Royaume du Maroc

Ministère de l'équipement, de transport , de la logistique et de l'eau

SCHEMA DIRECTEUR DE LA MOBILITE NATONALE (SDMN) : DEMARCHE, PUISSANCE, ET ATOUTS DE LA MODELISATION ET ZOOM SUR LA PARTIE ROUTIERE

(AVEC UN FOCUS SUR L'OBSERVATOIRE DE LA MOBILITE)

CID
CONSEIL, INGENIERIE ET DEVELOPPEMENT
إستشارة، هندسة و تنمية

Juillet 2018

Réalisé par M. Aissam BENKARIM

Ingénieur Spécialisé en mobilité et modélisation des systèmes de transport

Sommaire

1 Introduction 3

2 Etat des lieux et Benchmark en matière de modèles de trafics servant à l'analyse des déplacements 4

2.1 Etat des lieux 4

2.2 Benchmark des modèles de trafics au niveau national et international : 5

2.2.1 MODEV : le modèle de déplacements du Ministère de l'Equipement et des Transports de France 6

2.2.2 SIMCAT : un modèle de déplacements intégré au Système d'évaluation des politiques territoriales de Catalogne. 6

2.2.3 Le modèle de déplacements réalisé par ADM (Autoroutes du Maroc) 7

3 Description du Modèle à 4 étapes réalisé dans le cadre du SDMN 8

3.1 Préparation des données : 10

3.1.1 Définition du zonage 10

3.1.2 Données socioéconomiques par zone : 12

3.1.3 Réseaux digitalisés des différents modes : 12

3.1.4 Caractéristiques des nœuds : 13

3.1.5 Base de données des enquêtes et comptage : 13

3.2 Le modèle à quatre étapes 14

3.3 Etape Génération : 15

3.4 Etape Distribution : 16

3.5 Etape Choix Modal : 17

3.6 Etape Affectation (Cas de l'affectation routière) : 20

4 Analyse des résultats obtenus 23

4.1 Génération - Distribution 23

4.2 Choix modal 25

5 Conclusion 29

6 Bibliographie 30

1 Introduction

Aujourd'hui, les questions de la mobilité et du transport prennent une place très importante dans la gestion durable du territoire. Les modes de transport, se mettent de plus en plus en concurrence pour la recherche de solutions originales et novatrices afin de se démarquer les uns par rapport aux autres dans le but d'augmenter leur attractivité et compétitivité, et acquérir ainsi une image qui évoque à la fois le développement, la modernité et le respect de l'environnement.

La vision des décideurs est de rendre les infrastructures de transport plus attractives, plus complémentaires et plus compétitives à même de développer l'économie nationale. Cet objectif impose une réflexion sur l'ensemble des modes de transport (des personnes et des biens) et un réexamen de leurs utilisations actuelles.

Pour ceci un chantier d'étude a été lancé par le Ministère de l'équipement, de transport de la logistique et de l'eau afin de réaliser un Schéma directeur de mobilité nationale. Des solutions seront imaginées à l'issu de cette étude, pour assurer une utilisation rationnelle et judicieuse aussi bien de l'espace que des moyens de transport tout en encourageant au maximum les moyens de transports respectueux de l'environnement et de la sécurité des usagers.

Ce Schéma et ces réflexions permettront l'élaboration d'un modèle de transport tenant en compte de l'ensemble des paramètres identifiés et proposant une nouvelle organisation des moyens de transport. Ce schéma est donc une étape ultime avant la recomposition du secteur des infrastructures de transports.

Nous allons définir un modèle, une simulation, et la modélisation de transport. Puis nous distinguons quatre étapes respectivement sémantiques et conceptuelles, formelles, techniques ainsi que empiriques dans un modèle. Nous précisons par la suite le contenu de chaque étape, en donnant des exemples relatifs à la modélisation de la demande.

2 Etat des lieux et Benchmark en matière de modèles de trafics servant à l'analyse des déplacements

Ce chapitre consiste à donner les principes généraux permettant d'expliquer l'approche méthodologie relative à l'élaboration d'un modèle de trafics servant à l'analyse des déplacements au niveau national. Nous passerons en revue, dans un premier temps, quelques éléments par rapport à la situation de la mobilité au Maroc afin de construire un état des lieux. Nous enchainerons ensuite par un benchmark autours des fameux modèles de trafics au niveau national et international.

2.1 Etat des lieux

Le diagnostic de la mobilité nationale a été réalisé en étudiant les générateurs de la mobilité nationaux, régionaux et provinciaux ainsi qu'en analysant les différents modes et les flux de passagers et de marchandises générés.

1 Monographies régionales

Revue des principaux indicateurs socio-économiques des 16 régions puis les 12 régions et les 75 provinces du Royaume

- Population par milieu et par province
- PIB par secteur d'activité et par province
- Emploi par milieu et par province
- Taux de motorisation par région

Cartographie actuelle et prospective des principaux générateurs de mobilité par région

- Principaux centres urbains et des villes
- nouvelles en projet
- Modes de transport actuels et en projet
- Principales zones d'activités et plateformes logistiques existantes et en projet

2 Analyses par modes de transport

Analyse du trafic et de la gestion des capacités des infrastructures par mode de transport

- Historique d'évolution du trafic par mode
- Impact du shift modal sur les infrastructures
- Identification des infrastructures en congestion et en surcapacité

Etude de l'accessibilité et de la connectivité intermodale des modes de transport

- Couverture provinciale des infrastructures et identification des régions les moins bien couvertes par l'ensemble des modes
- Comparatif du potentiel de mobilité des provinces et de leur couverture par les infrastructures de transport
- Connectivité intermodale des infrastructures de transport

3 Analyses par flux

Modélisation des flux interprovinciaux de véhicules de transport de véhicules et de passagers par région

- Flux routiers de véhicules intra et interrégionaux entre les différentes provinces

Analyse détaillées des flux de marchandises au niveau national

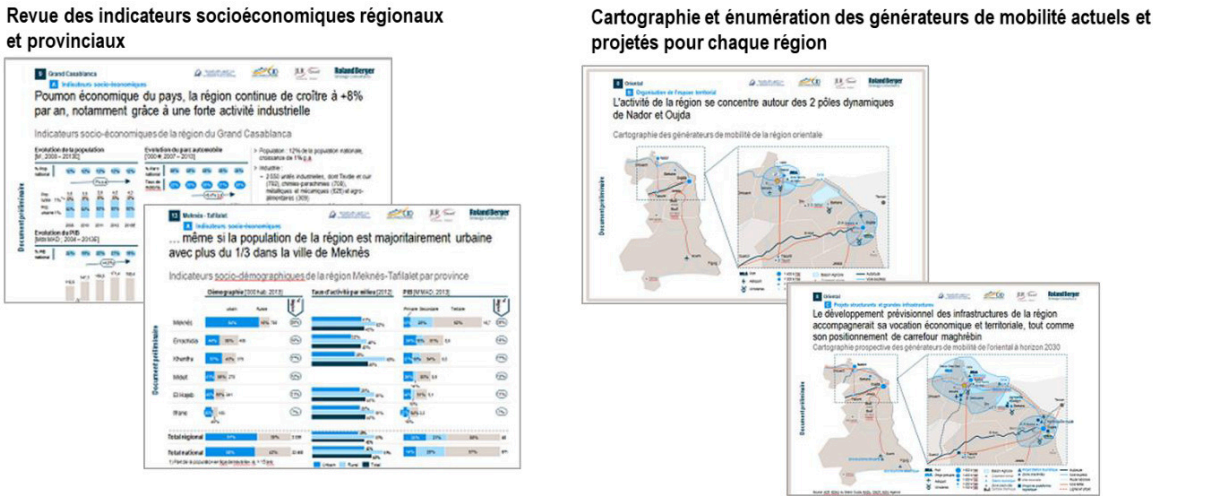
- Principaux flux de marchandises impactant la mobilité nationale
- Matrices O/D pour les flux traités
- Flux kilométriques intra et interrégionaux induits par la mobilité des marchandises

Traitement des flux de passagers par région et par mode

- Flux terrestres intra et interrégionaux entre les différentes modes et provinces

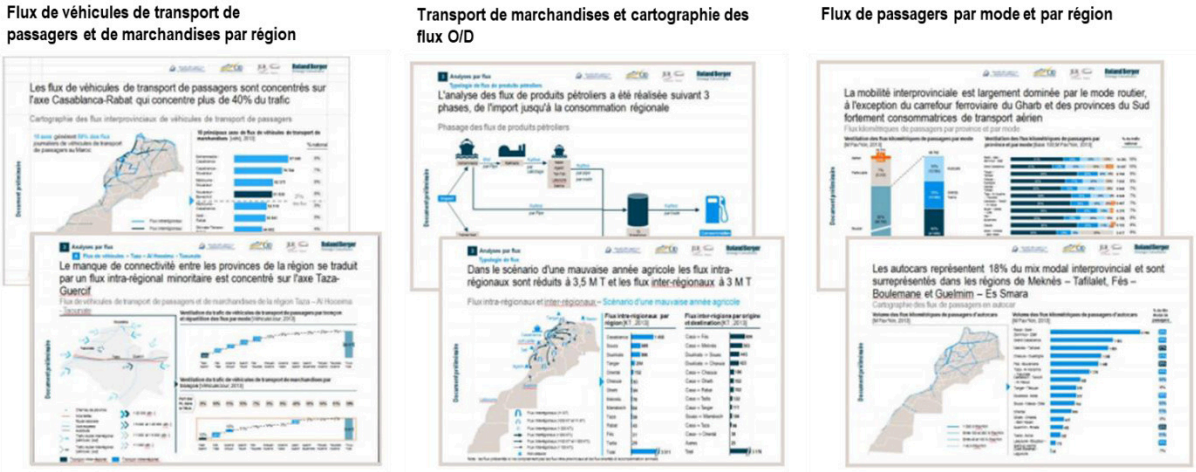
La réalisation des monographies régionales a permis d'identifier les générateurs actuels et futurs de mobilité à l'échelle provinciale. La figure suivante illustre un aperçu détaillé sur la région de l'oriental :

Figure 1. Aperçu des monographies régionales



Le diagnostic modal a été complété par une analyse des flux des véhicules, des passagers et des principales marchandises à l'échelle nationale, régionale et provinciale.

Figure 2. Aperçu des analyses réalisées par flux



2.2 Benchmark des modèles de trafics au niveau national et international :

L'objectif du benchmark est d'Identifier les bonnes pratiques d'intégration des modèles de trafics et de transport au niveau national et international.

2.2.1 MODEV : le modèle de déplacements du Ministère de l'Equipement et des Transports de France

Le modèle a été conçu pour tester tous types de politique de transport (infrastructure, tarification, coût / prix de transport, nouveaux véhicules...) et leurs impacts environnementaux. Il permet d'estimer la demande de transport et les trafics à moyen et long terme avec la prise en compte de :

- La répartition modale ;
- La congestion des réseaux et optimisation de l'utilisation des infrastructures ;
- La multimodalité/Intermodalité (accès aux gares, aéroports, plateforme multimodales fret) ;
- Les trafics interurbains et péri-urbains ;

Les entrées du modèle sont d'une part les paramètres socioéconomiques de la situation étudiée (horizon) et d'autre part la description de l'offre de transport au même horizon.

L'estimation mathématique des comportements des acteurs de transport est fondée sur des paramètres issus d'enquêtes. Les résultats sont contrôlés et ajustés sur les observations de trafics.

2.2.2 SIMCAT : un modèle de déplacements intégré au Système d'évaluation des politiques territoriales de Catalogne.

Le modèle de prévision de trafic intégré à SIMCAT a pour objet l'évaluation des impacts environnementaux des grandes infrastructures de transport et des grands projets urbanistiques de la Generalitat de Catalogne.

Créé en 2002, il a ensuite migré en 2005 sous Geomedia Transportation Manager de Intergraph.

La dernière version intègre des bases de données plus larges, actualisées sur 2008.

2.2.3 Le modèle de déplacements réalisé par ADM (Autoroutes du Maroc)

En 2007, la société ADM (Autoroutes du Maroc) a fait développer par la société SETEC Economie un modèle de déplacements sous Transcad en vue de disposer d'un outil permettant de simuler l'évolution des recettes de péages, notamment dans le cadre de modifications du réseau autoroutier ou de modifications des conditions de tarification.

Le modèle est monomodal. Il ne prend en compte que le mode routier. Il a connu plusieurs actualisations, en 2009, 2012 et 2014.

3 Description du Modèle à 4 étapes réalisé dans le cadre du SDMN

La coordination entre les politiques d'urbanisme et de transport, dans un contexte façonné par la montée en puissance des préoccupations environnementales et des enjeux du développement durable, est plus que jamais recherchée afin d'assurer une meilleure cohérence entre ces deux domaines. Le modèle sera donc un outil permettant d'analyser la place des politiques de mobilités et de transport au sein d'une politique plus globale de développement durable.

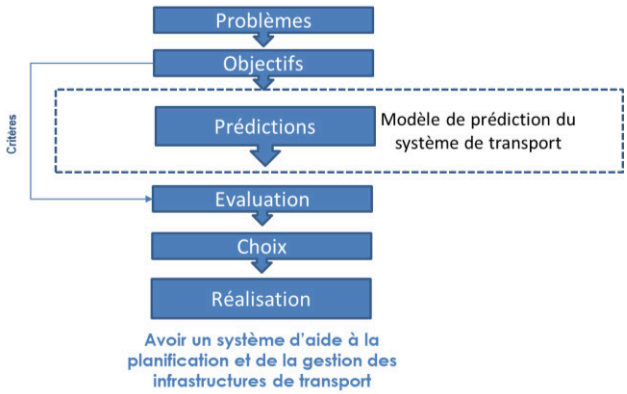
L'impact de ces politiques est suscité par des besoins en déplacements prévus. Ces derniers sont déterminés par les évolutions en volumes ainsi que les changements en termes des répartitions démographiques de la zone.

Au-delà de la nécessité de s'adapter le plus finement possible aux besoins en déplacement, plusieurs exigences économiques et sociales rendent cette prévision indispensable, avec des enjeux liés aux caractéristiques des systèmes de transport :

- **Le coût très élevé des investissements, qui doivent être évalués avant d'être décidés ;**
- **Le délai de construction et la durée de vie des investissements importants ;**
- **L'anticipation des évolutions et des dysfonctionnements ;**
- **L'accompagnement du développement économique et social.**

Pour toutes ces raisons, il est impératif de planifier l'organisation et le développement des transports. Cette planification doit pouvoir s'appuyer sur des prévisions aussi fines que possibles, compte tenu des incertitudes pesant sur l'évolution de l'environnement économique et social.

Figure 3 .Schéma d'élaboration d'un modèle de trafic

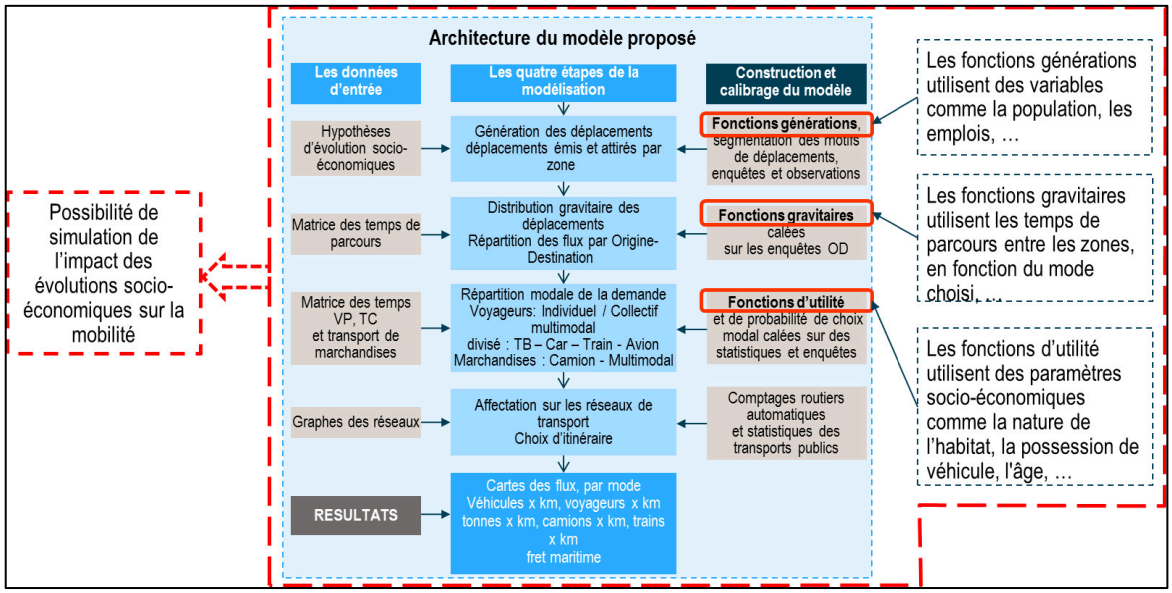


Le modèle à affectation directe permet de représenter une photographie de la situation actuelle et de la faire évoluer linéairement sur différents horizons. Ce modèle n'est pas adapté pour faire des simulations d'évolution de la mobilité, suite à l'évolution des caractéristiques socio-économiques des territoires.

Par contre un modèle à 4 étapes repose sur des variables socio-économiques. On peut donc simuler l'évolution de ses paramètres et voir leur impact sur la mobilité et le choix modal.

Le schéma ci-après illustre les différentes étapes de ce modèle :

Figure 4. Etapes d'élaboration d'un modèle à 4 étapes de transport



Avant d'entamer la réalisation du modèle de déplacement il faut tout d'abord caractériser le secteur des transports au Maroc et ses projections. Ce travail consiste en :

- L'élaboration d'une description globale de la population, de l'emploi et des générateurs spécifiques de mobilités au niveau national ;
- La caractérisation du développement urbain des différentes zones du périmètre de l'étude par la description de l'organisation de l'espace territorial, des projets en cours et des grandes infrastructures de transport futures dans l'aire de l'étude ;
- La réalisation d'un état des lieux au niveau national et international en matière de modélisation des déplacements.

L'étape suivante vise à constituer les bases de données nécessaires au calibrage du modèle de trafic.

- Une première partie des informations requises sont issues des enquêtes, et une deuxième partie provient des sources de données officielles et du recensement RGP 2014. Elles ont pour objet de reconstituer la situation actuelle sur la base de laquelle le modèle sera calé. La chaîne de modélisation doit reproduire fidèlement la situation actuelle avant de pouvoir simuler des situations futures.
- Le modèle doit permettre d'évaluer l'évolution des besoins de transport et de déplacements à moyenne et longue distance sur le Royaume en fonction de l'évolution des paramètres socio-économiques et de l'offre de transport multimodale.

3.1 Préparation des données :

3.1.1 Définition du zonage

Le système de planification territoriale adopté au Maroc tient compte des fonctions stratégiques associées pour les différents niveaux de stratification :

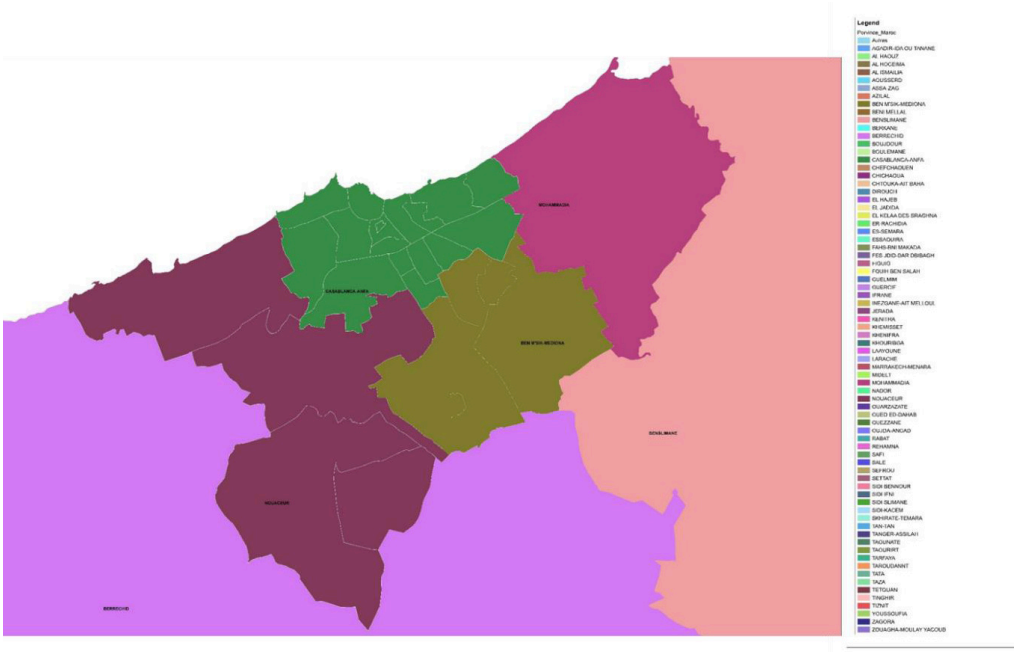
- La région ;
- La province ;
- La commune.

Pour les besoins de la modélisation, il est primordial d'associer le zonage au découpage administratif, afin de pouvoir profiter des données disponibles au niveau des statistiques nationales (HCP, administrations publiques, …)

Le maillage provincial a été adopté comme base du découpage en zone. Il sera enrichi par un découpage de certaines provinces pour des raisons techniques ou stratégiques :

- Casablanca, Tanger-Assilah, Marrakech, Inzegane-Ait Melloul, Fès : découpés en arrondissements ;
- Nous avons utilisé un découpage en 152 zones de tout le territoire du Royaume.

Figure 5. Zonage adopté dans le cadre du Modèle SDMN (152 zones)

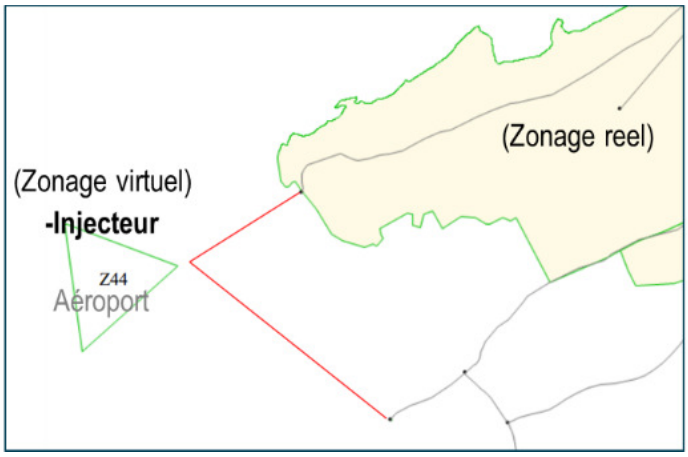


Présentation des injecteurs : Définition

Les injecteurs sont des zones situées le plus souvent en limite d'un zonage, reliés au réseau du zonage principal par un ou plusieurs connecteurs. Ils correspondent à des zones virtuelles ayant un flux d'échange entre l'aire de l'étude et la zone représentée par un injecteur.

Par exemple, l'aéroport de Casablanca génère des flux de l'extérieur du Maroc. Ce flux se rajoute aux flux générés par les différentes zones identifiées précédemment.

Leur contour est symbolique, en général un triangle pointant vers la zone de l'étude.



3.1.2 Données socioéconomiques par zone :

- Population totale 2014
- Population active 2014
- Population par CSP (Catégorie socioprofessionnelle) & segmentation des individus en captifs / Non captifs (Sur la base du taux de motorisation)(Un captif étant tout individu de disposant pas d'un véhicule)
- Emploi total
- Emploi primaire
- Emploi secondaire
- Emploi tertiaire
- Nombre de lits par zone

3.1.3 Réseaux digitalisés des différents modes :

• **Réseau de routes**	• **Réseau ferroviaire**	• **Réseau aérien**
✓ *Longueur* ✓ *Nombre de voies* ✓ *Largeur par voie* ✓ *Vitesse (réglementaire)* ✓ *Péage* ✓ *Coût de carburant* ✓ *Cout VL* ✓ *Cout PL1* ✓ *Cout PL2* ✓ *Cout Autocar (Prix du ticket)*	✓ *Longueur* ✓ *Type (Classique ou LGV)* ✓ *Projet : 0 si existant / 1 si futur* ✓ *Fonctionnel : 1 si fonctionnel / 0 si non-fonctionnel* ✓ *Vitesse* ✓ *Temps (temps de parcours)* ✓ *Coût*	✓ *Longueur* ✓ *Extrémités (entre aéroports)* ✓ *Fréquences* ✓ *Temps de parcours* ✓ *Type (Liaison aérienne ou bien connecteur)*

3.1.4 Caractéristiques des nœuds :

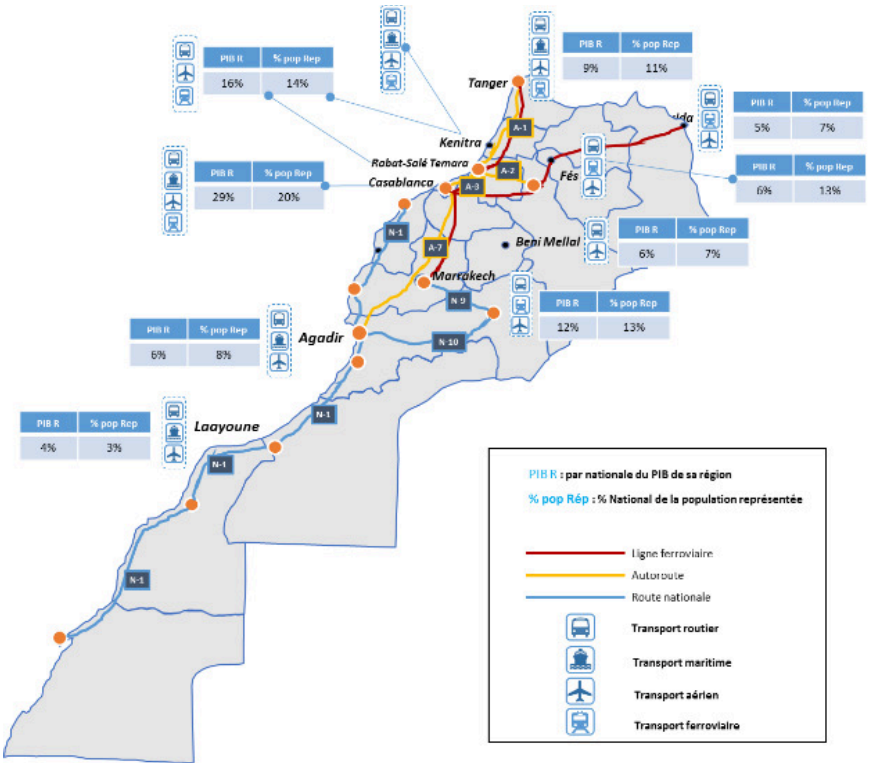
• Réseau de routes	• Réseau ferroviaire	• Réseau aérien
✓ Identifiant ✓ Long/Lat ✓ Type (Intersection, Pont …) ✓ Centroide	✓ Identifiant ✓ Long/Lat ✓ Type (Intersection, Pont, Gare …) ✓ Centroide	✓ Identifiant ✓ Long/Lat ✓ Type (Aéroport, point de connexion avec le réseau) ✓ Centroide

3.1.5 Base de données des enquêtes et comptage :

Enquêtes cordons : (Nombre de postes, lesquels, etc.)

Données relevées :

- Type de véhicule
- Nombre d'occupants (y compris le chauffeur)
- Origine du trajet, destination du trajet
- Lieu de résidence
- Motifs de déplacement :
  - > Déplacements domicile – Travail
  - > Déplacements touristiques
  - > Autres

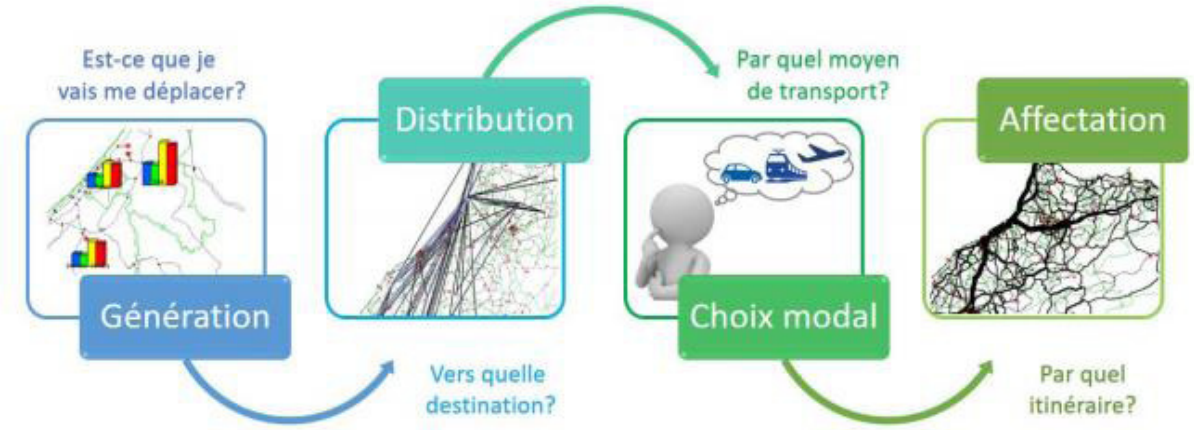


3.2 Le modèle à quatre étapes

Un modèle de transport est, comme nous l'avons vu précédemment, une représentation simplifiée de la réalité. C'est exactement ce but de simplification que vise le modèle classique à quatre étapes (modèle le plus utilisé au monde) qui consiste à décomposer le processus de choix de déplacement d'un individu en quatre étapes successives.

- Génération : Il s'agit d'estimer à partir de variables socio-économiques (nombre d'emplois, population, etc..) les déplacements émis et attirés par chacune des zones du territoire d'étude.
- Distribution : Cette phase permet de relier les volumes d'émissions et d'attractions déterminés lors de l'étape précédente. Les déplacements générés par une zone sont répartis sur l'ensemble du territoire. Ceci conduit à l'obtention de matrices « origine-destination » ou matrice OD.
- Choix modal : Cela consiste à répartir pour chaque flux (volume de trajets avec une origine-destination donnée) le nombre de déplacements effectués selon les différents moyens de transport considérés. Cette étape permet de déterminer les parts modales pour chaque OD.
- Affectation : Cette étape permet de distribuer, pour une OD et un mode donnée, les volumes de déplacement sur les différents itinéraires possibles.

Le schéma suivant résume, pour chaque étape, les choix qui doivent être accomplis par un individu avant son déplacement :



Nous allons à présent décrire les méthodes employées à chaque étape de la modélisation.

3.3 Etape Génération :

Il s'agit de générer, pour chaque combinaison de motif et de segment de demande. Pour ce faire, il existe différentes méthodes qui utilisent des variables démographiques (catégories de population, nombre d'actifs, etc..) et économiques (surfaces commerciales, nombre d'emplois, nombre de lits hôteliers, etc…) afin d'estimer les volumes d'émissions et d'attractions des zones du modèle. En l'absence de données de mobilité importantes, la méthode normative est privilégiée. Son principe est de mettre en relation directe les volumes d'émissions et d'attractions avec les variables socio-économiques, par régression linéaire. Ainsi, pour chaque motif et chaque segment de la demande, les émissions et attractions journalières de la zone i sont de la forme :

$$\begin{cases} E_i = \sum_k \nu_{i_k} . X_{i_k} & \text{où } X_{i_k} \text{ et } Y_{i_k} \text{ sont les variables socio-économiques retenues,} \\ A_i = \sum_k \theta_{i_k} . Y_{i_k} & \text{et } \nu_{i_k} \text{ et } \theta_{i_k} \text{ sont les paramètres d'émission et d'attraction.} \end{cases}$$

Dans notre cas, les variables explicatives par motifs sont les suivantes :

Tableau 1. Variables utilisées pour le modèle de génération

Motif	*Emission*	*Attraction*
Professionnel	Population active 2014	Emplois totaux 2014
Autres	Population adulte 2014	Emplois tertiaires 2014
Touristique	Population adulte 2014	Nombre de lits touristiques 2014

Tableau 2 .Formules de génération par motif

Motif	Type de déplacement	Formule de génération
Professionnel	Emission	E_pro= α_(Emission_pro_i).λ_i.⟦Pop_Active_2014⟧_i
	Attraction	A_pro= α_(Attraction_pro_i).μ_i.⟦Emp_totaux_2014⟧_i
Autres	Emission	E_Autres= α_(Emission_autres_i).λ_i.⟦Pop_Adulte_2014⟧_i
	Attraction	A_Autres= α_(Attraction_autres_i).μ_i.⟦Emp_tertiaires_2014⟧_i
Touristique	Emission	E_tour= α_(Emission_tour_i).λ_i.⟦Pop_Adulte_2014⟧_i
	Attraction	A_tour= α_(Attraction_tour_i).μ_i.⟦Lits_tour_2014⟧_i

Où les paramètres αi représentent la capacité émettrice de la zone par motif, en d'autres termes il s'agit du nombre de déplacements motorisés moyens par habitant et par motif, sortants ou entrant dans la zone. Ces paramètres sont évalués assez précisément par les enquêtes cordons (mode routier) et enquêtes spécifiques modales (enquêtes dans les gares et aéroports).

λ et μ sont des coefficients correctifs, initialisés à 1 et qui seront modifiés lors de l'étape du calage.

Le nombre total d'émissions doit logiquement correspondre à la somme des attractions, une procédure automatique sous TransCAD® réalise cet équilibrage (appelé opération de balancement) après la génération des déplacements.

Les générateurs de trafic importants (aéroports, ports) ont été modélisés séparément par une injection directe de flux de trafic implémentée sous TransCAD®.

3.4 Etape Distribution :

La méthode de distribution utilisée est dite « gravitaire », elle repose sur le principe que les déplacements entre deux zones seront plus importants si ces zones sont proches et si elles sont émettrices/réceptrices de flux important.

Par analogie avec la loi physique, le flux de déplacement entre les zones i et j, pour chaque combinaison de motif et de segment, est donné par une formule de type :

$$F_{ij} = \beta_{ij}.E_i.A_j.f(I_{ij})$$

Avec :

- Fij = flux de déplacement de la zone i vers la zone j
- Ei = volume de trafic émis par la zone i (pour la combinaison de motif et de segment donnée)
- Aj = volume de trafic attiré par la zone j (pour la combinaison de motif et de segment donnée)
- F(Iij)= fonction d'impédance
- β ij = coefficient multiplicateur (>0)

L'effet d'impédance qui représente les freins aux déplacements, ou la résistance au trafic est habituellement évalué à partir des distances ou des temps de parcours minimums.

La formule de distribution utilisée par l'équipe CID est :

$$F_{ij} = \frac{E_i . A_j}{I_{ij}^{0.3}}$$ avec I_{ij} = matrice des temps de parcours minimaux

Par la suite une nouvelle opération de balancement est effectuée sur TransCAD® pour équilibrer l'ensemble des flux sur le territoire.

3.5 Etape Choix Modal :

L'étape de choix modal, qui revient à répartir le trafic entre les différents modes en concurrence, a été évaluée à partir d'un modèle désagrégé du choix discret de type «**logit**».

L'approche désagrégée signifie que le modèle va baser ses estimations sur un ensemble de comportement et de choix individuels (issu des enquêtes), fonction de caractéristiques socio-économiques individuelles, et des offres de transport propres aux trajets de ces individus (interrogés lors des enquêtes). Cette approche s'oppose aux estimations effectuées à partir de caractéristiques moyennées (approche agrégée).

La base d'enquête utilisée pour ces estimations est conséquente : elle comporte une description de plus de 20 000 déplacements, effectués par 7 000 personnes différentes, qui ont été interrogées dans plusieurs gares, aéroports ou cordons routiers de grandes villes marocaines.

A partir de ces données, on va chercher à prédire le comportement d'individus confrontés à un choix modal à partir de la théorie des choix discrets. Pour ce faire, il est supposé que n'importe quel individu est capable de définir une fonction d'utilité évaluant son attraction pour un mode. L'individu est rationnel et choisira forcément le mode lui offrant la plus grande utilité. Cette utilité, notée U est composée de deux parties bien distinctes :

$$U_{\text{mode i}} = V_{\text{mode i}} + \varepsilon_{\text{mode i}} \quad \text{où} \begin{cases} \text{V est la partie déterministe de l'utilité} \\ \text{et } \varepsilon \text{ en est la partie aléatoire,} \end{cases}$$

ε *est* évaluée par une loi de Gumbel (0, 1)

La partie déterministe de l'utilité, est supposée dépendre linéairement de variables socioéconomiques et de variables liées aux offres de transport. L'estimation du modèle de choix modal consiste à déterminer les variables et paramètres de l'utilité V qui « expliqueront » au mieux le comportement de l'individu face à un choix modal. L'estimation se fait à partir de la base des données d'enquêtes, et permet de calculer les utilités Vi de chaque mode pour chaque OD et chaque combinaison de demande.

Par la suite, dans le cas d'un modèle multinomial (plusieurs modes sont en concurrence directe), la probabilité Pm de choisir le mode m, basée sur une la distribution de la loi logistique, est égale à :

$$P_m = \frac{e^{Vm}}{\sum_i e^{Vi}}$$

Cette probabilité correspond également à la part de marché du mode m (ou part modale). Ces probabilités sont calculées pour chaque OD et pour chaque combinaison de demande.

Par ailleurs, une autre segmentation de l'offre entre voyages courts (≤250 km) et voyages long (>250 km) est utilisée dans le modèles de déplacement interurbains pour uniformiser davantage les comportements observés : en effet une personne qui va faire un voyage de 500 km n'effectuera pas son choix du moyen de transport de la même manière qu'une personne qui va effectuer un trajet de 100 km.

Enfin, pour des raisons de corrélations entre certains paramètres d'offres de transport (notamment pour les modes autocar et grand taxi et train), nous avons décidé d'utiliser un modèle logit hiérarchique (à 2 ou 3 niveaux) plutôt qu'un modèle multinomial (qui exige une indépendance des différentes alternatives (offres de transport non liées entre elles).

Dans le cas des trajets courts par exemple, on suppose qu'un individu choisira d'abord entre un voyage en véhicule personnel (VP) et un voyage en transport en commun (TC), et dans le cas où il choisirait le TC, il ferait dans un deuxième temps le choix du mode de TC (train, taxi ou autocar). Les structures de modèles hiérarchiques pour les courtes et longues distances sont représentées ci-dessous :

Figure 6. Schéma explicatif de la structure des choix modaux effectués pour une distance inférieure à 250 km

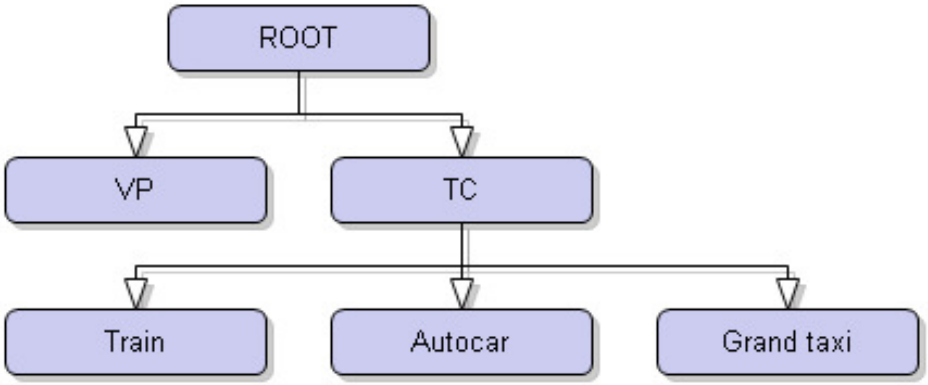
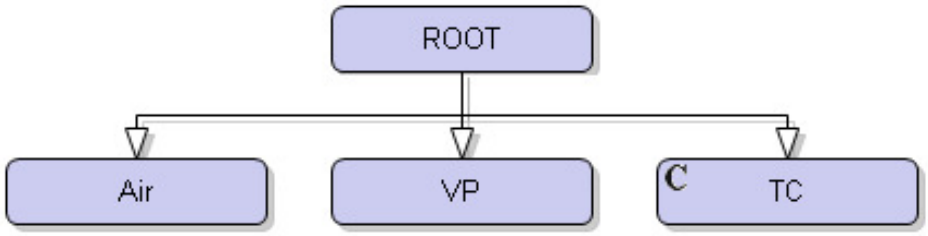


Figure 7. Schéma explicatif de la structure des choix modaux effectués pour une distance supérieure à 250 km



La formule de probabilité pour choisir un mode du deuxième niveau, sachant que le choix de premier niveau a été effectué, est donnée par la formule :

$$P(Train \mid TC) = \frac{e^{\frac{Vtrain}{\theta_{TC}}}}{e^{\frac{Vtrain}{\theta_{TC}}} + e^{\frac{Vtaxi}{\theta_{TC}}} + e^{\frac{Vautocar}{\theta_{TC}}}}$$

Où θTC est appelé paramètre de niche ou paramètre de logsum pour la niche TC.

3.6 Etape Affectation (Cas de l'affectation routière) :

Lorsque les parts modales de chaque OD sont obtenues, nous pouvons calculer le trafic journalier de chaque mode par combinaison de motif et de demande. Par la suite, le taux d'occupation moyen, déterminé par les enquêtes cordons, nous permet de transformer le flux d'individus en flux de véhicules (la même démarche est faite pour les grands taxis et les autocars). Les valeurs des taux d'occupation de VL par motif sont les suivantes :

Tableau 3. Taux d'occupation moyen des VL © CID – enquêtes SDMN

Motif	*Taux d'occupation*
Professionnel	**1,9**
Autres	**2,4**
Touristique	**2,3**

Ensuite, il ne reste qu'à sommer les flux de chaque combinaison de motif et de demande pour connaitre le trafic journalier de véhicules sur une OD donnée.

Les étapes suivantes consistent à répartir le trafic VP journalier sur une base horaire, via les courbes de fréquentations routières horaires (qui distinguent les périodes de pointes des périodes creuses), et enfin obtenir les trafics horaires moyens de chaque OD.

Une procédure sous TranCAD® affecte ensuite automatiquement ces trafics sur le réseau routier, en tenant compte des limites de capacités de la route donc des possibilités de congestion (il répartit le trafic sur plusieurs itinéraires si besoin). C'est une affectation à capacité contrainte, selon le principe classique d' « équilibre de Wardrop » qui utilise la formule débit-vitesse du BPR (Bureau of Public Road) américain, par défaut sous TransCAD®.

Cette étape consiste à l'affectation de la demande sur l'offre actuelle afin d'élaborer les variantes d'amélioration et une base de départ pour la simulation des solutions futures.

Figure 8. Affectation du trafic routier sur le réseau routier du Maroc (Année de base 2014)

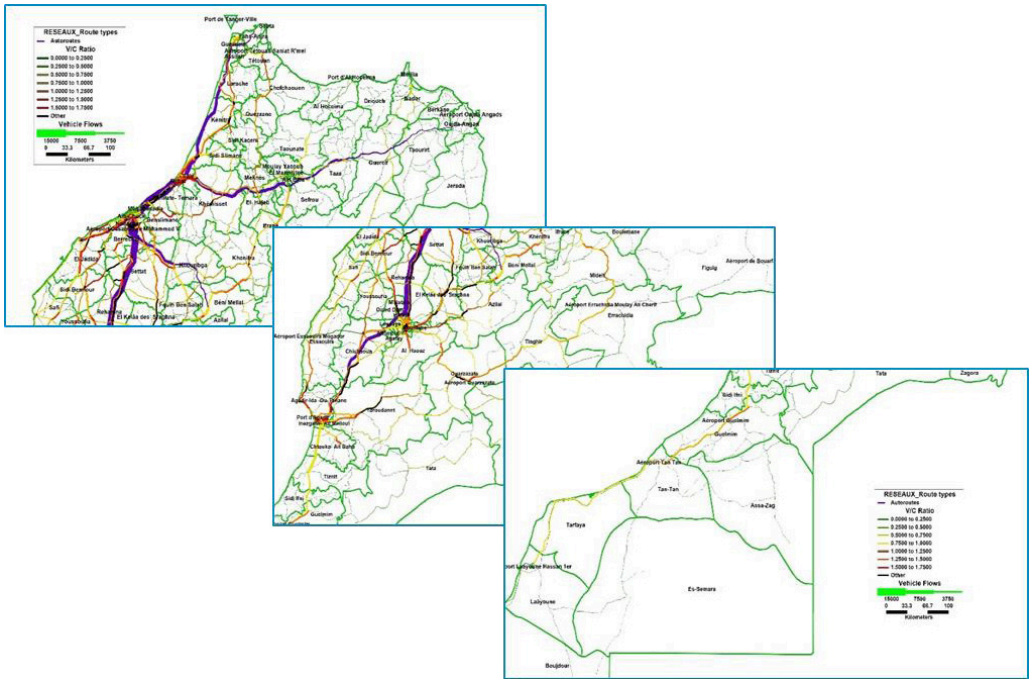
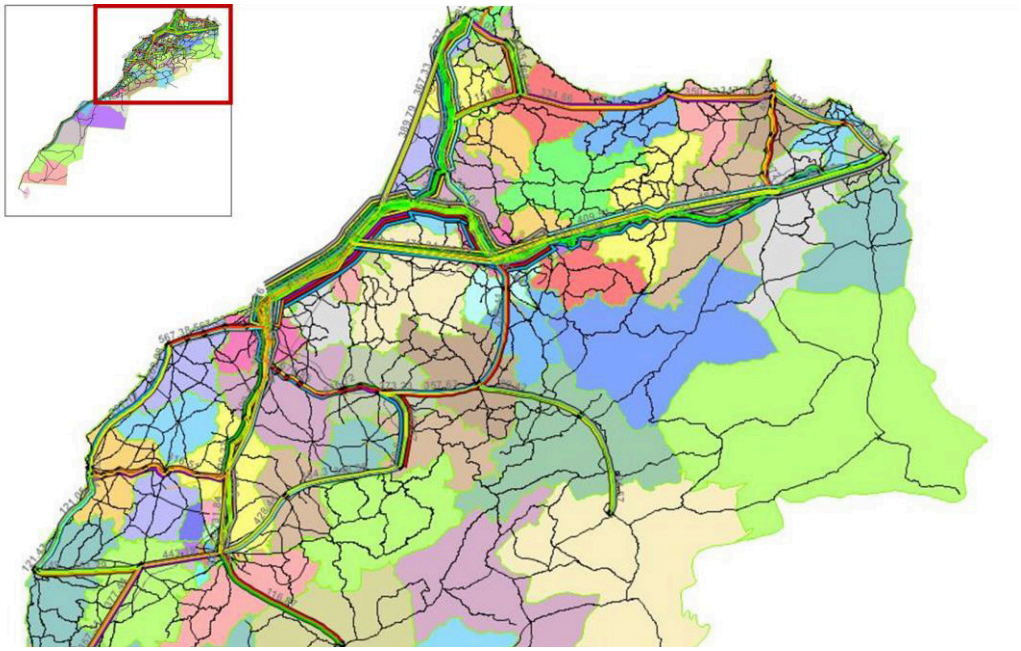


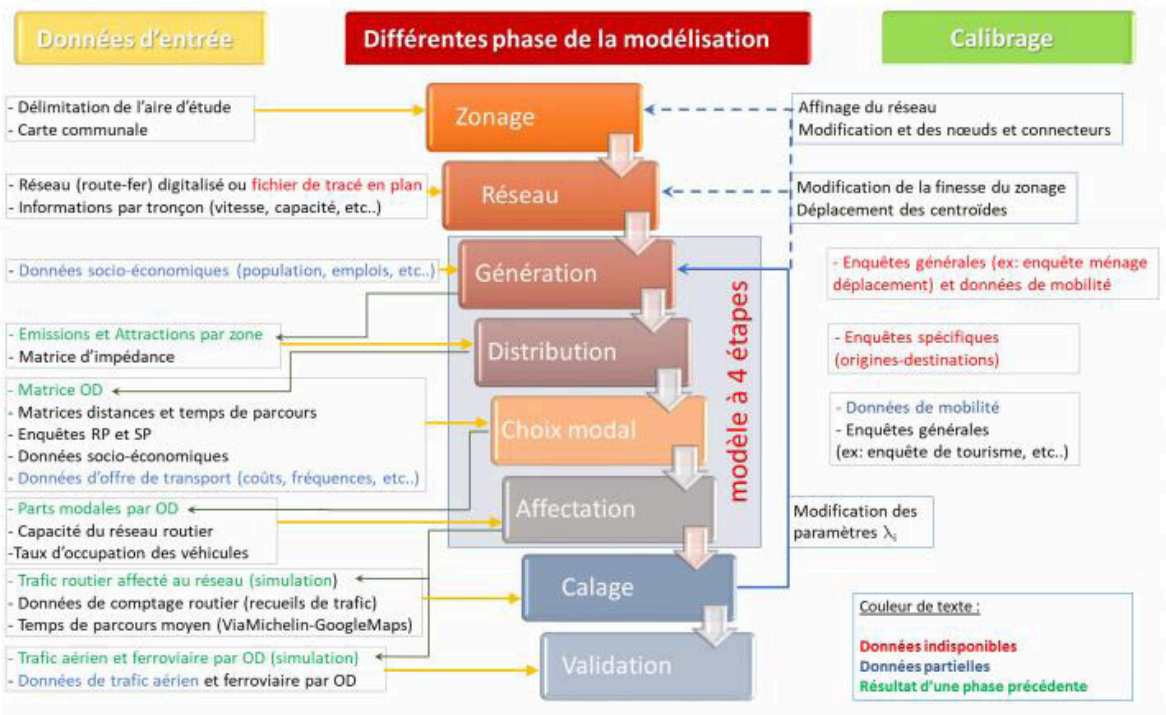
Figure 9. Affectation du trafic ferroviaire au niveau du Maroc (Horizon 2035)



Carte illustrative*

La figure suivante synthétise l'ensemble du processus de réalisation d'un modèle de déplacement, en situation de base :

Figure 10. Synthèse du processus de réalisation d'un modèle de trafic



4 Analyse des résultats obtenus

4.1 Génération - Distribution

Les étapes de génération et de distribution ne posent, en général, aucun problème particulier en termes de manipulations sur le logiciel TransCAD®. Les principales précautions ont été prises au niveau du maniement des différentes matrices.

Les figures ci-dessous donnent un aperçu visuel des trafics émis et attirés au niveau de quelques zones de l'aire de l'étude.

Figure 11. Volume des déplacements émis et attirés dans le territoire d'étude, pour le motif professionnel (émission des captif en bleu-attraction en vert, émissions des non captifs en jaune-attraction en rouge)

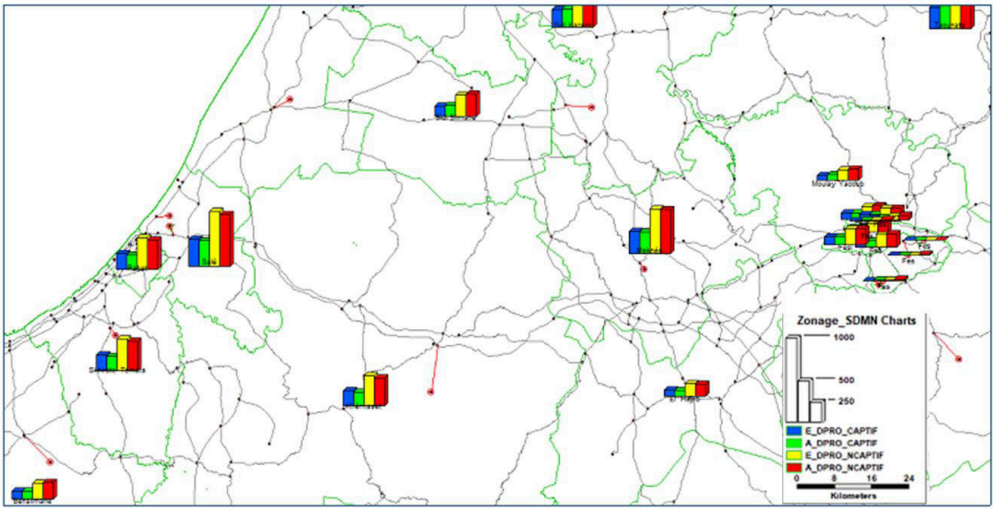
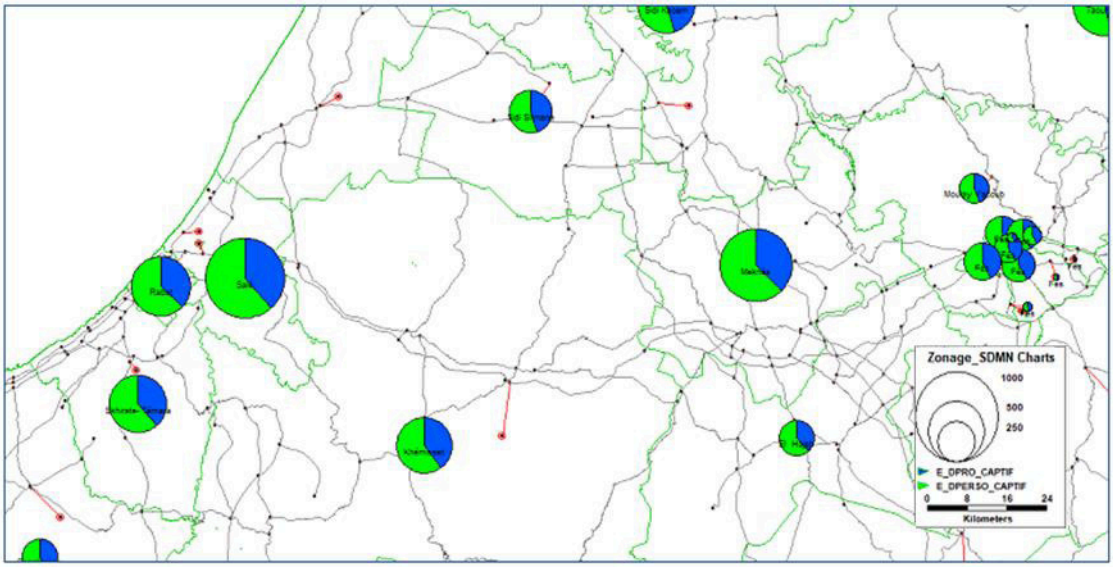


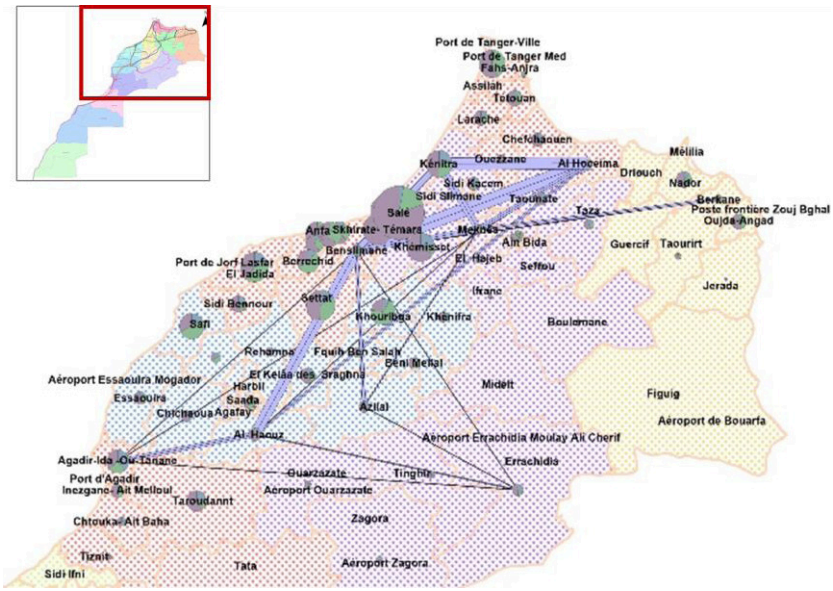
Figure 12. Comparaison des volumes d'émissions de déplacements des captifs pour les motifs professionnels (en bleu) et personnels (en vert) dans le territoire d'étude



Conformément aux données socio-économiques, les non-captifs sont plus nombreux à se déplacer que les captifs.

Nous avons élaboré à travers le logiciel TransCAD® un schéma des lignes de désirs qui illustre l'influence des grandes villes (Casablanca, Rabat, Marrakech, etc..) sur les villes moyennes proches (attraction de flux régionaux), et qui échangent également entre-elles des flux très importants, de manière proportionnelle à leurs tailles respectives et à l'inverse des distances les séparant.

Figure 13. Lignes de désirs entre les différentes régions – tous motifs



4.2 Choix modal

Avant d'estimer le modèle logit, il a été nécessaire de traiter la base de donnée en supprimant les déplacements « anormaux » qui créent un écart d'utilité trop important et augmentent très fortement le log vraisemblance. Par ailleurs les trajets non réalisables ont été supprimés (cas d'une personne enquêtée, par exemple, qui dit avoir fait le trajet en train entre deux villes non reliées et distantes du réseau ferré marocain).

Par la suite nous avons cherché à déterminer les variables explicatives du choix modal par analyse des résultats de la simulation du modèle sous TransCAD. Nous avons comparé pour ce faire les résultats obtenus sur plusieurs modèles, comportant des paramètres génériques (même paramètres pour une variable qui concerne les deux modes) ou spécifiques (paramètres distincts), de coût et de temps ou de coût généralisé ainsi que d'autres paramètres liés aux variables socio-économiques ou d'offre de transport (âge des personnes interrogées, sexe, possession ou non d'un véhicule, fréquence des TC, etc..).

Les formules utilisées pour calculer les coûts généralisés VP et TC ont été les suivantes :

$$\begin{cases} C_{generalisé_VP} = C_{kilometrique}.d_{istance} + V_{temps}.T_{parcours_VP} \\ C_{generalisé_TC} = P_{billet} + V_{temps}.T_{parcours_TC} \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} C_{kilometrique} = coût\ kilometrique \text{ (carburant, péages, entretien, etc..)} \\ d_{istance} = distance\ entre\ les\ deux\ villes\ de\ l'OD \\ V_{temps} = valeur\ du\ temps\ (10\ dh\ pour\ le\ motif\ personnel\ et\ 25\ dh\ pour\ le\ motif\ professionnel) \\ T_{parcours} = temps\ de\ parcours\ selon\ le\ mode \\ P_{billet} = Prix\ du\ billet \text{ de transport} \end{cases}$$

La qualité finale du modèle est évaluée à l'aide de différents indicateurs statistiques.

Nous avons basé nos analyses à partir de la cohérence des signes affectés aux différents paramètres et aux indicateurs fournis par le logiciel : le coefficient R2 ajusté de Mc Fadden et le test de Student. Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau ci-dessous :

(Une case rouge signifie que les signes ne sont pas cohérents ou que le test de Student à 95% n'est pas validé).

Figure 14. Données de résultats des modèles logit pour différentes variables comparées

	Modèle 1		Modèle 2		Modèle 3		Modèle 4		Modèle 5		Modèle 6		Modèle 7		Modèle 8		Modèle 9	
	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC	VP	TC
Paramètres génériques	x						x				x							
Paramètres spécifiques			x		x				x		-0,0051		x		x		x	
Coût	-0,0021		-0,002	0,0003							-0,2882							
Temps	-0,2632		-0,267	-0,251														
Coût généralisé					-0,002	-0,002	-0,0022		-0,005	-0,005			-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	-0,008	-0,007
Motorisation									3,5098		3,3277		3,5275		3,6136		2,8985	
Fréquence														0,0016		0,0012		0,244
Age																0,0157		0,0275
Sexe																		-0,16
Constante		0,334		-0,018		0,0008		0,0631		1,3606		1,4458		1,3315		0,8476		-1,126
T-student																		
Signes cohérents																		
R2 Mc Fadden ajusté	0,030741		0,039036		0,036387		0,036124		0,380779		0,355135		0,38133		0,383849		0,499851	

Le modèle offrant les meilleurs résultats d'estimation est le numéro 9 qui comporte comme variables explicatives : le coût généralisé des deux modes en paramétrage spécifiques, la motorisation, la fréquence des TC, l'âge et le sexe.

La motorisation sera prise en compte dans le modèle grâce à la segmentation de population par captivité (possédant ou non un véhicule) prévue initialement. Par contre l'âge, qui est une variable polyatomique, ne sera pas gardée car elle nécessiterait de segmenter davantage la population (par plusieurs classes d'âges). Il en est de même pour la variable de sexe des individus, qui multiplierait par deux le nombre de combinaisons de demande, et pourrait devenir problématique dans certains cas (notamment lorsque le nombre d'observations d'une combinaison deviendrait très faible, inférieur à 200 observations).

Les formules d'utilités (déterministes) obtenues ont les formes suivantes :

$$\begin{cases} V_{VP} = \alpha_{VP}.CG_{VP} \\ V_{TC} = \gamma + \alpha_{TC}.CG_{TC} + \beta_{TC}.freq_{TC} \end{cases}$$

Maintenant que les variables d'utilité ont été sélectionnés, nous avons estimé le modèle de choix modal pour chaque combinaison de demande et de motif, dans le cas de trajets courts. Les résultats obtenus sous TransCAD sont les suivants :

Figure 15. Paramètres du modèle obtenus pour les différentes combinaisons

Dataview4 - MNL_NV1

Alternatives	CG_VP	CG_TC	FREQ_TC	CST
1	CG_VP			
2		CG_TC	Frequence_TC	ONE
Model	-0.007167	-0.005291	0.377753	-1.765659
Model_DPRO_CAPTIF	-0.001985	-0.001772	0.119451	0.950886
Model_DPERSO_CAPTI	-0.003710	-0.001331	0.181830	-0.293350
Model_DPRO_NCAPTIF	-0.015312	-0.014987	1.384653	-3.992516
Model_DPERSO_NCAPT	-0.021481	-0.030113	4.170339	-3.084298

Le détail des estimations obtenues, et des indicateurs statistiques pour la combinaison des captifs ayant un motif professionnel, par exemple se trouve ci-dessous :

```
Choice Distribution
1                    405  13.0
2                   2715  87.0

Maximum likelihood reached at iteration 9
Parameter                  Estimate       Std. Err.          t Test
CG_VP                     -0.001985        0.000296       -6.707554
CG_TC                     -0.001772        0.000321       -5.526838
FREQ_TC                    0.119451        0.010880       10.979343
CST                        0.950886        0.123354        7.708613

 Log-likelihood at zero:    -2162.619203
 Log-likelihood at  end:    -1080.161033
-2 (LL(zero) - LL(end)):     2164.916341
 Asymptotic rho squared:        0.500531
   Adjusted rho squared:        0.498681
Total Running Time 417162:11:57.381.
```

Figure 16. : Résultats d'estimation pour les captifs avec motif professionnel et vérification de la cohérence avec des indicateurs statistiques

Paramètre	Signe attendu	Explication	Paramètre estimé	Valeur t-test
α_{VP}	négatif	L'utilité diminue quand le coût généralisé augmente	-0.020	-6.7
α_{TC}	négatif	idem	-0.018	-5.5
β_{TC}	positif	L'utilité augmente quand la fréquence des TC augmente	0.119	11.0
γ			0.950	7.7
R2 ajusté		Condition R2>0.3 respectée	0.498681	

Toutes les utilités ont pu être estimées avec tous les indicateurs statistiques au vert, nous pouvons à présent déterminer la matrice des utilités pour chaque OD (après avoir calculé les coûts généralisés VP et TC ainsi que les fréquences des TC sur chaque OD). Puis, nous obtenons les parts modales de chaque combinaison et de chaque OD, par la formule présentée précédemment, voici un aperçu des résultats pour la combinaison considérée :

Figure 17. Parts modales VP des captifs avec motif professionnel

E9 =EXP(Utilité_VP_DPRO_CAPTIF!E9)/(EXP(Utilité_VP_DPRO_CAPTIF!E9)+EXP(Utilité_TC_DPRO_CAPTIF!E9

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	New	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	28%	5%	2%	2%	3%	2%	2%	3%	3%	3%
3	2	5%	28%	5%	4%	5%	5%	3%	5%	4%	5%
4	3	2%	5%	28%	0%	2%	11%	1%	15%	6%	5%
5	4	2%	4%	0%	28%	2%	0%	0%	0%	4%	1%
6	5	3%	5%	2%	2%	28%	0%	1%	2%	5%	6%
7	6	2%	5%	11%	0%	0%	28%	1%	3%	5%	10%
8	7	2%	3%	1%	0%	1%	1%	28%	10%	1%	1%
9	8	3%	5%	15%	0%	2%	3%	10%	28%	5%	10%
10	9	3%	4%	6%	4%	5%	5%	1%	5%	28%	2%
11	10	3%	5%	5%	1%	6%	10%	1%	10%	2%	28%
12	11	2%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%

Les résultats de cette combinaison sont satisfaisants et conformes à nos attentes.

5 Conclusion

Au niveau de cette approche d'établissement du projet SDMN nous avons défini, sommairement, la demande et les concepts liés à l'offre. Puis nous avons décrit qualitativement les aspects de la demande ainsi que les aspects sociaux, en passant par les aspects économiques. Ensuite nous avons indiqué les motivations opérationnelles pour modéliser la demande de transport, dans une série de contextes d'application : les principaux contextes sont la prévision de la demande, l'évaluation de projet, et la planification de réseau.

Nous avons alors donné des principes généraux pour la modélisation : des définitions, et une analyse en quatre facettes pour un modèle de simulation. Les quatre facettes concernent, respectivement, le contenu sémantique, la formulation et son analyse mathématique, le traitement technique par un solveur (TransCAD®), la relation empirique entre le modèle et sa cible concrète.

Afin d'assurer la continuité de ce travail et faire vivre ce modèle, nous recommandons de créer un observatoire qui sera un lieu d'échanges et de débat qui aura comme objectifs de développer des outils de connaissance et d'information sur les transports de voyageurs et de marchandises et sur la logistique au niveau national, de réaliser des études et d'organiser des réunions thématiques. Il aura comme vocation à mettre à la disposition de l'ensemble des acteurs (institutionnels, entreprises, associations, grand public…) des éclairages utiles aux réflexions sur la politique de mobilité et des déplacements au niveau du Royaume.

6 Bibliographie

- Note Stratégique – Secteur des déplacements urbains- Avril 2007
- Aménagement du territoire au Maroc : infrastructures de transport et disparités régionales - 2011
- Plan de déplacement urbain du Grand Agadir -2012 (Date de lancement)
- Schéma directeur d'aménagement urbain du Grand Agadir -2011 (Date de lancement)
- Source PDU Marrakech 2008
- Schéma directeur de mobilité nationale (en cours)
- Etude de restructuration du transport en commun au niveau du Grand Casablanca 2014
- Etude du plan de circulation du Grand Casablanca - 2014

CID

CONSEIL, INGENIERIE ET DEVELOPPEMENT

إستشارة، هندسة و تنمية

www.cid.co.ma