurs urbains et aux preneurs de décisions pour déterminer l'impact de politiques et programmes alternatifs sur la mobilité urbaine, en termes d'émissions (directes ou indirectes) de CO₂, de parts modales ou de volumes de transport.

L'outil de modélisation a été développé à partir du modèle international de déplacements urbains de voyageurs du FIT présenté pour la première fois en 2017¹ et amélioré depuis dans le contexte du projet européen Horizon 2020 « Decarbonising Transport in Europe » notamment, en 2020² et pour les dernière éditions des Perspectives des Transports du FIT³. Cette note décrit en détail les sources de données, les étapes de modélisation et les hypothèses du modèle. C'est un document de référence à destination des usagers de l'outil souhaitant comprendre les hypothèses prises et les relations entre les différentes variables.

Le modèle a été développé dans le contexte du projet « Décarbonation des Transports pour les Économies Émergentes » (DTEE) du FIT, et financé par le Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature, de la Sécurité nucléaire et de la Protection des consommateurs de la République fédérale d'Allemagne (BMUV).

Périmètre du modèle

Le modèle représente la mobilité urbaine pour les 25 principales aires urbaines du Maroc identifiée à partir des données du Haut Commissariat au Plan⁴ (HCP) et de consultations avec le Ministère de l'Intérieur (MI) du Royaume. Ces aires urbaines sont basées sur un continuum de bâti et de concentration de population ne correspondant pas exactement aux limites administratives et sont estimées à partir de la population urbaine fournie au niveau des provinces et des régions. Elles ont ensuite été réparties en 4 catégories selon des seuils de population (pour l'année 2020) déterminés entre le FIT et le MI, représentant des seuils de comportements de mobilité distincts adaptés à la diversité des villes marocaines. La catégorie des aires urbaines est fixe et n'évolue pas dans le modèle pour permettre des analyses par catégorie à composition constante. La liste des aires urbaines considérées et leur catégorisation est présentée dans la Figure 1.

¹ Chen, Guineng, and Jari Kauppila. "Global Urban Passenger Travel Demand and CO₂ Emissions to 2050: New Model." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2671, no. 1 (January 2017): 71–79. <https://doi.org/10.3141/2671-08>.

² ITF, "The ITF Urban Passenger model – Insights and example outputs", Horizon 2020 project "Decarbonising Transport in Europe", 2020, <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cc3ef7f1&appId=PPGMS>

³ OCDE, Les Perspectives des Transports du FIT, OECD Publishing, Paris, https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook_25202367

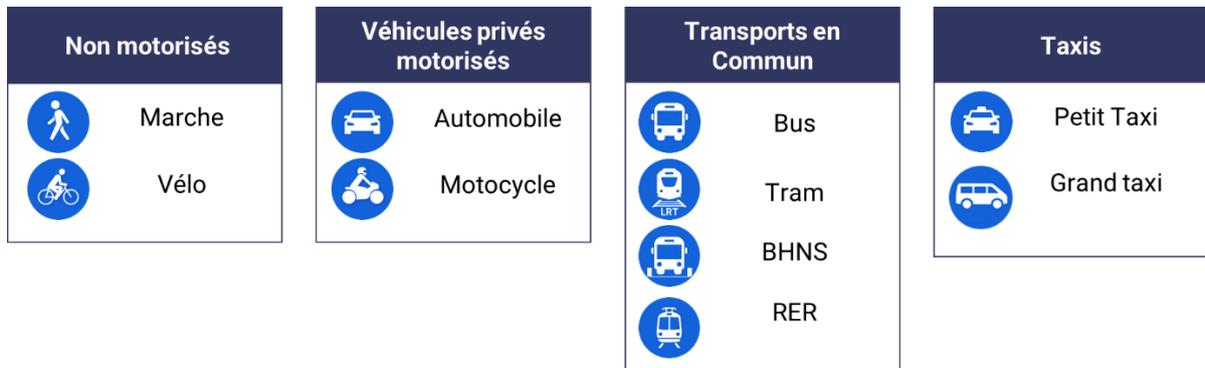
⁴ <https://www.hcp.ma/>

Figure 1 : Liste des aires urbaines

Population 2015		
Grand Casablanca	4 105 959	Catégorie I : plus de 2M habitants
Rabat-Salé-Skhirate-Temara	2 035 350	
Fès	1 143 583	Catégorie II : 900k à 2M habitants
Agadir-Ida-Ou-Tanane-Inezgane- Ait Melloul	1 045 696	
Tanger-Assilah	1 025 025	
Marrakech	989 604	
Meknès	696 869	Catégorie III : 300k à 900k habitants
Kenitra	619 243	
Oujda-Angad	517 014	
Nador	400 258	
Tétouan	401 192	
Khouribga	382 602	
El Jadida	319 426	
Berrechid	284 538	
Safi	347 904	
Béni Mellal	329 655	
Khémisset	284 731	Catégorie IV : inférieur à 300k habitants
Larache	267 273	
Laayoune	238 853	
Khenifra	231 417	
Settat	220 803	
Fquih Ben Salah	208 354	
Taza	209 190	
Berkane	185 845	
Errachidia	195 818	
TOTAL	18 232 218	
Part de la population marocaine	50.7%	

Pour chacune des aires urbaines d'étude, le modèle représente la répartition des déplacements urbains ayant une origine et destination au sein de l'aire urbaine. Ces déplacements sont réalisés grâce à l'un des 10 modes de transports considérés, dont certains prospectifs comme le RER par exemple. Ces modes sont ensuite agrégés en 4 principales catégories de modes pour simplifier la lecture des résultats. Figure 2 présente ces modes de transport. BHNS est l'acronyme pour Bus à Haut Niveau de Service, et RER pour Réseau Express Régional.

Figure 2 : Modes de déplacement

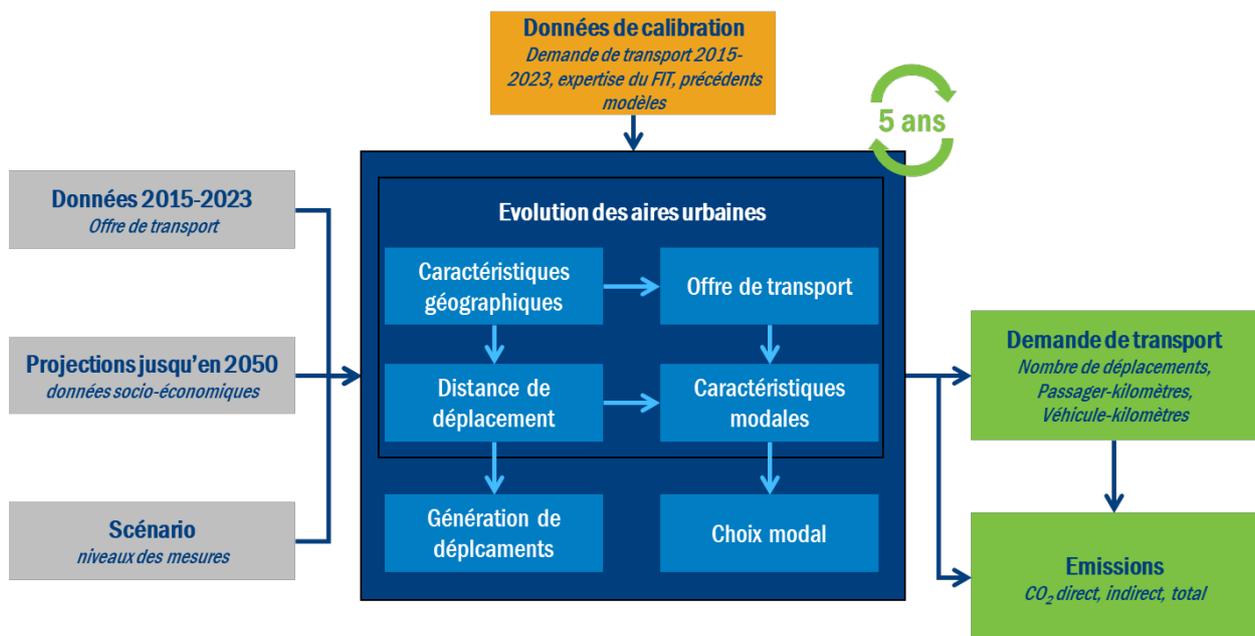


Les estimations de la demande de transport produite par le modèle sont disponibles en déplacements, en passager-kilomètres et en véhicule-kilomètres pour chaque aire urbaine et mode de transport. Cette demande est convertie en émissions de carbone, directes (du réservoir à la roue), indirectes (de la production d'énergie au réservoir) et totales (directes et indirectes). Le pas temporel du modèle est de 5 ans, entre 2015 et 2050 : les estimations sont donc produites pour 2015, 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 et 2050.

Structure du modèle

Le principe théorique de cette modélisation est inspiré par les modèles de transport 4 étapes traditionnels, en incluant une estimation finale des émissions de CO₂. Les résultats de chaque module impactent les étapes successives du modèle en tant qu'entrants, comme illustré dans la Figure 3. Le fonctionnement détaillé des différents modules et les hypothèses principales sont détaillés dans les sections suivantes.

Figure 3: Structure Générale du modèle



Tout d'abord, le modèle est initialisé par différents entrants : 1) Données existantes pour les années de référence 2015-2023, 2) Les projections de données socio-économiques jusqu'en 2050 (démographie, développements économiques), et 3) Les différents niveaux de mise en œuvre des mesures politiques et développements technologiques constituant les scénarios. Une modification d'un des entrants aura des impacts sur l'ensemble des sous variables et des résultats finaux du modèle.

Ensuite, le modèle réalise des estimations pour représenter l'évolution des aires urbaines. Il commence par faire évoluer les caractéristiques géographiques telles que la surface de l'aire urbaine et sa densité à partir des évolutions socio-économiques et des scénarios de mesures. Ces évolutions socio-économiques et géographiques entraînent une évolution des distances moyennes de déplacement, mais aussi de l'offre de transport. L'étape finale d'évolution des caractéristiques modales, c'est-à-dire l'évolution des niveaux de service, du temps moyen d'accès, du temps d'attente, du temps de trajet, du coût et du coût de stationnement pour chaque mode, peut alors être réalisée.

Le cœur du modèle de demande peut alors estimer la génération de déplacements et le choix modal. Le nombre de déplacements est notamment en lien avec la croissance démographique, et les perspectives d'évolution des taux moyens de déplacements, et le choix modal estime les parts modales à partir des caractéristiques modales.

Enfin, les principaux résultats du modèle sont produits. La demande de déplacements est le résultat d'une combinaison entre la génération de déplacement, les distances moyennes de déplacements et les parts modales. Des hypothèses quant à l'évolution des taux d'occupation moyen de véhicules permettant de convertir la demande en déplacements de voyageurs en demande en déplacements de véhicules. Les hypothèses d'amélioration des standards d'émission permettent alors d'affecter des émissions moyennes de CO₂ aux différents modes de transport, selon les développements des différentes technologies de véhicules. Les émissions de CO₂ directes, indirectes et totales deviennent ainsi disponibles.

Le modèle est calibré dans son ensemble à partir de données officielles communiquées par les autorités Marocaines, de la calibration du modèle international de déplacements urbains de voyageurs du FIT, et de l'expertise interne au FIT issue notamment de nombreux autres projets de décarbonation des transports dans les économies émergentes. Lorsque les données pour le Maroc n'étaient pas directement disponibles, des efforts de synthétisation à partir de cas similaires ou bien d'hypothèses ont été conduits pour que le modèle soit fonctionnel, et aussi précis que possible, selon les données disponibles.

Les entrants du modèle

Cette section présente les données nécessaires à l'initialisation du modèle. Trois types d'entrants sont notamment nécessaires : les données d'offre de transport en 2015-2023, les données de projections socio-économiques jusqu'en 2050 et les scénarios de mesures politiques et développements technologiques.

Les données 2015-2023

Offre de transport

L'année de référence du modèle est l'année 2015 étant donné le manque de fiabilités autour des données 2020 liées à la crise du Covid-19 bien que l'effet du Covid-19 ne soit pas inclus dans ce modèle tendanciel. Les données d'offre de transport utilisées pour initialiser le modèle proviennent de la période 2015-2023 et sont issues d'extractions de la base de données OpenStreetMaps (OSM)⁵ pour les infrastructures routières, d'informations collectées par la société MobiConseil à partir des plans de mobilités pour les infrastructures et flottes de transports en commun. Des données additionnelles quant à la tarification des transports proviennent de retours locaux de MobiConseil, du MI et de la base de données de Numbeo (World Transport Fare).

Les informations sur la vitesse, la fréquence, les temps d'attente moyens, la tarification proviennent du retour d'expérience du FIT sur d'autres projets similaires, du retour de MobiConseil, du MI et des

⁵ <https://www.openstreetmap.org/>

collectivités territoriales marocaines et d'analyses de valeurs disponibles sur les sites internet officiels. Par exemple, la tarification et les fréquences du tram sont disponibles sur les sites internet des opérateurs. Les données non observées sont reconstruites à partir des valeurs observées et selon des cas similaires. Par exemple, un bus à une vitesse moyenne inférieure à une automobile, elle-même inférieure à celle d'un motorcycle.

Projections jusqu'en 2050

Données démographiques

Les données de population sont issues des données officielles du HCP, pour la population totale administrative par province et pour la population urbaine, entre 2015 et 2030. Ces données sont ensuite projetées jusqu'en 2050 à partir des prévisions de croissance nationale de la population marocaine de l'ONU⁶, et calibrées sur la croissance relative des populations de chaque aire urbaine à cette croissance nationale entre 2015 et 2030.

Données économiques

Les données concernant le Produit Métropolitain Brut (PMB) sont issues des données officielles du HCP, au niveau régional, entre 2015 et 2030. Ces données sont réparties entre les différentes aires urbaines de manière à être compatibles avec les projections régionales, et selon une répartition du PIB par habitant basé sur les données LANDSAT 2010⁷. Ces données sont ensuite projetées jusqu'en 2050 à partir des prévisions de croissance nationale du PIB marocain de l'OCDE, du FMI et de la Banque Mondiale, et calibrées sur la croissance relative du PMB de chaque aire urbaine à cette croissance nationale entre 2015 et 2022.

Scénario

Pour permettre aux usagers de concevoir et tester différents scénarios prospectifs de politiques, le modèle permet d'évaluer 22 mesures politiques et développements technologiques listées dans la Figure 4 et décrite en détail dans la section correspondante. Ces mesures peuvent renvoyer à des mesures directes telles que celles de tarification ou de développement d'infrastructure, ou bien à des objectifs souhaités comme les développements technologiques, constitués de mesures permettant d'atteindre un pourcentage précis de véhicules électriques par exemple. La plupart de ces mesures a été identifiée grâce au projet Décarbonation des Transports en Europe⁸ et au Transport Climate Action Directory⁹ du FIT. Selon le type de mesure, elles peuvent aussi bien s'appliquer au niveau national (e.g. tarification des énergies fossiles), par catégorie d'aire urbaine (e.g. pénétration des bus électriques dans les flottes de transport en commun), ou par aire urbaine (e.g. développement d'infrastructure RER).

Les usagers peuvent définir un objectif pour chaque mesure, son année de mise en œuvre et son niveau en 2050 dans l'onglet « Définition de scénario ». Ces objectifs sont traduits en paramètre intermédiaires

⁶ UN World Population Prospects 2022, <https://population.un.org/wpp/>

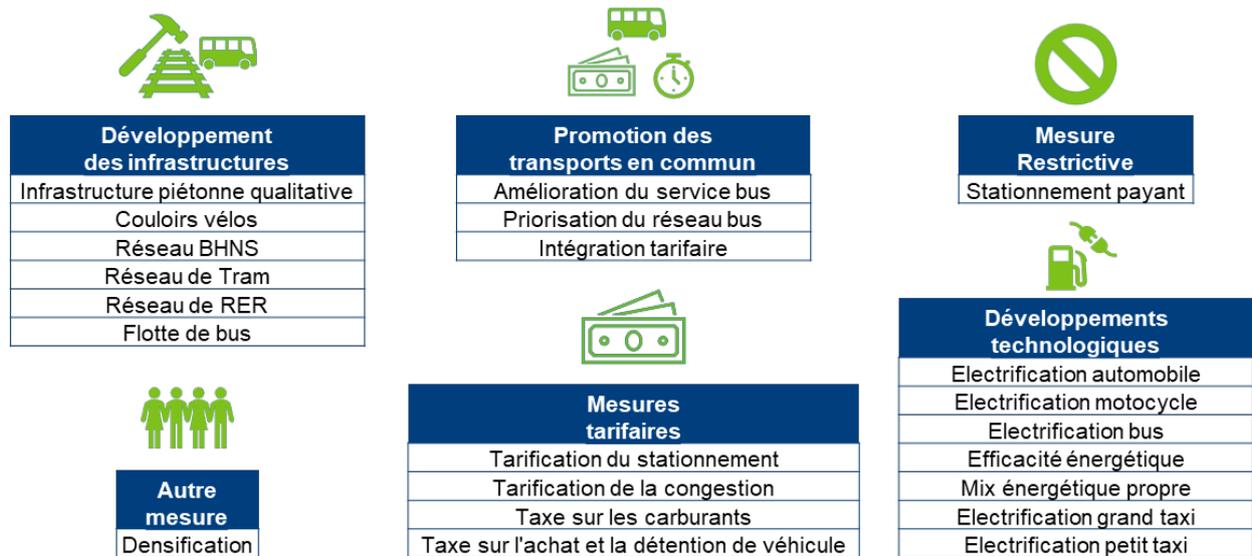
⁷ <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

⁸ ITF (2019), Modelling Urban CO₂ Mitigation Measures, <https://cordis.europa.eu/project/id/831743/results>.

⁹ ITF Transport Climate Action Directory (TCAD), <https://www.itf-oecd.org/tcad>

entre 2025 et 2050, avec pour objectif de lisser linéairement le développement des mesures dans le temps à partir de 2020. Ces paramètres viennent ensuite affecter différentes variables intermédiaires du modèle selon la mesure, et ainsi altérer les résultats finaux, permettant de tracer de nouvelles trajectoires de décarbonation.

Figure 4 : Liste des mesures par catégorie



Évolution des aires urbaines

Cette section décrit le fonctionnement de l'évolution des aires urbaines estimée dans le modèle. Elle se concentre tour à tour sur l'évolution de la géographie urbaine, des distances moyennes de déplacement pour chaque mode de transport, de l'offre de transport et enfin de caractéristiques des déplacements selon différents modes.

Caractéristiques géographiques

Ce module ajuste la croissance urbaine en fonction des données d'entrées et des hypothèses des différents scénarios, pour chaque aire urbaine. Tout d'abord, les données de population et de surface sont disponibles pour les années de référence 2015 et 2020. Ces données permettent de calculer les densités à l'échelle administrative des provinces. Des hypothèses sur les densités de population urbaine issues du

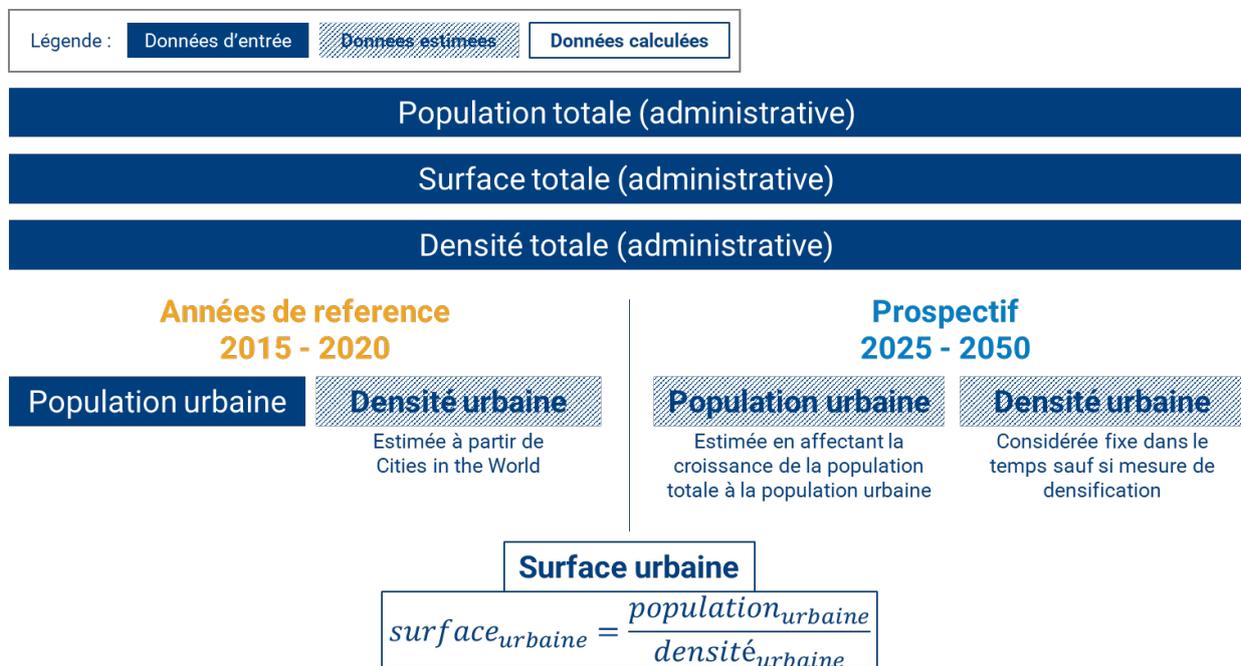
projet EC-OECD Cities in the World¹⁰ permettent d'estimer les densités urbaines de population pour les années de référence, et ainsi de calculer la surface urbaine correspondante.

En prospectif après 2020, trois hypothèses principales sont réalisées :

- La croissance de la population totale de la province est considérée comme étant intégralement urbaine. Tout ajout de population se concentre donc uniquement dans l'aire urbaine englobée dans la province.
- La densité urbaine est supposée fixe dans le temps, sauf en cas d'interaction avec une mesure de densification urbaine.
- La surface administrative est fixe dans le temps.

Un schéma résumant la procédure de calcul des caractéristiques géographiques est disponible Figure 5.

Figure 5 : Procédure de calcul des caractéristiques géographiques



En complément de cette approche, et bien que la situation ne se présente pas avec les scénarios de référence, une contrainte est mise en place de manière à ce que la surface urbaine ne puisse être supérieure à la surface administrative.

Distance de déplacement

Les distances moyennes de déplacement par mode de transport pour chaque aire urbaine sont estimées dans ce module.

¹⁰ <https://www.oecd.org/cfe/cities-in-the-world-d0efcbda-en.htm>

Tout d'abord les distances moyennes de déplacement par mode de transport pour l'aire urbaine du Grand Casablanca ont été estimées pour 2015 à partir des résultats de l'EMD Casa Transports 2018 ajustés manuellement au modèle par les équipes du FIT.

Les distances sont ensuite estimées pour les autres aires urbaines pour 2015, de manière proportionnelle au rayon moyen des aires urbaines, et en considérant une distance moyenne minimale de déplacement par mode. L'Équation 1 ci-dessous dicte cette procédure, avec $distance_{m,au,2015}$ la distance moyenne de déplacement du mode m pour l'aire urbaine au en 2015; $distance_{m,min}$ la distance minimale pour le mode m , et $s_{au,2015}$ la surface de l'aire urbaine au en 2015.

Équation 1 :

$$distance_{m,au,2015} = (distance_{m,Grand\ Casablanca,2015} - distance_{m,min}) \times \frac{\sqrt{s_{au,2015}/\pi}}{\sqrt{s_{Grand\ Casablanca,2015}/\pi}} + distance_{m,min}$$

L'évolution des distances de déplacement pour les années 2020-2050 est calculées à partir d'élasticités à la surface urbaine et à la densité urbaine comme décrit dans l'Équation 2, avec $distance_{m,au,t}$ la distance moyenne de déplacement avec le mode m dans l'aire urbaine au pour l'année t ; $e_{m,d}$ l'élasticité du mode m à la densité de population urbaine $d_{au,t}$ pour l'aire urbaine au pour l'année t ; $e_{m,s}$ l'élasticité du mode m à la surface $s_{au,t}$ de l'aire urbaine au pour l'année t .

Équation 2 :

$$distance_{m,au,t+5} = distance_{m,au,t} \times (1 + e_{m,d} \times \frac{d_{au,t+5}}{d_{au,t}}) \times (1 + e_{m,s} \times \frac{s_{au,t+5}}{s_{au,t}})$$

Les élasticités et les distances minimales de déplacement par mode de transport ont été ajustées par le FIT à partir de retours d'expériences de précédents projets internationaux et peuvent être modifiés par des usagers dans la section « Distance de déplacement » de l'onglet « Paramètres » du modèle.

Offre de transport

Ce module estime l'offre de transport future pour chaque aire urbaine. Les indicateurs d'offre de transport sont mis à jour suivant l'évolution de la surface urbaine, de la densité urbaine, du PMB par habitant et des mesures politiques concernant notamment le développement d'infrastructures. Ce module est composé de cinq sous-modules : infrastructures, flottes de véhicules, vitesse, temps d'attente, tarifs.

Infrastructures

Deux approches distinctes sont utilisées pour la représentation des infrastructures de transport : pour les infrastructures de transport en commun et cyclables ou pour les infrastructures routières y compris le réseau piéton qualitatif¹¹.

¹¹ Le réseau piéton qualitatif est constitué de trottoirs larges permettant une circulation suffisante et le croisement de personnes à mobilité réduite par exemple, et pensés de manière à favoriser l'usage de la marche.

Réseaux de transport en commun et cyclable

Cette catégorie regroupe les réseaux de Réseau Express Régional (RER), de tram, de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS)¹² et le réseau cyclable qualitatif¹³. Les données initialisées en 2015-2020 sont issues d'une analyse de l'entreprise MobiConseil des données officielles existantes (PMUD notamment) avec vérifications par le MI et les collectivités territoriales participant au projet. Les valeurs prospectives pour la période 2025-2050 sont intégralement issues des mesures de développement d'infrastructure du scénario étudié.

Infrastructures routières

Les réseaux d'infrastructures routières ont été estimés à partir d'une analyse des données OSM pour les aires urbaines du Grand Casablanca, de Rabat-Salé-Skhirate-Temara, de Fès, de Tétouan et de Khenifra, représentant toutes les catégories de villes du modèle. Les réseaux routiers sont répartis en quatre catégories : Réseau résidentiel – Catégorie IV (regroupant les catégorie OSM living_street, residential, unclassified), Axes secondaires et tertiaires – Catégorie III (regroupant les catégorie OSM secondary, secondary_link, tertiary, tertiary_link), Axes primaires – Catégorie II (regroupant les catégorie OSM primary, primary_link, trunk, trunk_link), et Autoroutes urbaines – Catégorie I (regroupant les catégorie OSM motorway, motorway_link). Ces réseaux sont associés à des largeurs et des vitesses limites croissantes.

Tout d'abord, la densité routière totale en mètre par kilomètre carré est estimée pour chacune des villes, et une valeur finale est affectée à l'ensemble des aires urbaines selon leur catégorie. De même, le % du réseau routier étant de catégorie I, II, III ou IV est estimé et ajusté pour chaque catégorie de ville. Cette approche permet d'estimer les réseaux routiers pour l'ensemble des aires urbaines en 2020. Ces hypothèses sont listées dans la Figure 6. Pour les catégorie IV, III et II, les réseaux sont ensuite projetés en 2015 et 2025-2050 de manière proportionnelle à la croissance de la surface urbaine. Le réseau de catégorie I est considéré différemment car il a une croissance moins organique et plus ponctuelle. Le réseau de catégorie I pour l'année 2015 est estimé de manière proportionnelle à la surface urbaine. Pour les projections en 2025-2050, la croissance du réseau est nulle pour 2025, 2035 et 2045, et considérée égale à la croissance calculée entre 2015 et 2020 pour les années 2030, 2040 et 2050.

Le réseau piéton qualitatif est estimé à partir du réseau routier total et à partir de consultation qualitative avec le MI et de sources diverses. Ces hypothèses initiales sont listées dans la Figure 6. Un pourcentage moyen de l'ensemble du réseau routier disposant d'un réseau piéton qualitatif est estimé et appliqué pour les années 2015 et 2020. La projection du réseau piéton pour les années 2025-2050 est réalisée via la définition de scénario.

Figure 6 : Hypothèses pour estimer les réseaux routiers en 2020

	Densité routière totale (m/km ²)	Part de route de catégorie I	Part de route de catégorie II	Part de route de catégorie III	Part de route de catégorie IV	Part d'infrastructure piétonne qualitative
Grand Casablanca	7200	3.70%	7.70%	14.50%	74.10%	38%
Rabat-Salé-Skhirate-Temara	7700	2.90%	9.80%	14.90%	72.40%	50%
Catégorie II	6800	1.04%	8.00%	8.00%	82.96%	44%
Catégorie III	6800	0.73%	9.50%	8.60%	81.17%	44%
Catégorie IV	6500	0%	5.90%	5.20%	88.90%	26%

¹² Le BHNS est un réseau de bus en site propre, à distinguer des couloirs de bus qui ont souvent un trafic mixte (circulation de taxis et de véhicules d'urgence notamment)

¹³ Le réseau cyclable qualitatif est une infrastructure dédiée aux cyclistes, et séparée des circulation piétonnes et automobiles par une barrière physique à rebord, et pas par une ligne de peinture uniquement.

Flottes de véhicules

A nouveau, deux approches distinctes sont présentes pour les véhicules de transport collectif et les véhicules individuels.

Véhicules de transport collectif

Les flottes de véhicules de transport collectif (bus, grand taxi et petit taxi) sont celles observées pour les années 2015 et 2020, à partir des dernières données actualisées fournies par le Ministère de l'Intérieur, ajustées selon le retour des collectivités territoriales participant au projet.

En prospectif pour 2025-2050, les flottes de taxis sont fixes dans le temps, et l'évolution de la flotte de bus de transport en commun est intégralement dictée par la mesure correspondante dans la définition des scénarios.

Véhicules individuels

Les flottes de véhicules individuels sont représentées à partir de sous-modèles principalement basés sur l'évolution du PMB par habitant. Ces modèles ont été calibrés à partir des stocks régionaux disponibles via la plateforme opendata du HCP. Ils fournissent donc une estimation et ne sont pas à considérer comme des observations officielles.

Pour les automobiles, le modèle suit la formule ci-dessous correspondant à une fonction de consommation de distribution logistique (courbe en S) à seuil avec $VP_{au,t}$ le nombre de voitures particulières pour 1000 habitants pour l'aire urbaine au pour l'année t ; $seuil$ un paramètre de seuil maximal de la fonction ; k un paramètre multiplicatif du $PMB_{au,t}$, le PMB par habitant pour l'aire urbaine au pour l'année t , et enfin p_{PMB} un paramètre d'ajustement du revenu.

Équation 3 :

$$VP_{au,t} = seuil \times \frac{1}{1 + \exp(-k \times (PMB_{au,t} - p_{PMB}))}$$

Cette formule de base est ensuite légèrement complexifiée pour corriger l'effet Covid-19 sur les projections 2020 et 2025, et pour intégrer l'impact de l'augmentation des prix notamment via certaines mesures, de la densité urbaine et du développement des transports en commun. La formule finale pour les projections en 2025-2050 est décrite dans l'Équation 4, avec $p_{Covid-19}$ le paramètre correctif pour l'effet Covid-19 and 2025, $p_{taxe,VP}$ le paramètre représentant l'impact de la mesure de taxation pour les voiture particulières, $prix_{VP,t+5}$ le prix moyen d'une voiture particulière pour l'année $t+5$, $e_{VP,d}$ l'élasticité de la détention automobile à la densité $d_{au,t+5}$ de l'aire urbaine au pour l'année $t+5$, et $p_{VP,TC}$ le paramètre correcteur de la détention automobile en fonction de l'évolution des parts modales de transport collectif $PM_{TC,t}$ de l'année t .

Équation 4 :

$$VP_{au,t+5} = p_{Covid-19} \times seuil \times \frac{1}{1 + \exp(-k \times (PMB_{au,t+5} - p_{PMB} - p_{taxe,VP} \times taxe_{VP} \times prix_{VP,t+5}))} \times (1 + e_{VP,d} \times \frac{d_{au,t+5}}{d_{au,2020}}) \times (1 + p_{VP,TC} \times (PM_{TC,t} - PM_{TC,2020}))$$

Pour les motos, cette formule est simplifiée en remplaçant la distribution logistique par une distribution linéaire, faisant l'hypothèse que la détention motocyclistes n'est pas sujette à un effet de seuil dans les conditions observées dans les aires urbaines marocaines. Les Équation 3 et Équation 4 deviennent respectivement Équation 5 et Équation 6, avec *Intercept* la constante de la fonction linéaire de motorisation automobile et $p_{Moto,PMB}$ le paramètre de revenus.

Équation 5 :

$$Moto_{au,t} = Intercept + p_{Moto,PMB} \times PMB_{au,t}$$

Équation 6 :

$$Moto_{au,t+5} = p_{Covid-19} \times (Intercept + p_{Moto,PMB} \times (PMB_{au,t} - p_{taxe,Moto} \times taxe_{Moto} \times prix_{Moto,t+5})) \times (1 + e_{Moto,d} \times \frac{d_{au,t+5}}{d_{au,2020}}) \times (1 + p_{Moto,TC} \times (PM_{TC,t} - PM_{TC,2020}))$$

Ces modèles sont également contraints de manière à ce que le stock total d'automobile ne puisse diminuer dans le temps, et le stock totale de motocycle de 10% tous les 5 ans.

L'ensemble des paramètres peut être ajusté par les usagers dans l'onglet « Paramètres » et la section « Parc de véhicules » du modèle.

Vitesse

Trois types d'approches sont présentes pour représenter les vitesses par mode de transport, selon que le mode soit actif, routier motorisé ou de transport public moyens et lourds. La vitesse des de l'ensemble des modes est initialisée à partir des données 2015 et 2020. Ces vitesses sont issues des études internationales conduite par le FIT. Et des données fournies par le MI pour les modes de déplacement de certaines aires urbaines.

Modes actifs

Pour les années 2025-2050, le développement d'infrastructures piétonnes et cyclables va augmenter ces vitesses moyennes.

Pour la vitesse moyenne des piétons, cette amélioration est liée à la part des infrastructures piétonnes qualitatives par rapport au réseau routier de catégorie IV, III et II, le réseau routier I ne donnant pas la possibilité d'être accompagné de trottoirs pour raisons de sécurité routière. L'équation correspondante est décrite ci-dessous avec $v_{marche,au,t}$ la vitesse moyenne du mode marche pour l'aire urbaine *au* et l'année *t*; $p_{v,marche}$ un paramètre d'élasticité de la vitesse *v* de la marche par rapport à la croissance de la part du réseau piéton sur le réseau routier IV, III, II, $\frac{reseau_{pieton,au,t}}{reseau_{IV\ III\ II,au,t}}$.

Équation 7 :

$$v_{marche,au,t+5} = v_{marche,au,t} \times (1 + p_{v,marche} \times \log\left(\frac{reseau_{pieton,au,t+5}/reseau_{IV\ III\ II,au,t+5}}{reseau_{pieton,au,t}/reseau_{IV\ III\ II,au,t}}\right))$$

De manière similaire, la vitesse du vélo est déterminée par l'Équation 8 avec $reseau_{cyclable,au,t}$ le nombre de kilomètres de pistes cyclables qualitatives pour l'aire urbaine *au* et l'année *t*:

Équation 8 :

$$v_{\text{vélo},au,t+5} = v_{\text{vélo},au,t} \times (1 + p_{v,\text{vélo}} \times \log(\text{reseau}_{\text{cyclable},au,t+5} - \text{reseau}_{\text{cyclable},au,t}))$$

Modes routiers motorisés

Les modes routiers motorisés (automobile, motocycle, petit taxi, grand taxi, bus) sont eux aussi sujets à une amélioration de la vitesse moyenne lorsque le réseau dédié à plus grande vitesse croît, mais sont également sujets à des effets de congestion dû à l'occupation moyenne de l'espace routier. La formule dictant cette relation est l'Équation 9 comprenant deux paramètres $p_{v,\text{mode},\text{reseau}}$ et $p_{v,\text{mode},\text{occ}}$ pouvant être ajustés.

Équation 9 :

$$v_{\text{mode},au,t+5} = v_{\text{mode},au,t} \times (1 + p_{v,\text{mode},\text{reseau}} \times \log\left(\frac{\text{reseau}_{\text{rapide},\text{mode},au,t+5}/\text{reseau}_{\text{mode},au,t+5}}{\text{reseau}_{\text{rapide},\text{mode},au,t}/\text{reseau}_{\text{mode},au,t}}\right)) \times (1 + p_{v,\text{mode},\text{occ}} \times \log\left(\frac{\text{occ}_{t+5}}{\text{occ}_t}\right))$$

Avec l'indicateur d'occupation de l'espace routier issu de l'Équation 10 ci-dessous.

Équation 10 :

$$\text{occ}_t = \frac{\sum \text{vehicule} \times \text{largeur}_{\text{vehicule}}}{\sum \text{reseau} \times \text{largeur}_{\text{reseau}}}$$

Pour les bus, la vitesse est calculée à partir de deux composant : le premier conforme à l'Équation 9, et le second prenant en compte l'existence de couloir de bus via la mesure de priorisation du réseau bus. Ainsi cette mesure détermine la part du réseau bus priorisée, qui aura donc une vitesse de 20km/h (ajustable dans les paramètres du modèle), le reste du réseau ayant une vitesse calculée à partir de la première composante sujette à la congestion et à l'infrastructure routière générale.

Transport public moyen et lourd

LE transport public moyen et lourd inclue le RER, le tram et le BHNS. L'ensemble de des ces modes étant en site propre, leur vitesse n'est pas affectée par la densification urbaine ou par la congestion, et donc reste constante dans le temps. Ces vitesses nominales sont initialisées à 25km/h pour le tram et le BHNS, et à 60km/h pour le RER et peuvent être ajustées dans l'onglet « Paramètres » du modèle.

Temps d'attente

Les temps d'attente sont calculés de trois manières différentes pour les petits et grands taxis, pour le bus et pour les transports publics moyens et lourd.

Taxis

Le temps d'attente moyen des taxis est initialisés pour 2015 et 2020 à partir de données secondaires. Son évolution dans le temps dépend de la taille de la flotte de taxi, et augmentera si le nombre de taxi par habitant diminue. En conséquence, la formule suivante dicte l'évolution du temps d'attente moyen, avec $\text{attente}_{au,\text{mode},t}$ le temps d'attente moyen pour le mode mode dans l'aire urbaine au pour l'année t et $p_{\text{attente},\text{mode}}$ le paramètre négatif d'élasticité à la croissance logarithmique de la flotte de véhicules correspondants par habitant.

Équation 11 :

$$\text{attente}_{au,\text{mode},t+5} = \text{attente}_{au,\text{mode},t} \times (1 + p_{\text{attente},\text{mode}} \times \log\left(\frac{\text{vehicule}_{au,\text{mode},t+5}/\text{population}_{au,t+5}}{\text{vehicule}_{au,\text{mode},t}/\text{population}_{au,t}}\right))$$

Le temps d'attente initial et les paramètres peuvent être ajustés dans l'onglet « Paramètres » du modèle.

Bus

L'évolution du temps d'attente moyen en bus est initialisée à partir de consultations des agences de transport publique et des collectivités territoriales participantes, et intégralement déterminée en prospectif par la mesure d'amélioration de la fréquence des bus.

Transport public moyen et lourd

Le temps d'attente des transports publics moyen et lourds est fixe dans le temps. Elle peut-être ajustée dans l'onglet « Paramètres ».

Tarifs

Le volet tarifs se concentre sur les coûts de détention et d'usage de modes de transport. Il est composé de quatre principaux volets : coût de l'énergie, coût des véhicules individuels, coût des transports publics et coût des taxis. Le coût d'achat des véhicules individuels n'est pas considéré dans cette partie du modèle, mais était intégrée dans la modélisation du taux de motorisation en véhicules individuels.

Coût de l'énergie

Le coût de l'énergie est une variable hautement spéculative. En effet, les prix de l'énergie, ainsi que les subventions nationales peuvent fortement varier sur une très courte période. Les coûts considérés dans le modèle sont des coûts moyens et leur projection repose sur une augmentation conservatrice de ces coûts. Trois sources d'énergie sont considérées : le diesel, l'essence et l'électricité. A la différence des précédents indicateurs disponibles la plupart du temps au niveau de l'aire urbaine, le prix de l'énergie est uniquement disponible au niveau national. Les prix nationaux annuels observables pour le Maroc ont été utilisés pour initialiser le modèle en 2015 et 2020. La projection dans le temps suit l'évolution du PMB par habitant selon l'Équation 12 avec $prix_{\text{énergie},t}$ le prix de l'énergie *énergie* pour l'année t , et $PMB_{\text{habitant}_{\text{national},t}}$ le PMB par habitant moyen au niveau *national* pour l'année t .

Équation 12 :

$$prix_{\text{énergie},t+5} = prix_{\text{énergie},t} \times (1 + p_{\text{prix},\text{énergie}} \times \frac{PMB_{\text{habitant}_{\text{national},t+5}} - PMB_{\text{habitant}_{\text{national},t}}}{PMB_{\text{habitant}_{\text{national},t}}})$$

Une contrainte est également ajoutée pour que les coûts de l'énergie ne diminuent pas, même en cas de décroissance du PMB par habitant. Cette contrainte est justifiée par la tendance structurelle des coûts de l'énergie à la hausse sur le long terme, bien que les variations annuelles puissent être importantes. La représentation de l'évolution des prix de l'énergie étant un exercice complexe sujette à de nombreux chocs économiques et n'étant pas le cœur de cet exercice, cette représentation simplifiée a été favorisée.

Coût des véhicules individuels

Le coût des véhicules individuels contient deux composantes : une représentant le coût de maintenance et d'usage kilométrique des véhicules, et une représentant le coût de stationnement.

Le coût de maintenance du véhicule par kilomètre parcouru est dicté par l'équation suivante avec $maintenance_{\text{véhicule},ua,t}$ le coût de maintenance kilométrique moyen du type de véhicule *véhicule* pour l'aire urbaine *au* pour l'année t , $\alpha_{\text{maintenance},\text{véhicule}}$, $\beta_{\text{maintenance},\text{véhicule}}$, $\gamma_{\text{maintenance},\text{véhicule}}$ et $\delta_{\text{maintenance},ua}$ des paramètres déterminés par le FIT.

Équation 13 :

$$maintenance_{véhicule,ua,t} = \alpha_{maintenance,véhicule} \times \beta_{maintenance,véhicule} \times \left(\frac{PMB_{habitant,ua,t}}{\delta_{maintenance,ua}}\right)^{\gamma_{maintenance,véhicule}}$$

Le coût kilométrique hors stationnement total de maintenance et d'usage va intégrer la consommation d'énergie en plus de cette composante de maintenance, ainsi que les mesures de tarification de la congestion rapporté au km par déplacement de véhicule. Il suit l'Équation 14 avec $CoûtKM_{véhicule,ua,t}$ le coût kilométrique moyen du type de véhicule *véhicule* pour l'aire urbaine *ua* pour l'année *t*, $mesure_{congestion,t}$ le surcoût entraîné par les mesures de congestion pour l'année *t* rapporté au kilomètre, et enfin le coût de consommation d'énergie calculé à partir de la consommation moyenne d'énergie *energie* par kilomètre $cons_{energie,t}$ pour l'année *t*, $part_{energie,t}$ la part de véhicules alimentés par l'énergie *energie* en circulation pour l'année *t*.

Équation 13 :

$$CoûtKM_{véhicule,ua,t} = maintenance_{véhicule,ua,t} + mesure_{congestion,t} + \sum cons_{energie,t} \times part_{energie,t} \times prix_{energie,t}$$

Le coût moyen de stationnement est déterminé au niveau de l'aire urbaine par deux éléments : la part de stationnements payants dans l'aire urbaine et le tarif moyen de stationnement. Le premier élément est initialisé à 60% pour 2015 et 2020 et sa projection dépend de la mesure de parts de stationnements payants.

Le coût moyen du stationnement automobile est initialisé à 0.4 USD (3.5 MAD) en 2020. L'évolution des tarifs de stationnement suit la même formule que celle pour les prix de l'énergie, avec une croissance élastique à celle du PMB par habitant. Le coût moyen de stationnement motorcycle est défini par un ratio du coût moyen de stationnement automobile fixé à 50% et modifiable par les usagers dans l'onglet « Paramètres ».

Coût des transports publics

Le coût moyen des transports publics est déterminé à partir du coût moyen en bus. Le coût des autres modes est déterminé grâce à un ratio au coût du bus. Ce coût est initialisé à 0.5 USD (4.4 MAD) en 2020 pour toutes les aires urbaines. Son évolution est élastique à celle du PMB par habitant, comme pour les prix de l'énergie et le coût du stationnement. Le paramètre d'élasticité ainsi que les ratios peuvent être ajustés dans l'onglet « Paramètre ». Les ratios par défaut sont de 1.25 pour le RER, tram et BHNS, signifiant qu'un trajet avec ces modes coûte 1.25 fois plus qu'un trajet en bus.

Coût des taxis

Le prix des taxis est calculé à partir du prix des petits taxis par déplacement (et pas par individu). Le ratio est initialisé à 2, en considérant que le taux d'occupation moyen d'un grand taxi est le double de celui d'un petit taxi, revenant à un coût par déplacement individuel identique pour les petits et les grands taxis.

Le coût des petits taxis est composé d'un élément forfaitaire fixe et d'un élément kilométrique. Ces éléments ont été initiés à partir des tarifications officielles pour 2020, et évoluent de manière élastique au PMB par habitant comme pour les prix de l'énergie.

Caractéristiques modales

Ce dernier module de l'évolution des aires urbaines convertie les résultats des trois précédents modules et des évolution socio-économiques en évolution des caractéristiques modales pour les déplacements moyens de chaque mode et de chaque aire urbaine. Ces résultats ne sont pas directement accessibles

dans le modèle mais sont utilisés directement pour le calcul du choix modal. Six principales caractéristiques sont calculées : le niveau de flotte et offre de services de mobilités, le temps d'accès, le temps d'attente, le temps de trajet, le coût et le coût de stationnement. Étant donné que le temps d'attente et le coût de stationnement ne subissent pas de transformation par rapport au module précédent, ils ne sont pas inclus dans ce descriptif, bien qu'ils soient inclus dans le calcul de choix modal.

Niveau de flotte et offre de services de mobilités

Trois différents types de formules pour indiquer le niveau de flotte et d'offre de services de mobilités sont utilisés, bien que similaire dans leur fonctionnement : un pour les mobilités actives et les transports publics moyens et lourds, un pour les véhicules individuels et les bus, et un pour les taxis. La séparation des réseaux de mobilités actives et du transport public moyen et lourd, des flottes de bus vient de la possibilité d'avoir ces réseaux non existants, nécessitant une modification du logarithme, alors que celle-ci n'est pas nécessaire pour les flottes de bus qui existent dans l'ensemble des aires urbaines. L'utilisation du logarithme dans les formule représente un impact marginalement moins important lors de l'addition d'un véhicule ou d'un kilomètre d'infrastructure pour les flottes ou réseaux les plus étendus.

Mobilités actives et transport public moyens et lourds

L'indicateur de niveau de flotte et offre de services de mobilités pour la marche, le vélo, le RER, le tram et le BHNS est calculé suivant l'équation suivante, avec $service_{mode,ua,t}$ l'indicateur de service pour le mode $mode$, l'aire urbaine ua et l'année t :

Équation 14 :

$$service_{mode,ua,t} = \log(1 + reseau_{mode,ua,t})$$

Véhicules individuels et bus

L'indicateur de niveau de flotte et offre de services de mobilités pour l'automobile, le motorcycle et le bus est calculé suivant l'équation suivante, avec $flotte_{mode,ua,t}$ la flotte pour 1000 habitants (population urbaine) pour le mode $mode$, l'aire urbaine ua et l'année t :

Équation 15 :

$$service_{mode,ua,t} = \log(flotte_{mode,ua,t})$$

Taxis

L'indicateur de niveau de flotte et offre de services de mobilités pour les petits taxis et les grands taxis est simplement égale à la flotte de taxis correspondante pour 1000 habitants, selon l'aire urbaine et l'année.

Temps d'accès

Les temps d'accès sont intégralement renseignés dans l'onglet « Paramètre », pour chaque mode concerné, aire urbaine et année. Ils peuvent être modifiés au besoin par les usagers. Ces temps d'accès représentent les temps d'accès, entre l'origine du déplacement et le mode de transport en question, et entre la fin du déplacement avec le mode et la destination. Ainsi, un déplacement impliquant de marcher 1 min pour accéder à un bus puis de marcher 6 min pour arriver à destination aura un temps d'accès pour le mode bus de $1 + 6 = 7$ min. La marche est le seul mode ne nécessitant pas de temps d'accès. Les temps d'accès ont été indiqués à partir de l'expertise du FIT sur ces sujets, et ne sont pas inclus dans les onglets principaux pour éviter la mauvaise interprétation de ces valeurs.

Temps de trajet

Les temps de trajets sont calculés en combinant la vitesse moyenne de déplacement et la distance moyenne de déplacement pour chaque mode. L'équation est donc relativement simple :

Équation 16 :

$$t_{mode,au,t} = \log(flotte_{mode,ua,t})$$

Coût

Le coût des déplacements (hors stationnement) varie selon le type de tarification : fixe, kilométrique ou bien mixte, en considérant que les modes marche et vélo n'ont pas de coût d'usage.

Véhicules individuels

Le coût hors stationnement des automobiles et motocycles est une multiplication du coût kilométrique par la distance moyenne :

Équation 17 :

$$c_{mode,au,t} = CoûtKM_{véhicule,ua,t} \times distance_{mode,au,t}$$

Transport public

Le coût des bus, RER, Tram et BHNS est identique au coût unitaire calculé pour le sous module d'offre de transport.

Taxis

Le coût des taxis est obtenu en combinant la tarification fixe et la tarification kilométrique, avec $txOcc_{mode,t}$ le taux d'occupation (hors conducteur) moyen des taxis selon le type de taxi $mode$ et l'année t :

Équation 17 :

$$c_{mode,au,t} = \frac{CoûtFixe_{mode,au,t} + CoûtKM_{véhicule,ua,t} \times distance_{mode,au,t}}{txOcc_{mode,t}}$$

Génération de déplacements et choix modal

Cette section décrit le cœur du modèle permettant de convertir les résultats intermédiaires des précédentes étapes en résultats principaux d'évolution de la demande de transport.

Génération de déplacements

Le module de génération des déplacements permet de générer le nombre moyen de déplacements journaliers par habitant d'une aire urbaine pour chaque aire urbaine. Tout d'abord, la décomposition du taux de déplacements par habitant entre les différentes aires urbaines est calculée pour 2020 et assumée identique en 2015. Une évolution préétablie de ce taux est en suite linéairement établie jusqu'en 2050.

La formule de répartition du nombre de déplacements pour 2020 est la suivant, avec $td_{au,2020}$ le taux de déplacements par individu journalier pour l'aire urbaine au et l'année 2020, $p_{td,cat}$ un paramètre variant selon la catégorie d'aire urbaine et $p_{td,PMB}$ un paramètre constant multiplicatif du PMB par habitant :

Équation 18 :

$$td_{au,2020} = \frac{\exp(p_{td,cat})}{\log(p_{td,PMB} \times PMB_{habitant_{ua,t}})}$$

La projection du taux de déplacement est réalisée à partir d'hypothèse fixées par l'utilisateur dans l'onglet « Paramètre » selon le tableau reproduit en Figure 7. Ces valeurs sont légèrement décroissantes, conformément aux observations internationales de diminution du nombre de déplacements moyens, principalement liée à la digitalisation des économies et des loisirs.

Figure 7 : Tableau dictant l'évolution de taux de déplacement journalier

Projection jusqu'en 2050		
	moyenne 2020	horizon 2050
Catégorie I	2.51	2.40
Catégorie II	2.29	2.15
Catégorie III	2.26	2.15
Catégorie IV	2.21	2.10

Choix modal

Modèle de choix discret

Le modèle de choix discrets est un modèle logit multinomial (MNL) avec 10 alternatives modales décrites dans la section détaillant le périmètre du modèle. Ce modèle estime les parts modales de déplacements des différents modes de transport en fonction des attributs des différents modes pour un déplacement moyen, pour chaque aire urbaine. Ces attributs sont résumés en une fonction d'utilité évaluant l'attractivité de chaque mode de transport de manière abstraite. L'Équation 18 décrit cette utilité pour chaque mode, aire urbaine et année avec $t_{acces_{mode,au,t}}$ le temps d'accès, $parking_{mode,au,t}$ le coût de stationnement et ASC_{mode} , $\beta_{service}$, β_{tacces} , $\beta_{attente}$, β_t , β_c et $\beta_{parking}$ les paramètres du modèle pouvant être ajustés par les usagers dans l'onglet « Paramètres ». Ces paramètres ont été calibrés de manière à être au plus proche de l'ensemble des valeurs obtenues pour les enquêtes ménages déplacement urbaines marocaines, et de l'expérience internationale du FIT.

Équation 18 :

$$u_{mode,au,t} = ASC_{mode} + \beta_{service} \times service_{mode,au,t} + \beta_{tacces} \times t_{acces_{mode,au,t}} + \beta_{attente} \times attente_{mode,au,t} + \beta_t \times t_{mode,au,t} + \beta_c \times c_{mode,au,t} + \beta_{parking} \times parking_{mode,au,t}$$

Les parts modales de déplacements peuvent ensuite être calculées à partir de l'Équation 20 pour l'ensemble des modes existants pour l'aire urbaine au et l'année t :

$$PM_{mode,au,t} = \frac{\exp(u_{mode,au,t})}{\sum_{mode} \exp(u_{mode,au,t})}$$

Principaux résultats

Cette section décrit les étapes finales de calcul permettant de convertir la demande en activité de voyageurs, activité de véhicules et émissions de CO₂.

Activité de voyageurs et de véhicules

A partir des résultats intermédiaires précédents, il est possible de calculer les principaux résultats en volume total de déplacements annuels, volume de déplacements annuels par mode, activité de voyageurs en passager-kilomètres et activités de véhicules en véhicule-kilomètre.

Le nombre total annuel de déplacements pour chaque aire urbaine est obtenu via la formule suivante, avec J_d une constante représentant le nombre moyen annuel de jours déplacés par individu. Cette valeur est initialisée à 320, inférieure aux 365 jours annuels car prenant en compte les déplacements hors de l'aire urbaine où les journées pour lesquelles un individu ne peut se déplacer (maladie par exemple). Ce paramètre peut être ajusté dans l'onglet « Paramètre » du modèle.

Équation 19 :

$$d_{au,2020} = td_{au,2020} \times population_{au,t} \times J_d$$

Le passage au nombre de déplacements annuels par mode de transport s'obtient alors simplement de la manière suivante :

Équation 20 :

$$d_{mode,au,t} = PM_{mode,au,t} \times d_{au,t}$$

La conversion en passager-kilomètre est également rapide avec l'Équation 21.

Équation 21 :

$$PKM_{mode,au,t} = d_{mode,au,t} \times distance_{m,au,t}$$

Enfin la conversion entre activité de voyageur et activité de véhicule est réalisée grâce aux taux d'occupation moyen des véhicules. Les valeurs du taux d'occupation moyen sont initialisées pour 2015 et 2020 à partir de valeurs de références du Maroc ou de pays similaires. Ces valeurs sont ajustées pour que la somme totale des véhicules-kilomètres avec les modèles non urbains de voyageurs soit conforme aux comptes nationaux pour ces années de référence. La valeur du taux d'occupation moyen est considérée fixe dans le temps pour la plupart des modes, sauf pour les véhicules individuels où elle diminue jusqu'à des standards de 1.2 et 1.05 voyageurs par véhicules pour les automobiles et les motos respectivement. L'Équation 22 donne accès à l'activité de véhicules en véhicule-kilomètre, $TKM_{mode,t}$ avec le taux d'occupation moyen du véhicule pour le $mode$ et l'année t . Les taux d'occupations moyens et leur évolution peuvent être ajustés pas les usagers.

Équation 22 :

$$TKM_{mode,au,t} = \frac{PKM_{mode,au,t}}{TO_{mode,t}}$$

Émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ finales peuvent être distinguées entre émission directes (du réservoir au pot d'échappement), émission indirectes (du puit au réservoir) et totales (directes et indirectes). Elles sont calculées à partir de facteurs d'émission moyens par véhicule-kilomètre. Ces facteurs d'émission sont déterminés à partir d'hypothèses sur l'efficacité énergétique, la consommation et les émissions moyennes par type de véhicule et d'énergie (diesel, essence ou électrique). L'ensemble de ces hypothèses sont listées dans l'onglet « Paramètre ». La composition de la flotte de véhicule par type d'énergie (c'est-à-dire le pourcentage de véhicules diesel, essence et électrique) permet d'obtenir les émissions moyennes par mode de transport. Les données sont principalement disponibles pour 4 modes associés aux véhicules types : automobile, motorcycle, bus et train. Les émissions des autres modes sont calculées à partir de ratios reliant à un des véhicules types, pouvant être ajustés par les usagers dans l'onglet « Paramètre ».

Les données d'émissions initiales par type d'énergie ont été calibrées pour avoir un facteur d'émission moyen correspondant à celui du Maghreb. Trois trajectoires ont ensuite été pré-établies : une trajectoire comprenant l'absence d'amélioration énergétique après 2024, une correspondant aux améliorations d'efficacité prévue dans la trajectoire actuelle des Perspectives des Transports du FIT 2023 pour la région, et enfin une dernière correspondant à une amélioration d'efficacité énergétique ambitieuse des Perspectives des Transports du FIT 2023 pour la région.

La composition de la flotte de véhicule par type d'énergie est initialisée avec les données historiques officielles pour 2015-2020 issue du HCP, et ensuite déterminée par les mesures d'électrification des flottes, en conservant le même ratio de véhicules diesel et essence qu'observé en 2020. Par exemple, s'il y avait 25% d'automobiles essence et 75% d'automobiles diesel en 2020, une mesure d'électrification à 50% en 2050 sera associée à 12.5% d'automobiles essence et 37.5% d'automobiles diesel en 2050.

A noter que pour les énergies électriques, les émissions indirectes sont reliées au mix énergétique marocain pour la production de l'électricité consommée. La valeur d'émission du mix énergétique est donc prise en compte, et est sa valeur pour 2020 est déterminée à partir des données de l'Agence Internationale de l'Énergie. L'évolution des émissions de ce mix énergétique sont intégralement déterminées par la mesure associée.

Mesures et scénarios

Cette section finale présente les mesures politiques et développement technologiques représentés dans le modèle. Ce chapitre débute par une description générale définissant les scénarios pré-définis et les mesures, avant une description détaillée de chaque mesure et de son impact sur le modèle.

Description générale

Pour rappel, l'objectif du modèle est d'évaluer l'impact des mesures politiques et développements technologiques affectant le milieu du transport urbain de voyageur marocain, sur la demande et les émissions de CO₂ sur secteur, à horizon 2050. Ces mesures sont regroupées en scénarios : un scénario est

constitué de l'ensemble des mesures prises en compte dans le modèle, de leur niveau et date de mise en œuvre. Le modèle comporte un total de 22 mesures réparties en 6 catégories (Figure 4) et 3 principaux scénarios.

Le scénario **Fil de l'eau** est un scénario minimaliste, où aucune mesure n'est appliquée et où la seule amélioration vient de l'amélioration de l'efficacité énergétique et d'émission attendue des véhicules, sans soutien additionnel ou norme.

Le scénario d'**Ambition limitée** est le scénario tendanciel actuel, correspondant à une mise en œuvre des mesures actuellement engagées et planifiées. Il ne prend cependant pas en compte les recommandations de PDU ou PMUD non engageantes et donc le financement et la réalisation n'est pas concrètement prévu.

Enfin, le scénario d'**Ambition élevée** est un scénario reposant sur une mise en œuvre plus agressive des mesures. Il comporte la réalisation de l'ensemble des recommandations apparaissant dans les PDU et PMUD.

Ces scénarios ont été définis en collaboration avec MobiConseil, le MI et le Ministère des Transports et de la Logistique (MTL), ainsi que les collectivités territoriales participantes au projet. Le scénario d'Ambition limitée a notamment bénéficié des retours de l'atelier de définition des scénarios tenu le 21 septembre 2023 à Rabat, ayant réuni des experts nationaux, et des représentants de collectivités territoriales.

Mesures détaillées

Infrastructure piétonne qualitative

Mesure représentant les objectifs de développement du réseau piéton qualitatif, c'est-à-dire avec un trottoir permettant une circulation suffisante et le croisement de personnes à mobilité réduite par exemple. Comme ce réseau est relativement peu quantifié, ces objectifs sont fixés par catégorie d'aire urbaine et en pourcentage moyen du réseau routier total.

Cette mesure détermine le nombre de kilomètre de réseau piéton qualitatif pour les années 2025-2050.

Couloirs vélos

Mesure représentant les objectifs de développement de couloirs vélos, c'est-à-dire avec une séparation physique de la chaussée et du trottoir et pas juste une ligne de peinture. Comme ce réseau est relativement peu quantifié, ces objectifs sont fixés par catégorie d'aire urbaine et en kilomètres.

Cette mesure détermine le nombre de kilomètre de couloirs vélos pour les années 2025-2050.

Réseau BHNS

Mesure représentant les objectifs de développement du réseau de Bus à Haut Niveau de Service, c'est-à-dire avec une infrastructure dédiée et à usage bus unique (site propre), à différencier des couloirs bus permettant un trafic mixte. Comme ce réseau est lié à des investissements relativement importants et politiques, ces objectifs sont fixés par aire urbaine et en kilomètres.

Cette mesure détermine le nombre de kilomètre de réseau BHNS pour les années 2025-2050.

Réseau de Tram

Mesure représentant les objectifs de développement du réseau de Tram. Comme ce réseau est lié à des investissements relativement importants et politiques, ces objectifs sont fixés par aire urbaine et en kilomètres.

Cette mesure détermine le nombre de kilomètre de réseau Tram pour les années 2025-2050.

Réseau de RER

Mesure représentant les objectifs de développement du Réseau Express Régional. Comme ce réseau est lié à des investissements relativement importants et politiques, ces objectifs sont fixés par aire urbaine et en kilomètres.

Cette mesure détermine le nombre de kilomètre de réseau RER pour les années 2025-2050.

Flotte de bus de transport en commun

Mesure représentant les objectifs de développement de la flotte de bus dédié aux services de transport en commun, hors BHNS. Comme cette flotte est liée à des investissements relativement importants et politiques, ces objectifs sont fixés par aire urbaine et en nombre de véhicules.

Cette mesure détermine le nombre de bus de transport en commun pour les années 2025-2050.

Amélioration du service de bus

Mesure représentant les objectifs d'amélioration des services de bus de transport en commun en termes de fréquence. Comme cette stratégie est généralement peu quantifiée, ces objectifs sont fixés par catégorie d'aire urbaine et en temps moyen entre deux bus. Des améliorations concernant l'accessibilité des services de bus ne sont pas incluses dans cette mesure.

Cette mesure détermine le temps d'attente moyen des bus de transport en commun pour les années 2025-2050.

Priorisation du réseau bus

Mesure représentant les objectifs de priorisation des services de bus de transport en commun, grâce à des couloirs bus ou des priorités aux intersections. Ce réseau de bus priorisé est distinct des réseaux de BHNS qui constituent un mode à part entière. Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine et le pourcentage du réseau bus qui est priorisé.

Intégration tarifaire

Mesure représentant les objectifs d'intégration des tarifs de transports en commun, permettant notamment aux usagers de circuler sur l'ensemble du réseau avec un seul titre de transport. L'objectif quantifiable de cette mesure est une diminution du coût moyen des déplacements en transports en commun. Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine et en pourcentage de réduction du coût moyen d'un déplacement en transports en commun.

Cette mesure ajuste le coût moyen des transports en commun pour les années 2025-2050.

Part des stationnements payants

Mesure représentant les objectifs de diminution de la part de stationnements gratuits dans les aires urbaines. L'objectif quantifiable de cette mesure est une augmentation de la part des stationnements payants. Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine et en pourcentage total de stationnements payants.

Cette mesure ajuste la part de stationnements payant pour les années 2025-2050.

Tarifification du stationnement

Mesure représentant les objectifs d'augmentation des tarifs de stationnement. Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine et en pourcentage d'augmentation du coût de stationnement.

Cette mesure ajuste le coût de stationnement pour les années 2025-2050.

Tarifification de la congestion

Mesure représentant les objectifs de tarification de la congestion, via une tarification de véhicules au sien de l'aire urbaine. Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine et en montant moyen de la tarification pour une automobile. La part de ce coût affecté aux motocycles et le pourcentage de véhicules soumis à cette taxe sont également à renseigner.

Cette mesure ajuste le coût d'usage des modes individuels motorisés pour les années 2025-2050.

Taxe sur les carburants

Mesure représentant les objectifs de taxation des carburants fossiles à l'achat. Cette mesure est définie au niveau national et en pourcentage d'augmentation du coût de l'achat de diesel et d'essence, dû à des politiques, par rapport à 2024.

Cette mesure ajuste le coût d'usage des modes individuels motorisés pour les années 2025-2050.

Taxe sur l'achat et la détention de véhicule

Mesure représentant les objectifs de taxation de l'achat de véhicule ou bien de taxation de la détention de véhicule motorisé individuel. Cette mesure est définie au niveau national et en pourcentage d'augmentation du coût d'achat et de détention par rapport à 2024, pour les motocycles ou pour les automobiles.

Cette mesure ajuste le nombre d'automobiles et de motocycles pour les années 2025-2050.

Augmentation de la densité urbaine de population

Mesure représentant les stratégies de densification urbaine et indirectement de TOD (Développement urbain orienté transport). Cette mesure est définie par catégorie d'aire urbaine, et en pourcentage d'augmentation de la densité de population urbaine dû à la mesure.

Cette mesure ajuste la croissance de la surface des aires urbaines pour les années 2025-2050.

Promotions des véhicules électriques (3 mesures)

Mesures représentant les stratégies de développement de la mobilité électrique dans le parc total de véhicules. Elles sont notamment à distinguer les objectifs de ventes de véhicules électriques qui sont bien plus élevés. Ces mesures sont déclinées pour les automobiles, les motocycles et les bus. Elles sont définies au niveau national pour les automobiles et les motocycles, et au niveau des catégories d'aire urbaine pour les bus, en pourcentage de véhicules électriques dans le parc de véhicules.

Ces mesures ajustent la composition des véhicules électriques automobiles, motocycles et bus pour les années 2025-2050.

Efficacité énergétique

Mesure représentant l'évolution de l'efficacité énergétique des véhicules, et donc de leur consommation et émission moyenne de CO₂ dans le temps. Cette mesure est définie au niveau national, et suit l'un des trois trajectoires d'efficacité énergétique du FIT : une trajectoire irréaliste sans amélioration énergétique après 2024, un trajectoire actuelle correspondant aux améliorations énergétiques sans mesure politique, et un trajectoire plus ambitieuse correspondant aux améliorations énergétiques obtenues avec un accompagnement politique via des standards de véhicules plus forts par exemple.

Cette mesure ajuste les consommations d'énergie et émissions de CO₂ moyennes par véhicule pour les années 2025-2050.

Rendre le mix énergétique plus propre

Mesure représentant l'évolution des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité au Maroc. Cette mesure est définie au niveau national en pourcentage de production d'électricité à faible ou zéro émission.

Cette mesure ajuste émissions indirectes de CO₂ pour les véhicules fonctionnant à l'électricité pour les années 2025-2050.

Électrification des taxis (2 mesures)

Mesures représentant les stratégies d'électrification des flottes de taxi. Elle se décline en deux mesures, pour les petits ou pour les grands taxis. En l'absence d'objectifs, l'électrification des taxis suit celle des automobiles individuelles. Cette mesure est définie au niveau national, et en pourcentage de véhicules électriques dans la flotte de taxis.

Cette mesure ajuste les consommations d'énergie et émissions de CO₂ moyennes par véhicule pour les années 2025-2050.