

Louvain School of Management

Les différents modèles d'affectation dans le transport de marchandises

Mémoire de fin d'études

Auteur : Moreschi Romain
Master 120 en ingénieur de gestion avec spécialisation en Supply
Chain & Transportation Management
Promoteur : Bart Jourquin
Année académique 2019-2020

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique | www.uclouvain.be/lsm

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite remercier mon promoteur, le professeur Bart Jourquin, pour tous ses retours rapides et ses conseils constructifs qui m'ont permis d'accomplir mon objectif.

Je remercie également ma famille et mes amis pour m'avoir supporté durant cette période mais surtout, pour m'avoir aidé dans la relecture de mon travail.

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Cadre théorique.....	8
2.1. Le transport de marchandises	8
2.2. Le modèle à 4 étages.....	10
2.3. Les méthodes d'affectation	12
2.4. Les limites du modèle à 4 étages pour le transport de marchandises.....	19
2.5. Les modèles « Activity-based »	20
3. Les modèles statiques.....	25
3.1. STAN.....	25
3.1.1. Origine du modèle STAN	25
3.1.2. Application du modèle.....	28
3.2. TRANS-TOOLS 3.....	29
3.2.1. Le calcul du niveau de service	30
3.2.2. Réponse à la demande.....	32
3.2.3. Choix de la route et chargement du réseau.....	32
3.3. NODUS.....	34
3.3.1. Fonctionnement.....	34
3.3.2. Calcul de la fonction de coût.....	35
3.3.3. 1 ^{er} étude de cas : impact du changement de climat sur la navigation sur le Rhin & le Danube	37
3.3.4. 2 ^{ème} étude de cas : Recherche d'un emplacement optimal & impact sur l'affectation.....	38
3.4. Forces et faiblesses de chaque modèle.....	41
4. Les modèles dynamiques	44
4.1. MATSim	44
4.1.1. Description du modèle.....	44
4.1.2. Étude de cas dans la réalité	49
5. Les modèles LUTI	54
5.1. ILUTE	54
5.1.1. Les différents acteurs.....	54
5.1.2. Formation des différents contrats	55
5.1.3. L'affectation	57
5.1.4. Conclusion de ce modèle	58
5.2. FREMIS	59
5.2.1. Introduction	59
5.2.2. Description du modèle & conclusion	60
6. Comparaison des modèles de réseaux & méthode semi-dynamique.....	62
7. Conclusion	65
Sources :.....	68

Liste des figures & tables

<i>Figure 1 : représentation de l'arbre de Dijkstra</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2 : arbre de Dijkstra.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 3 : arbre de Dijkstra avec augmentation du coût.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 4 : modélisation du problème</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5 : schéma de la situation</i>	<i>16</i>
<i>Figure 6 : réseau virtuel</i>	<i>22</i>
<i>Figure 7 : Zoom sur un nœud</i>	<i>23</i>
<i>Figure 8 : niveau de service.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 9 : exemple d'un réseau virtuel par voie d'eau</i>	<i>34</i>
<i>Figure 10 : réseau virtuel détaillé.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 11 : étapes de MATSim</i>	<i>45</i>
<i>Figure 12 : schéma de MATsim en comparaison avec l'algorithme co-évolutionnaire.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 13 : schéma du scénario.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 14 : modèle d'affectation d'ILUTE.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 15 : schématisation de FREMIS.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 16: exemple d'évolution du positionnement des véhicules.....</i>	<i>64</i>
<i>Table 1 : ensemble des facteurs influençant le transport de marchandises</i>	<i>9</i>
<i>Table 2 : schéma de classification pour l'attribution du trafic.....</i>	<i>12</i>
<i>Table 3 : présentation des résultats pour la localisation optimale</i>	<i>39</i>
<i>Table 4 : tableau des différents coûts</i>	<i>51</i>
<i>Table 5 : analyse des résultats (en km) par cas et par transporteur.....</i>	<i>52</i>

1. Introduction

A l'heure actuelle, l'étude des modèles de transport de marchandises est une tendance qui s'avère importante et qui a sa place dans des études de gestion. En effet, ils représentent une aide pour les entités politiques, à savoir des administrations ou des gouvernements, qui les utilisent dans le but de prendre des décisions selon des critères durables à savoir écologiques, économiques ou sociaux. Ce sont donc des outils d'aide à la décision pour prendre de bonnes décisions sur base de bonnes prévisions, la qualité de ces dernières étant primordiales. La spécificité dans ce mémoire est que nous nous concentrerons sur l'étude des modèles d'affectation dans le transport, c'est-à-dire les outils d'aide à la décision quant à l'allocation des flux sur les routes, qui vont dépendre de différents paramètres choisis par l'utilisateur (Willumsen, 2014).

Au vu des investissements que cela peut représenter, qu'ils soient monétaires ou temporels, l'erreur est peu tolérée. On ne fait pas référence à l'investissement lié à l'achat ou au droit d'utiliser le logiciel, mais bien au temps investi pour prendre les décisions ou aux investissements liés à ces nouvelles décisions (avoir recours à un prestataire de services de transport externe, utiliser un mode de transport plutôt qu'un autre). De plus, certains paramètres sont compliqués à estimer, surtout lorsque l'on se penche sur des scénarios à long terme. Par exemple, il est difficile d'estimer quelles seront les émissions de CO₂ d'un tel véhicule dans 20 ans. Pour ce faire, il est important que, lorsque l'on élabore un modèle, l'on intègre des analyses de sensibilité afin de tester différents scénarios.

La mise en place de ceux-ci va permettre d'analyser les variations de coûts qui seront présentes si l'on se trouve dans un « bon » ou un « mauvais » scénario. Ces deux notions, comme nous le verrons tout au long de ce mémoire, sont subjectives et propres à chaque individu. Cela va donc permettre aux parties prenantes de calculer le coût en cas d'erreur, plus communément appelé « the cost of getting wrong ». Comme le mentionnent certains auteurs dans la littérature, le coût d'une erreur peut, dans certains cas, coûter plus cher qu'une expertise qui aurait pu empêcher celle-ci (Willumsen, 2014).

Afin d'éviter des erreurs lors des analyses coût-bénéfice, il est important que toutes les parties prenantes du modèle connaissent les capacités de celui-ci en ayant une vision globale mais précise de ce qu'un modèle peut faire et ne pas faire. Par exemple, lorsque l'on se penche sur une étude d'affectation locale sur un plus petit périmètre, on aura plus tendance à utiliser des modèles de type micro ou méso, et non des macros (cf. Annexe 1).

Pour diverses raisons, essentiellement logistiques, le transport routier a toujours été celui qui prédominait. Selon une étude, en 2014, la part modale du transport routier de marchandises à

travers les 28 pays de l'Union européenne était estimée à 75% (Eurostat, 2018). En effet, malgré son coût plus élevé en comparaison avec les autres modes de transport, celui-ci laisse place à une flexibilité par rapport à ses concurrents. Il est toujours plus aisé d'organiser un transport par camion qu'un transport par bateau et de s'adapter en cas de contretemps. La conséquence liée à cette tendance est la croissance des parcs de véhicules légers depuis les 20 dernières années (État de l'environnement wallon, 2018). Les différents modèles dont nous parlerons vont également permettre de combiner différents modes de transport, c'est-à-dire avoir recours à l'intermodalité. En effet, les avantages logistiques du transport routier doivent, par exemple, être contrebalancés avec ses désavantages, notamment d'un point de vue écologique. La surutilisation du transport routier, ayant des impacts négatifs sur la congestion et l'écologie, a obligé les parties prenantes à changer leurs habitudes. On notera donc qu'entre 1990 & 2016, le transport routier de marchandises a diminué son empreinte carbone de 66%, notamment grâce aux réglementations imposées par l'Union européenne (la mobilité est en nous, 2019).

Dans un premier temps, nous allons développer un cadre théorique qui va permettre de mettre en lumière certains concepts et données importantes afin de comprendre au mieux la suite de ce mémoire. Nous commencerons par évoquer les différents facteurs qui composent le transport de marchandises.

Ensuite, nous introduirons le modèle à 4 étages qui est souvent utilisé dans le transport de passagers et qui est une base pour introduire le transport de marchandises. Nous décrirons brièvement les 3 premières étapes qui sont la génération, la distribution & le choix modal. La quatrième étape, l'affectation, représente le cœur de notre mémoire et sera détaillée dans la section qui suit. Cependant, ce modèle présente certaines limites pour le transport de marchandises, qui seront exposées et discutées.

Par après, nous nous attarderons sur la notion « d'activity-based model » qui est un modèle qui, contrairement à celui à 4 étages, permet de lier les différentes opérations, relatives au transport, entre elles. Cette notion va nous permettre de développer les modèles de la vie réelle, que nous classerons en 3 catégories :

- ⇒ La première est la catégorie des modèles statiques, qui sont des modèles considérant le trafic sur une longue période, sans y inclure son évolution. Par exemple, ces modèles considéreront un temps de trajet égal pour un départ à 11h ou à 16h, alors que la réalité nous montre que les routes sont plus congestionnées aux heures de pointe. Dans cette catégorie, nous parlerons des modèles STAN, TRANSTOOLS 3 & NODUS. Cependant, en toute fin de mémoire, nous verrons que NODUS présente une méthode alternative qui permet de prendre en compte l'évolution du trafic, même si celui-ci est considéré comme un modèle statique.

- ⇒ La deuxième est la catégorie des modèles dynamiques qui, au contraire de la première, va prendre en compte l'évolution du trafic. Le modèle MATSim sera développé dans celle-ci.
- ⇒ La troisième catégorie est celle des modèles LUTI qui permettent de prendre en compte différentes considérations liées à l'aménagement du territoire. Dans celle-ci, nous discuterons des modèles ILUTE & FRÉMIS.

L'objectif de ce mémoire sera donc d'analyser et de comprendre les différents modèles d'affectation qui ont émergé ces dernières années, tout en analysant les points forts & points faibles de chacun. Plutôt que de présenter un résumé de tout ce qui a été évoqué dans les sections précédentes, l'avant-dernière partie de ce mémoire sera consacrée à une méthode permettant de fusionner certaines considérations des modèles statiques & dynamiques, appelée méthode d'affectation semi-dynamique/temporelle. Finalement, la conclusion présentera un résumé des différents points importants de ce mémoire tout en y intégrant les différents enjeux à prendre en compte pour le futur.

2. Cadre théorique

2.1. Le transport de marchandises

Dans un premier temps, nous commencerons par déterminer les différentes décisions qui régissent le transport de marchandises. En effet, certaines peuvent constituer des décisions quotidiennes alors que d'autres peuvent s'étendre sur le long terme. Par après, nous évoquerons les différents facteurs qui influencent le transport de marchandises.

- Les décisions stratégiques, qui sont prises sur le long terme, nécessitent des investissements importants dans certains actifs telles que les usines de production. Par exemple, ce sont des décisions qui peuvent être prises en signant un contrat entre les différentes parties ;
- Les décisions tactiques sont revues et améliorées plus souvent car elles requièrent des investissements moins conséquents. Cependant, ces décisions nécessiteront un temps d'attente car elles doivent être en accord avec des parties externes ;
- Les décisions opérationnelles, quant à elle, peuvent être prises seules par le producteur ou le fournisseur de services. Ces décisions constituent une routine et sont donc, très souvent, journalières (De Jong & al., 2013, p5).

Ces différentes décisions vont se faire sur base de différents facteurs principaux du transport de marchandises. Dans la littérature, ceux-ci sont classés dans 3 catégories différentes (De Jong & al, 2013) (cf. table 1) :

1. *Les biens : production, consommation et commerce*

La personne qui reçoit le bien, que ce soit la matière première ou le produit fini, est le consommateur alors que celui qui l'envoie est le producteur. Les décisions sont prises par des personnes spécifiques dans la firme telles que le responsable R&D ou de production (De Jong & al., 2013, p6).

2. *Les réseaux d'inventaires :*

De temps à autre, les inventaires se trouvant dans des dépôts intermédiaires, situés entre le producteur et le consommateur, sont utilisés. Ceux-ci modifient donc les accords commerciaux ainsi que la route origine-destination. Le terme le plus utilisé dans la littérature est « consolidation », qui traduit une action qui a pour but de rassembler différentes livraisons dans un même mode de transport afin de maximiser le taux de remplissage de celui-ci et donc, de minimiser les coûts de transport (De Jong & al., 2013, p6).

Il se peut également que certaines grosses firmes aient recours à des prestataires de services de transport externe, comme nous le verrons plus tard dans ce mémoire.

3. L'organisation du transport :

Pour l'organisation du transport, de nombreuses discussions doivent être effectuées car différents acteurs sont impliqués dans celle-ci et chaque mode de transport a ses avantages et ses inconvénients. Pour ne citer que lui, le bateau offre la possibilité d'effectuer des économies considérables sur les coûts de transport mais la marchandise prendra plus de temps pour arriver à sa destination. Les décisionnaires sont, dans ce cas-ci, les mêmes que pour les réseaux d'inventaires (De Jong & al., 2013, p6).

Les notions de modes et moyens de transport sont également à prendre en compte dans ce tableau : un mode de transport décrit une forme particulière de transport alors que le moyen de transport définit le véhicule en lui-même. Ainsi, on peut dire que le transport routier est un «mode de transport» alors que le moyen de transport, quant à lui, peut s'associer à une voiture, une camionnette ou encore un camion poids lourd.

<u>Marché</u>	<u>Décisions</u>	<u>Décisionnaires</u>	<u>Période de temps</u>
Bien : production, consommation, commerce.	Emplacement de l'usine ; Système de production ; Facteurs de production ; Produits ; Fournisseurs ; Taille des envois aux clients.	Producteur : CEO ou manager de production ; Producteur ; Consommateur.	Long-terme.
Réseaux d'inventaires	Emplacement du centre de distribution ; Volumes d'inventaire ; Affectation des expéditeurs & receveurs au centre de distribution ; Taille des envois intermédiaires.	Manager marketing ; Manager logistique ; Fournisseur de service logistique externe (si externalisation).	Moyen-terme.
L'organisation du transport	Modes de transport ; Moyen de transport ; Taille des envois intermédiaires ; Horaire ; Choix de la route.	Manager logistique ; Manager de transport ; Fournisseur de service logistique externe (si externalisation).	Court-terme.

Table 1 : ensemble des facteurs influençant le transport de marchandises
(De Jong & al., 2013, p6)

2.2. Le modèle à 4 étages

Avant de discuter de l'étape d'affectation pour le transport de marchandises, il est important de connaître les étapes qui précèdent celle-ci. Ainsi, l'affectation en elle-même constitue la dernière étape du modèle à 4 étages. Ce type de modélisation est souvent utilisée pour le transport de passagers mais représente également une source d'inspiration pour les différents modèles de fret, ou transport de marchandises. Ce modèle s'agence de la manière suivante :

1. Génération :

Cette première étape aura pour objectif d'indiquer le total de trajets qui sera généré à partir de chaque origine vers chaque destination (Ortúzar & Willumsen, 2011, p. 139).

En pratique, les modèles utilisés pour définir cette demande sont des modèles de tendance qui extrapolent les résultats du passé pour les utiliser dans une estimation de la demande dans le futur.

2. Distribution :

Cette étape a pour but de créer une matrice origine-destination qui permettra de voir le point de départ et d'arrivée de chaque marchandise ou personne. Des matrices origine-destination temporelles seront aussi utilisées, celles-ci diffèrent par le fait qu'elles prennent en compte l'évolution du trajet de chaque personne, et sont donc modifiées à chaque période.

Beaucoup d'études portant sur le transport interurbain de marchandises utilisent des modèles synthétiques agrégés afin de prédire la matrice de mouvements des biens, qui sont : « le modèle gravitationnel » et « l'approche de programmation linéaire » (Ortúzar & Willumsen, 2011, p. 467).

3. Choix modal :

Cette section aura pour objectif de définir le mode de transport choisi. Pour le transport de passagers, le choix se résumera à déterminer si l'on prend son véhicule ou si l'on utilise les transports en commun. Dans le cas du transport de marchandises, les choix seront plus variés et pourraient concerner le transport par voie aérienne, d'eau, terrestre ou ferroviaire. Afin de définir ceux-ci, différentes considérations sont à mettre en avant : il faut connaître les caractéristiques de chaque mode de transport afin de voir ses avantages et inconvénients mais il est également important de savoir si certains modes de transport sont disponibles pour les chemins choisis par l'utilisateur (Ortúzar & Willumsen, 2011, p.207).

Il est bon de savoir que certains logiciels tels que NODUS, dont nous parlerons plus loin, combine cette troisième étape avec l'étape d'affectation en une seule car les choix sont dépendants les uns des autres.

4. Affectation :

Cette étape constitue le cœur de ce mémoire et sera détaillée entièrement dans la section 2.3.

L'affectation est donc le moment où on assigne les flux sur chaque route à partir la matrice créée dans l'étape de la distribution tout en injectant des caractéristiques typiques telles que les courbes de flux de coût et de vitesse. L'affectation est donc un mix entre un modèle de choix de route et le chargement de la matrice de voyage sur ces dites-routes.

La première étape dans une méthode d'affectation est le choix d'un itinéraire qui constitue la première décision d'un navetteur classique voulant se déplacer à un coût individuel minimum. Cette route dépendra de plusieurs facteurs tels que le temps du trajet, le coût monétaire de l'essence, la congestion, le type de route sur lequel il se trouve, les habitudes de conduite ou encore la signalisation.

La deuxième étape dans une méthode d'affectation est la création d'un arbre. Il est exécuté de nombreuses fois dans la plupart des algorithmes, dont au moins une fois par itération. Il existe différents algorithmes pour trouver le plus court chemin sur un réseau de routes : celui de Moore (1957), celui de Dijkstra (1959) ou encore A* (1967).

Dijkstra, l'algorithme le plus connu, a pour principe de calculer tous les chemins possibles et de les classer par ordre croissant. Comme nous le montre la figure 1, le chemin le plus court pour aller de l'origine A à la destination F est représenté en orange et aura un coût de 20.

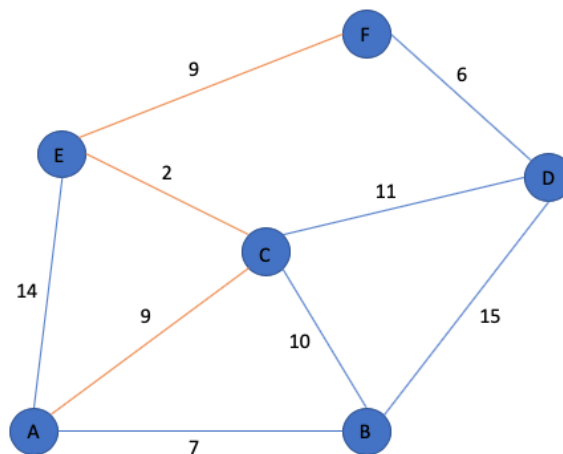


Figure 1 : représentation de l'arbre de Dijkstra

Il est souvent utilisé quand il s'agit de calculer un grand nombre de chemins car celui-ci les compile en une fois. Cependant, lorsque l'on doit calculer un chemin entre une origine et une destination, une alternative à cet algorithme existe, on la nomme algorithme « point par point » ou l'algorithme de A*(Hart & al 1968), souvent utilisé dans les GPS. Il est plus performant, plus précis et permet de prendre chaque chemin séparément mais, le revers de la médaille est

que celui-ci prend beaucoup plus de temps à tout calculer, surtout lorsque l'on est dans un cas où de nombreux chemins sont pris en compte. D'un point de vue plus pratique, un test avait été effectué sur un échantillon contenant 240.000 cellules sur un réseau virtuel, il en est ressorti que l'algorithme de Dijkstra, codé dans NODUS, avait effectué le calcul en 15min alors que celui d'A*, également codé dans NODUS, a effectué le calcul en 12h (Limbourg S, 2007, p93). Nonobstant le fait que certains ne seront pas optimaux, les chemins calculés par chaque algorithme peuvent être viables et le choix de celui-ci sera défini par la proportion cout/bénéfice que l'utilisateur en retire en utilisant un algorithme plutôt qu'un autre.

2.3. Les méthodes d'affectation

Dans la réalité, différentes contraintes entrent en jeu lors de l'affectation d'un chemin pour une entité transportant de la marchandise. Les deux contraintes qui influencent ces modèles sont (cf. table 2) :

- Les effets stochastiques qui acceptent la variabilité dans la perception qu'ont les chauffeurs, ainsi que le cout de la route. Le contenu transporté aura également un impact sur ces choix car un véhicule transportant des produits périssables cherchera à minimiser son temps de transport, et non son coût ;
- Les contraintes de capacité qui sont liées à la capacité maximum que peut accueillir une route (Ortúzar & Willumsen, 2011, p468).

	Effet(s) stochastique(s)	
Contrainte(s) de capacité	Non	Oui
Non	<i>Tout-ou-Rien</i>	<i>Stochastique</i>
Oui	<i>Équilibre</i>	<i>Équilibre stochastique</i>

Table 2 : schéma de classification pour l'attribution du trafic ::
(Jourquin & al. 2007)

- L'affectation « Tout-ou-rien »

A travers cette méthode d'affectation, nous voyons que ni les effets stochastiques ni les contraintes de capacité, c'est-à-dire la congestion, ne sont pris en compte. La conséquence directe de ce choix est que tous les conducteurs ayant la même origine et la même destination choisiront la même route.

En dépit du fait que cette méthode serve de base solide pour les autres méthodes d'affectation telles que l'équilibre ou les méthodes stochastiques, il ne faut pas oublier qu'elle se base sur des hypothèses peu réalistes. Assurément, si tous les utilisateurs prenaient la même route, de la congestion serait créée et le temps du trajet ainsi que son gain ne seraient pas exacts. Certains auteurs évoquent les différentes raisons dans la littérature, dont les principales sont que :

- Tous les transporteurs se rendent d'un point à un autre du réseau en empruntant le même itinéraire et le même mode de transport ;
- Les arcs présentent une capacité infinie associée à l'absence de congestion ;
- L'affectation se fait à partir des nœuds correspondant à la demande d'une zone. Chacun des transporteurs d'une zone précise sera supposé effectuer ses envois depuis le nœud associé (Jourquin & al., 2006).

- *Les méthodes stochastiques*

Au travers de celles-ci, on perçoit un coût différent pour chaque utilisateur, ce qui va amener à un choix de route varié même si nous ne sommes pas encore proches de la réalité car la congestion est toujours écartée. Deux approches différentes sont connues pour traiter cette méthode qui sont l'algorithme de Burrell (1968), auquel on ajoutera une alternative proposée par Jourquin & Limbourg (2007), et l'algorithme de Dial (1971) :

⇒ L'algorithme de Burrell :

Afin d'illustrer les différentes perceptions de coûts qu'ont les utilisateurs suivant certaines situations, certaines méthodes ont été développées à l'image de celle de Burrell (1968), basée sur différentes hypothèses :

1. Il faut différencier, sur chaque lien, les coûts observés par l'observateur et le conducteur ;
2. La distribution des coûts perçus est indépendante ;
3. Les routes, qui minimisent leurs coûts, sont choisies par les conducteurs (Ortúzar & Willumsen, 2011, p333).

L'algorithme de Burrell, qui a pour objectif principal de générer les routes les moins chères, se définit comme suit :

1. Make $n=0$;
2. Make $n=n+1$;
3. For each i-j pair :
 - a. Compiler les coûts perçus pour chaque lien ;

- b. Créer le coût minimum perçu pour chaque lien et assigner T_{ij} / N trajets (où N = segments de population) ;
4. Lorsque $n = N/\text{Segments}$, stop. Otherwise, go to step 2 (Ortúzar & Willumsen, 2011, pp361-362).

Cependant, comme cela a été expliqué par Jourquin & Limbourg (2007), les chemins alternatifs sont parfois très proches du chemin le moins coûteux, ce qui fait perdre tout intérêt à cette analyse. Ces deux auteurs ont donc élaboré une solution pragmatique en considérant qu'un chemin utilisé est un chemin dont le coût est augmenté, cela a pour but de limiter son utilisation lors du choix d'un chemin alternatif.

⇒ *Solution pragmatique*

- 0 $n=0$;
- 1 Calcul du chemin le moins coûteux ;
- 2 Augmentation du coût sur chaque arc utilisé ;
- 3 $n = n+1$;
- 4 itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$;

Calculer le chemin le moins coûteux à partir d'un point de départ revient à utiliser la méthode de Dijkstra (1959). Cependant, cet algorithme, combiné à la solution pragmatique illustrée précédemment, présente quelques limites. En effet, on peut apercevoir un calcul classique sur la figure 2 où le chemin le plus court pour aller de A à B sera en rouge, et celui pour aller de A à C sera en vert.

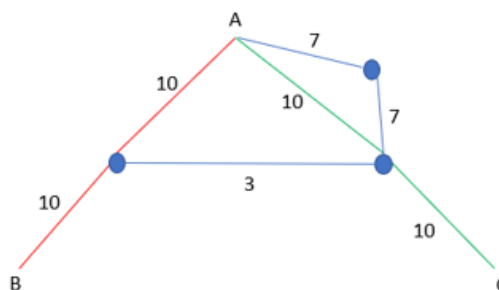


Figure 2 : arbre de Dijkstra

(Jourquin & al., 2007)

Supposons maintenant que l'on prend ce problème tout en y intégrant la solution pragmatique, les coûts sur ces deux arcs colorés seront augmentés (de 50% dans ce cas-ci) pour inciter un minimum à l'utilisation de ces nouveaux chemins. Dès lors l'algorithme de Dijkstra présentera ses premières limites car pour aller de A à C, comme on l'aperçoit sur la Figure 3, il va utiliser

le chemin en bleu qui suppose de passer par les deux chemins annexes ayant un cout initial de 7 chacun avant de prendre le chemin ayant le nouveau coût de 15. On aurait donc un cout total de 29.

En réalité, le chemin que devrait choisir Dijkstra serait celui en jaune qui part de A vers B, tout prenant l'intersection pour rejoindre C. En effet, l'augmentation du coût de A vers B de 50% n'a pas lieu d'être étant donné que l'on se concentre sur le plus court chemin entre A & C, ce qui induit qu'on aurait un chemin avec un coût total de 28 (10+3+15) et non 33 comme pourrait l'illustrer la figure 3. On remarque donc que Dijkstra n'est pas dans la capacité de faire la distinction entre différents itinéraires.

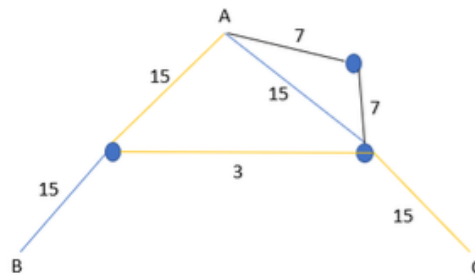


Figure 3 : arbre de Dijkstra avec augmentation du coût

(Jourquin & al, 2007)

⇒ L'algorithme de Dial

Cette méthode alloue les flux sur les routes alternatives en utilisant une expression logit basée sur un algorithme de chargement qui va répartir les trajets arrivant à un nœud parmi tous les nœuds de sorties possibles, en opposition avec l'algorithme « tout-ou-rien » qui affectait tous les trajets sur un seul et même chemin (Ortúzar & Willumsen, 2011, p363).

Comme nous le montre la figure 4, cet algorithme prend le problème « à l'envers » car il effectue la division du trajet au niveau d'un nœud sur base de sa provenance et non de sa destination. Considérons $A_1, \dots, A_i$, les différents points d'entrée à un nœud B, pour aller de l'origine i à la destination J (Ortúzar & Willumsen, 2011, p363).

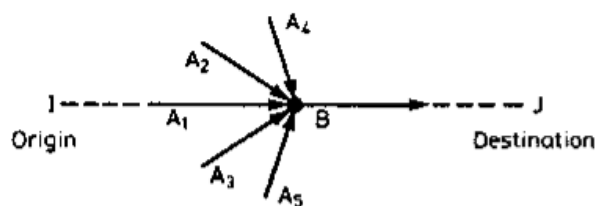


Figure 4 : modélisation du problème

(Ortúzar & Willumsen, 2011, p363)

Les facteurs de séparation f_i sont définis par :

$$\begin{aligned} f_i &= 0 & \text{Si } d_{Ai} \geq d_B \\ 0 < f_i &\leq 1 & \text{Si } d_{Ai} < d_B \end{aligned}$$

La première condition nous indique que f_i est considéré comme nul si A_i est plus loin de l'origine que B, sachant que d_{Ai} représente le coût minimum du trajet de l'origine i au nœud A_i . La deuxième va faire en sorte que le route choisie sera la plus profitable. Cependant, cet algorithme présente un point faible car il considère les routes de manière égale lorsqu'un choix doit être fait (Ortúzar & Willumsen, 2011, pp363-364).

Imaginons une situation où l'algorithme a la possibilité de prendre la direction du centre-ville, avec 3 choix de routes différents à l'intérieur, ou alors passer par une route qui contourne le centre-ville (cf. figure 5). Supposons 12000 trajets entre A & B avec des routes ayant un coût plus ou moins similaire, l'algorithme de Dial va les répartir de manière égale c'est-à-dire en assignant 3000 trajets sur la route qui contourne le centre-ville et 3000 trajets sur chaque route du centre-ville alors que dans la vie réelle, un utilisateur considèrerait le problème selon deux alternatives : prendre le centre-ville ou la route secondaire. Cet algorithme va donc rencontrer des problèmes s'il prend en compte certaines routes alternatives qui ne diffèrent que de quelques pourcents du coût de base. Aussi, cet algorithme a tendance à affecter les flux aux parties denses du réseau avec des chemins plus courts, plutôt qu'aux parties plus « clairsemées » possédant de longues routes (Ortúzar & Willumsen, 2011, pp363-364).

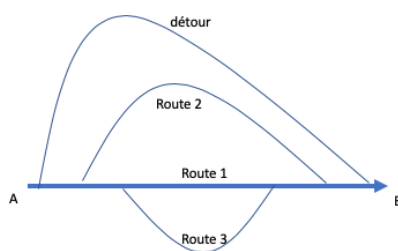


Figure 5 : schéma de la situation

(Ortúzar & Willumsen, 2011, pp363-364)

- L'équilibre

Quand nous parlons d'affectation congestionnée, nous pouvons parler de l'équilibre de Wardrop. Celui-ci, au contraire de l'algorithme de Burrell, prend en compte les contraintes de capacité mais exclut la manière dont les chauffeurs perçoivent les coûts.

Wardrop (1952) définit son premier principe comme suit : « *sous conditions d'équilibre, le trafic s'organise dans les réseaux congestionnés de telle manière qu'aucun voyage individuel ne puisse réduire ses coûts de trajet en changeant de route* ». Cependant, lorsque les voyageurs perçoivent les coûts de la même façon, l'équilibre de Wardrop (1952) s'exprime de la manière suivante : « *sous conditions d'équilibre, le trafic s'organise dans les réseaux congestionnés de telle manière que toutes les routes utilisées dans une paire origine-destination ont des coûts égaux ou inférieurs au coût généralisé alors que les routes non utilisées ont un coût égal ou supérieur* ».

Le second principe de Wardrop (1952) s'applique pour les planificateurs et les ingénieurs qui cherchent à minimiser le coût de transport dans le but d'atteindre un équilibre social. Ce dernier se traduit comme suit : « *Sous conditions d'équilibre social, le trafic devrait être organisé dans les réseaux congestionnés de manière de manière à minimiser le cout total du voyage* » (Ortúzar & Willumsen, 2011, pp368-369).

La littérature nous présente trois algorithmes différents qui permettent de prendre en compte cette congestion (Jourquin & al., 2006) : les méthodes de moyennes successives, l'algorithme de Frank & Wolfe et la méthode incrémentale :

Les deux premiers sont très similaires car ils ont pour objectifs d'effectuer différentes itérations jusqu'à ce que la condition « stop », c'est-à-dire au moment où le chemin est considéré comme optimal, soit activée. En d'autres termes, lors de l'initialisation, le flux V_a est mis à 0 sur chaque lien et son coût associé C_a est implémenté dans une situation de libre circulation (Jourquin & al., 2006, p217). A partir du moment où la condition « stop » est activée, le coût sera calculé sur base de la dernière itération $n-1$, où n est l'itération au moment de l'arrêt, dépendant du flux V_a^{n-1} (Jourquin & al., 2006, p217).

Ensuite, un ensemble de flux auxiliaires F_a^n sont obtenus sur base d'une affectation tout-ou-rien basée sur des coûts recalculés. Le nouveau flux V_a^n s'écrira donc comme suit :

$$V_a^n = (1 - \lambda^n) * V_a^{n-1} + \lambda^n * F_a^n$$

La condition « stop », inspirée par Leblanc & al (1975), s'écrit comme suit :

$$\text{Stop if gap} = \text{Max} \frac{|(V_a^n - V_a^{n-1})|}{V_a^n} < \varepsilon$$

Une valeur de 0,05 a été attribuée à ϵ , le terme d'erreur, par les auteurs car ceux-ci considèrent qu'elle est suffisamment basse que pour être proche de l'équilibre réel (Jourquin & al., 2006, p218).

La seule différence entre ces deux algorithmes est la valeur de lambda qui, pour la méthode des moyennes successives, sera inversement proportionnelle au nombre d'itérations ($\lambda = \frac{1}{n}$) alors que dans le second cas, elle sera recalculée après chaque itération, ce qui donnera un résultat plus précis mais également plus long à calculer (Jourquin & al., 2006, p217). A l'instar de ce qui a été exposé pour Dijkstra et A*, ces deux algorithmes se valent mais l'utilisation de ceux-ci se fera après une évaluation cout/bénéfice propre à chaque utilisateur.

Le dernier algorithme est celui de la méthode incrémentale qui permet d'affecter progressivement, c'est-à-dire à chaque itération, une partie de la matrice origine-destination sur le réseau. Cette proportion sera calculée par p_i ($i=1, \dots, n$) tel que (Jourquin & al., 2006, pp217-218) :

$\sum_i p_i = 1$
$p_i = \frac{n - i + 1}{n * (n + 1) / 2}$

Illustrons cela avec un exemple concret qui considère 10 itérations ($n=10$) : 18,1% de la matrice sera chargée le réseau à la première itération ($i=1$) alors qu'à la deuxième, 16,3% de la matrice seront ajoutés et chargés sur le réseau et ainsi de suite.

Cependant, le désavantage de cet algorithme par rapport aux deux premiers est qu'il ne permet pas de réaffecter les flux vers un autre lien/chemin après chaque itération. Cette méthode ne permet donc pas d'assurer que l'algorithme converge vers un équilibre (Jourquin & al., 2006, pp217-218).

- *L'équilibre stochastique*

Il prend en compte les deux effets dont nous avons parlé précédemment qui sont, d'une part, la perception des coûts qu'ont les utilisateurs et, d'autre part, les effets de la congestion. La condition d'équilibre s'exprime de la manière suivante : « *Chaque utilisateur choisit la route avec le coût de voyage minimum perçu ; en d'autres mots, sous équilibre stochastique de l'utilisateur, aucun d'entre-eux n'a une route avec un coût perçu inférieur et, de ce fait, ils restent tous sur leurs itinéraires actuels* » (Ortúzar & Willumsen, 2011, pp401-402).

De ce fait, dans cette section, chaque utilisateur définit son propre coût de voyage au lieu d'utiliser un coût applicable pour chaque. Un algorithme d'affectation est considéré comme convergent si, et seulement si :

- ⇒ On commence par un ensemble particulier de coûts de liaison C_a . Par exemple, des coûts de flux libres dans la première itération et des coûts en fonction des flux dans les suivantes ;
- ⇒ On assigne une matrice en utilisant des règles spécifiques comme celles de Dial, en produisant de nouveaux liens V_a (Ortúzar & Willumsen, 2011, p402).

2.4. Les limites du modèle à 4 étages pour le transport de marchandises

Précédemment, nous avons établi une brève introduction sur le modèle à 4 étages, qui est souvent utilisé dans le cadre du transport de passagers. Dans cette section, nous nous efforcerons d'exposer différentes raisons qui montrent qu'un modèle d'affectation pour le transport de passagers ne peut être applicable dans le cas du transport de fret, ou du moins que celui-ci doit être adapté selon plusieurs conditions.

Premièrement, le modèle de transport de passagers est fondé sur la demande moyenne de transport pour les passagers alors que la demande de marchandises se base sur un volume potentiel de marchandises à transporter (Quinet & Vickerman, 2004). De plus, chaque produit peut avoir une influence différente sur le transport. A titre d'exemple, l'importance économique qu'aurait un retard si le produit n'est pas livré dans les temps ou si celui-ci arrive trop tôt aura impact sur le coût de stockage. Ce coût étant énormément diversifié et pouvant prendre différentes valeurs, il reste très difficile à interpréter. Cela montre d'ores et déjà que l'étape d'affectation est bien plus difficile à appréhender quand on se situe dans le transport de marchandises.

Deuxièmement, le transport de fret contient plus d'acteurs, ou de facteurs, que le transport de passagers. En réalité, ce dernier ne requiert parfois que deux acteurs, à savoir le passager et le transporteur, alors que le transport de marchandises requiert, au minimum, l'intervention d'une firme qui produit et une qui l'envoie, d'un transporteur et d'une firme/d'un client qui reçoit ce produit. Comme nous le verrons plus tard, certains modèles d'affectation de transport de marchandises peuvent être plus élaborés et peuvent inclure la gestion logistique de l'entreprise concernée tels que la gestion d'inventaire ou la fréquence des expéditions. Nous verrons également que les centres de distribution, qui ne sont pas pris en compte dans ce modèle, s'avèrent très utiles et doivent donc y être inclus. En effet, ils permettent à l'entreprise

d'effectuer des économies d'échelles sur des envois conséquents et, ensuite, de redistribuer la marchandise en zone urbaine avec de plus petites flottes.

En parallèle à ce qui a été exposé ci-dessus, on voit que le choix modal est fortement impacté par ces différents acteurs lorsque l'on se trouve à un niveau d'agrégation peu élevé. En effet, l'expéditeur, afin de choisir son transporteur, compare les différents tarifs en vigueur afin de trouver celui qui lui convient le mieux, selon des critères de temps, coût & fiabilité. Il est important de noter qu'une conversion de la quantité (en tonnes) en nombre de véhicules est effectuée avant l'étape d'affectation (Quinet & Vickerman, 2004).

Troisièmement, concernant cette dite-étape, elle est beaucoup plus importante et doit prendre certains paramètres, ignorés pour le transport de passagers, en considération à l'instar de certains types de véhicules doivent être modélisés différemment. Par exemple, une petite camionnette ne peut pas être modélisée de la même manière qu'un camion poids lourd car les caractéristiques, supposons la capacité des deux modes, ne sont pas les mêmes et influenceront différemment sur le trajet choisi (Ortúzar & Willumsen, 2011, p 461). Les produits périssables sont également une preuve de la complexité liée au transport de marchandises car quand ce type de produit est transporté, la réduction du temps est souvent plus importante que l'optimisation du coût de transport.

D'autres aspects temporels ne sont pas pris en compte dans un modèle à 4 étages classique alors que ceux-ci doivent avoir une influence comme la saisonnalité ou la longueur des trajets. Avec ce type de modèle, il est difficile de modéliser ce qui se passe durant les heures de pointe ou d'anticiper la demande de transport sur des périodes plus longues.

Finalement, nous pouvons mettre en exergue une dernière limite qui, au contraire des précédentes, n'est pas liée à de la modélisation pure mais s'attarde plus sur la politique de confidentialité appliquée par certaines entreprises. En effet, une majorité d'entre elles n'aiment pas partager leurs données ou préfèrent n'en donner qu'une quantité restreinte alors que pour élaborer des modèles optimaux, il est nécessaire d'avoir toutes les données possible en sa possession.

2.5. Les modèles « Activity-based »

Le modèle classique à quatre étages, que nous avons vu précédemment, est un modèle dit « trip-based » ou modèle de tournée, c'est-à-dire que celui-ci prend en compte les trajets de manières indépendantes et isolées, sans établir de connexions entre chacun (Zwerts E., 2017). Le modèle à 4 étages considère une série d'aller-retour alors que certains voyages peuvent être combinés. Pour illustrer ceci, prenons un exemple lié à notre quotidien où une mère de famille, qui va

déposer son enfant à l'école le matin avant d'aller au travail, à l'intention faire les courses durant sa pause de midi, avant d'aller chercher son enfant sur le chemin du retour en fin de journée. Cette manière d'expliquer combine plusieurs trajets en un alors que l'approche « trip-based » considèrerait un aller-retour entre chaque action.

Partant de cette notion de « trip-based », s'est développée la notion « d'Activity-based » (ou ABM) qui prend en compte les différents liens existants entre les voyages et l'activité de production. Dans ce cas-ci, les modèles représentent l'activité de chaque personne et ces choix de voyage sur toute la journée (Whitney V., 2019).

La demande est faite en fonction des activités que chacun souhaite effectuer au cours de la journée. De plus, les ménages ainsi que les autres structures sociales influencent le comportement face aux voyages ou aux activités. Selon Zwerts (2017) : « *les approches axées sur les activités visent à prédire les activités qui sont menées où, quand, pendant combien de temps, avec qui, le mode de transport concerné et, idéalement, aussi les décisions implicites d'itinéraire* ».

Deux types de modèles seront explorés au cours de ce mémoire en se basant sur cette notion « d'activity-based » : il s'agit des modèles de réseaux virtuels, utilisés dans NODUS et les modèles multi-agents, utilisés dans MATSim, ILUTE ou Fremis.

a. Les réseaux virtuels

D'après Jourqin & Limbourg (2007), un réseau géographique ne peut être considéré comme suffisamment représentatif pour un segment de réseau. En effet, sur celui-ci, on pourrait utiliser différents modes de transport afin de réduire les coûts. Par exemple, un réseau géographique ne peut distinguer le gabarit d'un bateau ou affirmer qu'une marchandise a été transbordée d'un train à un bateau.

La notion de réseau virtuel est donc imaginée et dit que : sur un réseau, un coût unique peut être calculé selon différentes méthodes d'affectation. Cependant, la réalité veut qu'entre deux régions, il n'existe pas qu'un seul chemin. De ce fait, les méthodes d'affectations se doivent d'être multimodales et multi-flux. En d'autres termes, un réseau géographique ne prend en compte qu'un chemin sans y associer de coûts ou d'alternatives alors qu'un réseau virtuel, ou « super-réseaux », prend en compte les coûts liés à l'intermodalité et à l'affectation multi-flux (entre autres), cela signifie que les étapes 3 & 4 du modèle à 4 étages sont regroupées en une seule.

Un réseau virtuel peut-être représenté, de manière théorique, par la figure 6. Celle-ci est composée de nœuds & de liens. Les liens en gras sont ceux qui représentent une « action » entre deux nœuds, c'est-à-dire le camion qui roule sur l'autoroute ou encore le bateau qui navigue.

Les liens en pointillés peuvent être un simple transit à coût nul ou un transbordement entraînant des coûts supplémentaires.

Grâce à la figure 7, nous pouvons voir un « zoom » de ce qui se passe entre les nœuds b1W1, b2W2, b2W1 & b3R1 :

Où :

- B1, b2, b3 : représentent des nœuds ;
- W1, W2 : représentent deux modes de transport par voie d'eau, avec des capacités différentes ;
- R1 : représente un mode de transport ferroviaire (Jourquin & al., 2004, p5).

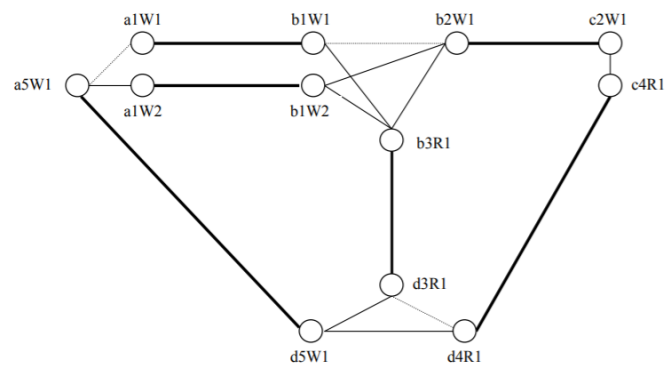


Figure 6 : réseau virtuel

(Jourquin & al., 2004,p5)

A l'intérieur de celle-ci, on peut voir les différentes opérations qui pourraient être effectuées. En effet, si on va de b1W1 à b2W1, il s'agira simplement d'un passage qui ne donnera lieu à coût supplémentaire nul au contraire du chemin allant de b1W1 à b3R1 fera face à des coûts supplémentaires dus au transbordement. Enfin, si on va de b1W1 à b000, cela signifie que l'on effectue un déchargement alors qu'à l'inverse, on effectuera un chargement. C'est d'ailleurs pour cela que l'on trouve des « + » et des « - » sur ce réseau car, par exemple, le coût de chargement n'est pas forcément le même que le coût de déchargement, ce qui permet donc de distinguer ces deux coûts différents grâce à un dédoublement des liens. Le but étant de se rapprocher un maximum de la réalité (Jourquin & al., 2004, p5).

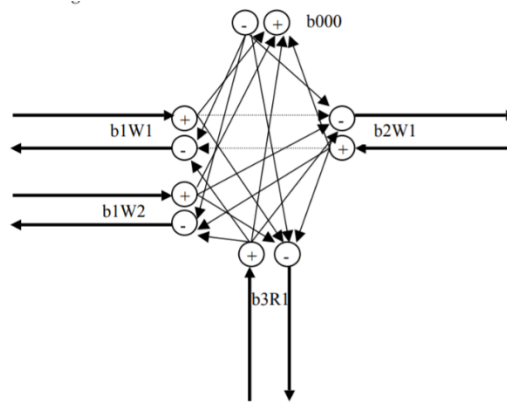


Figure 7 : Zoom sur un nœud

(Jourquin & al., 2004,p6)

Ce principe est très théorique et un exemple plus « pratique » sera exposé dans la partie qui explique le fonctionnement du logiciel NODUS.

b. Les modèles multi-agents

La modélisation de l'activité de chaque agent est effectuée grâce à la simulation via le modèle multi-agents (Livet P.A. & al., 2014). Pour introduire ce concept, il est important d'expliquer ce qu'est un agent. Selon le Dr. Mevludin (2006) : « *un agent est tout ce qui peut être considéré comme percevant son environnement par des capteurs agissant sur celui-ci, par des effecteurs* ».

Il peut-être une entité physique (un contrôleur dans une chaîne de production) ou une entité virtuelle (un logiciel qui reçoit un input d'un environnement et qui en ressort un output) (Mevludin G., 2006).

D'après Ferber (1995), les entités physiques ou virtuelles :

- Doivent être capable d'agir dans son environnement ;
- Ont la possibilité de communiquer avec d'autres agents ;
- Cherche à minimiser des objectifs personnels ;
- Possèdent des ressources propres ;
- A une idée claire de ce qu'est son environnement et possède une représentation partielle de celui-ci ;
- Possèdent des compétences et offrent des services ;
- Peuvent éventuellement se reproduire ;
- Possèdent un comportement qui tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elles disposent, et en fonction de leurs perceptions,

de leurs représentations et des communications qu'elles reçoivent (Ferber, cité dans Boland, 2018).

Ferber (1995) définit le modèle multi-agents, un système composé des éléments suivants :

- Un environnement « E », c'est-à-dire un espace disposant d'une métrique ;
- Un ensemble d'objets « O » auxquels on peut associer une position dans « E ». Ces objets sont dits passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés ;
- Un ensemble « A » d'agents, qui représentent les entités actives du système ;
- Un ensemble de relations « R » qui unissent les objets entre eux ;
- Un ensemble d'opérations « Op » qui permettent aux agents A de produire, consommer, transformer et manipuler des objets de « O » ;
- Un ensemble d'opérateurs qui ont pour but de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (Ferber, cité dans Boland, 2018).

Ces modèles sont utilisés dans différents domaines tels que l'écologie ou encore les sciences sociales. Dans le domaine du transport, des études ont été réalisées par France et Ghorbani (2003) ou encore Adler et al. (2005). Les résultats qui en ressortent sont qu'il y a une meilleure répartition des utilisateurs du réseau sans que l'utilité perçue soit compromise.

La particularité d'un modèle multi-agents est que chaque agent, étant considéré comme une entité individuelle, est simulé individuellement sur les réseaux par un processeur. De ce fait, l'ensemble des agents peut être simulé sur plusieurs processus, ce qui réduira drastiquement le temps de calcul, et donc, les coûts (Piotte J., 2013, p109).

Une des premières difficultés que l'on peut mettre en avant dans ce modèle est qu'il est difficile de le modéliser, par exemple en essayant d'intégrer une donnée qualitative dans celui-ci car pouvoir s'exprimer sous forme d'une variable capable d'interagir avec un tas d'autres variables (Amblard F., 2016). On peut donc se poser deux questions quant à ce modèle :

- Quels critères nous montrent que la modélisation du comportement d'un individu est correcte ? «
- La quantité d'informations nécessaire pour se rapprocher de la réalité n'est-elle pas trop conséquente ?

Les différents modèles de la vie réelle, qui seront présentés dans les sections suivantes, apporteront des éléments de réponse pour que les lecteurs puissent se faire une idée de la viabilité et de la possibilité d'utiliser ces différentes solutions, en y trouvant un certain bénéfice

3. Les modèles statiques

Le cadre théorique ayant été introduit, nous allons désormais nous focaliser sur les modèles d'affectation qui existent dans la réalité que nous allons les classer en 3 catégories différentes. La première, qui correspond à cette section, est celle relative aux modèles statiques que Sabine Limbourg définit de la manière suivante (2007, p79) : « *les modèles statiques décrivent le trafic sur une période suffisamment longue pour que les déplacements soient entièrement effectués pendant cette période* ». Ce sont donc des modèles qui se basent sur des données moyennes et qui ne représentent donc pas l'évolution du trafic en temps réel. Les différents modèles dont nous parlerons sont STAN, TRANSTOOLS 3 & NODUS.

3.1. STAN

3.1.1. Origine du modèle STAN

Certains modèles, à l'image du « Harvard Model », ne tiennent pas compte de la congestion ou encore du lien entre le transporteur & l'expéditeur. Le premier modèle qui a tenu compte de ces deux paramètres est le « *Freight Network Equilibrium Model* » (Friesz, Gottfried & Morlok) (Guelat et al., 1990).

L'hypothèse principale de ce modèle était que les biens sont transportés à un cout général total minimum. De manière théorique, l'approche normalisée est appropriée lorsque les produits ont un lien avec des modes précis :

- ⇒ Les aspects multimodaux d'un système de transport national sont représentés dans le choix des représentations de réseaux ;
- ⇒ Les aspects multi produits d'un système de transport national sont représentés dans la formulation du modèle prédictif ;
- ⇒ La demande ainsi que le choix modal sont exogènes et sont supposés préciser, pour chaque produit, une matrice O/D (Guelat et al., 1990, p27).

Selon Guelat et al. (1990, p29), même si les calculs de choix modaux sont faits sur base d'a priori, ce qui affectera le modèle sur un ensemble de sous-ensembles de modes, la demande d'un produit peut-être également affecté sur tous les modes autorisés.

Le modèle est également décrit comme flexible en ce qui concerne les mouvements intermodaux car il peut être limité à certains nœuds du réseau parmi certains modes spécifiques (Guelat et al., 1990, p29). Il peut être également utilisé pour des planifications stratégiques pour différentes modes et produits ou pour un transport de marchandises effectué par un seul et unique transporteur.

Cependant, celui-ci n'identifie pas les expéditeurs et les transporteurs de manière précise. En effet, étant dans le cas d'une planification stratégique, une comparaison avec les investissements effectués est nécessaire. L'hypothèse est que le comportement de l'expéditeur est compris dans la matrice origine-destination et dans la spécification du choix modal. Néanmoins, les auteurs précisent que des informations concernant les choix de mode des expéditeurs peuvent être introduites dans le modèle (Guelat et al., 1990, p30).

Ils ont donc mis en place un modèle multimode multi produits nommé STAN. Ses spécificités sont la manière dont celui-ci va représenter le réseau utilisé, la solution de programmation informatique utilisée, l'adaptation de l'algorithme du plus court chemin ainsi que l'emploi de l'analyse numérique. Celui-ci s'avérerait efficace lorsqu'il s'agissait de transporter à moindre coût. A l'heure actuelle, il n'existe plus mais représente une base pour les différents modèles qui vont suivre, notamment NODUS qui s'en est inspiré, et qui est apparu quelques années plus tard (1995). En effet, il illustre la notion d'activity-based nommée précédemment, qui ne calculait pas les chemins sur des réseaux géographiques mais sur un réseau représentant différentes opérations d'une chaîne de transport.

○ Description du modèle

Ensembles de nœuds :	N ;
Ensembles de modes :	M ;
Ensembles de transferts :	$T \subset A \times A$;
Un transfert :	$t \in T$;
Ensembles d'arcs :	A où $A \subset N \times N \times M$;
Un arc :	$a \in A$;
Fonction de coût dépendant du volume de biens sur l'arc :	S_a ;
Fonction de coût dépendant du transfert :	S_t ;
Les produits transportés sur les réseaux multimodes :	P (P étant l'ensemble de produits) ;
La matrice de demande associée au produit $p \in P$:	$g^m(p)$;
Le flux du produit p sur un réseau multimodale est :	$u^p = \begin{pmatrix} (u_a^p), a \in A \\ (u_t^p), t \in T \end{pmatrix}$;

Le cout de fonction moyen donné par le coût par arc et par transfert :	$S^p = \begin{pmatrix} (S_a^p), a \in A \\ (S_t^p), t \in T \end{pmatrix};$
Le coût total du flux sur l'arc a pour le produit p :	$S_p^a(u)u_p^a ;$
Le coût total du transfert pour le produit p :	$S_t^p(u)u_t^p$ (Guelat & al., 1990, p29)

Grâce aux informations récoltées précédemment, nous pouvons vous présenter ce modèle qui respecte la conservation des flux (1) ainsi que les contraintes de non-négativité ((2),(3) et (4)) (Guelat et al., 1990, p29).

$$\begin{aligned} \text{Min } F &= \sum_{p \in P} (\sum_{a \in A} S_p^a(u)u_p^a + \sum_{t \in T} S_t^p(u)u_t^p) = S(u)^T u \\ \text{s.t} \end{aligned}$$

$$\sum_{k \in K_{od}^{m(p)}} h_k = g_{od}^{m(p)}, \quad o \in O, d \in D, m(p) \in M(p), p \in P \quad (1)$$

Où

$K_{od}^{m(p)}$: correspond à l'ensemble de chemins qui vont du point d'origine o au point de destination D, en utilisant uniquement les modes de transport m(p) (Guelat et al., 1990, p29).

$$h_k \geq 0, \quad k \in K_{od}^{m(p)}, o \in O, d \in D, m(p) \in M(p), p \in P \quad (2)$$

Où :

h_k : représente le flux sur le chemin k (Guelat et al., 1990, p29).

$$u_a^p = \sum_{k \in K^p} \delta_{ak} h_k, \quad a \in A, p \in P \quad (3)$$

Où :

$$K^p = \bigcup_{m(p) \in M(p)} \bigcup_{o \in O} \bigcup_{d \in D} K_{od}^{m(p)} \quad (3a)$$

K^p représente l'ensemble de chemin qui peut être utilisés par le produit p ;

$$\delta_{ak} = 1 \text{ si } a \in k \quad (3b)$$

δ_{ak} : identifie les arcs d'un chemin spécifique (Guelat et al., 1990, p29).

$$u_t^p = \sum_{k \in K^p} \delta_{tk} h_k, \quad t \in T, p \in P \quad (4)$$

Où :

$$\delta_{tk} = 1 \text{ si } t \in k \quad (4a)$$

δ_{tk} : identifie les transferts d'un chemin spécifique (Guelat et al., 1990, p29).

3.1.2. Application du modèle

Diverses études de cas ont été effectuées avec ce modèle, que ce soit en Suède, au Canada, en Finlande ou encore au Brésil. Cette dernière, où diverses données ont dû être recensées afin de pouvoir utiliser ce modèle. Elle a été effectuée dans la région Sud-Est du pays, qui est considérée comme étant le cœur économique et démographique du pays.

Celles provenant de l'organisation de planification du ministère brésilien des Transports ont été fortement utilisées. A titre d'exemple, les données concernant la demande concernant 29 produits, qui représente 80% de la production et de la consommation dans le pays, provient de cette base de données. En plus de cela, dix modes de transport ont été pris en compte afin de rendre ce modèle le plus performant possible (Florian et al., 1989, p125).

Après avoir affiné les données de ce modèle, différents scénarios ont été testés :

- ⇒ La mise en place éventuelle d'un grand chemin de fer ;
- ⇒ De meilleures routes d'exportations, pour de nouveaux produits à l'intérieur du pays, jusqu'aux ports ;
- ⇒ L'évaluation de divers projets afin d'améliorer les composants des réseaux ferroviaires et portuaire (Guelat et al., 1990, p36).

Ce raffinement du modèle a permis d'améliorer sa stabilité numérique mais aussi d'offrir la possibilité de doubler le nombre de produits qui peuvent être affectés simultanément (Crainic & al., 1997).

Une autre étude a été effectuée en Finlande, au début des années 90 (Florian & al., 1993), pour analyser des scénarios relatifs au transport de charbon. Celle-ci s'est basée sur un réseau plus important constitué de 2572 nœuds, dont 23 nœuds de demande, 10 nœuds d'offre, 207 nœuds consacrés au transbordement et le reste constituant des nœuds classiques. Il contient également 6648 liens ainsi que 1772 transferts. Le but de cette étude est de voir la performance de l'algorithme lorsqu'un seul produit est transféré. En effet, ce modèle étant flexible, il peut également s'adapter au transport d'un seul produit, contrairement à l'étude de cas effectuée au Brésil où l'on transporte divers produits (Florian & al., 1993).

Cette étude s'est révélée très intéressante car elle a pu introduire l'importance de prendre en compte les contraintes de capacité sur le réseau. Elle a été effectuée en 3 phases :

- La première avait pour but de compiler le modèle sans contrainte de capacité. Celui-ci n'a effectué qu'une seule itération, cela revenait donc à calculer un algorithme du plus court chemin.
- La seconde avait pour but d'introduire certaines contraintes de capacité.

- La troisième utilise le même réseau mais en utilisant toutes les contraintes présentées dans le modèle ci-dessus.

Les résultats ont montré qu'au plus on complexifiait le modèle, au plus celui-ci avait un gap élevé, ce qui signifie que la solution trouvée après n itérations s'éloignait de l'optimum. Les auteurs ont également révélé que le temps de calcul entre chaque itération était de 341 secondes. Ces deux études représentent une introduction pour ces modèles statiques. Il est bon de savoir que, plus tard, certaines études ont été effectuées pour proposer d'autres modèles de planification stratégique en se basant sur STAN. Citons l'étude réalisée par Maia & al (2012) pour les lecteurs intéressés.

3.2. [TRANS-TOOLS 3](#)

Le modèle TRANS-TOOLS (TOOLS TRansport Forecasting ANd Scenario testing) est un modèle européen mis en place par la Commission européenne. Ce modèle traite autant le transport de passagers que le transport de marchandises et inclut également la possibilité d'avoir recours au transport intermodal.

Il a connu diverses versions au cours des années :

- TRANS-TOOLS 1 (TT1) était un modèle qui incluait un modèle de transport de passagers, un modèle de transport de marchandises, un modèle logistique ainsi qu'un modèle SCGE (spatial computable general equilibrium). Ce modèle suit l'approche du modèle à quatre étages (De Jong et al., 2012, p8).
- TRANS-TOOLS 2 (TT2) a été développé par une autre équipe et dans celui-ci, le modèle de transport de marchandises a été considérablement modifié. On passe d'un modèle gravitationnel sans contrainte, qui pourrait mener à des résultats illogiques, à un modèle gravitationnel doublement contraint (De Jong et al., 2014, p8).

Désormais, une nouvelle version du modèle, nommé TRANS-TOOLS 3, a été mise en place. C'est cette dernière qui nous intéresse et dont nous allons parler plus en détail dans cette section. Selon un rapport publié en 2016, cette nouvelle version est composée des éléments suivants :

- Un modèle commercial régional et interrégional pour délivrer une matrice de produits-consommateurs (en tonnes), en fonction des zones ;
- Un modèle de choix d'itinéraire modal unique pour générer des coûts et des délais de transport ainsi que des choix d'itinéraire en chaîne pour calculer le coût global et les transports pour un nombre donné de chaînes de transport multimodal ;
- Un modèle logistique désagrégé pour le choix de la chaîne de transport, y compris le choix du mode ;
- Agrégation des flux O-D d'une zone à l'autre (en tonnes) ;

- Choix de l'itinéraire de la chaîne de chargement de réseau (affectation en tonnes) ;
- Conversion du flux de tonnes en nombre de transports par voie d'eau ;
- Point de pivot pour les changements de débit prévus de D-O sur une matrice D-O de base ;
- Affectation uni modale des flux sur un réseau (De Jong et al., 2016, p13).

Ce modèle s'est surtout inspiré du modèle Agrégation-désagrégation-agrégation (ADA) provenant de Suède & Norvège. Les modèles agrégés sont des modèles qui prennent en compte les décisions d'une firme seule, dans le but de maximiser son profit et d'appliquer des modèles de choix désagrégés, comme des modèles multi-agents ou des règles normatives (De Jong & al., 2012, p16). D'un autre côté, nous avons les modèles désagrégés qui sont des modèles qui ne prennent pas en compte certaines décisions à un niveau « micro », ils sont donc considérés comme moins précis et plus généraux (De Jong et al., 2012, p15). Sur base de ce qui a été expliqué, on peut déduire que la différence entre les modèles ADA et les modèles de transport classiques est qu'ils intègrent des décisions telles que la taille du chargement et les chaînes de transport (cf. Annexe 2).

Le schéma en annexe 3 explique le fonctionnement général du modèle TRANSTOOLS 3, tout en identifiant les 7 étapes de la détermination de la demande parmi les 3 sous-modèles différents qui sont : le calcul du niveau de service (LoS), le calcul de la réponse à la demande et le choix de l'itinéraire/le chargement du réseau.

3.2.1. Le calcul du niveau de service

Le niveau de service (LoS), comme montré dans la figure 8, est une mesure qualitative qui permet de mettre en avant la qualité de service du trafic. C'est un niveau qui a été créé dans le but d'analyser les routes en les catégorisant selon certaines mesures liées à la performance, comme la vitesse, la densité ou encore le retard. Comme nous la montre la figure ci-dessous, on part du meilleur niveau A jusqu'au niveau le plus faible, à savoir F (Kadiyali, 2010). Il est bon de savoir que cette méthode a également été implémentée dans NODUS (Jourquin & al., 2008).

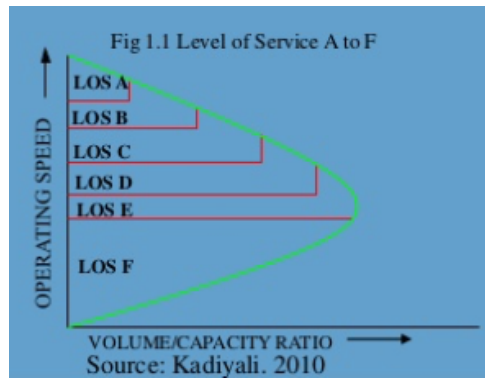


Figure 8 : niveau de service

(De Jong et al., 2012)

1^e étape : modèles de choix d'itinéraire de fret à mode unique

Ces modèles, constituant la première étape du calcul du niveau de service, calculent le temps et le coût par container (ou par tonne) entre :

- *Des zones et des terminaux pour le transport routier* : dans ce cas-ci, les modèles incluent la distance, la vitesse congestionnée modélisée, les péages ainsi qu'une pénalité de temps pour les passages frontaliers. La possibilité de calculer le temps et le coût entre des zones et des terminaux existe car le camion peut se rendre jusqu'à l'utilisateur final (De Jong & al., 2012, p22).
- *Des terminaux pour les autres modes* : dans ce cas-ci, pour servir les autres modes, il y a une nécessité d'avoir des terminaux. Dans ce type de modélisation, on peut identifier certains modes de transport tels que le transport de marchandises par RORO (Roll-on/Roll-off) qui sont des bateaux spécialisés, appelés rouliers, dans le transport de conteneurs ainsi que de poids lourds (le dico du commerce international).

En ce qui concerne les modèles ferroviaires, il y a certaines distinctions qui rendent ces modèles plus compliqués comme les trains roulant au diesel ou les trains électriques, qui ont un coût différent. De ce fait, trois combinaisons de tractions ont été identifiées :

- Diesel sur l'entièreté du chemin ;
- Changer la locomotive de diesel à électrique, ou l'inverse ;
- Électrique tout le long (De Jong et al., 2016, p23).

Les modèles de choix de route dans le transport maritime de fret calculent les routes les moins coûteuses par rapport au coût, pour certaines paires de ports possibles, pour un certain type de marchandise. Les calculs sont évidemment différents si on transporte des conteneurs, des produits « secs » ou liquides (De Jong et al., 2016, p23).

2^e étape : modèle de choix d'itinéraires en chaîne et calcul du niveau de service

Dans cette seconde étape, le modèle choisit un ensemble de combinaisons possibles et en calcule le coût optimal. Il n'est pas encore nécessaire d'affecter les flux sur le réseau. Cependant, on peut déjà dire que TRANSTOOLS autorise les combinaisons entre tous les modes de transport disponibles, c'est-à-dire routier, par voie d'eau, ferroviaire ou encore maritime.

3^e étape : modèle logistique stochastique pour le choix du type de chaîne/combinaison

Cette troisième étape représente un modèle qui calcule la probabilité de choisir une certaine combinaison selon une paire produit-consommateur & catégorie de marchandise. En input, le modèle a besoin d'une matrice origine-destination pour chaque type de marchandise et en ressortira des matrices origine-destination (en tonnes ou conteneurs) pour chaque paire (De Jong et al., 2016, p25).

3.2.2. Réponse à la demande

Cette deuxième sous-section permet de voir la manière dont la demande va varier suivant un changement du niveau de l'offre.

En parallèle à ce que nous avons vu plus haut, la première étape au sein d'une boucle de demande sera de calculer le coût moyen du transport, ainsi que son temps moyen. Lors de cette étape, il est important de ne pas oublier d'effectuer une conversion afin de transformer les résultats obtenus (en tonne/conteneur) en valeurs monétaires. Après cela, le modèle commercial aura pour objectif de calculer l'évolution des structures des échanges suite à certains changements par rapport au PIB/pays ou au PIB/habitant (De Jong & al., 2016, p26).

Finalement, le modèle logistique sera recalculé avec la nouvelle matrice ayant été créée sur base de la nouvelle demande générée.

3.2.3. Choix de la route et chargement du réseau

La dernière sous-section calcule les routes finales pour les transports de marchandises et affecte les flux sur les réseaux (De Jong et al., 2016, p26).

4^e étape : choix et affectation de l'itinéraire de la chaîne

C'est une étape très similaire à la deuxième, présentée dans la section 3.2.1. mais la différence marquante est que l'on affecte les flux sur le réseau. Ce qui ressortira de ce modèle est un flux de réseau mesuré en tonnes ou conteneurs pour les quatre catégories différentes de marchandises. Cet output pourra directement être transféré comme une matrice origine-destination uni modale (De Jong et al., 2016, pp26-27).

5^e étape : calcul du flux des moyens de transport par voie d'eau

La cinquième étape consiste à calculer le nombre moyen de transports par voie d'eau affecté sur une paire origine-destination selon les flux ou la taille des marchandises, cela permettant d'effectuer de la consolidation.

Selon le type de transport de marchandises, des équations différentes seront utilisées : l'affectation des conteneurs sur des camions de marchandises se fait sur trois types de véhicules différents (les véhicules utilitaires légers, les véhicules utilitaires lourds de moins de 40T et les « méga-camions » jusqu'à 60T). Le calcul utilise deux inputs différents :

- Le modèle logistique stochastique, pour le choix du type de chaîne, qui calcule les flux de marchandises par camion ;
- Les chaînes multimodales qui prennent en compte le camion le moins cher (De Jong et al., 2016, p28).

6^e étape : le choix d'itinéraire de modèle unique et de chargement de réseau :

Cette est similaire à la première mais deux particularités ont été ajoutées :

- On considère désormais l'affectation des véhicules sur les réseaux
- La congestion ainsi que les transports de passagers sont pris en compte pour optimiser la réponse (De Jong et al., 2016, p29).

7^e étape : les modèles d'impact :

Ces modèles calculent l'impact d'un nouveau scénario sur base du scénario initial. Ils sont calculés à différents niveaux, en utilisant certains outputs des modèles de transport de marchandises :

- Niveau de réseau : ce modèle est utilisé pour calculer l'impact du nouveau scénario sur la sécurité, l'énergie utilisée ou encore le CO2 ;
- Le niveau uni modal d'origine-destination : à travers celui-ci, on peut observer le flux de marchandises et de navires ainsi que le niveau de services pour les transports uni modaux entre les terminaux et les zones finales ;
- Niveau de chaîne origine-destination : le flux de marchandises pour une paire O-D (en tonnes) par type de chaîne par catégorie de marchandise sera mis en avant ;
- Niveau de marchandises production-consommation : ce modèle fournit des matrices production-consommation ainsi que le niveau de service pour chaque catégorie de marchandises ;
- Niveau économique de production-consommation : il permet de calculer le niveau de service général pour chaque catégorie de marchandises (De Jong et al., 2016, pp28-29).

3.3. NODUS

C'est un logiciel qui a été créé en 1995 par Jourquin mais qui, encore aujourd'hui, est sujet à des améliorations. Ce système d'information géographique (GIS) suit la méthodologie de réseaux virtuels développés à l'UCLouvain (Jourquin & al., 1996), et dont nous avons discuté dans la section prévue à cet effet, qui est vu comme une alternative au modèle classique à quatre étages afin de modéliser un réseau multimodal ainsi que le flux de transport intermodal pour le transport de marchandises. La particularité de ce logiciel est qu'il regroupe les étapes de « choix modal » et « d'affectation » en une seule.

3.3.1. Fonctionnement

La partie consacrée aux réseaux virtuels nous a permis d'introduire la manière dont fonctionnait NODUS. En quelques mots, le but de ce dernier est de décomposer toutes les opérations liées au transport : le chargement, le déchargement, le transit ou le transbordement sur un réseau multimodal. En d'autres termes, il crée un ensemble de chemins unimodaux sur ce même réseau, de manière systématique et automatique. (Jourquin & al., 1997). Bien évidemment, le modèle offre la possibilité de combiner plusieurs modes de transport afin de minimiser les coûts et de trouver la meilleure combinaison.

Prenons un exemple énoncé par Jourquin & Beuthe (2004) : supposons la figure 9 représentant un réseau par voie d'eau, et contenant 4 nœuds et 3 liens avec, sur chaque lien, la contrainte de capacité qui détermine le poids maximum qui peut être alloué sur un nœud. Afin d'aller sur le deuxième lien, qui a une capacité de 1350 T, un changement de mode pourrait être envisagé et c'est ce qui est expliqué plus en détail dans la figure 10. Le lien allant de b1 à b5 représente un simple transit, ce qui signifie que l'on ne doit pas prévoir des coûts supplémentaires au contraire du lien reliant b1 à b2 qui met en avant un transbordement.

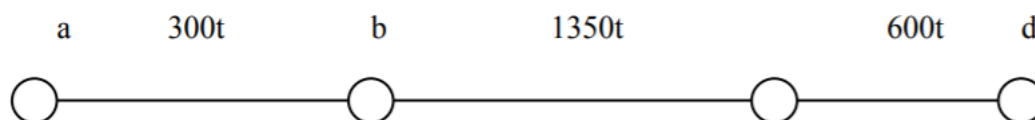


Figure 9 : exemple d'un réseau virtuel par voie d'eau

(Jourquin & Beuthe, 2004)

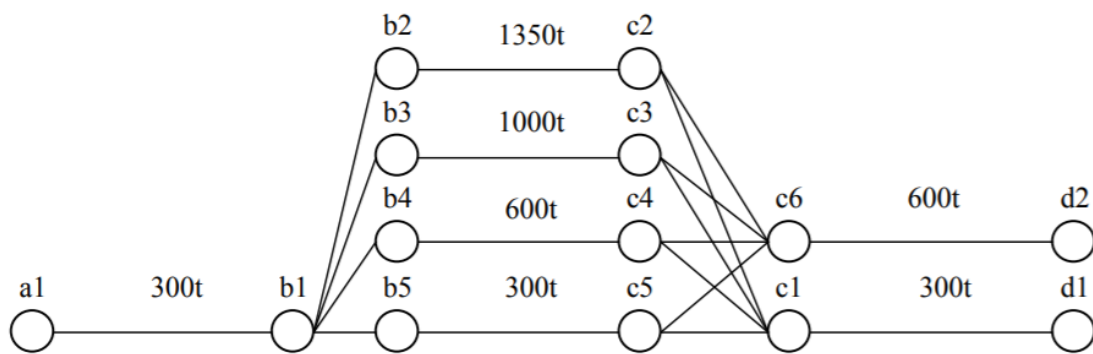


Figure 10 : réseau virtuel détaillé

(Jourquin & Beuthe, 2004)

Dans ce réseau virtuel, chaque lien représente une opération unique avec son propre coût, qui sera détaillé par après. Le choix du plus court chemin peut se faire par différents algorithmes, comme celui de Dijkstra ou A*.

NODUS fait également la distinction entre des modes et des moyens. En effet, un mode de transport pourrait définir un mode de transport terrestre et un « moyen » donne plus de détails sur ce mode, qui peut être une voiture, une camionnette, un poids-lourd. Ces détails sont essentiels pour l'affectation ainsi que le calcul du coût car les résultats et impacts sur la route ne seront pas les mêmes si on est dans une camionnette ou un camion poids-lourd.

3.3.2. Calcul de la fonction de coût

Comme nous pouvons l'apercevoir en annexe 4, NODUS est un modèle considéré comme flexible de par la diversité des méthodes d'affectation qu'il propose. Ainsi, nous voyons que les utilisateurs ont le choix entre la méthode Tout-Ou-Rien, celle d'équilibre (Frank-Wolfe, méthode incrémentale ou moyennes successives) ou encore, les méthodes multichemins utilisant Dijkstra ou A*.

A titre d'exemple, nous allons présenter une fonction d'une minimisation de coût basée sur une approche tout-ou-rien. Cet exemple nous montrera que le calcul utilisé reste très général et ne pourra pas, dans certains cas, varier selon la marchandise transportée. Par exemple, le coût n'est pas le même lorsque l'on transporte du blé ou du ciment, cela nécessite donc un afflux d'informations/de données supplémentaires (Jourquin & al., 2004, p7). De plus, les coûts externes tels que la congestion et la pollution sont pris en compte indirectement dans le calcul du cout social/de bien-être. Ce fait peut être relaté grâce à la documentation où sont démontrées différentes démonstrations des fonctionnalités de NODUS, dont l'une où l'auteur nous montre

que lorsqu'une route est utilisée, un coût supplémentaire à hauteur de 50% lui est attribué si elle est utilisée une autre fois (Jourquin, 2017, p21).

Le cout total de la fonction de transport défini dans NODUS s'exprime comme suit :

$$TC = \sum_{i \in I_i} \sum_{j \in I_j} \sum_{\theta} \left[(\beta^{\theta} + \frac{\alpha^{\rho}}{v^{\theta}}) * s_j + (\alpha^{\theta} * \alpha^{\rho} * \alpha^{\lambda}) * H_i^{\theta} \right] * Q_{i\theta}$$

Où :

β^{θ} : représente le coût de transport d'une marchandise θ ;

α^{ρ} : représente le cout d'opportunité durant le transport, par unité de temps ;

v^{θ} : représente la vitesse moyenne pour transporter la marchandise θ ;

s_j : représente la distance sur le lien j ;

α^{θ} : représente le coût de chargement, déchargement ou transbordement d'une marchandise θ ;

α^{λ} : représente le coût de la main d'œuvre lors d'une des opérations par unité de temps ;

H_i^{θ} : représente le temps nécessaire pour effectuer une des opérations pour la marchandise θ sur le lien j ;

$Q_{i\theta}$: représente la quantité totale de marchandise θ transportée sur les différents liens (Jourquin & al., 2004, pp7-8).

En plus de cela, NODUS se différencie grâce à sa possibilité de faire varier certains paramètres. En effet, au sein du logiciel, diverses fonctions existent pour se rapprocher un maximum de la réalité lorsque l'on exécute une simulation. Celles-ci sont :

- ⇒ « AVGLOAD » : elle permet de prédéfinir la quantité moyenne qu'un moyen de transport peut accepter. Par exemple, le logiciel va définir qu'un véhicule classé dans le « mode 1, moyen 1 » peut transporter en moyenne 20T. Cela va permettre au logiciel de définir si des opérations de transbordements sont nécessaires ou non ;
- ⇒ « ESV » : cette fonctionnalité permet d'adapter la taille d'un camion à celle d'une voiture. En d'autres termes, le logiciel considèrera qu'un camion sur la route représentera 1,5 voiture. Cela est très utile lors des calculs liés à la congestion ;
- ⇒ « LD/UL/TP_DURATION » : cette fonctionnalité permet d'avoir certains paramètres relatifs au temps de chargement/déchargement/transbordement nécessaire selon le mode et le moyen de transport (Jourquin, 2007, p39).

3.3.3. 1^e étude de cas : impact du changement de climat sur la navigation sur le Rhin & le Danube

NODUS, depuis sa création, a été utilisé dans diverses études. L'une d'entre elles a été effectuée en 2013 (étude publiée en 2014 par Beuthe & al.), avec pour but d'analyser l'impact du changement de climat, qu'on soit face à un temps sec ou mouillé, sur la navigation sur le Rhin & le Danube, tout en se basant sur des données qui ont été récoltées en 2005 et sur des prévisions effectuées pour 2050.

L'algorithme d'affectation qui a été utilisé a été calibré pour minimiser les coûts généraux alors que le modèle, lui, a été calibré en respect avec les répartitions modales recensées en 2005 et estimées en 2050. Au contraire du modèle classique à 4 étages, NODUS permet de prendre en compte, simultanément, cette répartition modale ainsi que l'affectation du chemin. Cette combinaison des étapes 3 & 4 (choix modal & affectation) s'avère très intéressante et n'est pas dénuée de sens car le choix modal dépendra toujours de divers chemins qui sont disponibles et les moins coûteux, cela va donc permettre de gagner du temps et de ne pas faire des itérations inutiles.

Dans cette étude de cas, le Rhin et le Danube seront évalués séparément car :

- ⇒ Les coûts (d'exploitations) sont différents ;
- ⇒ Le niveau d'eau à un moment donné n'est pas le même que l'on soit sur le Rhin ou sur le Danube (Beuthe & al., 2014, p6).

Cependant, les auteurs sont confrontés à deux autres problèmes. Le premier est que, parfois, certaines navigations s'effectuent sur les deux fleuves et, étant calculé séparément, il pourrait y avoir une surévaluation du coût généralisé. Le deuxième est que les coûts de transport étaient très difficiles à obtenir et sont, par conséquent, sujets à des hypothèses (Beuthe & al., 2014, p7).

Afin de régler le problème par rapport aux différents niveaux d'eau, des études ont été effectuées en amont. En effet, selon Beuthe & al. (2014, p7), il n'était pas possible de modéliser ce problème de manière continue car cela aurait posé des problèmes au niveau des calculs. Ensuite, sachant qu'il y a un lien entre les charges des différents navires et leurs tirants d'eau, c'est-à-dire la hauteur de la partie immergée du bateau. Pour ce faire, NODUS va prendre en compte la charge potentielle de chaque type de navire et son coût opérationnel, pour chaque profondeur possible (Beuthe & al., 2014, p2).

Le résultat de cette étude n'est pas ce qui importe dans ce cas-ci car ce qui est intéressant c'est de voir que le logiciel NODUS peut être considéré comme flexible. En effet, on aperçoit que celui-ci peut s'adapter à différentes situations et ne fait pas « que » prendre en compte le coût généralisé et la minimisation de celui-ci. On voit que, lorsque c'est possible, il y a la possibilité

de rajouter certains paramètres afin d'être plus proche d'un résultat optimal. De plus, on voit qu'il peut s'utiliser à une large échelle, c'est-à-dire à un niveau européen. Cependant, une constatation identique aux modèles précédents a été mise en avant, c'est le fait que le modèle doit encore avoir recours à certaines hypothèses, à l'image des coûts de transport. Cela ne va pas biaiser le modèle et les résultats qui en ressortent mais auront quand même un léger impact par rapport à la réalité.

3.3.4. 2^e étude de cas : Recherche d'un emplacement optimal & impact sur l'affectation

Cette étude qui a été faite en 2011, par Macharis & al., avait pour but de trouver une localisation optimale pour ajouter un nouveau terminal pour petits bateaux. Celle-ci converge avec les différents enjeux majeurs qui continuent de se développer dans notre société à l'heure actuelle, c'est-à-dire être durable, ce qui implique trois objectifs différents : économique, environnemental & social.

Le transport intermodal est certainement le meilleur de moyen de faire des économies sur les de couts de transport mais aussi, cette solution permet de traiter les problématiques liées aux externalités négatives dans le transport de marchandises. Il va donc permettre d'offrir des solutions afin de diminuer l'empreinte carbone de chacun ou encore réduire la congestion, car celui-ci permet d'effectuer des économies d'échelles et de maximiser le taux d'occupation de chaque mode de transport.

Trois logiciels ont été utilisés au cours de cette étude :

- ⇒ NODUS pour simuler un modèle de transport de marchandises multimodales. Son rôle sera majeur car c'est lui qui livrera les différents flux pour les modes de transport, calculera l'impact environnemental de chaque chemin ainsi que le coût total du service intermodal ;
- ⇒ SIMBA pour effectuer une simulation d'évènements discrets du réseau de navigation intérieure ;
- ⇒ LAMBIT qui supporte les analyses de localisation pour les terminaux intermodaux belges (Macharis & al., 2011, p171).

NODUS a eu pour rôle de générer les inputs pour le «p-hub median problem ». Grâce à cela, ce dernier a pu être intégré dans un autre logiciel (cplex) afin de déterminer les localisations optimales qui pouvaient être ouvertes ou ajoutées. Ce type de formulation a été préconisé par les auteurs car ceux-ci considèrent qu'elle prend en compte les coûts liés au préacheminement, c'est-à-dire des coûts supplémentaires pouvant être liés à de la collecte, ou au post-acheminement correspondant à des coûts supplémentaires dus à de la distribution (Limbourg, 2007, p143).

- Résultats

Au travers de la table 3, nous pouvons voir qu'une localisation optimale a été trouvée sur le canal Nimy-Blaton-Péronnes. Les résultats qui en ressortent sont que l'utilisation de ce nouvel emplacement va permettre d'augmenter la répartition modale du transport intermodal de 2,87% (en tonnes). De plus, l'information essentielle à ressortir de cette étude est que le coût général diminue de 0,05% avec ce nouveau terminal. Comme les auteurs le mentionnent, cette diminution peut être vue comme maigre mais si on regarde plus loin, on peut constater qu'il s'agit d'un transfert de millions de tonnes de la voie routière à la voie d'eau, ce qui représente une évolution pour le développement durable du système de transport (Macharis & al., 2011, P175).

Mode	Relative différence
Tons	
Road	-0,07%
Rail	-0,18%
Water	-0,09%
Intermodal	+2,87%
Tons.km	
Road	-0,02%
Rail	-0,10%
Water	+0,78%
Generalised cost	-0,05%

Table 3 : présentation des résultats pour la localisation optimale

(Macharis & al, 2011, p175)

Cette étude a été effectuée à la suite de ce qu'avait déjà publié Sabine Limbourg (2007) quelques années plus tôt. L'avantage de cette technique était donc de pouvoir diminuer les coûts généraux, ce qui a permis d'offrir une meilleure répartition modale sur le réseau. Lors de son étude, elle avait comparé les coûts généraux de la situation initiale et ceux après l'ajout d'un emplacement dit « optimal », et ceux-ci avaient diminué de 2%, ce qui était donc meilleur que la situation existante. Cependant, une solution optimale présentée par l'auteure améliorait le résultat de 2,4% (Limbourg S., 2007, p157).

La discussion de cette étude n'était pas tant liée au fait de pouvoir trouver un nouvel emplacement optimal, même si cela permet d'ajouter un point positif à NODUS en montrant

d'autres applications de celui-ci, mais elle permettait de soulever la complémentarité que le logiciel peut avoir avec un cas sur une étude d'affectation. En effet, on pourrait calculer l'impact de l'arrivée de ce nouvel emplacement dit « optimal » sur l'affectation sur le réseau, afin de voir si celui-ci amène, ou non, à de meilleurs résultats.

A titre d'exemple, une autre étude a été publiée récemment et se basait sur la même logique que celle présentée plus haut. Dans celle-ci, NODUS a été utilisé pour générer des données en output qui serviront d'input pour un modèle économétrique avec pour données de base : une matrice de demande provenant d'ETISPlus pour des régions NUTS2 & NUTS3¹ (Jourquin & al., 2019). Il a donc été utilisé pour calculer les coûts liés aux différentes opérations dans le transport, tout en intégrant également des coûts pouvant être liés à l'essence, la maintenance ou encore l'assurance. Avant que ces variables soient injectées dans le modèle économétrique de Logit conditionnelle, certaines d'entre elles, à savoir le cout de transport et le temps de transit, ont subi une transformation cox-box qui a pour but d'offrir une distribution normale des données & maximiser la probabilité du modèle (Box and Cox, cité dans Jourquin & al, 2019). Ces données ont été également utilisées afin de calibrer le modèle avec pour but de laisser l'occasion à d'autres utilisateurs de s'en servir.

¹ NUTS 2(nomenclature des unités territoriales statistiques) représente une région de 800.000 à 3.000.000 d'habitants alors que NUTS 3 correspond à une région 150.000 à 800.000 habitants (Geoconfluences, 2010).

3.4. Forces et faiblesses de chaque modèle

Forces	Faiblesses
STAN	
• Base solide pour NODUS ; • Modèle flexible par rapport aux mouvements intermodaux ; • Représentations bien détaillées de l'infrastructure de transport, des installations et des services ; • Prise en compte de la congestion.	• N'accepte que les changements de mode au niveau des nœuds de transport ; • Planification stratégique qui ne prend pas en compte les acteurs de manière directe ; • Plus efficace pour le transport à moindre cout ; • Modèle se focalisant uniquement sur le transport ferroviaire et terrestre.
TRANS-TOOLS 3	
• Prise en compte de la demande de transport et de passagers ; • Peut être utilisable pour tous les modes de transport ; • Certains choix de firmes peuvent être inclus ; • Fait la distinction entre les produits transportés ; • Permet de calculer certains niveaux (économiques ou écologiques).	• Peut traiter la demande de transport de marchandises et de passagers ; • Nécessite beaucoup de données en input ; • Ne fait pas la distinction entre les modes de tractation.
NODUS	
• S'inspirant des forces de chaque autre modèle ; • Prend en compte les modes de tractation ; • Continue de se développer à l'heure actuelle ; • Complémentaire à d'autres modèles ; • A permis de développer différents modèles pour différentes études.	• Prise en compte d'hypothèses ; • Beaucoup de données en input.

STAN, un modèle utilisé dans le cadre des planifications stratégiques, possède différentes forces dont l'une est qu'il possédait une base et une analyse suffisamment solide que pour permettre à NODUS de se développer. Nous avons constaté que ce modèle faisait preuve d'une certaine flexibilité car il peut être aussi bien utilisé pour transporter un seul ou plusieurs produits, les études de cas au Brésil et en Finlande en sont la preuve. A l'époque, ces résultats s'avéraient prometteurs et soulevaient déjà certaines problématiques à améliorer à l'image de l'importance de prendre en compte les contraintes de capacité. Cependant, ce modèle présente certaines faiblesses telles que le fait qu'il soit consacré à la planification stratégique, ce qui signifie que les expéditeurs et les transporteurs ne sont pas directement pris en compte, leurs choix sont intégrés dans la matrice d'origine-destination. On voit également que ce modèle, présenté comme tel, ne peut être utilisable à notre époque car il ne modélise que le transport ferroviaire ou routier alors que les transports aériens et par voie d'eau sont des solutions qui peuvent répondre à certaines problématiques, comme les longs trajets ou la recherche du coût minimum en effectuant des économies d'échelle. En réalité, il est difficile d'imaginer qu'un modèle ne prenant en compte que le transport ferroviaire et routier puisse être utilisé d'un point de vue international, et de manière optimale. En effet, la combinaison de certains modes de transport pourrait donner lieu à des économies, que ce soit au niveau du temps ou du coût, comme nous l'avons aperçu dans NODUS.

Le modèle TRANS-TOOLS 3 fait également preuve de flexibilité en offrant la possibilité de prendre en compte le transport marchandises ainsi que celui de passagers. Cependant, cette force peut être également vue comme une faiblesse car certains paramètres pourraient être considérés comme biaisés, car non-applicables pour les deux types de transport. Cependant, on peut considérer ce modèle comme étant assez complet car il peut considérer tous les types de transports et, surtout, il utilise la base de données ETIS PLUS, à l'instar de NODUS, qui est un projet qui a été finalisé en 2012 et qui a été élaboré par plus de 18 consultants en transport provenant de 11 pays différents (Boland S., 2018, p44). Il présente également d'autres forces car nous avons vu qu'il peut prendre en compte certains choix de firmes mais aussi les différents types de produits qui sont transportés car, comme nous l'avons vu au début de ce mémoire, les choix de route ne seront pas les mêmes si on transporte des produits périssables ou non périssables. La dernière étape de ce modèle nous a indiqué qu'il était en mesure de calculer certains niveaux, que ce soit des niveaux économiques ou écologiques, ce qui offrira la possibilité à son utilisateur de calculer ses différents impacts. Cependant, en plus celle énoncée au début, ce modèle présente également d'autres faiblesses comme la nécessité d'avoir une grosse base de données en input ou encore le fait de ne pas pouvoir distinguer les différents

modes de tractation. En effet, à l'inverse de NODUS, TRANS-TOOLS 3 ne peut différencier pas un train électrique d'un train diesel alors que l'impact économique et écologique de ces deux types de tractations ne seront pas les mêmes.

Enfin, Nodus peut être vu comme un mélange des deux modèles car celui-ci contient certaines fonctionnalités comprises dans les deux premiers cités. Sa modélisation en réseaux virtuels est une particularité venant de STAN et la possibilité de calculer des niveaux de services est une option que l'on retrouve dans TRANS-TOOLS 3. Il présente également l'avantage, contrairement à ses deux « concurrents », de pouvoir calibrer le modèle en permettant à l'utilisateur d'ajuster certains paramètres. Par exemple, l'utilisation d'une fonction AVGLOAD qui permet de définir la quantité moyenne qu'un certain type de véhicule peut transporter. De plus, ce logiciel a été utilisé pour de nombreuses études au cours de ce millénaire telle que la thèse de Jeremy Piotte (2013) qui s'est servi du logiciel NODUS pour développer un modèle d'affectation semi-dynamique, dont nous parlerons en toute fin de mémoire, ou encore un tas d'études publiées par le professeur Bart Jourquin & ses confrères au cours de ces différentes années. NODUS se différencie de ses concurrents grâce à une codification spécifique du nœud virtuel, ce qui est un des plus gros avantages de logiciel par rapport aux autres tels que STAN, son prédécesseur (Limbourg S., 2007, p80). Cependant, comme tout modèle, celui-ci présente certaines faiblesses comme le fait que certaines données qui sont soumises à des hypothèses car le comportement personnel de chaque acteur n'est pas pris en compte. Par exemple, une étude a été réalisée par le passé permettant de calculer l'impact d'une loi en suisse, interdisant le passage de camions de plus 40 tonnes sur son réseau de routes (Jourquin & al., 1997, pp11-12). Lors de cette étude, certaines hypothèses ont dû être prises en compte comme celle qui considère que l'expéditeur minimise ses propres coûts généraux, ce sont des informations qui ne sont pas calculées/prises en compte par ces logiciels. C'est une des raisons pour lesquelles les modèles multi-agents ont vu le jour. La deuxième faiblesse, qui est commune à beaucoup de modèles, est que beaucoup de données sont nécessaires en input. En effet, au plus on voudra se rapprocher d'un modèle optimal, au plus celui-ci nécessitera des données pour prendre le maximum de facteurs/d'acteurs en compte.

4. Les modèles dynamiques

La deuxième catégorie est celle relative aux « modèles dynamiques ». Au contraire de la première, ceux-ci prennent en compte l'évolution du trafic (Limbourg, 2007, p79). On peut donc dire que ce type de modèle fonctionne de manière continue et permet de prendre en compte certains paramètres tels que la congestion aux heures de pointe. Ces modèles peuvent être des modèles de micro-simulation ou des modèles multi-agents, comme MATSim qui sera le modèle analysé dans cette section.

4.1. MATSim

Le projet MATSim (Multi-Agent Transportation Simulation) a été développé, notamment, par Kai Nagel en 2005 (Sobieraj J., 2018, p36). Celui-ci est considéré comme une suite du projet TRANSIMS, développé lui aussi par cet auteur. Ce dernier était adapté principalement au transport de passagers mais il représente une base essentielle pour le développement de MATSim.

Le modèle TRANSIMS (1995) est constitué de quatre modules différents qui sont : la génération de la population, la génération de planification d'activité, le choix modal et de trajet et la micro-simulation du trafic (Piotte J., 2013, p109). Le principe général est une simulation qui va avoir lieu sous l'hypothèse que les coûts de transports sont en flux libre sur le réseau et, par après, seront recalculés sur chaque arc de manière itérative, en laissant à chacun la possibilité de modifier la décision sur base des résultats obtenus. Cette méthode est beaucoup plus détaillée dans le papier rédigé par Nagel K. & Rickert M. (2001). Cette introduction va nous permettre d'enchaîner sur l'explication du modèle MATSim afin de voir les améliorations qui y ont été apportées dans un premier temps et, dans un deuxième temps, voir comment celui-ci peut être applicable au transport de marchandises.

4.1.1. Description du modèle

Le fonctionnement de MATSim est représenté ci-dessous par la figure 11.

- ⇒ Premièrement, la demande initiale est initialisée sur base des données reçues par le système. Durant chaque itération, effectuée sur MOBSim (mobility simulation), chaque agent pourra optimiser sa demande en y incluant ses attentes.
- ⇒ Deuxièmement, chaque chemin/scénario reçoit un certain score qui permet d'évaluer la performance de celui-ci dans la réalité. Ce score est calculé selon une fonction d'utilité économétrique qui sera détaillée ci-dessous avec pour principe qu'au plus un score est bas, au moins un scénario sera intéressant pour l'agent en question.

⇒ Troisièmement, le processus de planification est enclenché. Celui-ci comporte différentes situations qui sont que :

- Si l'agent possède trop de scénarios, selon des paramètres établis, ceux possédant le score le plus bas seront supprimés. On parlera dans ce cas de mauvais scénario ;
- L'agent peut reprendre un ancien scénario, le calculer et réitérer ce dernier. Cette étape, aussi définie comme « innovation », constitue ce que les auteurs appellent un « bon scénario ».
- Choix d'un scénario (Horni & al., 2016, p23).

Les notions de « bon » et « mauvais » scénario sont évidemment propres à chacun et ne sont aucunement basées sur des caractéristiques générales. Un scénario qui est considéré comme bon pour l'agent x, ne le sera pas forcément par l'agent y car les attentes et les caractéristiques ne sont pas les mêmes.

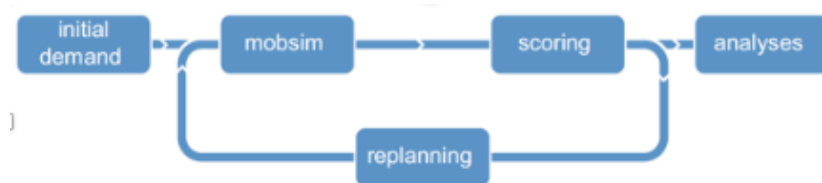


Figure 11 : étapes de MATSim

(Horni & al., 2016, p23)

MATSim se base sur la théorie de l'algorithme co-évolutionnaire qui est défini de la manière suivant par Popovici & al (2012) : « un algorithme co-évolutionnaire tente d'exploiter les notions darwiniennes d'hérédité et de survie des plus aptes à des fins de simulation ou de résolution de problèmes. Pour le dire simplement, une représentation est choisie pour coder certains aspects des solutions potentielles à un problème chez les individus [...]. Avec un peu de chance, l'itération de ces étapes conduira éventuellement à des solutions de haute qualité à un problème, si la résolution de problèmes est le but; ou à un comportement système intéressant ou réaliste ».

Le logiciel représente la population comme des scénarios alors que les êtres humains remplacent les espèces. La figure 12 représente cette situation qui a pour objectif d'atteindre un équilibre stochastique individuel, avec une optimisation basée sur le score individuel et non par rapport à une généralisation des cas (Horni & al., 2016, p24).

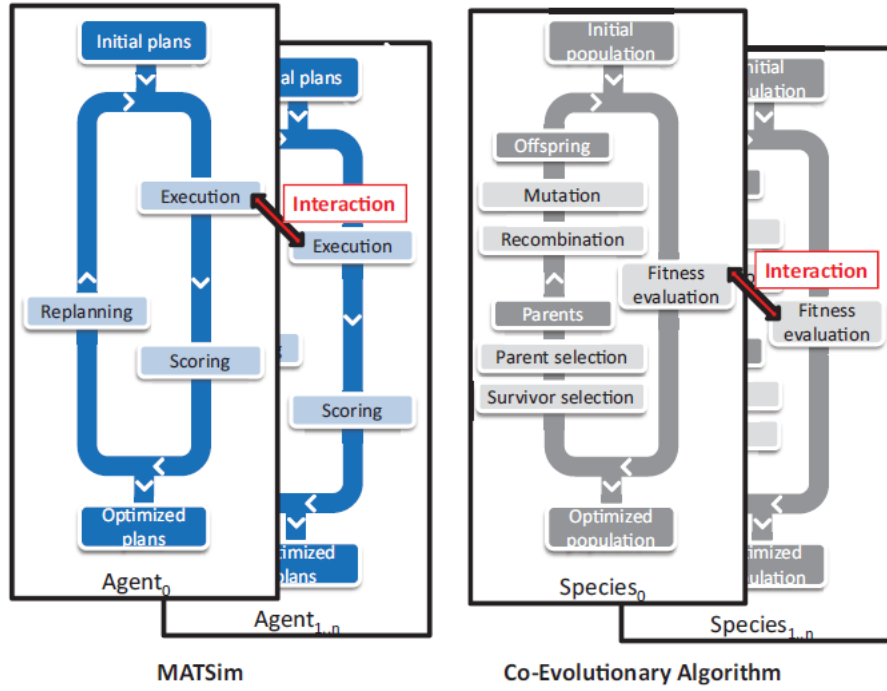


Figure 12 : schéma de MATSim en comparaison avec l'algorithme co-évolutionnaire

(Horni & al 2016, p24)

Comment déterminer le score pour chaque scénario ?

Afin qu'un agent choisisse le meilleur scénario, celui-ci se verra attribuer un score basé sur une fonction d'utilité économétrique, comme discuté précédemment, qui se définit comme suit :

$$S_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q} (A) + \sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)} (B)$$

$\sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q}$ représente la somme de toutes les fonctions d'utilité pour chaque activité alors que $\sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)}$ représente la somme de toutes les fonctions de (dés)utilités de chaque voyage, avec « N » qui représente le nombre d'activités et « q » le trajet dépendant de l'activité (Horni & al., 2016, p24).

Où :

$$S_{act,q} = S_{dur,q} + S_{wait,q} + S_{late.ar,q} + S_{early.dp,q} + S_{short.dur,q} (A)$$

1. $S_{dur,q}$ est la fonction d'utilité liée au fait d'effectuer une activité q et qui est représenté comme suit :

$$S_{dur,q} = \beta_{dur} * t_{typ,q} * \ln\left(\frac{t_{dur,q}}{t_{0,q}}\right)$$

β_{dur} : l'utilité marginale de la durée de l'activité q ;

$t_{typ,q}$: le moment auquel l'activité q peut commencer ;

$t_{dur,q}$: le temps pendant lequel l'activité q a été effectuée ;

$t_{0,q}$: le temps lorsque l'utilité devient positive (Horni & al., 2016, p25).

2. $S_{wait,q}$ est le temps d'attente durant l'exécution de l'activité q. Par exemple, le temps qu'un chauffeur de camion attendra devant un dépôt afin d'effectuer un chargement/déchargement. Ce paramètre se définit comme suit :

$$S_{wait,q} = \beta_{wait} * t_{wait,q}$$

β_{wait} : l'utilité marginale du temps d'attente durant l'activité q;

$t_{wait,q}$: le temps d'attente durant l'activité q (Horni & al., 2016, p25).

3. $S_{late.ar,q}$ est la fonction d'utilité représentant la pénalité applicable en cas de retard durant l'activité. L'expression est représentée de la manière suivante :

$$S_{late.ar,q} = \begin{cases} \beta_{late.ar} * (t_{start,q} - t_{latest.ar,q}) & \text{if } t_{start,q} > t_{latest.ar,q} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$\beta_{late.ar}$: l'utilité marginale d'un retard dans l'activité q ;

$t_{start,q}$: le moment où l'activité q commence ;

$t_{latest.ar,q}$: l'heure maximum à laquelle l'activité q peut commencer sans qu'il y ait de pénalité (Horni & al., 2016, p25).

4. $S_{early.dp,q}$ est la fonction d'utilité représentant la pénalité applicable si on termine l'activité q après l'heure initialement prévue. Elle est représentée par la fonction suivante :

$$S_{early.dp,q} = \begin{cases} \beta_{early.dp} * (t_{end,q} - t_{early.dp,q}) & \text{if } t_{end,q} > t_{early.dp,q} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$\beta_{early.dp}$: l'utilité marginale d'un départ en avance durant l'activité q ;

$t_{end,q}$: le moment où l'activité q se termine

$t_{early.dp,q}$: l'heure minimum à laquelle l'activité q peut se finir (Horni & al., 2016, p25).

5. $S_{short.dur,q}$ est la fonction d'utilité qui représente une pénalité si l'activité q est trop courte. On pourrait la voir comme une pénalité due à une mauvaise prévision car supposons qu'un chauffeur ait pris 10h pour effectuer un trajet, alors que 12h avaient été prévues, celui-ci représentera un cout supplémentaire de 2h qui aurait pu être évité. Elle est représentée de la manière suivante :

$$S_{short.dur,q} = \begin{matrix} \beta_{short.dur} * (t_{short.dur,q} - t_{dur,q}) & \text{if } t_{short.dur,q} > t_{dur,q} \\ 0 & \text{else} \end{matrix}$$

$\beta_{short.dur}$: l'utilité marginale d'une activité q trop courte ;

$t_{short.dur,q}$: le temps le plus court pour une activité q ;

$t_{dur,q}$: le temps pendant lequel l'activité q a été effectuée (Horni & al., 2016, p25).

Où :

$$S_{trav,q} = C_{mode(q)} + \beta_{trav.mode(q)} * t_{trav,q} + \beta_m * \Delta m_q + (\beta_{d.mode(q)} + \beta_m * \gamma d.mode(q)) * d_{trav,q} + \beta_{transfer} * x_{transfer,q} \text{ (B)}$$

$C_{mode(q)}$: une constante spécifique à un mode ;

$\beta_{trav.mode(q)}$: représente l'utilité marginale direct du temps passé à voyager avec un mode ;

$t_{trav,q}$: le temps de trajet entre deux emplacements d'activité q et q+1 ;

β_m : l'utilité marginale de l'argent ;

Δm_q : représente une différence dans le budget dû à, par exemple, un changement de prix ;

$\beta_{d.mode(q)}$: l'utilité marginale de la distance ;

$\gamma d.mode(q)$: le taux de distance monétaire spécifique au mode ;

$d_{trav,q}$: la distance parcouru entre deux emplacements d'activité q et q+1 ;

$\beta_{transfer}$: la pénalité des transferts par transport public ;

$x_{transfer,q}$: = 1 si un transfert a eu lieu entre l' étape actuelle et l'ancienne
= 0 sinon (Horni & al., 2016, p25).

4.1.2. Étude de cas dans la réalité

Cette étude de cas, réalisée par Schroeder & al (2012), considère les véhicules de fret comme des agents non-autonomes. En effet, ceux-ci sont sujets à des décisions logistiques qui sont prises par des opérateurs dans le but de servir leurs intérêts économiques. Les décisions peuvent être relatives à la taille du lot, à la recherche du bon parcours, au choix du véhicule ou encore, à de la planification des différentes routes/circuits (Horni & al., 2016, p156). Dans ce cas-ci, les auteurs ne prennent en compte que les décisions de deux agents, à savoir les prestataires de services de transport (PST) et le transporteur.

Dans la théorie, il existe deux types de modèles micro : les premiers sont ceux qui considèrent les flux de matières premières, qui peuvent être développés dans un environnement inter-régional alors que les seconds sont ceux qui se basent sur les problèmes de tournées, qui sont plus applicables pour du transport en agglomération (De Jong & Ben-Akiva, 2007). Ces différents modèles ne prennent pas en compte certaines décisions essentielles telles que la taille de l'environnement, la fréquence de livraison ou la location du dépôt. De plus, le modèle micro se basant sur le problème des tournées ne prend pas en compte le flux de matières premières. C'est pourquoi, dans cette étude de cas, l'agent PST est un lien entre l'approche des flux de matières premières et le problème des tournées (Schroeder & al., 2012, p650).

Le rôle de **l'agent PST** est défini par son contrat qui contient le type et la quantité de bien à envoyer, ainsi que l'origine/destination et le prix que l'expéditeur devra payer pour le service. Il va donc créer une chaîne de transport et attribuera un transporteur pour chaque étape sur celle-ci. Il est important de noter qu'une étape commence au moment où la marchandise est « prise » et se termine lorsque celle-ci arrive à destination. A l'image de ce que nous avons déjà décrit précédemment, le transport intermodal présente certains bénéfices liés à la réduction du coût du temps de transport, ce qui signifie que les auteurs autorisent également cette option dans l'étude de cas et que, de ce fait, une chaîne de transport peut contenir différentes étapes. Par exemple, on pourrait considérer une chaîne de transport où une des étapes s'effectue par voie ferroviaire alors que les autres s'effectuent par voie routière (Schroeder & al., 2012, p653). Le rôle de **l'agent transporteur** est défini par son contrat qui est assez similaire à celui de l'agent PST, ce qui est normal étant donné que l'agent choisit son transporteur. Les décisions que prend le transporteur sont relatives au choix du mode ainsi que l'acheminement et la planification des véhicules. Celui-ci possède un ensemble de véhicules avec un horaire pour chaque tournée, c'est-à-dire le moment où la marchandise sera prise en charge, l'heure d'arrivée chez le client ainsi que la route choisie (Schroeder & al., 2012, p654).

Schroeder & al. (2012) ont décidé de donner deux rôles différents à chacun des agents afin de complexifier cette structure afin qu'elle colle un maximum à la réalité.

- Simulation

Elle se fera donc en cinq étapes, conformément à ce qui a été décrit précédemment, mais en prenant en compte le transport de marchandises et non le transport de passagers

- a. *Initialisation* : un réseau de routes sera créé où l'on trouvera les agents PST avec leurs points de transbordement ou les transporteurs avec leurs dépôts et leurs flottes de véhicules ;
- b. *Construction d'un scénario pour chaque agent* : l'agent PST va créer une chaîne de transport qui convient au contrat qu'il a reçu, il attribuera un transport à celle-ci. Ce dernier créera un horaire pour chaque véhicule qu'il a à disposition ;
- c. *Implémentation dans MOBSim* ;
- d. *Calcul du score* : l'agent PST calculera son score en additionnant les frais qu'il doit payer au transport et le coût d'opportunité dû à des retards, par exemple. Le transporteur calculera son coût en additionnant les coûts des distances pour chaque véhicule engagé et des coûts fixes individuels ;
- e. *Amélioration par les agents* : L'agent PST pourrait attribuer d'autres chauffeurs sur certaines livraisons alors que le transporteur pourrait, par exemple, interchanger les marchandises et les véhicules (Schroeder & al., 2012, pp654-655).

La congestion ainsi que les autres perturbations sont incluses dans les scénarios du transporteur. En effet, on considère que ces paramètres sont présents lorsque celui-ci fait face à des coûts plus élevés lors de la surutilisation d'un véhicule ou lorsqu'il reçoit une pénalité due à un retard.

- Analyse du scénario

Le scénario illustré dans la figure 13 ci-dessous présente différentes caractéristiques :

- 64 cases représentant 64 zones ;
- Zone d'un kilomètre carré ;
- 1000 véhicules/heure ;
- Vitesse autorisée de 50km/h ;
- 80 km, avec une vitesse autorisée de 100km/h, entre l'entrée de la ville et l'usine (Schroeder & al., 2012, p655).

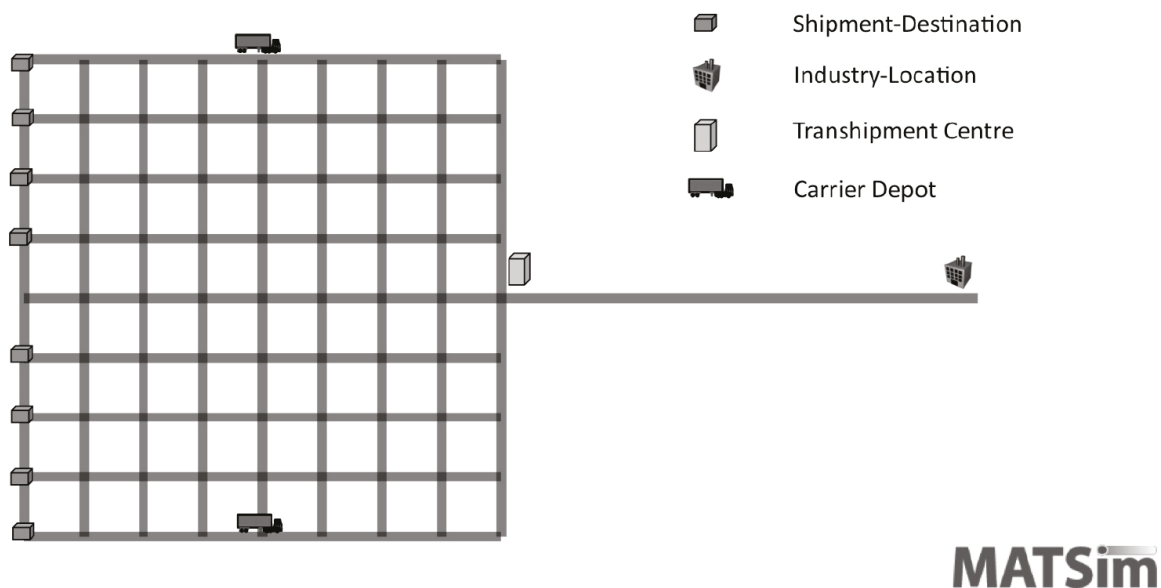


Figure 13 : schéma du scénario

(Schroeder & al., 2012, p655)

Il y a un seul agent **PST** qui doit assurer 8 livraisons, de cinq unités chacune, en partance de l'usine (à l'extrême droite sur la figure 13) et à destination de chaque point à l'extrême gauche. Le PST peut avoir recours à son centre de transbordement à l'entrée de la ville mais cela n'est pas une obligation. Celui-ci connaît également les transporteurs et leurs caractéristiques (Schroeder & al., 2012, p656).

Quant aux **transporteurs**, on en compte quatre avec deux se situant au nord et deux au sud. Au nord, il y a un transporteur léger et un transporteur moyen, qui peuvent transporter respectivement 10 & 20 unités maximum. Au Sud, il y a un transporteur léger et un transporteur lourd qui peuvent transporter respectivement 10 & 40 unités maximum. Les auteurs ont considéré que les coûts des transporteurs se limiteraient à ceux relatifs à la distance (voir table 4 ci-dessous). Le modèle a tourné 10 fois et a effectué 50 itérations au total. Les détails de chaque relaxation pour chaque cas se trouvent en Annexe 5.

Cost type	
Cost per km	1[€]
Cost per transshipment	5[€]
City toll	10[€]
Simulation	
#Itération	50
#Model runs	10

Table 4 : tableau des différents coûts

(Schroeder & al., 2012, p656)

Les différents cas qui seront analysés au travers de cette étude sont :

- Cas 1 : Une livraison à la fois ;
- Cas 2 : Planification en fonction du coût le plus bas ;
- Cas 3 : Planification en fonction du coût le plus bas mais les véhicules lourds sont interdits en ville ;
- Cas 4 : Planification en fonction du coût le plus bas mais les véhicules lourds sont interdits en ville & les véhicules moyens paient une taxe à l'entrée de la ville à hauteur de 10 euros/jour (Schroeder & al., 2012, p656)

- Analyse des résultats

Les résultats présentés ci-dessous dans la table 5 sont basés sur les différentes relaxations effectuées dans MATSim. Les deux meilleurs résultats (en nombre de km total) sont mis en avant. Il est également précisé si le centre de transbordement est sollicité.

Cases	Carrier 1	Carrier 2	Carrier 3	Carrier 4	Total	Use LC
Case 1	184,200	0	366,400	903,000	1,453,600	no
	366,400	184,200	184,200	720,800	1,455,600	no
Case 2	0	0	0	206,200	206,200	no
	0	0	0	206,200	206,200	no
Case 3	0	0	62,000	180,200	242,200	yes
	0	0	62,000	180,200	242,200	yes
Case 4	54,000	0	36,000	180,200	270,200	yes
	72,000	28,000	0	180,200	280,200	yes

Table 5 : analyse des résultats (en km) par cas et par transporteur

(Schroeder & al., 2012, p656)

Ce que l'on peut constater c'est que le premier cas, qui semblait déjà peu réel, est à exclure de par son nombre important de kilomètres. Le meilleur résultat est celui concernant le deuxième cas où on attribue le chargement total au quatrième camion qui possède la capacité suffisante pour tout prendre en charge. Cependant, cela ne sera pas toujours le cas dans la réalité, c'est pourquoi les auteurs ont aussi considérés des cas où les camions lourds ne peuvent être utilisés en villes (cas 3) et où les camions moyens paient une taxe d'entrée (cas 4). Ce que les résultats nous montrent c'est qu'au plus on se rapproche de la réalité en ajoutant des contraintes, au plus on effectuera de kilomètres et on devra répartir la marchandise dans des véhicules qui ne présentent pas forcément les mêmes avantages. Cependant, si on compare les résultats du deuxième cas (206,2 km) et le moins bon résultat du quatrième (280,2 km), on constate la

présence d'une augmentation de l'ordre de 35,8%. Ce résultat nous montre l'importance d'avoir un modèle complet qui prend en compte le maximum d'acteurs et de facteurs car si on utilise des modèles trop simples, en comparaison avec la réalité, les résultats seront faussés et amèneront à des pertes.

Ce modèle nous permet de calculer des résultats intéressants et de comparer différents scénarios afin de voir lequel est le plus adapté à ce que recherche chaque agent. Dans le cadre d'un transport interurbain, ce modèle s'avère très efficace. Cependant, la quantité de données nécessaires en input est très contraignante au vu de toutes les informations dont le modèle a besoin pour que la fonction « scoring » fonctionne parfaitement.

5. Les modèles LUTI

5.1. ILUTE

La troisième catégorie dont nous parlerons concerne les modèles LUTI (Land Use And Transportation Intégration). Ces modèles prennent en compte l'activité de chaque acteur ainsi que leurs décisions logistiques, ce qui nécessite une prise en compte de nombreux facteurs. Ce sont donc une forme de modèles dynamiques avec, pour particularité supplémentaire, la possibilité d'y intégrer des considérations territoriales ou les externalisations telles que les effets d'agglomération, la pollution ou la congestion (De Lapparent M, 2015). Ces types de modèles se développent grâce au modèle multi-agents ou dit « activity-based ». Dans cette section, nous parlerons des modèles ILUTE & FREMIS.

5.1.1. Les différents acteurs

Nous allons définir brièvement tous les acteurs qui pourraient intervenir dans ce modèle mais cela ne signifie pas que pour chaque cas, tous les acteurs seront utilisés. A titre d'exemple, certaines sociétés peuvent être l'expéditeur et le réceptionnaire.

- *Établissements commerciaux, entreprises et installations*

L'objectif des établissements commerciaux, comme démontré dans l'annexe 6, est de faire du profit en utilisant ses propres ressources pour produire et vendre des matières premières (ou commodité), services commerciaux ou encore fournir des services logistiques à ses clients. Une entreprise quant à elle, est une organisation qui possède ou exploite un ou plusieurs établissements commerciaux. A l'intérieur de celle-ci, dans le cas de la production de différents produits, un établissement commercial pourrait produire une commodité pour un établissement commercial appartenant à la même entreprise. Afin de faciliter le modèle, les liens entre établissements commerciaux appartenant à la même entreprise de production de matières premières ne sont pas pris en compte (Roorda M.J. & al., 2010, p21). Dans le cas d'un service logistique, les relations sont prises en compte car elles peuvent inclure différentes locations.

- *Installations de production de commodité et de service aux entreprises*

Ces deux installations sont considérées comme des ressources internes à l'entreprise (Roorda M.J. & al., 2010, p22). Dans notre situation, les seules décisions qui concernent les installations de production de matières premières sont celles qui amèneront à l'efficacité. Cependant, les décisions concernant les acteurs telles que les vendeurs, les clients ou le transport seront prises par l'établissement commercial.

- *Installations de services logistiques*

Ce sont des services, également considérés comme des ressources internes, qui peuvent être utilisés par l'entreprise dans son propre intérêt ou en tant que prestataire logistique pour une firme externe (Roorda M.J. & al., 2010, pp22-23).

- *Le consommateur final*

5.1.2. Formation des différents contrats

Au sein de ce modèle, trois types de contrats sont développés :

- Les contrats de matières premières qui se forment entre le client et le vendeur afin de déterminer la quantité à envoyer sur base de l'offre et de la demande de chacun, qui est influencée par le prix et différents autres paramètres ;
- Les contrats de services commerciaux qui ressemblent très fort à celui cité précédemment. Cependant, dans celui-ci, on ne fait pas référence à une liste de produits à envoyer mais plutôt à des services, qui ne nécessitent donc pas de transport ;
- Les contrats de services logistiques qui permettent d'identifier les parties prenantes qui s'occuperont de la partie logistique (le client ou le vendeur) ainsi que le mode de transport qui sera préconisé en fonction de différents paramètres (Roorda M.J, 2009, p23).

Dans le cadre de notre mémoire, la partie qui nous intéresse est celle concernant le dernier contrat car il traite de l'affectation des marchandises. Cependant, pour comprendre comment ce dernier est mis en place, il faut s'intéresser à la formation du contrat de matières premières qui est lié. Étant donné que le deuxième contrat est très similaire, nous ne nous intéresserons pas à celui-là.

Les contrats de matières premières & de services logistiques.

Ce type de contrat peut s'avérer utile lorsqu'il s'agit de transférer des matières premières d'un établissement commercial à un autre en considérant que l'un d'entre eux aura le rôle de producteur et de consommateur (Roorda M.J, 2009, p23).

Les auteurs ont développé un modèle d'optimisation qui prend en compte différents paramètres qui peuvent influencer le choix du vendeur et du client. Ce dernier peut être un consommateur final mais également un établissement commercial appartenant à la même entreprise. Ce processus se déroule en cinq étapes :

1. L'offre S_{KAP} et la demande D_{KAP} sont décrites comme suit :

$S_{kap} = f(X_a, P_{kap}^s, P_{ap}^d)$
$D_{kap} = f(X_a, S_{ap})$

Où :

X_a : les caractéristiques de l'établissement commercial (i.e la capacité de production) ;

P_{kap}^s : la fonction de prix définit par un vendeur a, qui vend un produit k pour une période estimée p ;

P_{ap}^d : le vecteur de la fonction de prix qu'un client a va payer pour une période estimée p ;

S_{ap} : le vecteur de prévision de production de matières premières (Roorda M.J & al, 2010, pp23-24).

2. La quantité commandé Q_{kap} par un consommateur a pour subvenir à sa demande est définit grâce à un optimisation du niveau d'inventaire qui se définit comme suit :

$$Q_{kap} = f(C_{kap}, O_{kap}, D_{kap})$$

Où :

C_{kap} : le coût de commande d'un produit k pour le client a dans la période estimée p ;

O_{kap} : le coût de transport d'un produit k pour le client a dans la période estimée p (Roorda M.J. & al., 2010, p24).

3. Le choix du client dépendra de différents facteurs. Premièrement, il choisira son fournisseur s'il respecte les conditions de capacité et de fréquence. Si celles-ci sont remplies, il départagera chacun d'entre eux grâce à la fonction L_{ckab} qui détermine la durée du contrat. Intuitivement, au plus le contrat sera long, au plus les remises sur les produits achetés seront intéressantes pour la partie prenante concernée. De ce fait, le prix du vendeur b, pour un produit k à une période estimée p est déterminé comme suit (Roorda M.J & al, 2010, p24) :

$$P_{kbp}^s = f(L_{ckab}, Q_{kap}, F_{kap})$$

Où :

La fréquence de livraison F_{kap} est définit comme suit (Roorda M.J & al, 2010, p24) :

$$F_{kap} = \frac{D_{kap}}{Q_{kap}}$$

L_{ckab} se définit comme suit :

$$L_{ckab} = f(k, X_a, X_b, P_{kbp}^s(L_{ckab}, Q_{kap}, F_{kap}))$$

$$L_{ckab} \geq \frac{1}{F_{kap}}$$

4. Le choix du client, quant à lui, sera défini par la fonction d'utilité $U_{kap}(b)$ représentée de la manière suivante (Roorda M.J & al, 2010, p24) :

$$U_{kap}(b) = f(X_b, P_{kbp}, C_{kab}) + \varepsilon$$

5. Cette dernière étape sert à déterminer qui s'occupera de la partie logistique. La création d'un contrat de services logistiques a du sens dans le cas où le fournisseur se chargerait de la livraison de la marchandise, si le client ne possède pas sa propre flotte, une flotte adaptée à sa livraison ou si la livraison en interne coûterait trop cher par rapport à une livraison par un fournisseur externe (Roorda M.J. & al., 2010, p26). Le contrat se définit comme suit :

$$U_{lgp}(f) = f(X_f + P_{kfijp}^s) + \varepsilon$$

Où :

X_f : les caractéristiques de l'entreprise de services logistiques ;

P_{kfijp}^s : le prix donné par l'entreprise de services logistiques f pour transporter une matières premières k, d'un point i à un point j, pour une période définie p (Roorda M.J, 2009, p26).

5.1.3. L'affectation

Le modèle d'affectation est schématisé, représenté par la figure 14, est schématisé comme suit :

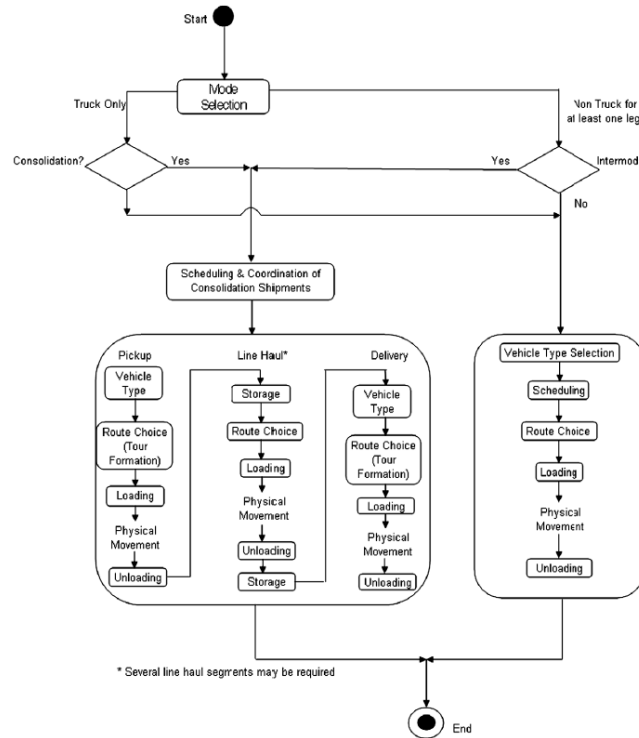


Figure 14 : modèle d'affectation d'ILUTE

(Roorda M.J. & al., 2010, p27)

Le choix du mode de transport aura une conséquence sur la manière dont celui-ci sera affecté, conformément à ce que nous avons déjà vu dans le modèle classique à quatre étages. Si on analyse la figure 14, on voit que le transport uni modal nécessitera moins d'étapes que le transport intermodal/le transport par camion avec consolidation. Ce dernier consiste à optimiser les coûts avec pour objectif de regrouper différents transports, pour différents établissements commerciaux, en un seul. Cela aura non seulement un impact économique pour les vendeurs et pour les clients mais aussi un impact écologique pour la planète car il y a une possibilité de réduire l'empreinte écologique en réduisant les trajets à vide/en augmentant le taux de remplissage d'un camion.

Les modèles d'affectation que nous avons décrit dans la section précédente ne sont pas propices pour une simulation à grande échelle car toutes les données nécessaires (connaissance de tous les coûts, des temps de livraisons) ne seront pas connues par l'entreprise commerciale. Cela aura pour conséquence de ne pas pouvoir donner des résultats optimaux.

Roorda et al. (2010, p28) ont donc décidé d'utiliser une approche qui ressemble à celle utilisée De Jong & Ben Akiva (2007) qui représente l'utilité d'une chaîne logistique pour un envoi spécifique pour des paramètres connus ($C_{hsm} = \sum_z C_{hsz}$) ainsi qu'un terme d'erreur représentant les coûts inconnus ou non observés (ε_{hsm}).

$U_{hs}(m) = -C_{hsm} - \varepsilon_{hsm}$
--

Une entreprise de services logistique h cherchera, quant à elle, à maximiser sa fonction d'utilité.

$Max U_{hm} = \sum_s U_{hsm}$

5.1.4. Conclusion de ce modèle

Ce type de modèle, se basant sur les caractéristiques de chaque agent, nécessite une base de données assez importante qui le rend difficilement applicable d'un point de vue international pour différentes raisons. La principale est que d'un pays à l'autre, les prix pratiqués ne seront pas les mêmes et, étant donné que nous sommes dans un modèle multi-agents, il est essentiel de prendre chaque acteur de la chaîne de manière individuelle, sans faire une moyenne des coûts pour qu'ils soient applicables à chacun.

Ce modèle reste néanmoins fait de manière simplifiée car d'autres paramètres pourraient être pris en compte tels qu'un délai dans lequel la marchandise devrait être préparée et/ou livrée. Ce sont des informations qui n'ont pas été spécifiées dans ce modèle mais qui, dans la réalité, pourraient être introduites et pourraient modifier la manière d'opérer. Celles-ci sont d'autant plus importantes dans le choix du service logistique et dans l'étape d'affectation car si un

produit doit arriver dans un délai plus court, on se concentrera plus sur une méthode d'affectation visant à réduire le temps de transport, au risque d'augmenter les coûts.

C'est également un modèle où l'affectation ne constitue pas seulement une « quatrième étape » car les coûts de service logistiques, qui impacteront l'affectation des marchandises, sont présents à travers toutes les étapes, notamment dans l'élaboration des contrats avec les transporteurs et expéditeurs.

La prise en compte de l'externalisation est un facteur intéressant à l'heure où cette tendance ne cesse de grandir dans les entreprises, ce qui permettra à l'entreprise de se focaliser sur son activité première. De plus, cela nous conduirait à des services logistiques efficaces grâce à des économies d'échelles et à une meilleure planification (Roorda & al., 2009, p30).

5.2. FREMIS

5.2.1. Introduction

Quelques années plus tard, Cavalcante R.A. & Roorda M.J., deux des auteurs ayant développé ILUTE, ont développé un autre modèle dans la lignée de l'ancien, celui-ci se nommant « FREMIS ». Ce dernier est plus utile dans la formation du troisième type de contrat illustré dans la section précédente, à savoir la formation de contrat de services logistiques.

La valeur ajoutée de FREMIS par rapport à ILUTE est :

- ⇒ La possibilité de créer un regroupement d'envois dans le contrat ou, comme on l'appelle dans le secteur économique, « un bundle » ;
- ⇒ Des approches d'apprentissages différentes pour les expéditeurs et les transporteurs sur le marché ;
- ⇒ Des modèles de tarification des transporteurs pour chaque contrat en fonction des lieux d'expédition et de la concurrence sur le marché (Cavalcante R.A. & al, 2013, p 869).

Ce modèle étant considéré comme flexible, les auteurs ont envisagé la possibilité de prendre en compte d'autres aspects tels que les stratégies de tarification des transports. Au travers de cette étude menée à Toronto au Canada, le modèle FREMIS a mis en avant 3 types de modèles différents sur les 5 qu'il possède :

- ⇒ Le regroupement des envois ;
- ⇒ Le prix du transporteur ;
- ⇒ La sélection des transporteurs (Cavalcante R.A. & al, 2013, p 869).

Les modèles se basant sur le choix modal et sur l'externalisation des envois/livraisons se trouvent dans d'anciennes études (Cavalcante R.A. & al, 2009) ou font l'objet d'études futures. De ce fait, dans l'étude qui a été menée, l'hypothèse était que le choix modal était connu et que

les expéditeurs avaient choisi d'externaliser leurs livraisons via un prestataire de services logistiques.

5.2.2. Description du modèle & conclusion

Le modèle est représenté graphiquement de la manière suivante :

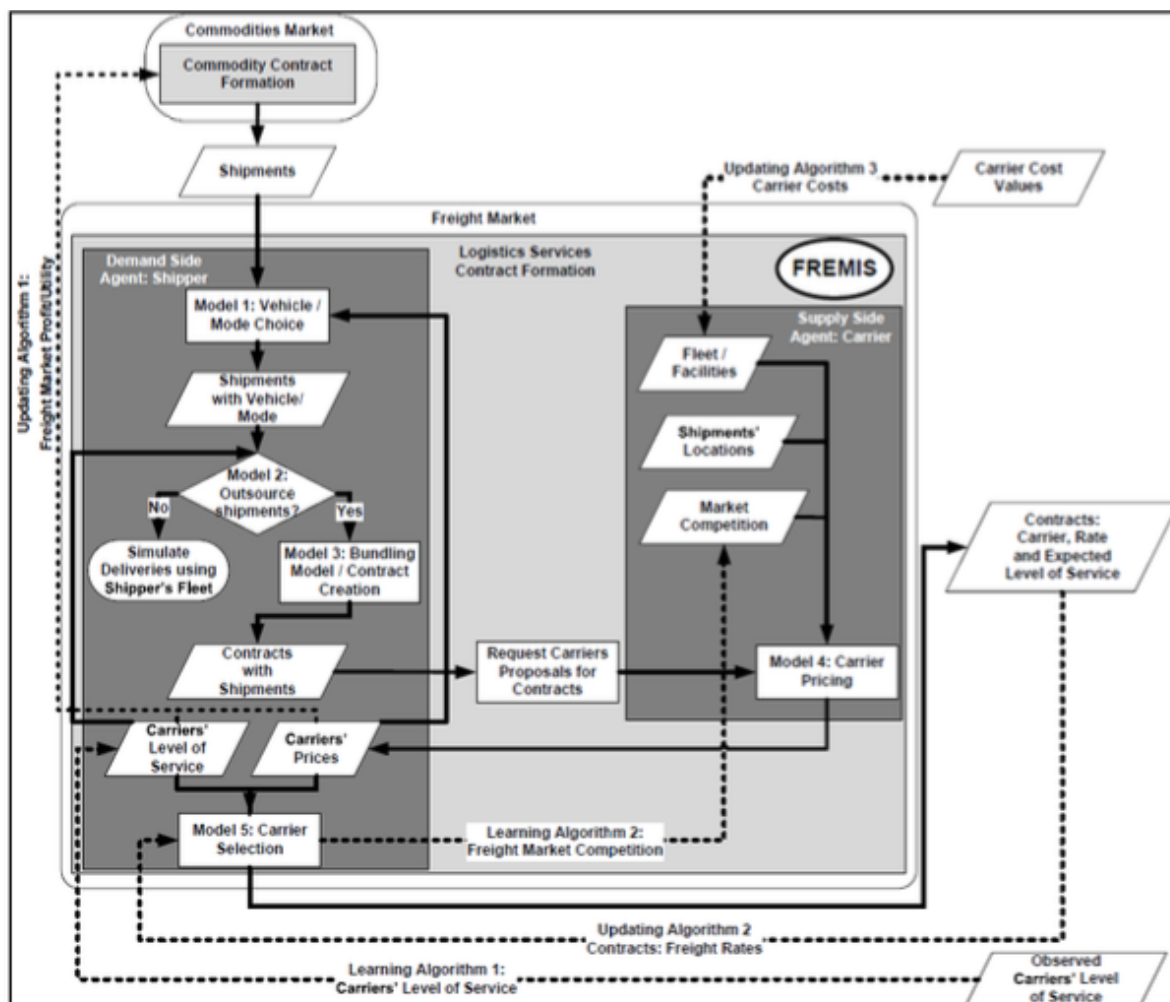


Figure 15 : schématisation de FREMIS

(Cavalcante R.A. & al, 2013, p872)

On peut remarquer que ce modèle est plus élaboré et plus détaillé que le modèle ILUTE mais possède également certaines similitudes. Du côté de la demande, nous avons mentionné précédemment que les deux premiers choix, qui sont le choix modal et l'externalisation, n'étaient pas inclus dans ce modèle. Deux décisions sont prises à ce niveau afin de maximiser le niveau d'utilité, il s'agit du modèle de regroupements des expéditions et le modèle de choix du transporteur.

Le modèle présenté dans le réseau FREMIS est un modèle de probabilité qui met en avant les distances à vide des camions ainsi que la distance entre les locations qui présentent une forte concentration des flux de marchandises (ports, aéroports) (Cavalcante R.A. & al, 2013, p 872).

Il est constitué d'équations assez complexes et ne sera donc pas détaillé dans la suite de ce mémoire.

Lorsque l'on regarde du côté de l'offre, on aperçoit que FREMIS ne se base que sur des contrats à court-terme qui ne reprennent que les propositions de prix des transporteurs. Les deux autres types de décisions se basant sur des contrats à moyen et long-terme, c'est-à-dire le niveau de service et les ressources des transporteurs, sont des ressources extérieures au système (exogènes).

6. Comparaison des modèles de réseaux & méthode semi-dynamique

Les trois dernières sections nous ont permis de nous attarder sur les différents modèles de réseaux qui ont été utilisés ces dernières années, ceux-ci ne représentant pas une liste exhaustive de tous les modèles existants. Nous avons donc pu identifier les forces & faiblesses que présentait chacun d'entre eux, mais surtout nous avons pu voir que ces modèles pouvaient être complémentaires.

La différence majeure que l'on peut mettre en avant pour ces modèles est liée à la granularité, à la finesse de chacun d'eux. En effet, les modèles statiques donnent une image du flux moyen sur une période précise, sans prendre en compte l'évolution de celui-ci, alors que des modèles dynamiques prennent en compte l'évolution des flux sur une journée mais nécessitent plus de données et un temps de calcul important. C'est pourquoi nous observons dans la littérature que, conformément à ce qui a été dit précédemment, ces modèles seraient plus utilisés dans des réseaux intra-urbains avec une matrice origine-destination plus condensée.

- La méthode d'affectation semi-dynamique

C'est pourquoi, en 2013, une thèse (Piotte J, 2013) a été publiée en proposant une alternative à ces méthodes afin de pouvoir tirer profit des avantages. Cette méthode, qui a été nommée semi-dynamique ou d'affectation temporelle, permet de prendre en considération certaines particularités des modèles statiques et dynamiques. L'idée de base était de pouvoir observer le flux routier des véhicules sur une période de temps donnée sur le réseau wallon, cela ne pouvant pas être fait avec les deux modèles pris de manière séparée (Piotte J., 2013, p112). Cette méthode est notamment disponible dans NODUS et se divise, en réalité, en deux sous-méthodes. Dans les deux cas, une matrice origine-destination temporelle est créée en considérant des trajets divisés par période (des périodes d'une heure étaient utilisées dans le cadre de cette recherche).

La première méthode était en réalité une extension de l'algorithme de Dijkstra mais ne présentait pas des résultats intéressants car elle considérait les fonctions de coûts identiques pour des périodes différentes. La deuxième, quant à elle, s'avère plus intéressante étant donné qu'elle considère le changement des coûts associés aux arcs à chaque période/itération et le nouveau positionnement du véhicule à la fin de celle-ci (Piotte J., 2013, p117).

Lors de chaque itération, la matrice origine-destination temporelle est modifiée, en prenant en compte chaque nouvel emplacement du véhicule, si celui-ci n'est pas arrivé à destination. Les grandes étapes de cet algorithme sont :

Pour chaque période p :

1. Calculer les plus courts chemins sur base des coûts de transport de la période courante à l'aide de l'algorithme de Dijkstra ;
2. Pour chaque chemin correspondant à une ligne de matrice $OD(t)$;
 - a. Pour chaque arc, charger celui-ci si le véhicule le traverse pendant la période courante ;
 - b. Sauver la position du véhicule en fin de période. Si celui-ci n'est pas sur un nœud du réseau, créer un nœud temporel (Piotte J., 2013, p116).

On peut observer un exemple concret de cette méthode dans la figure 16 où la partie de gauche représente le début de chaque période alors que celle de droite représente la fin de celle-ci. Il est important de noter que les coûts sont exprimés en minutes et qu'un seul véhicule est affecté par période. Cet exemple nous permet de voir que, par exemple, pour l'affectation du premier véhicule, si l'on avait considéré la première méthode qui se basait sur des coûts ne variant pas, le chemin aurait eu un coût de 160. Cependant, on voit qu'à la deuxième période, les coûts n'étant plus les mêmes, le plus court chemin pour le véhicule 1 engendre un coût de 140 et n'est surtout plus le même chemin qu'initialement. Finalement, on voit qu'en $t=3$, le coût total du plus court chemin est de 150. Cette méthode va donc permettre aux utilisateurs d'avoir des résultats en temps réel qui coïncident au mieux avec la réalité car, comme nous l'avons dit en introduction, la précision des modèles est primordiale car seules les bonnes prévisions amènent à de bonnes décisions et à peu d'erreurs.

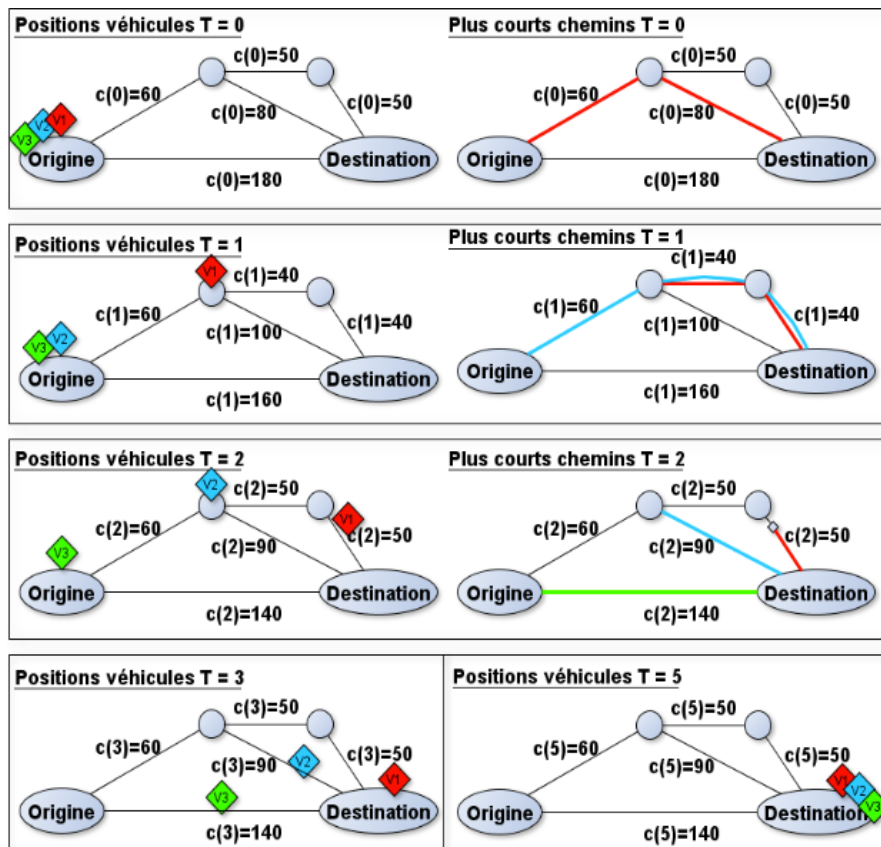


Figure 16: exemple d'évolution du positionnement des véhicules

(Piotte J., 2013, p117)

Le reproche que l'on pourrait donner à cette méthode est de ne pas prendre en compte la perception variable des coûts qu'auraient les utilisateurs (Piotte J., 2103, p118). Néanmoins, avoir la possibilité de représenter les coûts associés au véhicule selon des heures de départ différente, et dans un réseau plus important, représente une belle avancée et une alternative intéressante. Ainsi, on peut donc voir que NODUS fait preuve d'une certaine flexibilité car il présente diverses méthodes d'affectation qui lui permettent d'être performant dans le cadre des modèles statiques mais également d'avoir certaines particularités qui lui permettent de remplir certaines conditions d'un modèle dynamique.

7. Conclusion

Au plus les années passent, au plus les modèles d'affectation pour le transport changent, que ce soit ceux concernant les passagers ou les marchandises. En effet, nous sommes à l'ère du numérique où la digitalisation prend une place importante dans notre société. En plus de cela, nous sommes à une époque où la mondialisation est à son apogée et où le recours à l'e-commerce s'accroît grandement, ce qui a tendance à réduire drastiquement les trajets personnels liés au shopping et à augmenter le commerce international ainsi que la possibilité d'effectuer de la consolidation (Tavasszy, 2019, p3).

Nous avons commencé la rédaction de ce mémoire en énonçant les différentes notions théoriques liées au transport de marchandises afin d'en identifier les tenants et aboutissants. Cela nous a permis de comprendre les raisons pour lesquelles certaines entités politiques investissaient dans ces modèles : celles-ci sont économiques, écologiques ou sociales. Tous ces efforts ont donc pour objectif commun de se développer dans une logique durable. Ensuite, nous nous sommes attardés sur les différentes caractéristiques qui régissaient le transport de marchandises.

Par après, nous avons identifié les quatre étapes du modèle à quatre étages : la génération, la distribution, le choix modal et l'affectation qui est le sujet principal sur lequel s'attarde ce mémoire. Ce modèle est souvent utilisé dans le transport de passagers, mais présente de nombreuses limites pour le transport de marchandises, qui ont été évoquées dans la section prévue à cet effet. Pour n'en citer qu'une seule, le transport de passagers ne doit pas prendre en compte autant d'acteurs/facteurs que le transport de fret, ce qui permet d'avoir des modèles moins élaborés et moins contraignants alors que les modèles de transport de fret se doivent de l'être.

Dans un deuxième temps, nous avons introduit la notion d'« Activity-based » qui, au contraire de la notion « trip-based » identifiée dans le modèle cité précédemment, permet de faire un lien entre chaque activité plutôt que de les calculer de manière séparée. Partant de cette notion, nous avons pu en identifier deux sous-sections : les réseaux virtuels ainsi que les modèles multi-agents.

Dans un troisième temps, nous avons parlé de certains modèles de la vie réelle en les classant en trois catégories différentes :

- Les modèles statiques qui prennent en compte les déplacements sur une longue période sans considérer l'évolution du trafic au cours celle-ci. Dans cette section, nous avons parlé du modèle STAN, qui n'existe plus à l'heure actuelle, mais qui est le logiciel qui a inspiré NODUS. Ce dernier, de par sa diversité dans les méthodes d'affectation qu'il

propose, se révèle très intéressant et efficace pour des calculs d'affectation à une échelle macro. Une explication a également été fournie quant au modèle TRANS-TOOLS 3 ;

- Les modèles dynamiques qui prennent en compte l'évolution du trafic au cours de la période de calcul. Citons MATSim qui, grâce à sa fonction d'utilité qui calcule le score de chaque scénario, permet de calculer les chemins et leur donner à score selon une fonction qui prend en compte les considérations de chaque agent ;
- Les modèles LUTI prenant, quant à eux, les considérations liées à l'aménagement du territoire.

Après avoir développé et présenté quelques études de cas relatives à certains modèles, nous avons pu dresser un bilan et proposer une solution alternative qui a été défendue dans une thèse, et qui est présente dans NODUS, qui est ce que l'on appelle la méthode d'affectation semi-dynamique/temporelle. Cette dernière va permettre de prendre en compte les déplacements de chaque véhicule sur un réseau plus important que ce qu'un modèle dynamique accepterait tout en considérant l'évolution du coût du trafic. L'objectif de ce mémoire n'était pas de faire un classement des meilleurs modèles afin que l'un sorte du lot car nous avons pu voir que chacun des modèles possédait des caractéristiques différentes qui leur permettaient d'être efficaces à certains niveaux.

Cependant, le progrès ne s'arrêtant jamais, il faut penser au futur et réfléchir à ce qui peut encore être amélioré pour optimiser ces méthodes d'affectation, peu importe la catégorie dans laquelle elles se trouvent. La digitalisation représenterait un réel apport dans les nouvelles techniques d'affectation de marchandises, c'est pourquoi une des premières idées est donc de développer les techniques d'information et de communication afin de pouvoir récolter le plus de données possible, dans le but d'optimiser chaque type de transport pour des raisons d'ordre écologiques, sociales ou encore économiques (Tavasszy, 2019, p3). Dans les modèles statiques, beaucoup d'auteurs ont encore recours à des hypothèses dans le but de simplifier leurs modèles ou simplement par manque d'informations, cela ne donne pas lieu à un modèle inutilisable mais, cependant, celui-ci ne sera pas optimal. Cette même problématique peut être associée aux modèles LUTI qui, de par la nécessité de récolter des données qualitatives/quantitatives pour chaque agent, sont encore difficilement modélisables et ne représente pas, à l'heure actuelle, une solution viable.

Aussi, plusieurs auteurs tels que Tavasszy (2019) ou Blanquart (2008) ont mis en avant l'idée d'avoir recours à des transports intelligents, avec pour objectif de favoriser le transport vers des modes plus respectueux de l'environnement (ferroviaire ou maritime) afin de réduire les nuisances sonores pour la population ou d'optimiser l'utilisation de certaines infrastructures. Cependant, ce type de transport ne permet pas des livraisons dites « porte-à-porte », ce qui

signifie qu'il faudrait inclure une modélisation multi-agents, comme nous l'avons découvert et développé avec MATSim, afin que les véhicules autonomes puissent aller jusqu'à un centre de distribution. Une fois que cela est fait, la marchandise serait distribuée sur un ensemble de véhicules non-autonomes qui effectueraient des livraisons « urbaines ».

En conclusion, nous voyons donc que ces modèles d'affectation, ainsi que ceux qui se développeront plus tard, représentent un coût pour l'entreprise, que l'on regarde ça sous un angle monétaire ou temporel, même si les deux sont extrêmement liés dans ce cadre. Cependant, les prévisions et les solutions que ceux-ci peuvent apporter représentent un réel gain économique, écologique et social si ceux-ci sont appliqués correctement. Nous finirons ces quelques lignes en mentionnant la phrase énoncée au départ disant que : « les bonnes décisions se prenaient sur base de bons outils d'aide à la décision possédant, en input, de bonnes prévisions ».

Sources :

Sources littéraires :

- ⇒ Box, G. and Cox, D.,(1964), «An analysis of transformations, Journal of the Royal Statistical Society», Series B, 26, pp 211-252.
- ⇒ Cavalcante, R. A. & Roorda, M. J. (2009), «A Disaggregate Vehicle-Type Discrete Choice Model for Commercial Travel Survey in the Region of Peel». McMaster University, Hamilton, ON, Canada, Translog, 1st Annual International Conference June 17th-18th, 2009.
- ⇒ Harker P.T. (1987), « Predicting intercity freight flows», Utrecht, VNU.
- ⇒ Hart P. E., Nilsson N. J. et Raphael B., 1968, «*A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*», IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 Vol. 2, pp. 100-107.
- ⇒ Kadiyali LR. (2010), « traffic engineering and transport planning».
- ⇒ Le Blanc, L.J., Morlock, E.K. and Pierskalla, W.P. (1975). An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Assignment Problem. *Transportation Research*, vol. 9, no. 5, pp. 309-318.
- ⇒ Ortúzar, S. J. D., & Willumsen, L. G. (1990). *Modelling transport*. (4th ed) Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- ⇒ Quinet E., Vickerman R., 2004, «*Principles of Transport Economics*», Edwar Elgar, Cheltenham,UK.
- ⇒ Tavasszy L., & De Jong G. (2013), “modelling freight transport” (1° ed), Elsevier.

Sources web :

- ⇒ Adler J., Satapathy G., Manikonda V., Bowles V. & Blue B. (2005), “A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance” *Transportation Research Part B Methodological* 39(4): pp297-318 (page consultée le 07-04-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/222919549_A_multi-agent_approach_to_cooperative_traffic_management_and_route_guidance.
- ⇒ Barcelo J., Garcia D. & Perarnau J. (2005), « METHODOLOGICAL NOTES ON COMBINING MACRO, MESO AND MICRO MODELS FOR TRANSPORTATION ANALYSIS » (page consultée le 07-04-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/242154775_METHODOLOGICAL_NOTES_ON_COMBINING_MACRO_MESO_AND_MICRO_MODELS_FOR_TRANSPORTATION_ANALYSIS.
- ⇒ Beuthe M., Jourquin B, Urbain N., Lingemann I. and Ubbels B. (2014), «Climate change impacts on transport on the Rhine and Danube. A multimodal approach», *Transportation*

- Research part D 27, pp6-11 (page consultée le 19-04-2020) [WEB]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920913001442>.
- ⇒ Boland S. (2018), « Freight Demande Forecasting Model », Master Thesis, UCLouvain FUCaM Mons (page consultée le 20-02-2020) [WEB]
<https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/fr/object/thesis%3A14316>.
- ⇒ Cavalcante R.A. & Roorda M.J (2013), « Freight Market Interactions Simulations (FREMIS) : an Agent-base modelling framework », Procedia computer science 19, pp867-873 (page consultée le 27-03-2020) [WEB]
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877050913007242?token=AB908B37CCBFF3536475A25195ED01430D519B61D6AA99DDBFEC9CE1B13C127876F5D2A0E80FCB632CA5D5FC93C5E293>.
- ⇒ Crainic T.G., Florian M. & Larin D. (1997), «STAN- A multiproduct multimode national and regional freight transportation planning system – new developments», IFAC proceedings volumes, volume 30 (8), pp325-329 (page consultée le 20-02-2020) [WEB]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017438444>.
- ⇒ De Bok M., Tavasszy L. (2018), « An empirical Agent-based system for urban goods transport (MASS-GT) », Procedia Computer Science 130, pp126-133 (page consultée le 25-02-2020) [WEB]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918303715>.
- ⇒ De Jong G., Nielsen O.A., Jensen A.F., Thorhauge M., Henriques, Michael, Tanner, Reto, Johnson D., Dekker T., Sowa V., Vierth I., Bates J., Jeppe R. (2016), «Final report on the freight and logistics model. Research and development of the European Transport network model – Transtools version 3» (page consultée le 18-01-2020) [WEB]
[http://www.transportmodel.eu/system/files/TT3%20WP7%20D7.2 freight%20and%20logistics%20model 3.0 Final.pdf](http://www.transportmodel.eu/system/files/TT3%20WP7%20D7.2%20freight%20and%20logistics%20model%203.0%20Final.pdf).
- ⇒ De Jong G., Tavasszy L.A., Vierth I. & Ben-Akiva M. (2012), « Recent developments in national and international freight transport models within Europe», Transportation 40, pp347-371 (page consultée le 10-01-2020) [WEB]
[https://www.researchgate.net/publication/257640422 Recent developments in national and international freight transport models within Europe](https://www.researchgate.net/publication/257640422_Recent_developments_in_national_and_international_freight_transport_models_within_Europe)
- ⇒ de Jong, G., Ben-Akiva, M., (2007), « A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice». Transportation Research Part B: Methodological 41 (9), 950–96 (page consultée le 25-03-2020) [WEB]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261507000549>.
- ⇒ de Jong, G., Gunn, H.F. and Walker, W. (2004) National and international freight transport models: overview and ideas for further development. *Transport Reviews*, 24 (page consultée le 18-01-2020) [WEB]

- [https://www.researchgate.net/publication/33038829 National and International Freight Transport Models An Overview and Ideas for Future Development](https://www.researchgate.net/publication/33038829_National_and_International_Freight_Transport_Models_An_Overview_and_Ideas_for_Future_Development).
- ⇒ De Lapparant M. (2015), « les modèles LUTI : état de l'art, exemples internationaux et effets d'agglomération », Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, TRANSP-OR (page consultée le 21-05-2020) [WEB] https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/3_de_lapparent_site.pdf
- ⇒ Durand A.A (2016), « les Parisiens restent les champions de l'embouteillage », Le Monde (page consultée le 21-03-2020) [WEB] https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2016/03/17/les-parisiens-restent-les-champions-des-embouteillages_4885270_4355770.html.
- ⇒ État de l'environnement Wallon (2018), « Transport de marchandises » (page consultée le 04-05-2020) [WEB] <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/TRANS%202.html>.
- ⇒ Eurostat (2018), « Statistiques sur le transport de marchandises », (page consultée le 18-05-2020) [WEB] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Freight_transport_statistics/fr&direction=next&oldid=393985
- ⇒ Ferber J. (1995), «Le système Multi-agent : vers une intelligence collective», Reading, MA, Addison-Wesley (page consultée le 20-02-2020) [WEB] http://www.lirmm.fr/~ferber/publications/LesSMA_Ferber.pdf.
- ⇒ Florian M. & Crainic T.G. (1989), "Strategic Planning of Freight Transportation in Brazil: Methodology and Applications," Final Report, 5 volumes, Publications #638-642, Centre de recherche sur les transports, Université de Montreal (page consultée le 20-02-2020) [WEB] <https://books.google.be/books?id=qzrMM0hszQC&pg=PA62&lpg=PA62&dq=Strategic+Planning+of+Freight+Transportation+in+Brazil:+Methodology+and+Applications&source=bl&ots=7MrwqOWjN&sig=ACfU3U1vCn3g4Y-Cn9FqWeiFyxNmIRqYYw&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwibi47QkanoAhWB6aQKHZY7B4MQ6AEwBnoECAkQAQ#v=onepage&q=Strategic%20Planning%20of%20Freight%20Transportation%20in%20Brazil%3A%20Methodology%20and%20Applications&f=false>.
- ⇒ Florian M. & Crainic T.G. (1993), «Determining origin-destination matrices and optimal multiproduct flows for freight transportation over multimodal networks», Transportation Research part B, pp351-368 (page consultée le 13-05-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/23527375_Determining_origin-destination_matrices_and_optimal_multiproduct_flows_for_freight_transportation_over_multimodal_networks.

- ⇒ Floyd R.W. (1962), "Algorithm 97: shortest path", Communications of the ACM 5 (6) (1962) 34
- ⇒ France J. et Ghorbani A.A. (2003): « A multiagent system for optimizing urban traffic». Dans IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT 2003), Halifax, Canada, pp. 411–414 (page consultée le 19-01-2020) [WEB] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1241110/>.
- ⇒ Friesz T.L., Gottfried J.A. & Morlok E.K (1986), "A Sequential Shipper-Carrier Network Model for Predicting Freight Flows," *Trans. Sci.* 20 (2) ,pp80-91 (consultée le 10-01-2020) [WEB] <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.20.2.80?journalCode=trsc>
- ⇒ Geoconfluences (2010), « Nomenclatures des unités territoriales statistiques » (page consultée le 02-06-2020) [WEB] <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/nomenclature-des-unites-territoriales-statistiques-nuts>
- ⇒ Guelat J., Florian M. & Crainic T.G. (1990), «A multimode multiproduct network assignment model for strategic planning of freight flows » , *Trans. Sci.* 24,25-39 (Page consultée le 20-02-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/237007491_A_Multimode_Multiproduct_Network_Assignment_Model_for_Strategic_Planning_of_Freight_Flows.
- ⇒ Horni A., Nagel K., Axhausen K.W. (2016), « The Multi-Agent Transportation Simulation MATSim » (page consultée le 31-03-2020) [WEB] <https://www.jstor.org/stable/j.ctv3t5r7p>.
- ⇒ Jourquin B. (2006), « A multi-flow multi-modal assignment procedure applied to the European freight transportation networks» , *Studies in Regional Science* 35, pp929-945 (page consultée le 29-10-12) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/266085601_A_multi-flow_multi-modal_assignment_procedure_applied_to_the_European_freight_transportation_networks.
- ⇒ Jourquin B. (2017), « NODUS Demo project » (Page consultée le 18-04-2020) [WEB] <https://github.com/jourquin/Nodus/blob/master/demo/Demo.pdf>
- ⇒ Jourquin B. & Beuthe M. (1997), « NODUS, a Multi-Modal Geographic Information System Designed for Freight Transport », Conference: 36th meeting of the Western Regional Science Association, Waikoloa, Hawaii (page consultée le 18-04-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/266143907_NODUS_a_Multi-Modal_Geographic_Information_System_Designed_for_Freight_Transport
- ⇒ Jourquin B. & Limbourg S. (2006), « Equilibrium traffic assignment on large virtual networks: implementation issues and limits for multi-modal freight transport », *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 6(3), pp205-228 (page consultée le 29-11-2019) [WEB]

https://www.researchgate.net/publication/242119581_Equilibrium_traffic_assignment_on_large_Virtual_Networks_Implementation_issues_and_limits_for_multi-modal_fr_eight_transport

- ⇒ Jourquin B. & Limbourg S. (2007), « Une procedure d'affectation multi-flux et multimodale appliquée aux réseaux transeuropéens de fret », les cahiers scientifiques du transport n°52, pp9-25 (page consultée le 18-10-2019) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/266088345_UNE_PROCEDURE_D'AFFECTATION_MULTI-FLUX_ET_MULTIMODALE_APPLIQUEE_AUX_RESEAUX_TRANSEUROPEENS_DE_FRET.
- ⇒ Jourquin B. and Beuthe M.(2004), « A decade of freight transport modeling with Nodus: Acquired experiences and future challenges», presented at the World conference of the regional Science Association, Porth Elizabeth, South-Africa, April 14-17, 2004 and at TRALOG 2004, Mølde (Norway).
- ⇒ Jourquin B., Iassinovskia G., Lechien J., Pinna J. (2008), « Lines and services in a strategic multi-modal freight network model : methodology and application », Louvain School of Management (page consultée le 27-04-2020) [WEB] <https://github.com/jourquin/Nodus/blob/master/doc/papers/2008%20-%20ETC%20Conference%20-%20Lines%20and%20services.pdf>
- ⇒ Jourquin B. & Beuthe M. (2019), « Cost, transit time & speed elasticity calculations for the European continental freight transport », Transport policy https://www.researchgate.net/publication/335438211_Cost_transit_time_and_speed_elasticity_calculations_for_the_European_continental_freight_transport.
- ⇒ Kühnel N., Thunig T. & Nagel K. (2018), « Implementing an adaptive traffic signal control algorithm in an agent-based transport simulation», Procedia Computer Science 130, pp 894-899 (page consultée le 09-04-2020) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918304484>.
- ⇒ La mobilité est en nous (2019), « Chiffres clés de l'impact environnemental du transport routier de marchandises » (page consultée le 05-04-2020) [WEB] <https://www.fntr.fr/sites/default/files/2019-10/Chiffres-impact-environnemental-TRM-0619.pdf>
- ⇒ LesEchos (2019) « Comment la logistique réduit son empreinte écologique » (page consultée le 04-05-2019) [WEB] <https://www.lesechos.fr/partenaires/econocom/comment-la-logistique-reduit-son-empreinte-ecologique-1137314>
- ⇒ Limbourg (2007) : « Planification Stratégique de Systèmes de Transport de Marchandises en Europe », PhD Thesis, Facultés Universitaires Catholiques de Mons (page consultée le 19-03-2020) [WEB] https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:5885/datastream/PDF_01/view.

- ⇒ Livet P.A., Phan D., Sanders L (2014), « Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales », *Revue Française de sociologie*, volume 55, pp689-729 (page consultée le 18-03-2020) [WEB] <https://www.cairn.info/revue-francaise-de-sociologie-2014-4-page-689.htm>.
- ⇒ Macharis C., Caris A., Jourquin B. & Pekin E. (2011), « A decision support framework for intermodal transport policy », *European Transport Research Review*, pp167-178 (page consultée le 29-04-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/257787579_A_decision_support_framework_for_intermodal_transport_policy.
- ⇒ Mackie P.J. & Nellthorp J. (2003), « Transports, projects, programmes & policies : Evaluation needs & capabilities » (page consultée le 22-04-2020) [WEB] https://books.google.be/books?id=MIADwAAQBAJ&pg=PT111&lpg=PT111&dq=SCGE+V+S+LUTI+MODEL&source=bl&ots=IU2m-YETU&sig=ACfU3U23X0X3gWYcuXQ3V9MTtZkm3lhoQw&hl=nl&sa=X&ved=2ahUKEwjkv9a4_fvoAhWOLewKHYZIA20Q6AEwDXoECAAsQAQ#v=onepage&q=SCGE%20VS%20LUTI%20MODEL&f=false.
- ⇒ Maia L.C. & Do Couto A.F.(2012), « An innovative freight traffic assignment model for multimodal networks», *Computers in industry*, volume 64 (2) pp121-128 (page consultée le 12-03-2020) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361512001972>.
- ⇒ Mevludin G. (2006), “Agents and multi-agents systems: a short introduction for Power Engineers”, *Electrical Engineering and Computer Science Department University of Liege* (page consultée le 12-03-2020) [WEB] http://www.montefiore.ulg.ac.be/~glavic/MAS-Intro_Tech_report.pdf.
- ⇒ Nagel K & Rickert M. (2001), « Parallel implementation of the TRANSIMS micro-simulation », *Parallel computing*, Volume 27 (12), pp1611-1639 (page consultée le 01-04-2020) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819101001065>
- ⇒ Ozturk O., Patrick J. (2018), « An optimization model for freight transport using urban rail transit», *European Journal of Operational Research*, Telfer School of Management, university of Ottawa (page consultée le 10-12-2019) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717311116>.
- ⇒ Pavon J., Arroyo M., Hassan S. et Sansores C. (2008), « Agent-based modelling and simulation for the analysis of social patterns », *Pattern Recognition Letters*, 29, 1039-1048 (page consultée le 12-03-2020) [WEB] https://www.researchgate.net/publication/222648958_Agent-based_modelling_and_simulation_for_the_analysis_of_social_patterns

- ⇒ Piotte J. (2013), « Modélisation des flux routiers de marchandises, de la génération de la demande par une approche multi-agents à l'affectation temporelle », Thèse de doctorat, Louvain School of Management, Université Catholique de Louvain (page consultée le 19-03-2020) [WEB] <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:126150>.
- ⇒ Planetoscope (2020), « Marchandises transportées par voie maritime dans le monde » (page consultée le 05-05-2020) [WEB] <https://www.planetoscope.com/Mobilite/1835-marchandises-transportees-par-voie-maritime-dans-le-monde.html>
- ⇒ Popovici E., Bucci A., Wiegand R.P., De Jong E.D. (2012), « Coevolutionary principles », Handbook of natural computing, pp987-1033 (page consultée le 01-04-2020) [WEB] <https://www.cs.tufts.edu/comp/150GA/handouts/nchb-main.pdf>.
- ⇒ Roorda M.J., Cavalcante R., McCabe S., Kwan H. (2010), « A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services », Transport Research Part E, pp18-31 (page consultée le 23-03-2020) [WEB] <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1366554509000817?token=68B3DE29BB7F1EB5BE6C5E4B7F465A4AAC0ECA5B47B8A31320FA11161E37CAA6FB58CE843EA76F8D91FBA7B46474811A>.
- ⇒ Schroeder S., Zilske M., Liedtke G., Nagel K. (2012), « Towards a Multi-Agent Logistics and Commercial Transport Model: The Transport Service Provider's View », Volume 39, pp649-663 (page consultée le 01-04-2020) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812006040>.
- ⇒ Sobieraj J. (2018), « méthodes et outils pour le conception de systèmes de transports intelligents coopératifs », thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, école doctoral des sciences et technologies de l'information et de la communication (page consultée le 30-04-2020) [WEB] <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02042591/document>
- ⇒ Tavasszy L. (2019), « Freight modelling for the next big logistics innovations », WCTR 2019, Mumbai.
- ⇒ Toilier F., Gardrat M., Routhier J.L., Bonnaïfous A. (2018), « Freight transport modelling in urban areas : the french case of the freturb models », University of Lyon, France (page consultée le 18-11-2019) [WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X18302748>.
- ⇒ Whitney V. (2019), Activity and trip-based travel models » (page consultée le 07-04-2020) [WEB] <https://medium.com/data-mining-the-city/activity-trip-based-travel-models-e4833571570>.
- ⇒ Willumsen L. (2014), « Role of transport modelling : How to use transport model to assist decision making : assumptions & constraints » (page consultée le 15-05-20) [WEB] <https://www.slideshare.net/Pilo100/transport-modelling-for-managers-2014-willumsen>

- ⇒ Ziemke D., Kaddoura I., Nagel K. (2019), « The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data», Procedia Computer Science 151, pp870-877 (page consultée le 03-04-2020)
[WEB] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919305848>
- ⇒ Zwerts E. (2017), « Activity-based modelling : an overview »