

Développement d'un logiciel pour l'analyse de la pertinence des modes de transport en milieu urbain ou régional

Projet d'ingénieur en laboratoire

Année 2014-2015

Étienne CORBILLÉ

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Enjeux et objectifs.....	4
2.1	Contexte scientifique.....	4
2.2	Objectifs et méthodologie.....	6
3	Modèle analytique d'évaluation socio-économique.....	7
3.1	Modélisation du réseau et de la demande.....	7
3.1.1	Demande de transport.....	7
3.1.2	Offre de transport.....	9
3.1.2.1	Transports collectifs.....	9
3.1.2.2	Mode routier.....	10
3.1.3	Application sur un exemple.....	10
3.2	Modèle de choix modal.....	12
3.2.1	Temps de trajet.....	13
3.2.2	Coût généralisé du voyageur.....	14
3.2.3	Parts modales.....	14
3.2.4	Élasticité de la demande.....	14
3.3	Coûts économiques pour l'opérateur et la collectivité.....	15
3.4	Fonctions objectifs pour l'optimisation du réseau.....	16
3.5	Conclusion sur le modèle.....	17
4	Structure et fonctionnalités du logiciel développé.....	18
4.1	Généralités.....	18
4.2	Structure.....	18
4.2.1	Implémentation du modèle.....	18
4.2.2	Interface graphique.....	20
4.3	Utilisation via l'interface graphique.....	21
4.4	Utilisation experte.....	27
4.5	Limites et perspectives de développement.....	30
5	Conclusion.....	31
6	Bibliographie.....	32

1 Introduction

La planification des transports collectifs au niveau urbain et régional est un problème complexe aux multiples dimensions. En effet, l'analyse d'un plan de transport et son évaluation socio-économique requièrent à la fois la prise en compte de toutes les variables concernant la demande mais également toutes les caractéristiques et les contraintes liées à l'offre de transport. De plus, l'offre et la demande sont en perpétuelle interaction et la modification d'une caractéristique suffit à rompre l'équilibre en place.

Planifier une offre de transport, c'est répondre aux besoins de mobilité des individus de la façon la plus pertinente tout en assurant la viabilité et la durabilité du service du point de vue technique, économique, social et environnemental. Cet équilibre doit être trouvé par les collectivités et en particulier les autorités organisatrices de transport qui ont en charge la planification et le financement. À la nécessité de répondre à des besoins de mobilité très importants viennent s'ajouter de nouvelles exigences environnementales et les contraintes liées à la raréfaction des ressources financières publiques. Ces éléments conduisent les politiques publiques à optimiser l'offre existante et à rechercher de nouvelles solutions de transports durables, c'est-à-dire capable d'assurer l'efficacité des déplacements du point de vue économique, en garantissant l'équité sociale et en respectant les contraintes écologiques (Boillat, 2007).

Une préoccupation essentielle lors de la planification d'une offre de transport est le choix de mode (bus, tramway, métro, etc.) et les variables qui caractérisent la desserte (fréquence, taille du véhicule, espacement des arrêts, etc.). L'analyse doit alors prendre en compte les coûts de production des transports, les caractéristiques de la demande mais également les offres concurrentes comme la route ou les services d'autres transporteurs. On trouve dans la littérature académique des éléments de réflexion et de décision sur ces problèmes mais leur application dans des conditions opérationnelles nécessite un certain savoir-faire. Il y a donc un véritable intérêt à développer des outils d'aide à la décision clairs, pédagogiques, à la fois simples et réalistes pour permettre aux collectivités d'engager une première réflexion sur un projet ou d'analyser les grands traits de l'offre actuelle. D'autant plus que, dans le contexte actuel, les collectivités ont des compétences qui évoluent en termes de transport et que le transport par autocar pourrait être rapidement libéralisé.

Ce rapport présente le développement d'un modèle analytique d'évaluation socio-économique d'une offre de transport inspiré de (Van Nes, 2002) et son implémentation dans un logiciel simple à destination d'un public compétent en transport mais non spécialiste en modélisation. On détaillera dans une première partie les objectifs et la méthodologie adoptée avant de présenter successivement le modèle et le logiciel développé.

2 Enjeux et objectifs

La modélisation en transport possède une place prépondérante dans l'évaluation d'un projet ou d'une offre de transport. Ainsi, de nombreux opérateurs et quelques autorités organisatrices de transport ont développé leurs propres outils de modélisation. Les industriels se sont également installés sur ce marché et proposent de puissants logiciels mais dont l'utilisation est peu accessible aux non-initiés. Les outils existants se basent sur une littérature académique foisonnante mais aussi très spécialisée ce qui rend difficile l'édification d'un modèle générique apte à analyser le système de mobilité dans son ensemble et notamment son caractère multimodal.

2.1 Contexte scientifique

Depuis les années 60 et le début de la modélisation en transport, la forme générique d'un modèle s'est standardisée (voir Illustration 1). Cette approche débute par la collecte des données d'un territoire et la construction d'une représentation abstraite de l'offre et de la demande souvent sous la forme d'un zonage traversé par un réseau. Ensuite vient le processus de modélisation des déplacements qui est classiquement divisé en quatre étapes (McNally, 2000) :

1. génération de la demande, on détermine pour chaque zone le nombre de déplacements dont elle sera l'origine ;
2. distribution des trajets, on associe à chaque déplacement une origine et une destination (on obtient alors la matrice « origine – destination ») ;
3. choix modal, on détermine les parts modales pour chaque trajet en fonction de l'offre existante ;
4. affectation, on affecte les trajets à un itinéraire précis selon le mode choisi.

La structure du « modèle à 4 étapes » est souvent adaptée selon les cas et des solutions alternatives existent. Cependant cela offre un point de référence utile pour effectuer des comparaisons et positionner un modèle au sein de la grande variété de ceux existants. Chaque étape fait souvent l'objet d'un « sous-modèle » ce qui permet leur réutilisation. La structure décrite est donc par construction modulaire et son intérêt réside dans les multiples possibilités d'agencement de ces « sous-modèles » pour décrire au mieux la situation étudiée.

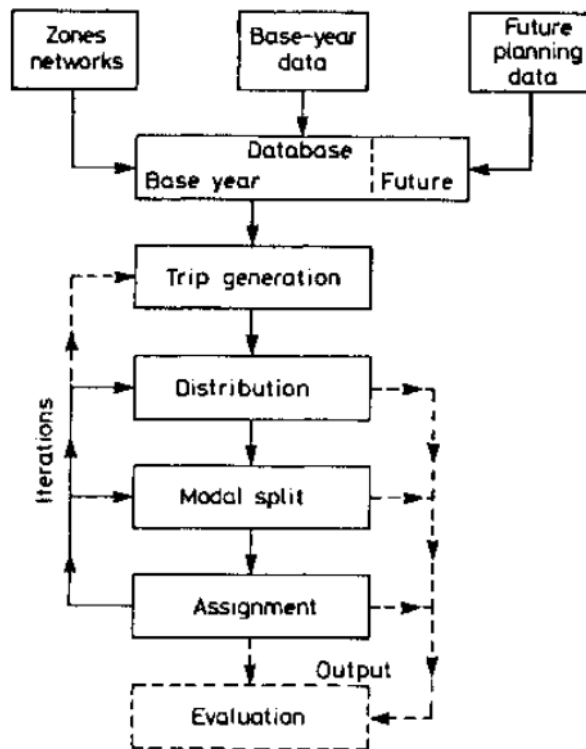


Illustration 1: Forme générique d'un modèle de transport (de Dios Ortuzar, 2011)

On utilise ensuite un module d'évaluation des résultats afin de permettre la comparaison entre différents scénarios et ainsi disposer d'un outil d'aide à la décision. La construction de ce module dépend grandement des objectifs du modélisateur. Si l'on se place du côté des collectivités, on prendra comme objectif l'intérêt général et on se basera donc sur une analyse coûts-avantages du projet pour la société. Pour cela, il est nécessaire de monétariser les bénéfices et les nuisances du scénario. Lorsqu'il s'agit de biens marchands, le marché fournit un prix mais ce prix ne correspond pas forcément au coût réel du bien pour l'ensemble de la collectivité. De plus, les investissements ont des effets pour lesquels il n'existe pas de prix, comme les externalités environnementales ; on est alors obligé de calculer leur coût ou leur valeur. On peut alors combiner ces avantages et ces coûts pour en tirer des critères d'évaluation des projets en tenant compte de l'étalement dans le temps des dépenses et des recettes : le projet coûte au début pour sa construction, puis rapporte tout au long de sa durée de vie (Quinet, 2013).

Cette évaluation permet alors soit de choisir un projet, soit d'améliorer une offre existante. En effet, améliorer la performance des réseaux est aujourd'hui une nécessité compte tenu de l'accroissement des déficits d'exploitation lors des trente dernières années (Faivre d'Arcier, 2012). Des gains potentiels peuvent être réalisés par le design des réseaux et la maîtrise des coûts de production. La littérature est abondante au sujet du problème d'optimisation des réseaux compte tenu de sa difficulté. En effet, ce problème est NP-complet et une large part des articles scientifiques se concentrent sur les outils mathématiques et informatiques permettant de le résoudre soit de manière approchée, soit sur des réseaux de petite taille. On trouvera dans (Van Nes, 1999) un aperçu détaillé des modèles développés pour différents types de réseaux (routier/transport en commun),

différentes fonctions objectifs (minimisation des coûts/maximisation du surplus) et pour plusieurs méthodes de résolution.

La modélisation et l'optimisation d'un réseau de transport sont constituées d'une multitude de sous problèmes aux fortes contraintes techniques, le projet décrit dans ce rapport s'inscrit donc dans un environnement complexe avec un fort niveau de spécialisation des outils déjà développés.

2.2 Objectifs et méthodologie

Le projet a pour objectif le développement d'un modèle d'évaluation socio-économique d'une offre de transport et de son implémentation dans un logiciel prototype. L'idée principale est de proposer un outil d'aide à la décision clair, pédagogique et facile à utiliser pour permettre aux collectivités d'engager une première réflexion sur un projet ou d'analyser les grands traits d'une offre existante.

En conséquence, le nombre de données d'entrée nécessaires à la modélisation devra être restreint et on se focalisera sur l'analyse de la pertinence des modes pour la desserte de territoires donnés. La relative simplification du problème de design optimal d'un réseau ne devra pas empêcher l'adaptation du modèle à des types différents de demande de transport (desserte d'un point remarquable, demande homogène ou diffuse, etc.) et à des échelles géographiques variables, notamment l'urbain et l'interurbain. On souhaite également que le logiciel puisse fournir des sorties graphiques et des indicateurs socio-économiques permettant d'aider à la décision sur les modes de transport à déployer et l'optimisation des caractéristiques de l'offre comme la fréquence d'une ligne ou l'espacement entre les stations. Enfin, la modélisation de la concurrence entre différents modes de transport devra être intégrée ce qui implique le développement d'un modèle de choix modal.

Concernant la structure du modèle et du logiciel, elle devra être modulaire de façon à être adaptable à permettre l'introduction de nouvelles fonctionnalités dans l'optique de la poursuite ultérieure de ce travail.

Pour permettre la réalisation de ces objectifs, nous avons fait le choix de définir le modèle sur un espace géographique de type « corridor », donc sur une seule dimension. Ceci constitue une approximation acceptable compte tenu du niveau de précision visé et ce choix semble pertinent au regard de la configuration radiale de nombreux réseaux de transports qui peuvent donc être modélisés localement par des corridors sur chaque radiales. Afin de garantir un faible nombre de données d'entrée, on proposera autant que possible des valeurs génériques concernant le coût des différents modes et les contraintes d'exploitation. Cependant ces valeurs seront paramétrables pour assurer l'adaptabilité du modèle et du logiciel à chaque situation.

Le logiciel sera développé en langage Python qui est simple d'utilisation et très répandu. On s'efforcera de séparer structurellement l'implémentation du modèle en lui-même et l'interface graphique afin de permettre une utilisation « experte » sans les contraintes imposées par le développement d'une interface ergonomique.

3 Modèle analytique d'évaluation socio-économique

On se propose dans cette partie de décrire précisément le modèle analytique d'évaluation socio-économique pour que le logiciel ne constitue pas une « boîte noire ». Ce modèle est librement inspiré de (Van Nes, 2002). On s'attachera à identifier les hypothèses sous-jacentes aux choix de modélisation et les limites de validité du modèle.

Au regard de la structure standard d'un modèle de transport (voir partie 2.1 page 4), le modèle développé ne s'occupe pas de la génération de la demande et de la distribution des trajets. En effet, on considère que la matrice « origine – destination » est une donnée d'entrée. De plus, par soucis de simplicité, on fait l'hypothèse que les trajets sont tous mono-mode est sans correspondance. En conséquence, le problème de l'affectation n'est pas traité compte tenu du caractère unidimensionnel de l'espace géographique considéré. On attachera de l'importance uniquement au problème du choix modal et aux outils d'évaluation socio-économique en sortie de la simulation. Le modèle est statique et non pas dynamique, on est donc sous l'hypothèse de l'atteinte d'une situation d'équilibre.

3.1 Modélisation du réseau et de la demande

Le modèle est construit sur un espace géographique de type corridor qui peut accueillir différents modes et services de transport en parallèle. Le corridor est caractérisé par sa longueur L et peut être divisé en un nombre de zones n au sein desquelles les caractéristiques de l'offre et de la demande seront constantes. L'unité de temps considérée pour toutes les variables est l'heure. Compte tenu du caractère unidimensionnel du problème, on pourra parler de l'abscisse d'un élément et on fixe arbitrairement l'origine du repère à l'une des extrémités du corridor de façon à ne travailler qu'avec des abscisses positives.

3.1.1 Demande de transport

La demande est caractérisée par la fonction densité de demande de transport $p(x, y)$ (en individus par m^2 se déplaçant de l'abscisse x vers y). Cette fonction n'est pas directement exploitée mais est utile pour les calculs intermédiaires et le passage aux valeurs moyennes. La méthode retenue est d'associer à chaque zone du corridor une demande de transport q_{ij} dont l'unité est le nombre d'individus se déplaçant de la zone i vers la zone j par heure. Au sein de chaque zone, on considère que la densité de demande est homogène ainsi que la densité des destinations. Cela signifie formellement que pour tout x dans la zone i et tout y dans la zone j :

$$p(x, y) = \frac{q_{ij}}{l_i l_j}, \text{ avec } l_i \text{ et } l_j \text{ les longueurs des zones } i \text{ et } j.$$

Pour chaque couple origine – destination (i, j) , on définit la distance moyenne parcourue d_{ij} . D'après l'hypothèse d'homogénéité, on a :

$$d_{ij} = \frac{1}{q_{ij}} \iint |x-y| p(x,y) dx dy .$$

Avec x_i et x_j les abscisses respectives du centre des zones, on en déduit que :

- $d_{ij} = \frac{l_i}{4}$ si $i=j$
- $d_{ij} = |x_j - x_i|$ sinon.

On définit également le serpent de charge du corridor dans chaque sens de circulation $c^a(x)$ et $c^b(x)$ avec la convention que le sens a (resp. b) est celui des abscisses décroissantes (resp. croissantes). La valeur de $c^a(x)$ représente le nombre d'individus passant par l'abscisse x au cours de leur déplacement en une heure, c'est donc la charge du réseau en un point donné. La valeur maximale de cette variable sur tout le corridor est nécessaire au dimensionnement de l'offre puisqu'elle représente la charge maximale et donc la capacité minimale requise pour répondre à la demande.

On peut exprimer la charge en fonction des « charges partielles » par couple origine – destination :

$$c^b(x) = \sum_{ij} c_{ij}^b(x) .$$

Sous l'hypothèse d'homogénéité de la demande dans chaque zone, on a :

1^{er} cas : $i < j$

On a alors : $c_{ij}^a(x) = 0$ car on est dans le sens des abscisses croissantes ; et pour $c_{ij}^b(x)$:

- si $x < x_i - \frac{l_i}{2}$ (en amont zone i) : $c_{ij}^b(x) = 0$;
- si $x_i - \frac{l_i}{2} < x < x_i + \frac{l_i}{2}$ (dans la zone i) : $c_{ij}^b(x) = \frac{q_{ij}}{l_i} (x - (x_i - \frac{l_i}{2}))$;
- si $x_i + \frac{l_i}{2} < x < x_j - \frac{l_j}{2}$ (entre les zones i et j) : $c_{ij}^b(x) = q_{ij}$;
- si $x_j - \frac{l_j}{2} < x < x_j + \frac{l_j}{2}$ (dans la zone j) : $c_{ij}^b(x) = \frac{q_{ij}}{l_j} (x_j + \frac{l_j}{2} - x)$;
- si $x_j - \frac{l_j}{2} < x$ (en aval de la zone j) : $c_{ij}^b(x) = 0$.

2^{ème} cas : $i = j$

On a alors : $c_{ii}^a(x) = c_{ii}^b(x) = q_{ii} \frac{x}{2l_i} (1 - \frac{x}{l_i})$

3^{ème} cas : $i > j$

Le 3^{ème} cas se déduit aisément en substituant i par j et b par a dans les expressions du 1^{er} cas.

3.1.2 Offre de transport

On approxime le réseau routier par un unique axe tandis le corridor peut contenir une ou plusieurs lignes de transports collectifs concurrentes. Dans le cadre du modèle développé, chaque ligne parcourt nécessairement la totalité du corridor. Il serait possible de se libérer de cette contrainte mais on n'a pas souhaité complexifier inutilement le modèle et on considère donc que celui-ci s'applique à l'échelle de la plus petite ligne de transport collectif.

3.1.2.1 Transports collectifs

Chaque ligne de transport collectif est caractérisée par :

- son mode (bus, BHNS, tramway, métro ou train) ;
- la distance inter-station par zone s^i (si $s^i > l_i$ alors on considère qu'il n'y pas d'arrêts dans la zone et s^i représente la distance entre les deux stations les plus proches de part et d'autre de la zone) ;
- sa fréquence f exprimée en véhicules par heure ;
- la vitesse inter-station des véhicules par zone v^i (vitesse moyenne de circulation sur l'axe sans arrêt en station) ;
- le temps perdu par le véhicule à chaque arrêt t_s ;
- la capacité des véhicules κ ;
- le prix moyen payé par chaque usager par voyage p .

À partir de ces données, on peut calculer la vitesse commerciale de la ligne au sein de chaque zone v_c^i et la vitesse commerciale globale v_c qui dépendent de la longueur des zones, des distances inter-station, du temps perdu à chaque arrêt et de la vitesse inter-station :

$$v_c^i = \frac{l_i}{\frac{l_i}{v^i} + \frac{l_i}{s^i} t_s} = \frac{1}{\frac{1}{v^i} + \frac{t_s}{s^i}}$$
$$\text{et donc } v_c = \frac{L}{\sum_i^n \frac{l_i}{v_c^i}} .$$

Le mode de transport n'intervient pas directement dans le modèle mais sera utilisé dans le

logiciel pour fixer les valeurs par défaut des coûts d'infrastructure, de maintenance et d'exploitation de la ligne.

3.1.2.2 Mode routier

Par soucis de simplicité, nous avons modélisé le mode routier sur le même modèle qu'une ligne de transport collectif en fixant certaines caractéristiques et en adaptant les autres :

- la distance inter-station par zone est fixée à 0 ce qui équivaut à une ligne avec un nombre d'arrêts infini et donc en particulier avec une station à l'origine et à la destination du trajet ;
- le temps perdu par le véhicule à chaque arrêt est nul ;
- le prix moyen par voyage est remplacé par un prix kilométrique p qui intègre celui du carburant, des éventuels péages et le coût d'entretien de la voiture personnelle ;
- la vitesse inter-station des véhicules par zone v^i est laissée libre et représente la vitesse moyenne de circulation sur l'axe routier ;
- la capacité des véhicules κ doit représenter le nombre moyen de voyageurs par voiture (généralement entre 1,1 et 1,5) ;
- la fréquence f doit être utilisée pour fixer la limite de capacité de l'axe routier (la valeur de 1800 véh./h/voie est souvent citée dans la littérature).

3.1.3 Application sur un exemple

Illustrons la modélisation du réseau et de la demande sur l'exemple du projet dit « A31 bis » dont les données sont accessibles dans le cadre du débat public organisé d'avril à juillet 2015, notamment dans le document (Ingérop, 2015). On considère le corridor situé entre les villes de Thionville et Luxembourg. D'une longueur d'environ 30 km, on peut l'approximer en le divisant en 3 zones : une zone urbaine à Thionville (3 km de long), une zone urbaine à Luxembourg-Ville (3 km de long) et une zone peu dense entre les deux de 24 km (voir Illustration 2).

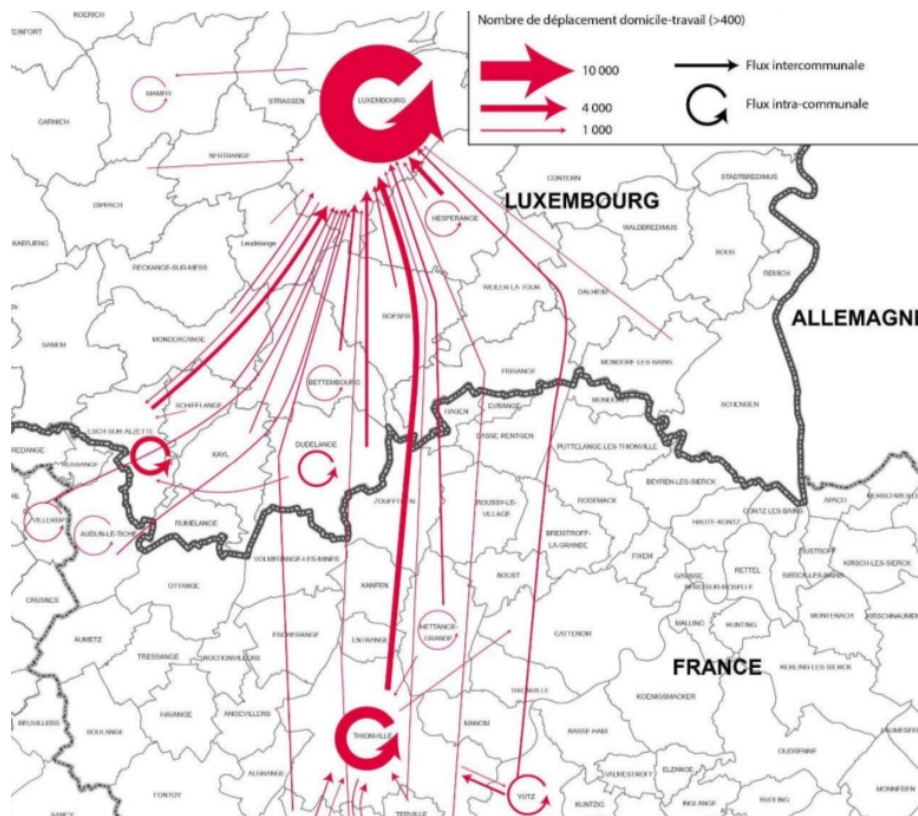


Illustration 2: Déplacements domicile - travail sur le corridor Thionville - Luxembourg (Ingérop, 2015)

Le corridor est traversé par l'autoroute A31 et une ligne ferroviaire. Sur l'autoroute, le temps de trajet à l'heure de pointe du matin entre les deux villes est de 44 min, soit une vitesse moyenne de 45 km/h. Il existe une ligne de bus, la ligne 300, qui relie ces villes en empruntant l'autoroute : elle marque quatre arrêts dans Thionville, dix dans Luxembourg et aucun dans la zone rurale. La ligne ferroviaire est emprunté par 4 trains/h à l'heure de pointe dont le temps de parcours est de 20 min sans gare intermédiaire soit une vitesse moyenne de 90 km/h. L'analyse détaillée de cette offre de transport nous conduit à l'utilisation des paramètres suivants pour modéliser le réseau :

	Ligne de bus 300	TER
Distance inter-station s^i (km)	(0.750, 24 , 0.300)	(3, 29 , 3)
Fréquence f (véh./h)	8	4
Vitesse inter-station v^i (km/h)	(30, 45, 30)	(90, 90, 90)
Temps perdu à chaque arrêt t_s (s)	34	60
Capacité κ (voy./véh.)	75	678
Prix moyen par voyage p (€)	1,50	1,80

L'autoroute est composée de deux voies standards dont la capacité estimée est de

1800 uvp/h¹. Une partie de cette capacité est utilisée par des poids lourds en transit et d'autres véhicules dont l'origine ou la destination ne se situe pas dans le corridor considéré et on estime alors que la capacité résiduelle est de 2600 uvp/h pour les deux voies. Le taux d'occupation moyen des véhicules est de 1,12 voy./véh. On modélise donc le mode routier de la façon suivante :

	Axe routier A31
Distance inter-station s^i (m)	(0, 0, 0)
Fréquence f (uvp/h)	2600
Vitesse inter-station v^i (km/h)	(30, 45, 30)
Temps perdu à chaque arrêt t_s (s)	0
Capacité κ (voy./véh.)	1,12
Prix kilométrique p (€/km)	0,34 ²

Pour la modélisation de la demande de transport, on s'appuie sur l'analyse par « macro-zones » de (Ingérop, 2015) pour déterminer la matrice origine – destination suivante à l'heure de pointe (les flux Nord – Sud sont négligés) :

	Thionville	Zone interurbaine	Luxembourg-Ville
Thionville	0	2000	9000
Zone interurbaine	0	1200	3700
Luxembourg-Ville	0	0	0

La modélisation du réseau et de la demande est donc relativement aisée alors même que les données récoltées n'étaient pas spécialement adaptées au modèle décrit ici.

3.2 Modèle de choix modal

Tous les individus mentionnés dans la matrice « origine – destination » réalisent leur trajet quelle que soit l'offre de transport et ne peuvent pas reporter ou annuler leur voyage. Chaque trajet est mono-mode et il n'est pas possible de réaliser des correspondances. Ainsi, chaque voyageur évalue toutes les lignes et choisit celle qui maximise son utilité. L'utilité est calculée à partir du temps de trajet perçu, du prix associée à la ligne et d'une constante spécifique à chaque mode qui permet de calibrer le modèle et d'exprimer les autres facteurs du choix non pris en compte.

1 uvp : unité véhicule particulier (un poids lourd vaut 2 uvp)

2 (ADETEC, 2012)

3.2.1 Temps de trajet

Considérons l'ensemble des voyageurs de l'OD (i, j) dont le trajet est réalisé en empruntant une ligne donnée. On décompose le temps de trajet total en plusieurs termes : le temps d'accès à la station, le temps d'attente à la station, le temps de trajet en véhicule et le temps d'arrivée à destination (entre la descente du véhicule et l'arrivée à destination).

On fait l'hypothèse que ces voyageurs empruntent la ligne à un arrêt situé dans la zone i et descendent dans la zone j même s'il n'y a pas de stations dans ces zones. C'est une hypothèse qui simplifie grandement les calculs et permet l'utilisation de valeurs moyennes pour le temps de trajet (les calculs ne sont pas détaillés ici mais ne présente pas de difficulté particulière en utilisant la fonction densité de demande définie précédemment).

Concernant le temps d'accès à la station, on a :

$$t_a^i = \frac{s^i}{2v_a} \text{ (hypothèse de densité de demande uniforme),}$$

avec v_a la vitesse d'accès à l'arrêt (généralement la vitesse de marche donc environ 5 km/h).

Le temps d'arrivée à destination se traite de la même manière : $t_e^j = \frac{s^j}{2v_e}$.

avec v_e la vitesse d'arrivée à destination que l'on prend généralement égale à la vitesse d'accès v_a .

Le temps d'attente à la station est $t_w = \frac{1}{2f}$ sous l'hypothèse d'une arrivée aléatoire des voyageurs à la station (souvent non valable quand la fréquence est faible).

Tout comme le temps d'accès, le temps de trajet en véhicule $t_t^{(i,j)}$ dépend des caractéristiques de la desserte et s'écrit alors :

- si $i=j$, $d_{ij} = \frac{l_i}{4}$ donc $t_t^{(i,j)} = \frac{l_i}{4v_c^i}$;
- si $i \neq j$, $t_t^{(i,j)}$ se décompose en 3 termes : le temps de traversée de la moitié de la zone origine, celui de la zone de destination et le temps de traversée complète des zones intermédiaires, donc $t_t^{(i,j)} = \frac{l_i}{2v_c^i} + \frac{l_j}{2v_c^j} + \sum_{k=\min(i,j)+1}^{\max(i,j)-1} \frac{l_k}{v_c^k}$.

Le temps de trajet total pour la ligne considérée est donc : $t_{tot}(i, j) = t_a^i + t_w + t_t^{(i,j)} + t_e^j$.

Pour obtenir le temps de trajet *perçu*, on pondère chaque composante du temps de trajet total selon son degré de perception par le voyageur : $t_p^{(i,j)} = w_a t_a^i + w_w t_w + w_t t_t^{(i,j)} + w_e t_e^j$. Dans le modèle présenté ici, on considérera que les paramètres de pondération sont les mêmes

pour tous les voyageurs mais on aurait pu tout aussi bien les considérer comme caractéristiques propres de chaque OD. Le temps de trajet total sera utilisé pour mesurer la performance des réseaux de manière objective tandis que le temps de trajet perçu intervient dans le choix de la ligne utilisée par le voyageur.

3.2.2 Coût généralisé du voyageur

On note c_{time} la valeur du temps des voyageurs (en €/h) et α_m (€) la valeur monétarisée de tous les autres paramètres qui entrent en jeu dans la perception du coût d'un trajet (confort, préférence d'un mode etc.). Cette constante spécifique à chaque mode peut être positive (c'est alors un « malus ») ou négative (« bonus ») et se définit toujours de manière relative par rapport à une référence.

Le coût généralisé unitaire moyen de l'OD (i, j) en empruntant une ligne z de mode m est donc : $CG_u^{(i,j)}(z) = c_{time} t_p^{(i,j)}(z) + \alpha_m + p(i, j, z)$ avec $p(i, j, z)$ le prix de la ligne z sur l'OD. On utilise bien ici le temps total *perçu*.

3.2.3 Parts modales

Pour calculer l'utilité totale des voyageurs sur le corridor, il faut expliciter le modèle de choix modal. Nous allons utiliser pour cela un modèle Multinomial Logit. On considère alors que l'utilité se décompose en une partie déterministe (le coût généralisé) et une partie aléatoire. Notons $P^{(i,j)}(z_0)$ la part modale de la ligne z_0 pour l'OD (i, j) , on a alors (Train, 2009) :

$$P^{(i,j)}(z_0) = \frac{\exp(-CG_u^{(i,j)}(z_0))}{\sum_z \exp(-CG_u^{(i,j)}(z))}.$$

Si z_0 est l'unique ligne du réseau, on a bien $P^{(i,j)}(z_0) = 1$.

Le coût généralisé total pour l'OD (i, j) sur l'intégralité du réseau est alors :

$$CG_{tot}^{(i,j)} = q_{ij} \log \left(\sum_z \exp(-CG_u^{(i,j)}(z)) \right),$$

Le coût généralisé total des voyageurs sur le corridor s'obtient alors en sommant sur toutes les OD :

$$CG_{tot} = \sum_{i,j} q_{ij} \log \left(\sum_z \exp(-CG_u^{(i,j)}(z)) \right).$$

On est donc capable, pour un réseau et une demande donnés, de calculer le coût généralisé total qui représente de manière monétaire le coût des voyages des usagers et reflète donc la pertinence de l'offre par rapport aux caractéristiques de la demande.

3.2.4 Élasticité de la demande

Jusqu'à présent nous avons considéré que le demande était constante et entièrement déterminée par la donnée des (q_{ij}) . Or, on a pu remarquer expérimentalement que

l'augmentation de l'offre de transport s'accompagne souvent d'une augmentation de la demande (Noland, 2002) et réciproquement pour une diminution de l'offre ou du niveau de service. Ce phénomène est lié à l'ajustement de l'offre et de la demande par les reports modaux. Il n'est pas à prendre en compte si on explicite au sein du modèle tous les modes de transports et itinéraires à disposition de la demande car les reports modaux sont traités dans le modèle de choix modal. En revanche, si par soucis de simplicité on n'a modélisé qu'une seule ligne de transport public mais pas par exemple les itinéraires routiers parallèles, il est intéressant de prendre en compte cet effet de « demande induite » en simulant des reports modaux exogènes. Pour cela, on doit partir d'une situation de référence pour l'offre et la demande : q_{ij}^0 est le nombre d'utilisateurs du réseau considéré et on note $CG_{tot}^{(i,j)}(Z_0)$ le coût généralisé total sur la même OD pour une offre initiale Z_0 . Pour une nouvelle offre Z , on aura alors :

$$q_{ij} = q_{ij}^0 \left(c + (1-c) \left[\frac{CG_{tot}^{(i,j)}(Z_0)}{CG_{tot}^{(i,j)}(Z)} \right]^\gamma \right),$$

avec γ l'élasticité de la demande par rapport au coût généralisé et c le taux de captif du réseau considéré (proportion de la demande utilise le réseau quelle que soit l'offre). On voit bien que si $CG_{tot}^{(i,j)}(Z) < CG_{tot}^{(i,j)}(Z_0)$, alors $q_{ij} > q_{ij}^0$.

3.3 Coûts économiques pour l'opérateur et la collectivité

Pour évaluer la pertinence d'un mode ou optimiser un réseau, il faut contre-balancer les gains potentiels perçus par le voyageur après une amélioration/détérioration de l'offre par le coût économique que représente cette évolution.

On distinguera dans le modèle les coûts d'infrastructure C_{inf} et les coûts d'exploitation C_{exp} . Les coûts d'infrastructure comprennent les investissements réalisés pour bâtir l'infrastructure mais également les coûts de maintenance. Les coûts d'exploitation comprennent les investissements réalisés pour l'achat du matériel roulant ainsi que les coûts de personnel (conducteur, agents, etc.) et le coût d'entretien du matériel.

Pour réaliser une offre à une fréquence f , l'opérateur à besoin de N véhicules par heure avec :

$$N = \frac{2fL}{v_c}.$$

Le nombre de véhicules nécessaire augmente donc avec la longueur du corridor, la fréquence de la ligne et la distance inter-station qui diminue la vitesse commerciale.

L'évaluation des coûts des services régionaux reste encore aujourd'hui un thème complexe pour lequel les éléments connus ne permettent pas d'évaluer l'ensemble des coûts (Cerema, 2014). De plus, il y a une confusion autour du terme de coût d'exploitation et des composantes qu'il intègre. À ces contraintes s'ajoute la difficulté d'obtenir à partir des

retours d'expérience les coûts pour chaque mode exprimés dans les mêmes unités et calculés avec les mêmes hypothèses. Pour réaliser le logiciel, nous avons donc choisi d'utiliser les coûts donnés dans (Van Nes, 2009) qui sont exprimés en €/h/véh. pour l'infrastructure comme l'exploitation et pour chaque mode. On a donc :

$$C_{inf} + C_{exp} = \sum_z N(z) (C_{inf}(z) + C_{exp}(z)) .$$

Le tableau suivant détaille les valeurs utilisées.

	Bus	BHNS	Tram	Métro	Train
C_{inf} (€/h/véh.)	0	32	100	989	646
C_{exp} (€/h/véh.)	78	95	122	446	499

L'opérateur et/ou la collectivité tire également des recettes de son réseau : le prix payé par les usagers pour leur voyage. On a donc au total :

$$C_{tot}^{op} = C_{inf} + C_{exp} - R = \sum_z \left(N(z) (C_{inf}(z) + C_{exp}(z)) - \sum_{i,j} q_{ij} P^{(i,j)}(z) p(z) \right) .$$

3.4 Fonctions objectifs pour l'optimisation du réseau

On dispose désormais des coûts pour les usagers et pour l'opérateur. On est donc en mesure de comparer les coûts pour la situation de notre choix et évaluer l'opportunité d'une évolution de l'offre particulière. Cependant on souhaite également que le modèle puisse proposer des solutions pour aider à la décision, on va donc optimiser sous contraintes les caractéristiques de l'offre (fréquence et inter-station pour chaque ligne) pour minimiser ou maximiser une fonction objectif.

Deux approches complémentaires peuvent être utilisées :

- minimiser le coût total à demande fixe (sinon solution triviale avec demande nulle) :

$$\min_Z \left[CG_{tot}(Z) + C_{tot}^{op}(Z) \right] ;$$
- maximiser le bien-être de la société (le surplus des voyageurs et des opérateurs) :

$$\max_Z \left[\frac{\sum_{i,j} q_{ij}}{2} \left(CG_{tot}(Z_0) - CG_{tot}(Z) \right) - C_{tot}^{op}(Z) \right] .$$

Minimiser les coûts à demande fixe permet d'avoir une vision à court terme des économies pouvant être réalisées sans trop perturber l'offre de transport. Ce modèle peut alors s'appliquer dans le cas où l'on n'a pas de situation de référence. La maximisation du surplus renvoie davantage à l'évolution d'une offre de transport existante sur un plus long terme. Ces deux approches sont sensiblement équivalente et leur différence réside davantage dans l'aptitude de l'une à traiter le cas d'une demande variable. On utilisera donc la maximisation du bien-être dans le cas où l'on souhaite prendre en compte l'évolution de la demande en fonction de celle de l'offre.

L'optimisation des deux fonctions objectifs se fait sous la contrainte de la capacité des réseaux, l'offre de transport doit être supérieure à la charge critique en passagers :

$$f_k \geq P(z) \max_x c^a(x) \text{ pour toute ligne } z \text{ avec } P(z) \text{ sa part modale.}$$

3.5 Conclusion sur le modèle

Le modèle développé est par construction assez simple dans la mesure où il traite des variables moyennées par zone. Son inconvénient majeur est donc le caractère approximatif des résultats mais on considère ici que la précision requise n'est pas le critère principal, l'objectif est la facilité d'utilisation et l'évaluation globale des avantages et inconvénients de chaque mode. Nous donnerons des exemples d'application du modèle et de l'optimisation du réseau dans la seconde partie en utilisant le logiciel développé.

4 Structure et fonctionnalités du logiciel développé

4.1 Généralités

Le logiciel a été développé en langage Python dans sa version 2.7 qui permet l'utilisation de la programmation orientée objet. La bibliothèque utilisée pour l'interface graphique est wxPython³ qui présente l'avantage d'être multi-plateformes (Windows, Mac, Linux), le logiciel est donc exécutable sur tout ordinateur. À l'heure actuelle, le code source représente 2600 lignes de code dont 1600 pour l'interface graphique.

Le logiciel permet de caractériser un corridor de référence (longueur, matrice OD et lignes de transport collectif) puis de le soumettre à différents scénarios :

- soit des scénarios « de simulation » où l'utilisateur peut modifier manuellement les caractéristiques de l'offre et de les évaluer au regard des coûts ;
- soit des scénarios « d'optimisation » où l'utilisateur choisit d'optimiser certaines caractéristiques de l'offre sous des contraintes qu'il définit.

Tous les scénarios peuvent être simulés à demande fixe ou variable.

Les paragraphes qui suivent décrivent précisément la structure et l'organisation du code source. Le lecteur peu familier avec la programmation pourra sauter les parties 4.2 et 4.4 sans perte d'informations essentielles. Pour les autres, le code source est entièrement commenté et on présentera uniquement la structure générale et certains points qui méritent une attention particulière.

4.2 Structure

Le logiciel a été développé de manière modulaire afin de permettre sa réutilisation et l'intégration de nouvelles fonctionnalités. En conséquence, on a structurellement séparé la partie « modèle » du code de celle de l'interface graphique en limitant les interactions.

4.2.1 Implémentation du modèle

Le modèle est placé au sein d'un package qui peut être utilisé indépendamment de l'interface graphique, il constitue donc une bibliothèque de fonction qu'un utilisateur « expert » peut utiliser dans d'autres programmes ou pour réaliser des tâches spécifiques qui ne sont pas permises par l'interface graphique pour le moment.

La classe **Model** est une classe d'encapsulation qui regroupe tous les objets et données nécessaires pour faire fonctionner le modèle, ses attributs sont donc :

- le corridor en situation dite « de référence » (instance de la classe **Corridor**) ;
- les paramètres du modèle (instance de la classe **Parameters**) ;
- les corridors à simuler et à optimiser (instances de la classe **Corridor**) ;

³ <http://www.wxpython.org/>

- le résultats des simulations et des optimisations (instances de la classe **Corridor**).

Elle contient également les fonctions nécessaires à la simulation et à l'optimisation des corridors : **Simulate()** simule les corridors contenus dans la liste **simulations** et enregistre les résultats dans la liste **simulations_results** tandis que **Optimize()** optimise les corridors de la liste **optimizations** et enregistre les résultats dans la liste **optimizations_results**. Les listes contenant les résultats sont des listes simples où chaque élément est une instance de classe **Corridor**. Les listes **simulations** et **optimizations** ont une forme plus complexe. Pour les simulations, chaque élément de la liste est une liste contenant en première position le corridor à simuler et en deuxième position un booléen indiquant si la demande sera élastique (variable) ou non. Pour les optimisations, chaque élément est une liste dont le premier élément est le corridor avec les lignes de transport qui ne seront pas optimisées, le deuxième élément est la liste des lignes à optimiser et le troisième élément est le booléen d'élasticité de la demande. Les informations concernant les variables à optimiser et les contraintes d'optimisation sont contenu dans les objets ligne (**Line**) eux-mêmes.

Dans les paramètres, on retrouve les valeurs par défaut des caractéristiques de chaque modes : coûts d'infrastructure, d'exploitation, constance spécifique pour le choix modal, capacité etc. On a également ce qui concerne la demande à savoir la pondération des différents termes du temps de trajet total qui permet d'obtenir le temps *perçu* ; mais également la valeur du temps, le taux de captifs et l'élasticité de la demande. La classe **Parameters** regroupe toutes ces constantes et permet de créer facilement une ligne dite « par défaut » pour chaque mode grâce à la méthode **DefaultLine(corridor, mode)**.

La classe **Corridor** contient tous les éléments permettant de définir un corridor :

- longueur ;
- typologie (nombre de zones, longueur de chaque zone, etc.) ;
- caractéristiques de la demande (liste d'objets de type **OD**) ;
- caractéristiques de l'offre (liste d'objets de type **Line**).

Elle contient également les méthodes permettant l'évaluation socio-économique, on peut citer les plus importantes :

- coût généralisé total (**GeneralizedCost(param)**) ;
- coût pour l'opérateur (**OperatorCost(param)**) ;
- temps de trajet moyen (**AvgTravelTime(param)**) ;
- surplus des voyageurs (**GetConsumerSurplus(param, corridor)**).

C'est la raison pour laquelle le résultat des simulations et optimisations est donné sous la forme d'un objet de classe **Corridor** : on peut accéder à toutes les informations pertinentes sur le corridor à partir de cette classe. Nous avons vu dans la première partie concernant la spécification du modèle que la plupart des coûts totaux ont la forme d'une double somme sur l'offre et la demande, comme par exemple le coût généralisé total :

$$CG_{tot} = \sum_{i,j} q_{ij} \log \left(\sum_z \exp(-CG_u^{(i,j)}(z)) \right).$$

En conséquence, on a créé les classes OD et Line qui contiennent toutes les caractéristiques de chaque OD (origine, destination, flux, distance du trajet etc.) et de chaque ligne (fréquence, distance inter-station, capacité des véhicules etc.) et réalisent les calculs intermédiaires.

La structure de la classe **Model** est synthétisée dans la figure suivante.

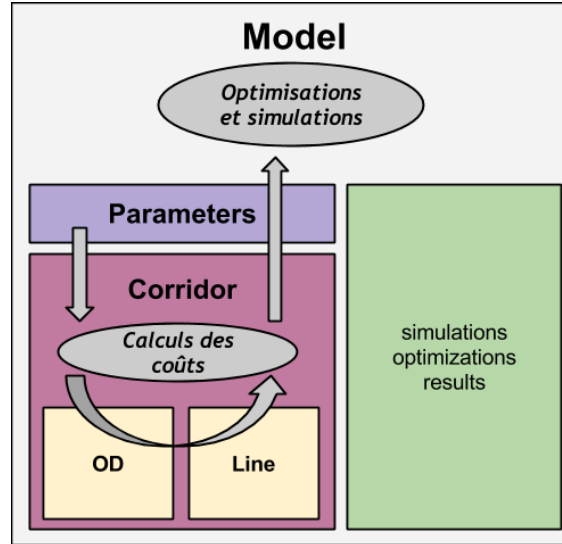


Illustration 3: Structure de l'implémentation du modèle

Le langage Python ne permet pas simplement la « protection » des données c'est-à-dire que les valeurs de tous les attributs de toutes les classes sont modifiables par simple affectation dans le code source. Or, certaines de ces variables sont interdépendantes : par exemple la longueur du corridor détermine la distance parcourue par chaque OD ; ou encore une modification du volume du flux par OD de la situation de référence doit se répercuter sur les corridors « scénarios ». En conséquence il faut faire attention lors du développement à ne pas perdre la cohérence entre les différentes variables.

4.2.2 Interface graphique

L'interface graphique vient se greffer à l'implémentation du modèle pour permettre de modifier les caractéristiques du corridor, de l'offre et de la demande ainsi que déclencher les calculs d'optimisation et de simulation avant d'afficher les résultats. Elle est composée de trois onglets :

- Corridor et demande : définition de la situation initiale (corridor, réseau de transport et matrice OD) ;
- Options de simulation : construction des scénarios de simulation et d'optimisation (choix des variables à optimiser, contraintes, nouvelles lignes etc.)
- Résultats : affichage des résultats.

Le code source de l'interface graphique est sans surprise, on se contente de modifier les attributs des instances de classes en fonction des actions de l'utilisateur et on lance les calculs en cliquant sur le bouton « Calculer » de l'onglet « Options de simulation ». Les résultats affichés sont ceux contenus dans les attributs `reference`, `simulations_results` et `optimizations_results` de la classe `Model`.

Attirons l'attention du développeur sur la boîte de dialogue de paramétrage du choix modal (classe `LogitDialog`) : elle permet de donner des valeurs aux constantes spécifiques à chaque mode α_m (0 par défaut) en affichant les parts modales issues du calcul avec ces constantes. Cette boîte de dialogue est utile quand on a une situation de concurrence intermodale et que l'utilisateur connaît la répartition modale en situation de référence.

La seule fonction de la classe `Model` qui interagit avec l'interface graphique est la fonction `Calculate()` qui, après avoir simulé et optimisé les corridors scénarios, appelle la fonction `InsertResults()` de la classe `MainWindow` pour confirmer la fin des calculs et déclencher l'affichage des résultats.

L'interface graphique développée jusqu'à présent ne permet pas de définir manuellement la typologie du corridor (nombre et longueur des différentes zones). Elle propose cependant 3 typologie pré-définie qui permettent de modéliser de nombreuses situations : une unique zone (corridor homogène), deux zones non symétriques (corridor de type radial) et trois zones symétriques avec une zone intermédiaire plus longue (corridor de type interurbain).

4.3 Utilisation via l'interface graphique

On présente dans cette partie l'utilisation du logiciel via l'interface graphique, c'est aussi l'occasion de montrer un cas d'application du modèle et ses résultats.

La première chose à faire est de définir une situation de référence dans l'onglet « Corridor et demande ». On doit d'abord choisir parmi trois typologie de corridor :

- corridor homogène (une unique zone au sein de laquelle se font les déplacements) ;
- corridor de type radial ou centre-banlieue (une zone dense et sa banlieue) ;
- corridor de type interurbain (deux zones denses séparées par une zone peu dense).

Pour l'exemple, nous définissons un corridor de type radial d'une longueur de 30 km. On doit ensuite renseigner la matrice origine – destination. En ligne nous avons les origines et en colonne les destinations de sorte que la case située à l'intersection de la première ligne et de la deuxième colonne désigne le flux de A vers B (voir Illustration 4). Dans notre exemple, nous allons nous intéresser uniquement au flux de A vers B qui représente un total de 3000 personnes à l'heure de pointe du matin par l'autoroute et la ligne de bus existante.

Corridor et demande
Options de simulation
Résultats

Caractéristiques et typologie

Typologie du corridor :

<

A

B

>

Longueur (km) :

30

Matrice origine - destination :

	A	B
A	0	3000
B	0	0

Demande totale : 3000

Lignes de transport collectif existantes

Voiture
Bus

Modifier
Supprimer

Ajouter une ligne

Illustration 4: Définition de la situation de référence

Nous renseignons ensuite les caractéristiques des lignes de transport existantes. Dans notre exemple, il y a une autoroute à deux voies de capacité résiduelle de 2600 uvp/h qui est très congestionnée dans la zone A (vitesse moyenne de 45 km/h). En ville (zone B), la vitesse moyenne est estimée à 25 km/h. La ligne de bus est en site propre sur l'autoroute (vitesse moyenne de 70 km/h) avec un arrêt tous les 1000 mètres environ et une fréquence d'un bus toutes les 10 min. En ville, il y a un arrêt tous les 300 mètres en moyenne et la vitesse est de 25 km/h comme pour le mode voiture. On définit donc deux lignes avec ces caractéristiques grâce au bouton « Ajouter une ligne » et à la boîte de dialogue qui apparaît (voir Illustration 5 et 6).

On doit ensuite paramétrer le modèle de choix modal. Pour cela, il faut cliquer sur « Calibrer le modèle de choix modal » dans le menu « Paramètres » (voir Illustration 7). Cette boîte de dialogue nous permet d'ajuster les constantes spécifiques à chaque mode pour faire correspondre les parts modales du modèle avec celles de la situation réelle. Ici par exemple, mettre un bonus de 0,50€ à la voiture (bonus car constante négative) nous permet d'avoir des parts modales réalistes et un taux de charge qui correspond bien à la réalité (autoroute saturée).

Nom de la ligne :

Mode

☒ Routier

☐ Bus

☐ BHNS

☐ Tramway

☐ Métro

☐ Train

Prix du ticket (€) :

Véhicules

Vitesse inter-station (km/h) zone A :

Vitesse inter-station (km/h) zone B :

Capacité (personnes) :

Niveau de service

Distance inter-station (km) zone A :

Distance inter-station (km) zone B :

Fréquence (véh./h) :

Illustration 5: Définition des caractéristiques du mode routier

Nom de la ligne :

Mode

☐ Routier

☒ Bus

☐ BHNS

☐ Tramway

☐ Métro

☐ Train

Prix du ticket (€) :

Véhicules

Vitesse inter-station (km/h) zone A :

Vitesse inter-station (km/h) zone B :

Capacité (personnes) :

Niveau de service

Distance inter-station (km) zone A :

Distance inter-station (km) zone B :

Fréquence (véh./h) :

Illustration 6: Définition des caractéristiques du mode bus

Paramètres du modèle de choix modal

Constante spécifique au mode Voiture (€) :

Constante spécifique au mode Bus (€) :

Constante spécifique au mode BHNS (€) :

Constante spécifique au mode Tramway (€) :

Constante spécifique au mode Métro (€) :

Constante spécifique au mode Train (€) :

Ligne	Demande	Part modale	Charge max.
Voiture	2603	87 %	100 %
Bus	397	13 %	95 %

Illustration 7: Calibration du modèle de choix modal

On peut alors passer à l'onglet « Options de simulation » pour définir nos scénarios. Nous allons définir un scénario de simulation où le prix du ticket de bus passe de 1,20€ à 2€ et un scénario d'optimisation où l'on cherche la desserte optimale du bus.

La définition d'un scénario de simulation est aisée et est en tout point identique à la définition de la situation initiale sauf que l'on ne peut que modifier les lignes de transport et que l'on peut cocher l'option « Élasticité de la demande » conformément à ce qu'on a défini lors de la construction du modèle.

Pour le scénario d'optimisation, on doit d'abord choisir les lignes que l'on va optimiser et cliquer sur « Optimiser ». On le fait pour le bus, la ligne de bus passe alors dans le cadre du bas (voir Illustration 8) puis on clique sur le bouton « Options » pour définir les contraintes d'optimisation.

Nom du scénario :

☐ Élasticité de la demande

Lignes de transport collectif existantes

Lignes de transport collectif à optimiser

Illustration 8: Définition d'un scénario d'optimisation

Il y a une case à cocher devant chaque variable que l'on peut optimiser. Il faut alors cocher celles que l'on veut optimiser et définir les contraintes (minimum et maximum pour chaque variable). Dans notre cas, on souhaite optimiser sur toutes les caractéristiques de la desserte mais compte tenu de la capacité de la voie réservée au bus, on ne peut pas dépasser la fréquence de 12 véh./h soit un bus toutes les 5 min (voir Illustration 9).

Nom de la ligne :

Mode

☐ Routier

☒ Bus

☐ BHNS

☐ Tramway

☐ Métro

☐ Train

Prix du ticket (€) :

Véhicules

Vitesse inter-station (km/h) en zone A :

Vitesse inter-station (km/h) en zone B :

Capacité (personnes) :

Niveau de service

	Valeur	Min.	Max.
<input checked="" type="checkbox"/> Distance inter-station (km) zone A :	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="20"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Distance inter-station (km) zone B :	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="20"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Fréquence (véh./h) :	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="12"/>

Illustration 9: Optimisation sous contraintes d'une ligne

On lance alors les calculs en cliquant sur le bouton « Calculer » de l'onglet « Options de simulation ». Une fois les calculs terminés, une boîte de dialogue permet de savoir si l'optimisation a réussi et dans le cas contraire affiche le message d'erreur renvoyé par la

fonction d'optimisation. La méthode utilisée pour l'optimisation est l'algorithme « L-BFGS-B » de la bibliothèque Scipy⁴.

Les résultats s'affichent ensuite directement dans l'onglet « Résultats ». Cet onglet est divisé en deux parties :

- dans le cadre du haut s'affiche la synthèse des résultats avec pour chaque scénario la demande totale (pas nécessairement identique à la situation de référence si l'on a coché l'option d'élasticité de la demande), le temps de trajet moyen sur le corridor, le coût généralisé moyen des usagers, les coûts totaux d'infrastructure et d'exploitation (sur toutes les lignes), le coût total associé au scénario (coût généralisé total et coûts pour l'opérateur) et le surplus du scénario ;
- dans le cadre du bas, on peut afficher le détail de l'offre de transport pour chaque scénario, c'est-à-dire la demande et les coûts associés à chaque ligne de transport. Afin de faciliter les comparaisons, on peut afficher en même temps les résultats détaillés pour deux scénarios.

L'Illustration 10 reporte les résultats détaillés de la situation de référence et du scénario de simulation où le prix de billet de bus passe à 2€. Si en situation de référence la part modale du bus était de 13 %, l'augmentation du prix du billet l'a fait chuter à 6 % (200 personnes de moins à l'heure de pointe). En plus de diminuer les recettes de l'opérateur, on voit que cette mesure est contre-productive car elle renforce la part modale du mode routier alors que l'autoroute était déjà saturée. En revanche le temps de trajet moyen sur le corridor diminue dans la mesure où le mode routier est plus rapide bien que plus cher.

Coûts par scénario

Scénario	Demande totale	Temps de trajet moyen	Coût généralisé moyen	Coûts d'infrastructure	Coût d'exploitation	Coût total	Surplus total
Référence	3000	27 min	9.26 €	0 €/h	1002 €/h	28299 €/h	-525 €/h
Prix 2€	2983	25 min	9.33 €	0 €/h	1002 €/h	28461 €/h	-732 €/h
Optimisation bus	3000	29 min	9.07 €	0 €/h	1671 €/h	27884 €/h	-388 €/h

Offre de transport par scénario

Référence

Ligne	Demande	Part modale	Charge max/Capacité	Fréquence	Vitesse commerciale	Interstation	Nombre véhicules	Coûts d'infra.	Coût d'exploitation	Coût opératé
Voiture	2603	87 %	100 %	2600.0 v...	38 km/h	A : 0 m B : 0 m	0	0 €/h	0 €/h	0 €/h
Bus	397	13 %	95 %	6.0 véh./h	28 km/h	A : 1000 m B : 300 m	13	0 €/h	1002 €/h	1002 €/h

Prix 2€

Ligne	Demande	Part modale	Charge max/Capacité	Fréquence	Vitesse commerciale	Interstation	Nombre véhicules	Coûts d'infra.	Coût d'exploitation	Coût opératé
Voiture	2792	94 %	107 %	2600.0 v...	38 km/h	A : 0 m B : 0 m	0	0 €/h	0 €/h	0 €/h
Bus	191	6 %	46 %	6.0 véh./h	28 km/h	A : 1000 m B : 300 m	13	0 €/h	1002 €/h	1002 €/h

Illustration 10: Résultats détaillés pour le scénario "Prix 2€"

⁴ <http://www.scipy.org/>

L'Illustration 11 montre les mêmes résultats pour le scénario d'optimisation des caractéristiques de la ligne de bus à prix constant et demande fixe. Le tableau suivant synthétise les différences d'offre entre la situation initiale et l'optimisation.

	Référence	Optimisation
Fréquence	6 véh./h	12 véh./h
Inter-station banlieue	1000 m	1105 m
Inter-station centre-ville	300 m	857 m
Vitesse commerciale	28 km/h	33 km/h
Part modale	13 %	28 %
Ratio charge maximale/capacité	95 %	83 %

On voit ainsi qu'augmenter la fréquence et la distance inter-station permet d'améliorer la vitesse commerciale et rendre le trajet en bus beaucoup plus attractif ce qui améliore sensiblement sa part modale (plus de 400 voyageurs supplémentaires à l'heure de pointe). De manière générale cette optimisation est profitable car le coût généralisé moyen diminue de 0,19€ et le coût total sur l'heure de pointe passe de 28299€ à 27884€ (les coûts d'exploitation supplémentaires sont donc compensés par les gains pour les usagers).

Coûts par scénario							
Scénario	Demande totale	Temps de trajet moyen	Coût généralisé moyen	Coûts d'infrastructure	Coût d'exploitation	Coût total	Surplus total
Référence	3000	27 min	9.26 €	0 €/h	1002 €/h	28299 €/h	-525 €/h
Prix 2€	2983	25 min	9.33 €	0 €/h	1002 €/h	28461 €/h	-732 €/h
Optimisation bus	3000	29 min	9.07 €	0 €/h	1671 €/h	27884 €/h	-388 €/h

Offre de transport par scénario										
Référence										
Ligne	Demande	Part modale	Charge max/Capacité	Fréquence	Vitesse commerciale	Interstation	Nombre véhicules	Coûts d'infra.	Coût d'exploitation	Coût opératé
Voiture 2603	87 %	100 %		2600.0 v...	38 km/h	A : 0 m B : 0 m	0	0 €/h	0 €/h	0 €/h
Bus 397	13 %	95 %		6.0 véh./h	28 km/h	A : 1000 m B : 300 m	13	0 €/h	1002 €/h	1002 €/h

Optimisation bus										
Ligne	Demande	Part modale	Charge max/Capacité	Fréquence	Vitesse commerciale	Interstation	Nombre véhicules	Coûts d'infra.	Coût d'exploitation	Coût opératé
Bus 838	28 %	100 %		11.9 véh./h	33 km/h	A : 1105 m B : 857 m	21	0 €/h	1671 €/h	1671 €/h
Voiture 2162	72 %	83 %		2600.0 v...	38 km/h	A : 0 m B : 0 m	0	0 €/h	0 €/h	0 €/h

Illustration 11: Résultats détaillés pour le scénario d'optimisation du bus

Cet exemple avait pour objectif de montrer les potentialités du modèle tout en décrivant l'utilisation de l'interface graphique. Cette interface a été développée en vue d'une utilisation par des individus non spécialistes de la modélisation en transport et qui veulent étudier une situation réelle. Elle présente néanmoins des limites dans les actions qu'elle permet et on montrera dans la partie suivante comment des utilisateurs avancés ayant des

notions de programmation peuvent se servir du code source du logiciel pour obtenir des résultats plus poussés, dans le cadre de la recherche scientifique par exemple.

4.4 Utilisation experte

L'interface graphique restreint les possibilités de modélisation et l'affichage des résultats alors même que le modèle est très souple et que son implémentation a conservé cette souplesse. On se propose dans cette partie de répondre à un problème spécifique en programmant dans le langage Python un script qui utilise l'implémentation du modèle mais pas l'interface graphique.

Ce projet a été motivé notamment par l'augmentation des compétences en transport des collectivités et autorités organisatrices. En particulier, la libéralisation du transport par autocar pourrait avoir un impact important sur les lignes ferroviaires peu fréquentées. À partir du modèle, nous allons analyser la pertinence de ces deux modes en fonction de deux paramètres : la longueur du corridor et la quantité de demande.

On se place dans un corridor de type « inter-urbain » de longueur 30 km et on étudie le flux de la ville A vers la ville B à l'heure de pointe du matin. Pour chaque volume de flux compris entre 0 et 5000 personnes, nous allons utiliser le modèle pour optimiser la fréquence et la distance inter-station d'une ligne d'autocar d'une part et d'une ligne ferroviaire de l'autre avant de comparer le coût total sur le corridor dans chaque cas. Pour la ligne de bus, on fixe une vitesse inter-station de 25 km/h en centre-ville et 70 km/h en zone peu dense tandis que le train roule à 90 km/h en moyenne sur toute la longueur du corridor.

Le script de base pour réaliser une telle analyse pourrait être le suivant :

```
import model as m

model = m.Model()

for i in range(100):
    length = 30
    demand = int(round((i+1.0)/100.0*5000))

    model.SetLength(length)
    model.SetTypology(2)
    model.SetOD(0, 2, demand)

    corridor = model.reference.Duplicate("")

    bus = m.Line(corridor, 1, 10, [0.3, length, 0.3], [25.0, 70.0, 25.0], 50, 34.0/3600, 0)
    bus.opt = [1, [1, 0, 1]]
    bus.cons = [(1, None), [(0.250, length), (0.250, length), (0.250, length)]]

    train = m.Line(corridor, 5, 10, [0.7, length, 0.7], [90.0, 90.0, 90.0], 700, 60.0/3600, 0)
    train.opt = [1, [1, 0, 1]]
    train.cons = [(1, None), [(0.6, length), (0.6, length), (0.6, length)]]

    model.optimizations.append([corridor, [bus], 0])
    model.optimizations.append([corridor, [train], 0])

model.Calculate()

results_bus = model.optimizations_results[0]
results_train = model.optimizations_results[1]
```

On voit dans ce script que l'on définit les caractéristiques de notre corridor avec les fonctions :

- `model.SetLength(30)` : fixe la longueur du corridor à 30 km ;
- `model.SetTypology(2)` : l'argument 2 désigne un corridor interurbain ;
- `model.SetOD(0, 2, demand)` : fixe un certain niveau de demande entre les zones 0 et 2 (A et B).

Ensuite, on définit les lignes de transport avec la fonction `Line(corridor, mode, fréquence, distance inter-station, vitesse inter-station, capacité, temps perdu à chaque arrêt, prix)`. Pour optimiser ces lignes, on modifie l'attribut `opt` dont la structure est `[frequence, [interstation0, interstation1, interstation2]]` avec un booléen qui vaut **VRAI** si cette variable sera optimisée. L'attribut `cons` représente sur le même modèle les contraintes pour ces mêmes variables. On ajoute ensuite les scénarios d'optimisation avant de lancer les calculs avec `model.Calculate()`. Reste alors à récupérer les informations que l'on juge pertinentes et les enregistrer dans un fichier (cette partie du code a été omise par soucis de lisibilité). Pour notre exemple, on souhaite avoir pour chaque cas le coût total, on utilise alors la fonction `results_bus.TotalCost(model.param)`.

Nous avons ensuite pu tracer le coût total du mode autocar et du mode train en fonction de la demande (voir Illustration 12).

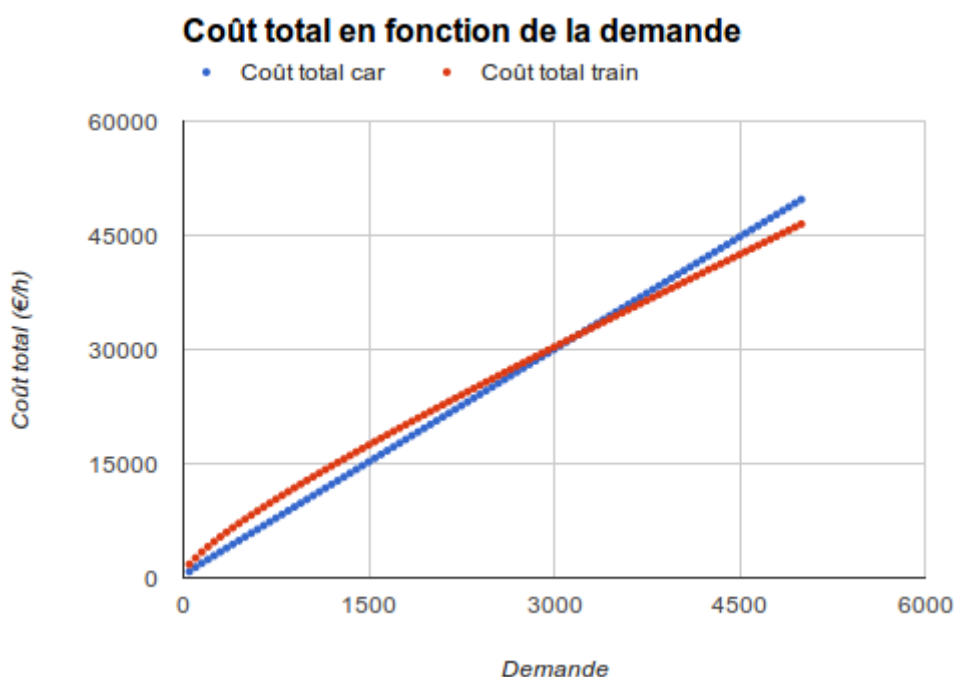


Illustration 12: Coût total des modes autocar et train en fonction de la quantité de demande

On voit que le train est pertinent à partir d'un niveau de demande de 3500 personnes par heure à l'heure de pointe. Ce volume de flux est déjà très élevé et l'autocar n'est en fait plus pertinent au-delà de 1000 personnes car la fréquence doit alors être supérieure à 20 véh./h (un car toutes les 3 min) ce qui est très difficile à exploiter sans une infrastructure

spécifique. La problématique des lignes ferroviaires peu utilisées relève davantage de flux inférieurs à 1000 personnes à l'heure de pointe. On voit dans ce cas ici que le train est toujours plus cher que le car. Ce constat change-t-il en fonction de la longueur du corridor ? Nous avons appliqué le même procédé que précédemment en faisant cette fois varier la longueur du corridor entre 1 et 80 km pour une demande fixée à 500 personnes à l'heure de pointe du matin. Les résultats sont reportés en Illustration 13.

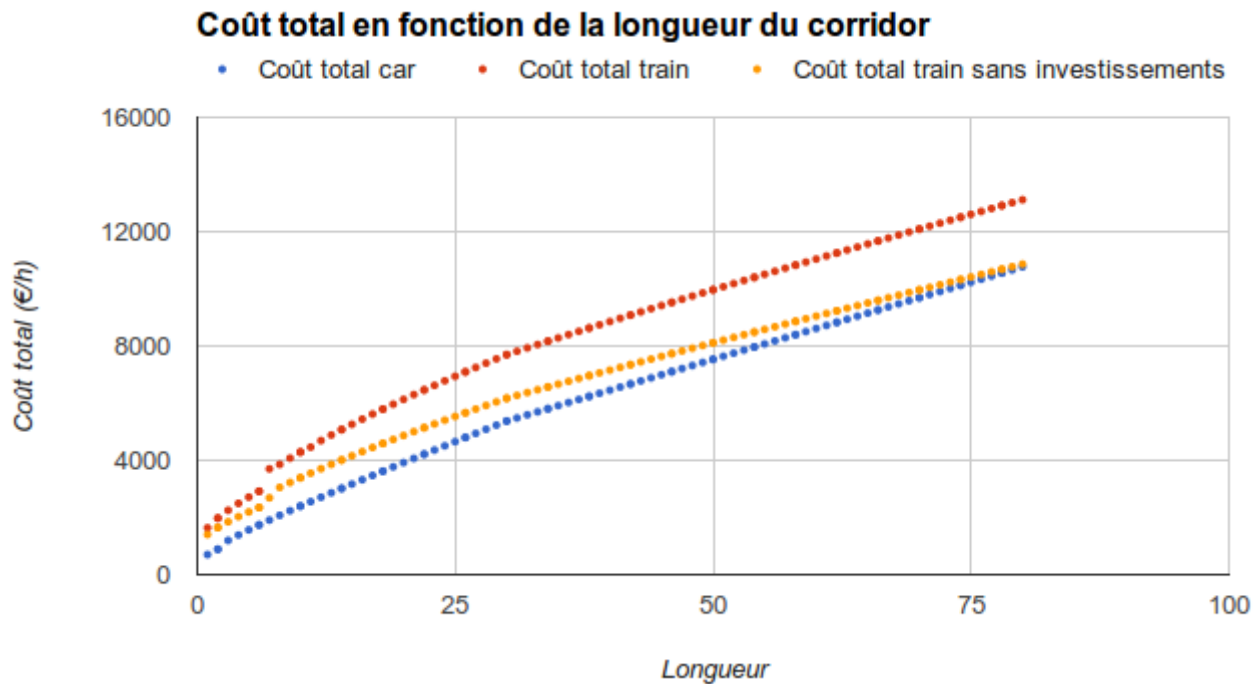


Illustration 13: Coût total des modes autocar et train en fonction de la longueur du corridor

Le constat reste inchangé : l'autocar est plus pertinent que le train quelque soit la longueur du corridor quand la demande n'est que de 500 personnes. Nous avons également lancé les optimisations en modifiant le coût du train pour ne pas inclure les coûts d'investissements en infrastructure (~80 % du coût d'infrastructure (Van Nes, 2009)) et en matériel roulant (~15 % du coût d'exploitation (Cerema, 2014)). On voit que la pertinence du mode train augmente beaucoup plus vite avec la distance. En fait, cela montre la grande dépendance des résultats aux valeurs attribuées pour les différents coûts. Quels coûts inclure ? Doit-on prendre en compte des coûts d'investissements alors que l'infrastructure existe ? Quelles contraintes attribuer aux différentes variables d'optimisation ? La simplicité du modèle ne doit pas faire oublier que la modélisation et les calculs socio-économiques reposent sur de nombreuses hypothèses qu'il faut questionner pour mener un raisonnement valide.

On espère avoir montré ici la puissance qui réside dans l'implémentation du modèle indépendamment de l'interface graphique, d'autant plus que l'optimisation des 200 lignes nécessaire au tracé des courbes précédentes prend moins d'une minute.

4.5 Limites et perspectives de développement

Le logiciel et le modèle présentés sont encore au stade du développement et de nombreuses corrections ou nouvelles fonctionnalités pourraient y être ajoutées.

Concernant le modèle en lui-même, le mode routier est encore assez mal géré et se révèle être très souvent la solution optimale pour les usagers. En conséquence, l'optimisation du coût total est parfois biaisée et conduit à la « fermeture » des lignes de transport collectifs. Une solution envisageable pour ce problème serait d'introduire les coûts environnementaux liés à l'usage de la voiture. Cette partie n'a pas du tout été traitée alors qu'elle constitue bien souvent une part non négligeable de l'évaluation socio-économique. De manière générale, l'attribution de valeurs chiffrées aux différents coûts s'est révélée problématique alors même que les résultats en sont fortement dépendants. Il faudrait que le modèle et le logiciel permettent à l'utilisateur de détailler davantage les coûts et de pouvoir choisir ceux qu'il désire prendre en compte.

Le modèle gère également assez mal la concurrence entre deux modes dans le cas d'une optimisation du réseau. En effet, la minimisation des coûts totaux conduit à une massification des flux sur une unique ligne de transport et ne permet pas de modéliser la complémentarité de différents modes. Cette question est liée à la manière dont le modèle prend en compte la « non desserte » de certaines zones. En effet, on calcule le temps d'accès et le temps de trajet de manière indépendante ce qui pose problème lorsqu'il n'y a pas d'arrêt situé dans la zone origine. Cela conduit à de trop grandes imprécisions permettant la massification des flux exposée précédemment. De plus, le modèle ne gère pas pour le moment l'intermodalité ce qui est très restrictif, notamment lorsqu'on souhaite étudier la complémentarité entre les modes. Le dernier point concernant le modèle est celui de la gestion de la capacité du réseau. En effet, celle-ci n'est traitée que comme une contrainte sur l'offre de transport et n'est pas intégrée dans le choix modal alors que le confort est une caractéristique importante. Son intégration pose néanmoins de gros problème et conduit inévitablement à développer un modèle avec plusieurs itérations pour atteindre une situation d'équilibre. Si l'on a écarté cela par soucis de simplicité, les résultats de l'optimisation de certaines situations se révèlent complètement faussés par la mauvaise prise en compte de la capacité des lignes.

Enfin, concernant l'interface graphique, celle-ci est pour l'instant trop limitée. On a montré dans la partie 4.4 que l'implémentation du modèle en lui-même permettait de réaliser des visualisations et des calculs plus poussés. On pourrait s'en inspirer pour améliorer l'interface graphique et notamment rendre les résultats plus concrets. De plus, il manque de nombreuses fonctions annexes comme l'enregistrement d'une configuration pour un usage ultérieur ou encore l'export des résultats vers un fichier qu'un tableur pourrait exploiter. Enfin, on pourrait imaginer un module de l'interface permettant une configuration manuelle de la typologie du corridor (nombre de zone, longueurs des zones etc.) car les typologies pré-définies ne couvrent pas toutes les situations possibles, notamment concernant la longueur de chaque zone.

5 Conclusion

Le projet a conduit au développement d'un modèle d'évaluation socio-économique d'une offre de transport et de son implémentation dans un logiciel. Nous pensons avoir réussi à réaliser un prototype d'outil d'aide à la décision clair, pédagogique et facile à utiliser à destination principalement des collectivités souhaitant engager une première réflexion sur un projet ou analyser les grands traits d'une offre existante.

Il reste cependant de nombreux points à travailler, notamment les sorties du logiciel et les indicateurs socio-économiques utilisés. Si la modélisation de la concurrence entre différents modes de transport a été intégrée au modèle, celle-ci reste encore à un stade assez expérimental. Néanmoins, la structure du modèle et du logiciel est très souple et permet l'introduction de nouvelles fonctionnalités dans l'optique de la poursuite ultérieure de ce travail.

6 Bibliographie

- (1) ADETEC, (2012). Le coût réel de la voiture. Article publié en ligne : http://www.adetec-deplacements.com/cout_utilisation_voiture_8p.pdf (vérifié le 12 juin 2015)
- (2) Boillat, P. (2007). « De la mobilité à la mobilité durable : politiques de transport en milieu urbain » In Forum Enviro 07 (Wald, 16 novembre 2007).
- (3) Cerema, (2014). Transport régional : premiers éléments de réflexion sur la pertinence des modes fer et route pour des dessertes régionales. Octobre 2014.
- (4) de Dios Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling transport. John Wiley & Sons.
- (5) Faivre d'Arcier, B. (2012). Mesure de la performance des lignes de transport public urbain. Rapport du projet APEROL : Amélioration de la Performance Économique des Réseaux par Optimisation des Lignes.
- (6) Ingérop, (2015). A31-A3 Thionville – Luxembourg : Étude de l'opportunité d'un aménagement multimodal. Rapport de phase 1+2. Volume 1 : diagnostic et enjeux. http://a31bis.debatpublic.fr/sites/debat.a31bis/files/a31bis_opportunite_dune_exploitation_multimodale_a31-a3_diagnostic_et_enjeux.pdf (vérifié le 10 juin 2015).
- (7) Quinet, E. (2013). L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, France.
- (8) McNally, M. G. (2000). The Four Step Model. In: Handbook of Transport Modelling, ed. David A. Hensher and Kenneth J. Button, 35-52
- (9) Noland, R. B., & Lem, L. L. (2002). A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 7(1), 1-26.
- (10) Train, K. E. (2009). Discrete choice methods with simulation. Cambridge university press.
- (11) Van Nes, R. (1999), Design of multimodal transport systems, Setting the scene: Review of literature and basic concepts, TRAIL Studies in Transportation Science Series, No. S99/3, Delft University Press, Delft
- (12) Van Nes, R. (2002). Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach. TU Delft, Delft University of Technology.