

MODELE DE PLUS COURT CHEMIN MULTIOBJECTIF POUR LE TRANSPORT INTERMODAL AU SEIN DE LA CHAINE LOGISTIQUE VERTE

Marie SAWADOGO

LGIPM
Île du Saulcy
57045 Metz Cedex 01 - France
marie.sawadogo@umail.univ-metz.fr

Didier ANCIAUX

LGIPM
Île du Saulcy
57045 Metz Cedex 01 - France
anciaux@univ-metz.fr

RESUME : *Les impacts du transport sur l'environnement et la société sont indéniables de nos jours. La mondialisation et les prises de consciences environnementales sans cesse croissantes contraignent les autorités gouvernementales et les entreprises à prendre des mesures pour limiter les impacts de leurs activités sur l'environnement et la société. Les entreprises de logistiques et de transport ne sont pas en reste dans cette dynamique, et des recherches sont de plus en plus menées pour mieux comprendre et limiter les impacts émanant de leurs activités. Le transport est connu comme étant une activité économique ayant d'énormes impacts sur l'environnement; l'objectif de notre étude est de développer un système d'aide à la décision au choix d'un chemin dans un système de transport intermodal permettant de réduire ces impacts. Le coût et le temps de transport ne sont donc plus les seuls critères de choix d'un chemin ; ainsi nous prenons en compte également les critères environnementaux et sociétaux. Le modèle ici présenté tente de reproduire les caractéristiques et le comportement d'un système de transport intermodal afin de proposer aux décideurs un chemin avec le meilleur rapport impact/coût. Dans cet article, nous présentons le modèle multiobjectif servant de base à notre système d'aide à la décision.*

MOTS-CLES : *Chaîne logistique verte, Transport intermodal, Impacts environnementaux, Modélisation, Plus court chemin multiobjectif.*

1 INTRODUCTION

Le transport est devenu une composante incontournable de quasiment toute activité moderne; en un siècle et demi, les transports de marchandises ont été multipliés par 1000 à la surface du globe. Aussi, les conséquences de la mondialisation que sont les délocalisations, l'augmentation des distances interentreprises et l'augmentation des flux ont créé une demande accrue de services de transport intermodal et d'infrastructures de transport multimodal. Le secteur des transports est le premier consommateur de produits pétroliers et le premier émetteur de gaz à effet de serre. De ce fait, les stratégies nationales et internationales de développement durable mettent en exergue la nécessité de réduire les niveaux de consommation d'énergie des transports et de s'orienter vers des modes de transport ayant moins d'impacts sur l'environnement, tels que le rail et les voies navigables.

Le fret intermodal fait de plus en plus l'objet d'un intérêt accru en raison notamment des problèmes de congestion du trafic, des préoccupations environnementales et des problèmes de sécurité sur les axes de transport. Une prise de conscience de l'importance stratégique de l'adaptation de la chaîne logistique aux exigences environnementales oblige les entreprises à reconsidérer l'organisation « traditionnelle » de la chaîne logistique,

dans le but de mettre en place une chaîne logistique à même d'allier enjeux économiques et enjeux socio-environnementaux. Par conséquent, des recherches sont de plus en plus menées pour l'évaluation environnementale des activités logistiques et pour la mise en place méthodes de réduction des impacts. C'est pourquoi dans un réseau intermodal avec plusieurs alternatives de chemins et de modes de transport, le choix d'un chemin pour acheminer les marchandises d'un point origine s vers une destination t doit permettre d'optimiser simultanément les coûts, le temps, les performances, et aussi les impacts environnementaux et sociétaux; cela fait appel à des méthodes d'optimisation multiobjectif.

Le présent article a pour objectif de présenter le modèle de plus court chemin multiobjectif qui servira de base à la mise en place d'un système d'aide à la décision permettant de réduire les impacts émanant des flux de transports intermodaux. Nous visons également à apporter des réponses à la gestion du trafic notamment par la prise en compte des problèmes de congestion dans notre système de décision afin, de contribuer au désengorgement des voies de circulation.

Après avoir situé le cadre général de notre étude, nous présenterons le modèle multiobjectif mis en place puis nous finirons pour quelques perspectives pour la résolution du modèle et son amélioration.

2 LE TRANSPORT INTERMODAL

Le transport intermodal est défini par la Conférence Européenne des Ministres des Transports comme étant le transport d'une charge utile (marchandises, hommes...) en utilisant successivement deux ou plusieurs modes de transport, d'un point « origine » à une « destination » donnée, sans avoir à dépoter les marchandises d'un premier contenant pour les recharger dans un autre (Rondinelli et al., 2000).

L'intermodalité est donc un processus de transport par le biais d'une interconnexion de réseaux, impliquant diverses combinaisons de modes de transport dans lequel toutes les composantes sont parfaitement liées pour former une coordination efficace. Cette organisation offre une gamme complète de modes de transport et plusieurs options de transport ; ce qui permet de coordonner les livraisons, la production, le stockage et les différentes fonctions de distribution. Les réseaux intermodaux sont caractérisés par des changements dynamiques et des modes de transport multiples opérant simultanément entre eux (Qu et al., 2008). Les systèmes de transport intermodaux offrent donc un grand choix de mode de transport et plusieurs alternatives de chemins possibles ; d'où la nécessité d'une meilleure coordination des flux et des mouvements dans un tel système.

Plusieurs modélisations ont été proposées pour représenter au mieux les réseaux de transport intermodaux; parmi les plus utilisés, on peut citer le modèle de graphe multivalué (Ziliaskopoulos et al., 2000), le modèle d'hypergraphe multimodal (Lozano et al., 2002) et le modèle utilisant des arcs de transfert présenté dans (Lozano et al., 2001).

Dans notre modèle, nous utiliserons un réseau semblable à celui présenté dans (Ziliaskopoulos et al., 2000) représenté par un graphe G , une variable $\theta_i^{mm'}$ représente le temps de transbordement sur tout nœud i du réseau. Les arcs représentent un seul mode de transport ; le choix du mode à utiliser pour se rendre sur les nœuds successeurs s'effectue au niveau de chaque nœud courant.

3 IMPACTS SOCIO-ENVIRONNEMENTAUX DU TRANSPORT ET CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

3.1 La chaîne logistique verte

Une chaîne logistique peut être définie comme un processus intégré, dans lequel un certain nombre d'acteurs différents travaillent ensemble dans le but d'acquérir des matières premières, de transformer ces matières premières en produits finis, et de livrer ces produits finis aux détaillants. Cette chaîne est traditionnellement caractérisée par des flux de matières et des flux d'informations (Beamon, 1998). La gestion traditionnelle de la chaîne logistique est centrée sur l'amélioration des performances économiques comme l'optimisation de coûts engendrés par les flux logistiques, la minimisation des temps de transport au sein de la chaîne, les problèmes de localisation des centres de production et de distribution,

la coordination des flux informationnels entre les acteurs, l'optimisation et la gestion des stocks...

La chaîne logistique verte quant à elle reconnaît les impacts des activités logistiques sur l'environnement et la société, et tente de trouver les moyens pour les limiter. La définition et le champ d'application de la chaîne logistique verte dans la littérature sont assez vastes et variés, ils vont des « achats verts ou achats responsables » (green purchasing), à la prise en compte des impacts depuis le fournisseur jusqu'au client final en passant par la production jusqu'à la logistique inverse. (Srivastava, 2007) définit la gestion de la chaîne logistique verte comme « l'intégration de la conscience environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, en incluant la phase de conception du produit, l'extraction et le choix des matériaux et matières premières, le processus et les procédés de fabrication, la livraison du produit fini au client ainsi que la gestion de la fin de vie du produit ». Selon Klassen et Johnson (2002) on a cinq méthodes de gestion de la chaîne logistique verte ; la certification environnementale, la prévention de la pollution, la logistique inverse, l'analyse de cycle de vie et l'éco-conception.

Dans la littérature plusieurs études existent sur les différents aspects et les méthodes de la chaîne logistique verte. Une revue intéressante de la littérature est présentée dans (Zhang et al., 1997), elle met en évidence à la fois la prise en compte des impacts environnementaux dans la conception des produits mais aussi l'analyse de cycle de vie des produits. Cette étude met également en évidence la réduction des impacts pendant le processus de production et la gestion de la fin de vie des produits (recyclage, réutilisation, le remanufacturing, la gestion des déchets...). A cela il faut ajouter des études comme celles présentées dans (Min et al., 1998) qui mettent en évidence les problèmes de localisation et routage dans la chaîne logistique verte.

Dans notre étude, nous nous focaliserons sur la réduction des impacts induits par le transport des marchandises au sein d'un réseau de transport intermodal.

3.2 Impacts socio-environnementaux du transport

Le transfert de matières premières et de biens d'un point à l'autre dans une chaîne logistique se fait par divers modes de transport, à savoir terrestre, aérien ou maritime. Les niveaux et les types de pollution dus au transport dépendent principalement de la combinaison de deux facteurs: le type de transport et la distance parcourue.

Les impacts du transport sur la santé et l'environnement sont bien connus de nos jours; ils comprennent le réchauffement climatique, la détérioration de la couche d'ozone, la dispersion de substances organiques et inorganiques toxiques notamment l'ozone troposphérique, la raréfaction du pétrole et d'autres ressources naturelles; et la dégradation des paysages et des sols.

La pollution émanant des véhicules, tels que les camions poids lourds, inclut les gaz polluants tels que le mo-

noxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les particules polluantes et les composés organiques volatils (COV). Certains hydrocarbures (y compris les COV) provenant des émissions des moteurs sont cancérigènes. Les oxydes d'azote sont des gaz toxique invisibles qui peuvent former de fines particules d'aérosols ou de sels qui peuvent contribuer aux pluies acides ou au smog. Les carburants des moteurs sont souvent émis sous forme de particules polluantes. Ces particules toxiques sont très souvent des substances chimiques cancérigènes causant d'énormes dégâts dans les poumons. En outre, l'ozone et les particules sont responsables de maladies respiratoires, de dommages environnementaux et de problèmes de visibilité, tels que le brouillard. De plus, environ 20% des citoyens européens souffriraient de problèmes dus aux bruits des transports. Pour plus de détails sur les impacts, se référer à la roue des impacts présentée dans (Anciaux, 2007).

Dans la littérature, plusieurs études sont menées sur la réduction les impacts environnementaux du transport. La majeure partie de ces études porte d'une part sur l'analyse des impacts émanant des systèmes de transport, sur la revue de la littérature concernant les méthodes de réduction des impacts, et d'autre part sur l'estimation des coûts engendrés par les impacts environnementaux du transport (M. Piecyk, A. McKinnon, 2007), (Levinson et al., 1998), (Forkenbrock, 1999). Des études sont également menées sur la mise en place de politiques d'internalisation des coûts environnementaux du transport (Ricci et al., 2005) ainsi que sur les méthodes et modèles de calcul des coûts engendrés par les impacts (Janic, 2007).

Concernant la contribution à la réduction de ces impacts de nombreuses recherches sont menées ; les solutions apportées vont des techniques managériales aux méthodes d'optimisation issues de la recherche opérationnelle. L'introduction de nouvelles technologies et les nouveaux concepts de transport tels que les biocarburants, l'éco-conduite et les systèmes de management environnemental (ISO 14000, ISO 14001,...) permettent une réduction des émissions par véhicule et contribuent à des systèmes de transports respectueux de l'environnement. (Rondinelli et al., 2000) proposent une approche intégrée « Système Proactif pour le Management Environnemental », ayant pour objectif de prévenir la pollution et de réduire les sources de dégradation de l'environnement par le fret intermodal.

En plus de toutes ces méthodes, une alternative pour réduire les impacts environnementaux et sociétaux du transport est de faire un choix judicieux de chemin et de mode de transport. Ainsi, notre contribution pour réduire les impacts du transport intermodal passe par la proposition et la conception d'un système d'aide à la décision pour le choix d'un chemin minimisant les impacts.

4 MODELE D'INTEGRATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIETAUX DU TRANSPORT INTERMODAL

4.1 Modèle graphique

Nous considérons pour notre étude un réseau de transport intermodal représenté par le graphe orienté $G = (V, A, M)$; où $V = \{1, \dots, N\}$ représente l'ensemble fini des nœuds du graphe de cardinalité $|V| = N$, $A = \{(i_1, j_1), \dots, (i_L, j_L)\}$ représente l'ensemble fini des arcs de cardinalité $|A| = L$ reliant les nœuds de G , et $M = \{m\} = \{r_{oute}, e_{au}, a_{ir}, r_{ail}\}$, l'ensemble fini des modes de transport disponibles sur le réseau.

Pour tout nœud $i \in V$, soit :

- ✓ M_i : l'ensemble des modes de transport disponibles au nœud i .
- ✓ Γ_i^- : l'ensemble des prédécesseurs directs du nœud courant i
- ✓ Γ_i^+ : l'ensemble des successeurs directs du nœud courant i

Dans un réseau intermodal, chaque nœud est un lieu probable de transbordements ; en effet, chaque nœud est un lieu où l'on a le choix entre continuer avec même mode de transport, ou le remplacer par un autre (Lozano et al., 2001). Tout mode de transport m_{ij} utilisé sur un arc (i, j) est un élément de $M = \{r_{oute}, e_{au}, a_{ir}, r_{ail}\}$. Dans le graphe G , un seul et unique mode transport $m_{ij} \in M$ est utilisé sur chaque arc $(i, j) \in A$.

4.2 Description du problème

Dans le graphe intermodal G , on considère le transport une quantité Q de marchandises d'un point d'origine s à une destination t . On considère dans notre étude le transport d'un seul type de marchandises. Chaque arc (i, j) est une représentation abstraite d'infrastructures de support des déplacements (rail, route, voie navigables, ligne aérienne) entre deux villes i et j séparés d'une distance d_{ij}^m pour chaque mode transport m utilisé. Nous avons dans le graphe plusieurs choix de chemins et de modes de transport possibles.

L'objectif ici est de déterminer le chemin « le plus efficace » de s à t afin de minimiser les coûts engendrés par le transport, le temps de transport et les différents impacts sur l'environnement et la société. Les critères retenus pour la prise de décision sont alors multiples et sont divisés sept groupes de critères à savoir « le coût économique », « le temps de transport », « la pollution atmosphérique », « la consommation d'énergie », « les nuisances sonores », « les dégâts dus aux transbordements » et « les risques d'accidents ».

Le modèle présenté ici a également pour objectif de prendre en compte la congestion en minimisant les retards occasionnés par la congestion, et cela par un bon choix des heures de départ et d'arrivée, de sorte à éviter les pics de congestion et à respecter les fenêtres de temps fixées par le client. Le grand nombre de critère et la complexité des données du problème rend impossible

l'utilisation des techniques d'optimisation « traditionnelles »; nous faisons donc appel à des méthodes d'optimisation basées sur plusieurs objectifs et plus particulièrement au problème de plus court chemin multiobjectif plus apte à résoudre les problèmes de recherche de chemin.

4.3 Le Problème de plus court chemin multiobjectif

Le choix d'un chemin pour acheminer des marchandises peut se faire en tenant compte du temps de transport, du coût, des stationnements... D'une façon générale, les outils utilisés pour guider ce choix sont basés sur des techniques de résolution de « problème de plus court chemin ».

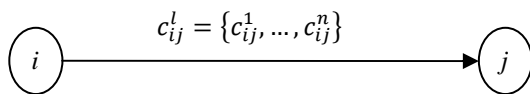
Le problème de plus court chemin est l'un des problèmes d'optimisation de réseau les plus étudiés depuis les années cinquante (R.E. Bellman 1958 ; E. Dijkstra 1959, Ford et Fulkerson 1962, E.f. Moore 1959) Toutes ces études sont basées sur la recherche d'un chemin dans un graphe en se basant sur un seul objectif.

Cependant, dans la plupart des problèmes réels traités, la complexité de l'environnement économique et social implique la prise en compte de plusieurs critères autres que le coût et le temps. Il s'en suit la mise en place de méthodes plus à même de prendre en compte simultanément plusieurs critères ; d'où la notion de plus court chemin multiobjectif.

Considérons le graphe $G(V, A, M)$ défini plus haut. Soit n le nombre de critères étudiés, avec $n \geq 2$. A chaque arc $(i, j) \in A$ on associe une fonction vectorielle c de dimension n , qui attribue à chaque arc un « coût » $c_{ij}^l, (l = 1, \dots, n)$ représentant l'ensemble des coûts sur l'arc (i, j) l'ensemble des critères l . D'où :

$$c: A \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$(i, j) \mapsto c^l(i, j) = c_{ij}^l = (c_{ij}^1, \dots, c_{ij}^n)$$



Les valeurs des composants du vecteur coût c_{ij}^l dépendent du mode de transport utilisé sur l'arc $(i, j) \in A$. Chaque coût c_{ij}^l représente un critère ; les critères pris en compte sont modélisés selon les équations présentées dans la section suivante.

4.4 Modélisation des critères de décision

4.4.1 Le temps de transport

On définit un horizon de temps total $[0, T]$ pendant lequel le trajet est effectué sur un arc (i, j) donné. Le temps total de transport comprend les durées de transbordement, des retards dus aux engorgements, ainsi que des temps « libre » de trajet.

4.4.1.1. Prise en compte de la congestion

L'étude de la congestion dans la littérature se fait sur plusieurs niveaux à savoir les niveaux microscopiques, macroscopiques et mésoscopiques (Lindsey et al., 1999). Ces études concernent également la gestion des files d'attente dus à la congestion (Arnott et al., 1993).

Dans notre étude, la prise en compte de la congestion se fait en terme de réduction des retards causés par les congestions sur les arcs du réseau, et de choix des heures de départ et d'arrivées afin d'éviter les pics de congestion. Les heures de pics de congestion sont supposés connues à l'avance. On définit des fenêtres de temps correspondant aux pics de congestion. Le flot du trafic est décrit par trois variables : une densité de trafic \mathcal{T} (nombre de véhicules par kilomètre), un flux φ (nombre de véhicules par heure ou capacité du goulet d'étranglement en cas de congestion) et une vitesse de circulation v (en kilomètre par heure).

Soit ι le nombre de fenêtres de temps pour chaque période de pic de congestion sur un arc (i, j) et $(T_{w_{ij}}^1, \dots, T_{w_{ij}}^\iota)$ l'ensemble des fenêtres temporelles correspondant aux heures d'engorgement sur l'arc (i, j) où :

- ✓ $T_{w_{ij}}^\iota = [T_{w_{ij}}^{\iota-}, T_{w_{ij}}^{\iota+}]$ et T_{ij}^ι correspond à l'heure du pic de congestion.
- ✓ $T_{w_{ij}}^{\iota-}$: L'heure de début des engorgements
- ✓ $T_{w_{ij}}^{\iota+}$: L'heure de fin des engorgements

Et soit :

- ✓ χ : la longueur de la queue : le nombre de voiture dans les lieux d'engorgement.
- ✓ t_i^m : l'heure de départ du nœud i avec le mode m

Les retards causés par la congestion R_{ij}^m sont calculés en fonction de ces données et l'on obtient :

$$R_{ij}^m = \frac{\chi(\text{le nombre de véhicules})}{\varphi(\text{flux})} = \int_{T_{w_{ij}}^{\iota-}}^{t_i^m} v(z) dz - \varphi(t_i^m - T_{w_{ij}}^{\iota-})$$

4.4.1.2. Le temps de transbordement

Le transbordement est l'ensemble des opérations permettant de faire passer des marchandises d'un mode de transport à un autre, avec éventuellement une mise à quai intermédiaire, sans passer par le stock. Soit $\theta_i^{m,m'}$ le temps total de transbordement au nœud $i \in V$, nécessaire pour faire passer une quantité Q de marchandises du mode $m \in M$ au mode $m' \in M_i$.

$$\theta_i^{m,m'} = Q \cdot \Delta_i \cdot h_i$$

Avec :

- ✓ Δ_i : durée moyenne pour un transbordement au nœud i par tonne de marchandises transbordées (en h)
- ✓ h_i : facteur de transbordement » qui nous indique s'il y a eu transbordement ou non au nœud i , avec :

$$h_i = \begin{cases} 1 & \text{S'il y a transbordement au nœud } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

4.4.1.3 Les fenêtres de temps

A chaque nœud $i \in V$ on associe une fenêtre de temps $T_{w_i} = [e_i^m, l_i^m]$, où e_i^m représente l'heure d'arrivée au plus tôt du moyen de transport m au nœud i et l_i^m son heure d'arrivée au plus tard, tel que $e_i^m \leq l_i^m$.

Notons $L_i^m \in T_{w_i}$, l'heure d'arrivée au nœud i avec le mode m et $\theta_i^{mm'}$ le temps de transbordement au nœud i . L'heure de départ ξ_i^m du nœud i avec le mode m est déterminée suivant deux cas :

i. l'heure de départ n'est pas connue à l'avance et dans ce cas, il faudra le calculer en fonction des données du problème :

$$\xi_i^m = L_i^m + \theta_i^{mm'}$$

ii. Lorsque l'heure de départ ξ_i^m est connue à l'avance, on détermine alors l'heure d'arrivée au plus tard l_i^m par la relation :

$$l_i^m = \xi_i^m - \theta_i^{mm'}$$

Ainsi, si le nœud i considéré est le nœud destination finale c'est-à-dire $i = t$, alors $\xi_i^m = 0$ et si $i = s$ c'est-à-dire le nœud source, alors $L_i^m = 0$.

4.4.1.4 Temps total de trajet

Soit T_{ij}^m le temps total de trajet sur l'arc (i, j) . En présence de congestion, le temps total de trajet est défini comme ayant deux composantes : le temps « libre » de trajet T_{ij}^{fm} qui est une composante fixe et connue du temps de trajet, et le retard dû à la congestion R_{ij}^{um} :

$$c_{ij}^1 = T_{ij}^m = T_{ij}^{fm} + R_{ij}^{um}$$

Avec :

$$T_{ij}^{fm} = L_j^m - \xi_i^m$$

Où :

- ✓ ξ_i^m : L'heure de départ du nœud i
- ✓ L_j^m : L'heure d'arrivée au nœud j
- ✓ R_{ij}^{um} : Temps perdu dans les lieux d'engorgement

4.4.2 Le coût économique

Il correspond à l'ensemble des coûts frais d'expédition des marchandises. Il comprend le coût de transport, le coût de transbordement, le coût du stock en transit et les remises et pénalités éventuelles.

4.4.2.1 Le coût de transport

Afin de caractériser le coût global d'un transport de marchandises, il est nécessaire de modéliser le plus fidèlement possible le coût réel demandé par le transporteur pour acheminer la marchandise d'un fournisseur. Ainsi la construction du modèle ci-dessous a pour but de répondre au mieux à ces exigences. Le coût de transport inclut les coûts de débrayage et les frais de voyage. C'est l'ensemble des coûts fixes et variables engendrés par l'utilisation du moyen de transport c'est-à-dire l'ensemble des coûts du transporteur mobilisés par l'utilisation d'un moyen de transport m pour répondre à la demande d'un fournisseur. Le coût de transport C_{ij}^m

sur l'arc (i, j) utilisant le mode de transport m est donné par :

$$C_{ij}^m = \left[(c_1^m + T_{ij}^m \cdot c_2^m + d_{ij}^m \cdot c_3^m) \cdot \left(\mu_{ij}^m + \xi^m + (1 - \xi^m) \cdot \sqrt{(Q/A - \mu_{ij}^m \cdot B)/B} \right) \right]$$

Avec :

$$\mu_{ij}^m = \begin{cases} \mu_1^m - 1 & \text{Si } \max\left(\left\lfloor \frac{Q}{CQ^m} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{V}{CV^m} \right\rfloor\right) = \max\left(\frac{Q}{CQ^m}, \frac{V}{CV^m}\right) \\ \mu_1^m & \text{Sinon} \end{cases} \quad (i)$$

Où :

$$\checkmark \mu_1^m = \max\left(\left\lfloor \frac{Q}{CQ^m} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{V}{CV^m} \right\rfloor\right) \quad (ii)$$

$$\checkmark A = \begin{cases} 1 & \text{Si } \frac{Q}{CQ^m} > \frac{V}{CV^m} \\ \frac{Q}{V} & \text{sinon} \end{cases} \quad (iii)$$

$$\checkmark B = \begin{cases} CQ & \text{si } \frac{Q}{CQ^m} > \frac{V}{CV} \\ CV & \text{sinon} \end{cases} \quad (iv)$$

- ✓ μ_{ij}^m : Nombre (d'unité -1) de moyens de transport du mode m nécessaires pour l'arc (i, j)
- ✓ c_1^m : Coût fixe dû à l'utilisation du moyen de transport m (coût de prise en charge) exprimé en devise.
- ✓ c_2^m : Coût d'utilisation du moyen de transport m par unité de temps (en fonction du temps de transport).
- ✓ c_3^m : Coût de déplacement en devise par unité de déplacement pour moyen de transport.
- ✓ T_{ij}^m : Temps de trajet sur l'arc (i, j)
- ✓ ξ^m : Coefficient de prise en charge du moyen de transport m ; $0 \leq \xi^m \leq 1$.
- ✓ Q : Masse de produits transportés en unité de poids
- ✓ V : Volume de produits transportés en unité de volume
- ✓ CQ^m : Capacité massique du moyen de transport m .
- ✓ CV^m : Capacité volumique du moyen de port m .

Dans ce modèle, c_1^m caractérise les coûts fixes rencontrés par le transporteur pour l'utilisation du moyen de transport m ; ce paramètre inclut la venue du camion sur le site du fournisseur quelque soit la charge à transporter et les kilomètres à réaliser (coût de dossier, ...). c_2^m permet de prendre en compte les coûts horaires engendrés par l'utilisation du moyen de transport m ; ce paramètre permet d'inclure essentiellement le salaire du conducteur, rémunéré légalement sur la base d'un tarif horaire. c_3^m comprend l'ensemble des coûts kilométriques (usure du véhicule, consommation de carburant ou électrique, ...); ce paramètre est fonction de la densité de la marchandise transportée (influence sur la consommation).

La masse volumique du produit transporté intervient pleinement dans le nombre de moyens de transport à

déterminer. En effet, il est nécessaire de connaître le facteur limitant (poids ou volume) pour connaître le nombre de moyens de transport nécessaire à l'acheminement de Q tonnes ou de $V m^3$ de marchandises. La variable ξ^m correspond au coefficient de prise en charge du moyen de transport m . Ce coefficient permet de prendre en compte les frais engendrés par l'acheminement de marchandises dans une unité de transport dont la capacité de transport n'est pas entièrement utilisée. Cette variable varie de 0 à 1 en fonction de la pénalité infligée par le transporteur pour le déplacement d'une unité de transport non remplie

4.4.2.2 La pénalité de remplissage

L'acheminement de marchandises par une unité non remplie engendre des frais qui peuvent être de natures différentes :

- L'unité de transport voyage seulement avec la marchandise du client : l'unité n'est pas remplie donc le surcoût unitaire de masse transporté est plus élevé pour le transporteur que s'il voyageait rempli.
- L'unité de transport voyage remplie car le transporteur a rempli son unité de transport incomplète grâce à d'autres clients : le transporteur a des coûts supplémentaires de gestion.

Le surcoût d'utilisation ϑ^m du moyen de transport m est donné par la formule suivante :

$$C_{2ij}^m = \vartheta^m = (c_1^m + T_{ij}^m \cdot c_2^m + d_{ij}^m \cdot c_3^m) \cdot (\xi^m + (1 - \xi^m) \cdot \sqrt{(Q/A - \mu_{ij}^m \cdot B)/B}) - (Q/A - \mu_{ij}^m \cdot B)/B$$

4.4.2.3 le coût du stock en transit

C'est le coût du stock en transit dans les points de transbordement, plateformes logistiques ou les hubs intermodaux. Ce coût est considéré comme étant la somme des coûts de stockage en transit et du coût du stock de sécurité. Le coût du stock de sécurité est généralement négligeable par rapport à celui du stock en transit; de ce fait, il est souvent ignoré lors des prises de décisions. Nous tenons compte uniquement du coût du stock en transit, considéré comme étant proportionnel au temps de transit. Le coût total C_{2ij}^m du stock en transit est donné par :

$$C_{3ij}^m = \mathcal{N} \cdot c_4^m \cdot T\tau_i$$

Avec

- ✓ \mathcal{N} : Nombre d'unités de produits à transporter
- ✓ c_4^m : Coût du stock en transit pour le mode m par unité de produits par heure.
- ✓ $T\tau_i$: Temps de transit au nœud i .

4.4.2.4 Le coût de transbordement

Pour aller d'un nœud i à un nœud successeur $j \in \Gamma_i^+$, les containers sont transbordés (ou non) d'un mode de transport m vers le même mode de transport (transfert intra-modal) ou un autre mode m' (transfert intermodal). Le coût de ce transbordement est obtenu à partir de la fonction suivante :

$$C_{4ij}^m = C_i^{mm'} \cdot h_i \cdot \left((\mu_{ij}^{m'} + \xi^{m'} + (1 - \xi^{m'}) \cdot \sqrt{(Q/A - \mu_{ij}^{m'} \cdot B)/B}) \right)$$

Avec :

- ✓ $C_i^{mm'}$: Coût de transbordement par container du mode de transport m au mode de transport m' au nœud i
- ✓ h_i : Facteur de transbordement au nœud i
- ✓ $0 \leq \xi^{m'} \leq 1$ et $\mu_{ij}^{m'}$ sont déterminés de la manière qu'en (4.4.2.1).

4.4.2.5 La remise

C'est une fonction σ^m correspondant à la remise concédée par le transporteur en fonction du nombre de moyen de transport utilisés μ_{ij}^m pour acheminer les marchandises sur une distance d_{ij} .

$$C_{5ij}^m = \sigma^m = g(\mu_{ij}^m) \quad (6)$$

4.4.2.6 Les pénalités temporelles

Les fenêtres temporelles induisent des contraintes de temps et des coûts supplémentaires. En effet, le coût total de transport inclut non seulement les coûts définis plus haut mais également les coûts engendrés par le fait qu'un moyen de transport arrive très tôt ou en retard à destination.

On définit deux coûts de pénalité : le coût de pénalité de retard et le coût de pénalité d'avance au nœud destination. Le début du service (livraison ou transbordement) à chaque nœud doit être compris entre les bornes inférieures et supérieures des fenêtres de temps. En effet, si un « véhicule » arrive très tôt, c'est-à-dire avant le début de la fenêtre de temps $T_{wi} = [e_i^m, l_i^m]$, il doit attendre jusqu'à e_j^m pour commencer son service.

D'où :

$$C_{6ij}^m = c_{ij}^p = \begin{cases} \varepsilon \cdot (e_j^m - l_j^m) & \text{si } l_j^m \leq e_j^m \text{ pénalité d'avance} \\ 0 & \text{si } l_j^m \in [e_j^m, l_j^m] \\ \rho \cdot (l_j^m - l_j^m) & \text{si } l_j^m \geq l_j^m \text{ pénalité de retard} \end{cases}$$

Avec :

- ✓ c_{ij}^p : Coût des pénalités sur l'arc (i, j)
- ✓ ε : Coefficient de pénalité d'avance défini en coût par heure d'avance
- ✓ ρ : Coefficient de pénalité de retard défini en coût par heure de retard
- ✓ l_j^m : L'heure d'arrivée au nœud j
- ✓ l_j^m : L'heure de départ du nœud j
- ✓ e_j^m : L'heure d'arrivée au plus tôt au nœud j

Le **coût économique** c_{ij}^2 est donné par la somme des coûts définis plus haut :

$$c_{ij}^2 = \sum_{u=1}^6 C_{uij}^m = C_{1ij}^m + \vartheta^m + C_{3ij}^m + C_{4ij}^m + \sigma^m + c_{ij}^p$$

4.4.3 Modélisation des impacts environnementaux et sociétaux

On tient compte dans ce modèle des impacts pendant la phase d'utilisation du moyen de transport: les impacts en matière de déchets lors du nettoyage du moyen de transport, du dégivrage des avions,... ne sont pas pris en compte. La modélisation de ces impacts permet d'intégrer la conscience environnementale dans la prise de décision au sein de la chaîne logistique. La modélisation est effectuée à partir de données issues d'études internationales comme celles menées par INFRAS et IFEU Heidelberg.

4.4.3.1 La pollution atmosphérique

Pour estimer le coût des émissions de gaz polluants provoquées par le transport de marchandise, il est nécessaire de considérer les émissions directes et indirectes des différents moyens de transport.

Ce modèle d'estimation permet de quantifier les émissions de CO₂, COV et NO_x, principaux gaz émis par les moyens de transport. Cette fonction dépend de la masse de marchandises acheminée, du type de moyen de transport ainsi que la distance parcourue.

La quantité de gaz polluants émis $G_{ij}^{m\gamma}$ d'un gaz γ par le mode de transport m sur un arc (i, j) est donnée par:

$$c_{ij}^3 = G_{ij}^{m\gamma} = \sum_{(i,j) \in A, m \in M} e^{m\gamma}(Q, V) \cdot (d_{ij}^m + R_{et}^{air}) \cdot \left(\mu_{ij}^m + (1 - \xi^m) \cdot \sqrt{(Q/A - \mu_{ij}^m \cdot B)/B} \right)$$

Avec:

- ✓ $e^{m\gamma}$: Quantité de polluant γ émise par le moyen de transport m en unité de poids, par unité de poids de marchandises transportées et par unité de déplacement
- ✓ R_{et}^{air} : Distance parcourue pendant la période de roulage pour un avion en unité de distance; pour un mode de transport autre que l'avion, $R_{et}^{air} = 0$.

4.4.3.2 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale des transports correspond à la consommation énergétique de traction de l'ensemble des transports: route, rail, transports maritime et aérien, navigation intérieure et oléoducs. Les principaux carburants couverts sont les produits pétroliers, l'électricité, le gaz naturel. La quantité d'énergie consommée par un moyen de transport m est calculée ici en fonction de la distance parcourue d_{ij}^m , de la quantité de marchandise transportée Q et du facteur de consommation d'énergie définit dans (Knorr et al., 2005).

$$c_{ij}^4 = E_{ij}^m = Q \cdot d_{ij}^m \cdot \varepsilon^m$$

ε^m est le facteur de consommation moyenne d'énergie du moyen de transport m , définit par une étude menée par IFEU Heidelberg en 2005. Ce facteur est définit pour chaque mode de transport et est exprimée en $kJ/t.km$.

4.4.3.3 La pollution sonore

Le transport est la principale source de pollution sonore. La pollution sonore peut être définie comme un son non-désiré ou nuisible. Le bruit généré par les systèmes de transport affecte les personnes dans les zones d'habitation; ces nuisances sont d'autant plus importantes que le trafic est dense. Les perturbations sonores émises par le trafic dépendent du volume du trafic (la densité), de la vitesse et la composition du trafic (type de véhicules). Elles dépendent également de la distance entre la route et les premières habitations ou les zones d'impacts (David J. Forckenbrock 1999).

La quantité de bruit émise sur un arc (i, j) est donnée par :

$$c_{ij}^5 = B_{ij} = \sum_{(i,j)} \varphi b^m \mathcal{D}_{pop_{ij}} \delta_{im}$$

- ✓ b^m : Quantité moyenne de bruit en dB (A) émise par le moyen de transport m en fonction de la distance du lieu d'impact.
- ✓ $\mathcal{D}_{pop_{ij}}$: Nombre moyen de personnes impactées par le bruit sur l'arc (i, j)
- ✓ δ_{im} : Distance moyenne entre le lieu d'émission du bruit et les premières personnes impactées
- ✓ φ : La densité du trafic

4.4.3.4 Le risque d'accidents

L'estimation quantitative du risque est la mesure du risque comme étant le produit mathématique de la probabilité qu'un événement survienne et les conséquences de cet événement (Stewart and Melchers, 1997; Chapman and Ward, 1998). Dans le domaine de la sécurité des transports, le risque est perçu comme étant la combinaison de deux composants: la survenue d'un accident et les conséquences de cet accident

Les dommages causés par les accidents peuvent être classés en plusieurs types selon qu'il y ait des blessés graves ou modérés, des morts ou des dommages matériels. Lowrance (1976) définit le risque d'accident comme une mesure de la probabilité qu'un accident survienne et de la gravité des dommages engendrés par cet accident.

Pour les besoins de notre étude, nous définissons le risque d'accident comme étant la probabilité qu'un moyen de transport m transportant une quantité Q de marchandises sur une distance d_{ij} soit impliqué dans un accident sur un arc (i, j) du réseau. Cette probabilité suit une loi de Poisson de paramètre λ_{ij}^m . Sa fonction de répartition est définie par la fonction p_{ij}^a tel que:

$$c_{ij}^6 = p_{ij}^a(X = k) = e^{-\lambda_{ij}^m} \cdot \frac{(\lambda_{ij}^m)^k}{k!}$$

Avec :

- ✓ $p_{ij}^a(X > 0) = 1 - e^{-\lambda_{ij}^m}$: la probabilité qu'il y ait au moins un accident.
- ✓ p_{ij}^a : Le risque d'accident sur l'arc (i, j)
- ✓ λ_{ij}^m : Nombre réel strictement positif représentant le nombre moyen d'accidents engendré par le

moyen de transport m sur l'arc (i, j) en fonction de la densité du trafic : nombre d'accidents par unité de flux :

$$\lambda_{ij}^m = \frac{A: \text{nombre moyen d'accidents sur l'arc}}{\varphi: \text{flux du trafic sur l'arc}}$$

- ✓ k : Nombre réel strictement positif
- ✓ e : La base de l'exponentielle

4.4.4 Les dégâts dus au transbordement

Pendant les opérations de transbordement, des dégâts peuvent survenir lors du transport et la manipulation des produits. A chaque transbordement, les dégâts surviennent de façons indépendantes les unes des autres. La probabilité $\mathcal{D}_i^{mm'}$ que des dégâts surviennent lors du transbordement d'une quantité Q de marchandises à un nœud i du réseau est donnée par un calcul réalisé en utilisant le théorème central limite.

Soit $\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}$ le nombre de transbordement sur un chemin du graphe, X_i la quantité de dégâts survenant lors d'un transbordement sur un nœud i d'un chemin \mathcal{P}_{st} composé de $\kappa \in \mathbb{N}$ nœuds et $S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}} = \sum_{i=1}^{\kappa} X_i$, la somme des dégâts sur le dit chemin. L'espérance mathématique de $S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}$ est $E(X) = \mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}} \bar{X}$ et son écart-type est $\sigma \sqrt{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}$.

La probabilité d'avoir un dégât au nœud i est donnée par :

$$c_{ij}^7 = \mathcal{D}_i^{mm'} = Q \cdot h_i \cdot \frac{S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}} - \mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}} \bar{X}}{\sigma \sqrt{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}}$$

Avec :

- ✓ $\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}$: Le nombre de transbordement un chemin \mathcal{P}_{st} du graphe
- ✓ $S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}$: Somme des dégâts dus aux transbordements sur un chemin avec $S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}} = \sum_{i=1}^{\kappa} X_i$
- ✓ \bar{X} : La quantité moyenne de dégâts $\bar{X} = \frac{S_{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}}{\mathcal{N}_{\mathcal{P}_{st}}}$
- ✓ h_i : Facteur de transbordement au nœud i
- ✓ Q : Masse de produits transportés en unité de poids

4.5 Modèle de plus court chemin multiobjectif

Le modèle proposé ici permet de prendre en compte à la fois les caractéristiques du transport intermodal et l'ensemble des critères intervenant dans la prise de décision au sein de la chaîne logistique verte. Nous construisons une fonction objectif pour chacun des critères pris en compte. Les contraintes du problème sont également modélisées et pris en compte dans le système de décision.

4.5.1 Construction des fonctions objectifs

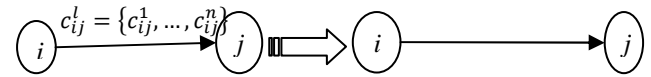
Soit deux variables binaires x_{ij} et y_{ij}^m , où x_{ij} représente la variable de conception du réseau et y_{ij}^m la variable d'utilisation des modes de transport avec :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'arc } (i, j) \text{ est utilisé} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$y_{ij}^m = \begin{cases} 1 & \text{Si le mode } m \text{ est utilisé sur l'arc } (i, j) \in A, \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Pour chaque critère c_{ij}^l étudié, une fonction objectif $f^l(x)$ est définie.

$$f^l(x) = \{f^1(x), \dots, f^n(x)\}$$



Soit $f^l(x)$ le vecteur « fonction objectif » de dimension l , le problème de plus court chemin multiobjectif dans un réseau intermodal est formulé comme suit:

$$\min f^l(x) = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^l \cdot x_{ij} \quad \forall l = 1, \dots, n$$

Dans ce modèle, on suppose que toutes les fonctions objectifs sont aussi importantes les uns que les autres.

4.5.2 Les contraintes du problème

On distingue deux types de contraintes dans notre problème: des contraintes globales définies sur l'ensemble du réseau et des contraintes locales définies sur les arcs ou les nœuds du réseau. Ces contraintes peuvent porter sur le graphe et sa construction ou directement sur les critères.

4.5.2.1 Les contraintes locales

✓ Les Contraintes sur le graphe

$$c_{ij}^l \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A \quad (1)$$

$$x_{ij} = \{x_{ij} \in \mathbb{N} / x_{ij} \in [0, 1]; \forall (i, j) \in A\}; \quad (2)$$

$$x_{ij} = \{y_{ij}^m \in \mathbb{N} / y_{ij}^m \in [0, 1]; \forall (i, j) \in A \text{ et } m \in M\} \quad (3)$$

La contrainte d'équilibre de conception est définie comme suit :

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji}$$

D'où la contrainte (4),

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = \begin{cases} 1 & i = s; x_{ji} = 0 \\ 0 & \forall i \in V \setminus \{s, t\} \\ -1 & i = t; x_{ij} = 0 \end{cases}$$

$$x_{ij} = y_{ij}^m; \quad \forall (i, j) \in A \text{ et } m \in M \quad (5)$$

Les contraintes (1) et (2) et (3) sont des contraintes de non-négativité. La contrainte (4) est la contrainte d'équilibre de conception à chaque nœud i du réseau nécessaire pour obtenir les arcs construisant un chemin de s à t . La contrainte (5) signifie que l'utilisation d'un arc implique immédiatement l'utilisation d'un mode de transport m sur cet arc.

✓ La praticité

La praticité d'un moyen de transport correspond à son aptitude à être pratique pour acheminer Q (tonnes) ou V (m^3) de marchandises sur une distance d_{ij} dans un temps imparti T_{ij}^m . Ce caractère pratique d'un moyen de transport m est fonction des trois variables énoncées ci-dessus et donné par :

$$\Phi_{ij}^m = \varphi(Q, V, T_{ij}^m, d_{ij}^m)$$

✓ **Contraintes temporelles**

L'heure de départ de chaque nœud du réseau doit être choisit de sorte à éviter les pics de congestion.

Soit T_j^* l'heure idéale d'arrivée au nœud j tel que $T_j^* \in [e_j^m, l_j^m]$; l'heure de départ du nœud i permettant d'éviter les engorgements est donné par :

$$\begin{cases} \check{t}_i^m = T_j^* - R_{ij}^m \\ T_j^* \leq l_j^m \end{cases}$$

4.5.2.2 Contraintes globales

Elles concernent les décisions prises sur l'ensemble du réseau.

✓ **Choix de l'heure de départ :**

Cette contrainte a pour but d'induire le choix de l'heure de départ du nœud source de façon à respecter les différentes fenêtres temporelles dans chaque ville et d'arriver dans la fenêtre de temps imposée par le client au nœud destination.

Soit $T_{w_t} = [e_t^m, l_t^m]$ la fenêtre de temps au nœud destination, e_t^m et l_t^m représentent respectivement l'heure d'arrivée au plus tôt et heure d'arrivée au plus tard au nœud destination. Et soit $T_{w_s} = [\check{t}_s^{m-}, \check{t}_s^{m+}]$ la fenêtre de temps au nœud source, \check{t}_s^{m-} et \check{t}_s^{m+} représentent respectivement l'heure de départ au plus tôt et heure de départ au plus tard au nœud source.

Le choix de l'heure de départ du nœud source est contraint par l'équation suivante :

$$l_t^m - \check{t}_s^{m-} \leq \sum_{(i,j) \in P_{st}} T_{ij}^m$$

✓ **Le nombre de transbordements**

Le nombre de transbordements $\mathcal{N}_{P_{st}}$ sur un chemin du graphe est supposé fixé en avance, en fonction des changements de modes imposés par la structure du réseau et de la fragilité des marchandises transportées en accord avec le client. Il doit être inférieur à une valeur maximale κ fixée à l'avance.

$$\mathcal{N}_{P_{st}} = \sum_{i=1}^{\kappa-1} h_i \leq \kappa$$

- ✓ $\kappa \in N$: Nombre de nœud utilisés sur un chemin P_{st} .
- ✓ κ : Nombre maximal de transbordement ; pour les produits fragiles, $\mathcal{N}_{P_{st}} \leq 2$.

La résolution du modèle ici défini est complexe du fait du caractère contradictoire critères et du grand nombre de données à traiter. Les objectifs étant conflictuels, il est

généralement impossible de trouver une solution unique qui procure simultanément la solution optimale pour l'ensemble des objectifs $f^l(x)$. Le problème de plus court chemin multiobjectif est connu comme étant NP-difficile et les algorithmes rencontrés dans la littérature font face à des difficultés notamment pour la gestion du grand nombre de données sur les chemins; il en résulte un temps de calcul considérable. Le concept de solution "optimale" devient donc moins pertinent en optimisation avec objectifs multiples. Par conséquent, la résolution d'un tel modèle consiste à rechercher un ensemble de solutions appelé ensemble Pareto-optimal ou ensemble efficace, en utilisant des relations dites de dominance.

La recherche d'un chemin dans le graphe intermodal $G(V, A, M)$ revient donc à trouver la succession de nœud et de mode transport à utiliser. Ainsi, un chemin P_{st} entre s et t est une séquence de nœuds et de modes: $P_{st} = \{(i_1 \equiv s, m_{i_1, i_2}), (i_2, m_{i_2, i_3}), \dots, (i_\kappa, m_{i_\kappa, i_\kappa} \equiv t)\}$, $\kappa \in N$ est le nombre de nœud utilisés sur le chemin.

Selon l'additivité des paramètres des arcs, chaque chemin est évalué par un « vecteur performance » (ou vecteur objectif ou encore vecteur coût de chemin) $c^l(P_{st}) = \{c^1(P_{st}), \dots, c^n(P_{st})\}$ qui correspond à la somme des coûts associés au critère l le chemin P_{st} .

D'où :

$$c^l(P_{st}) = \sum_{(i,j) \in P_{st}} c_{ij}^l$$

Où $c^l(P_{st})$, représente la somme des coûts associés au critère l sur chaque arc du chemin P_{st} , $\forall l = 1, \dots, n$. En d'autres termes, le vecteur $c^l(P_{st})$ du chemin P_{st} est une somme vectorielle des vecteurs coûts correspondant aux arcs.

La résolution du problème de plus court chemin multiobjectif revient donc à trouver l'ensemble des chemins qui minimisent le vecteur coût multiobjectif $c^l(P_{st})$. Divers algorithmes et méthodes tels que la programmation dynamique, les algorithmes à correction d'étiquettes, les algorithmes à fixation d'étiquettes, les méthodes interactives, les algorithmes évolutionnaires... ont été implémentés et étudiés pour résoudre ce type de problème.

5 CONCLUSION

La conjoncture économique et les prises de conscience environnementales au niveau planétaire contraignent les entreprises à reconsidérer l'organisation de leur chaîne logistique, et cela dans l'optique de privilégier des moyens de transport plus respectueux de l'environnement et d'assurer une meilleure coordination des flux afin de limiter les impacts sur l'environnement et de désengorger les axes de circulations.

Dans cet article nous avons intégré les impacts environnementaux et sociétaux dans la prise de décision au sein d'un réseau de transport intermodal. Ce modèle a pour objectif de modéliser le plus fidèlement possible tous les

critères devant être pris en compte pour la prise de décision pour un transport intermodal au sein de la chaîne logistique verte. Et contrairement à ce qui se fait dans la littérature, il se veut être plus complet parce que prenant en compte tous les aspects du système étudié. Nous avons ainsi présenté un modèle de plus court chemin multiobjectif qui prend en compte les caractéristiques des réseaux intermodaux et qui permet à la fois d'optimisation les coûts de transport, le temps de transport et les impacts socio-environnementaux, dans le but d'apporter une réponse mathématique efficace pour résoudre les problèmes environnementaux du transport.

Notre objectif ultime est de résoudre ce modèle par un algorithme de colonies de fourmis plus apte à prendre en compte l'ensemble des variables du problème. Une application sur un cas réel de transport intermodal est envisagée pour étudier la robustesse du modèle en vue d'améliorations et d'une validation, afin de mettre en place notre système de décision qui serait destiné à des décideurs du monde de la logistique et du transport.

6 REFERENCES ET PERSPECTIVES

- Andrea R. and I. Black, Measuring the Marginal Social Cost of Transport, *Research in Transportation Economics*, Volume 14, p.245–285, 2005.
- Anciaux D., 2007. Chaîne logistique verte: un modèle intégrant l'aspect environnemental du transport intermodal. *7e Congrès International du Génie Industriel*, Trois-Rivières, Québec (Canada).
- Arnott R., A. de Palma and L. Robin, 1993. A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand, *American Economic Review*, vol.83, No.1, p.161-179.
- Beamon B. M., 1998. Supply Chain Design and Analysis: Models and Method. *International Journal of Production Economics*, Vol. 55, No. 3, p. 281-294.
- Bellman R.E., 1958. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*. Vol.16, p. 87–90.
- Caramia M. and P. Dell'Olmo, 2008. Multi-objective Management in Freight Logistics: Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms. ISBN 978-1-84800-381-1, doi 10.1007/978-1-84800-382-8.
- Dijkstra E.W, 1959. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, Vol.1, p. 269–271.
- Forkenbrock D. J., 1999. External costs of intercity truck freight transportation”, *Transportation Research Part A*, Vol.33, p.505-526.
- Klassen R. and P.F. Johnson., 2004. *The green supply chain*. In Westbrook, R. & New, S. (Eds.). Understanding Supply Chains - Concepts, Critiques and Futures. p. 229 -251.
- Knörr W. and C. Reuter, EcoTransIT: *Environmental Methodology and Data – Update – July 2005*.
- Lozano A. and G. Storchi, 2001. Shortest viable path algorithm in multimodal networks. *Transportation Research Part A*, Vol.35, p. 225-241.
- Lozano A. and G. Storchi, 2002. Shortest viable hyperpath in multimodal networks. *Transportation Research Part B*, Vol.36, p.853–874.
- Levinson D. M. and D. Gillen, 1998. The full cost of intercity highway transportation. *Transportation Research part-D*, Vol. 3, No. 4, p. 207-223.
- Milan J, 2007. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D*, Vol.12, p. 33–44.
- Min H., V. Jayaraman and R. Srivastava, 1998. Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions, *European Journal of Operational Research*, 108, pp.1–15.
- Piecyk M. and A. McKinnon, 2007. Internalising the External Costs of Road Freight Transport in the UK, Logistics Research Centre, School of Management and Languages, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, <http://www.greenlogistics.org>.
- Qu L. and Y. Chen, 2008. A Hybrid MCDM Method for Route Selection of Multimodal Transportation Network. Part I, LNCS 5263, p. 374 – 383.
- Rondinelli D. and M. Berry, 2000. Multimodal Transportation, Logistics, and the Environment: Managing Interactions in a Global Economy. *European Management Journal*, Vol. 18, p. 398–410.
- Srivastava S. K., 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, Vol. 9, Issue 1, p. 53–80.
- Ziliaskopoulos A. and W. Wardell, 2000. An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. *European Journal of Operational Research*, Vol. 125, p. 486-502.
- Zhang H.C., T.C. Kuo, H. Lu and S.H. Huang 1997. Environmentally conscious design and manufacturing: a state-of-the-art survey. *Journal of Manufacturing Systems*, 16, p.352-371.