

UNE PROCÉDURE D'AFFECTION MULTI-FLUX ET MULTIMODALE APPLIQUÉE AUX RÉSEAUX TRANSEUROPEÉENS DE FRET

BART JOURQUIN, SABINE LIMBOURG
LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT
FUCAM

1. INTRODUCTION

Un système de transport est un ensemble complexe et ses performances dépendent des décisions prises à différents niveaux de la société. Les processus d'évaluation, de conception et de gestion de ce système peuvent cependant être modélisés. Cette modélisation permet, entre autres, d'élaborer et d'évaluer des stratégies qui améliorent le système de transport.

Le point de départ de la réalisation d'un modèle de trafic consiste à examiner la zone d'étude, afin de mieux cerner la configuration de son réseau de transport et les caractéristiques qui lui sont associées. La région étudiée se voit ainsi dotée d'une certaine structure et son territoire découpé en zones dont la demande de transport est concentrée en un centroïde (centre de gravité de la zone).

Pourtant, un simple réseau géographique ne fournit pas la base appropriée

pour des analyses détaillées des opérations de transport, car un même segment du réseau peut être employé par des véhicules de types (ou même de modes) différents. Une modélisation des fonctions assurées par les nœuds aux terminaux et plates-formes de transbordement est nécessaire, car les coûts des opérations qui y sont effectuées représentent une partie importante du coût total de transport. Un réseau de transport ne peut donc pas se résumer à une simple représentation géographique, mais doit être considéré comme un réseau de service dans lequel toutes les opérations de transport doivent être identifiées. Pour analyser ces opérations, des coûts doivent être attachés aux liens sur lesquels les marchandises sont transportées ainsi qu'aux nœuds où elles sont manipulées. Cependant, la plupart de ces opérations peuvent être effectuées de différentes manières et à des coûts différents. Ainsi par exemple, des bateaux de différents gabarits, qui ont des frais d'exploitation différents, peuvent utiliser la même voie d'eau ; dans un terminal, la cargaison d'un camion peut être transbordée sur un train, consolidée avec d'autres chargements sur un bateau ou simplement être déchargée si elle a atteint sa destination finale. Les coûts associés varient évidemment en fonction de la nature de ces différentes opérations.

Une des solutions possibles est de représenter chaque type d'opération par un lien spécifique d'un «réseau virtuel», pour lequel un coût approprié et unique peut être calculé. Si elle donne des résultats intéressants, cette approche nécessite toutefois l'utilisation de méthodes d'affectation appropriées, qui sont discutées dans cet article.

En effet, lorsqu'il s'agit de modéliser de grandes zones géographiques, telles que le territoire européen par exemple, les données qu'il est possible d'obtenir sont, pour autant qu'elles existent, de nature assez agrégées. Les informations sur la demande de marchandises par exemple sont, dans le meilleur des cas, disponibles au niveau régional NUTS 3, et sur base annuelle. Étant donné qu'il n'est pas réaliste de penser que tous les flux entre deux régions passent par le même chemin et utilisent le même mode de transport, l'affectation de la demande se doit donc d'être multimodale et multi-flux.

Les modèles de trafic à mettre en œuvre doivent ainsi être capables de distinguer les différentes opérations de transport dans la chaîne logistique et de tenir compte de la nature agrégée des informations sur la demande afin de bien représenter les alternatives de modes et d'itinéraires parmi lesquels les chargeurs choisissent.

Après une courte présentation de la méthode des réseaux virtuels, un certain nombre de problèmes inhérents à leur mise en œuvre dans des modèles de réseaux transnationaux sont discutés. Il en ressort qu'il est nécessaire d'opter pour des algorithmes d'affectation plus sophistiqués que l'approche Tout-ou-Rien (ToR), et plus appropriés à tenir compte de la nature agrégée des données que les algorithmes d'équilibre.

Nous démontrons ensuite qu'une approche alternative, de type multi-flux, offre une réponse plus satisfaisante lorsqu'elle est appliquée aux modèles de fret stratégiques sur des territoires et des réseaux de grande taille. Cette approche est finalement décrite, mise en œuvre et discutée dans un exercice complet, basé sur le cas réel du réseau transeuropéen de transport de fret. Cet exercice, même s'il est construit sur une base de données contenant des informations publiques incomplètes, montre qu'il est possible de mettre en œuvre la méthodologie proposée sur des réseaux de très grande taille. En effet, si le réseau géographique utilisé est composé d'une centaine de milliers d'arcs, le réseau virtuel qui en est dérivé, et sur lequel nos algorithmes sont appliqués, contient plus de six cent mille arcs.

2. LES RÉSEAUX VIRTUELS COMME ALTERNATIVES AUX RÉSEAUX GÉOGRAPHIQUES

Un simple réseau géographique ne fournit pas d'information suffisamment détaillée pour permettre une analyse fouillée des opérations de transport, particulièrement lorsque la même infrastructure peut être empruntée par différents moyens de transport. Pour résoudre ce problème, l'idée initialement proposée par HARKER (1987) et CRAINIC et al. (1990) est de créer un lien « virtuel » avec des coûts spécifiques représentant une utilisation particulière d'une infrastructure. Le concept des « super-réseaux » développé par SHEFFI (1985), qui propose des liens de « transfert » entre les réseaux modaux, fournit également une structure comparable. Le concept a été systématisé et mis en application dans un logiciel (Nodus) par JOURQUIN (1995) et JOURQUIN et BEUTHE (1996). Cette systématisation a permis une application de la méthode à de grands réseaux multimodaux internationaux.

Dans l'approche classique à quatre étapes (génération, distribution, choix modal et affectation), le module de choix modal permet d'estimer, le plus souvent à l'aide d'un modèle stochastique, ce qui est transporté sur chaque réseau modal. La demande est donc affectée pour chaque mode séparément. Même lorsque les affectations se font sur base du simple algorithme du ToR, ces modèles de transport multi-modaux sont donc en quelque sorte multi-flux par nature, puisque la demande pour une même paire de la matrice origines-destinations (O-D) est répartie entre différents modes. Cette répartition peut également se faire entre différents itinéraires si une technique d'affectation un peu plus sophistiquée est mise en œuvre.

Un réseau virtuel permet quant à lui une affectation des flux non seulement entre différents itinéraires, mais également entre divers modes (et moyens) de transport. En effet, contrairement à l'approche classique, les réseaux virtuels décomposent explicitement toutes les opérations de la chaîne de transport. Un chemin calculé sur un tel réseau peut donc être une combinaison de différents modes et moyens de transport, qui peut contenir des opérations de pré- et post-acheminement par camion avec des transbordements vers le chemin de fer par exemple. La prise en compte explicite de l'inter-modalité est l'avan-

tage principal apporté par les réseaux virtuels, qui permettent ainsi de combiner la répartition modale et l'affectation en une seule étape, dès lors qu'un itinéraire peut représenter un parcours intermodal.

Les fonctions de coût utilisées pour les différentes opérations de transport peuvent être détaillées et complexes et, par exemple, tenir compte de la nature des marchandises transportées. Ce niveau de détail peut ainsi conduire au choix de différentes chaînes de transport pour des marchandises différentes, introduisant ainsi un embryon de multi-flux dans le modèle.

Toutefois, dans l'implémentation originale de la méthode, seul l'algorithme du ToR est utilisé pour l'affectation. Ainsi, la quantité totale contenue dans une cellule de la matrice O-D est affectée sur un chemin unique, même si ce chemin peut être intermodal.

Or, le niveau d'agrégation des matrices O-D qui peuvent être produites pour des grandes zones géographiques est tel qu'on ne peut pas supposer que, pour une catégorie donnée de marchandises, tout est transporté par le même mode de transport sur le même itinéraire. La demande au niveau européen par exemple, n'est souvent disponible qu'au niveau régional de type NUTS1 ou NUTS2. L'origine et/ou la destination des marchandises est alors souvent matérialisée au centroïde de chaque région, et il n'est pas réaliste de considérer que tout ce qui est transporté entre ces régions l'est d'une même façon.

Il s'agit donc, sur les réseaux virtuels, d'utiliser une méthode d'affectation capable d'identifier un certain nombre de chaînes de transport entre lesquelles les marchandises seront ventilées, de sorte qu'elles soient transportées par différents modes et/ou sur des itinéraires différents.

3. LIMITES DES MODÈLES D'ÉQUILIBRE APPLIQUÉS AUX RÉSEAUX VIRTUELS

Le problème de l'affectation est bien connu. Le lecteur moins au fait des techniques habituellement utilisées en trouvera une description, notamment dans ORTÚZAR et WILLUMSEN (1990) ou THOMAS (1991). Retenons que cette étape du modèle affecte les demandes de transport sur les divers itinéraires qu'offre le réseau. Les méthodes d'affectation doivent évidemment tenir compte des facteurs qui déterminent le choix des expéditeurs et des transporteurs, en particulier des coûts et du temps de transport qui peuvent dépendre de la capacité du réseau. Les méthodes d'affectation doivent ainsi respecter un ensemble de contraintes, notamment liées à la capacité, au temps de parcours et au coût de transport. Ces méthodes font appel à des techniques d'optimisation et peuvent être groupées en quatre catégories, selon qu'elles tiennent compte des contraintes de capacité et d'une distribution stochastique des coûts généralisés des expéditeurs (Tableau 1).

Pour être complète, une procédure d'affectation devrait considérer à la fois les effets stochastiques et les effets dus aux contraintes de capacité. Cependant, la complexité du problème ne permet pas d'appliquer une telle

procédure à des cas réels de grande taille. En pratique, VAN VIELT (1976) avait déjà proposé que le choix d'une procédure d'affectation dépende du niveau de congestion. Lorsque le réseau est relativement peu congestionné, ce qui est souvent le cas pour des trafics inter-régionaux, les méthodes stochastiques doivent être préférées. Par contre, un haut niveau de congestion est un argument en faveur des méthodes tenant compte des contraintes de capacité.

Tableau 1 : Techniques d'affectation

Distribution des coûts généralisés		
Contrainte de capacité	Non	Oui
Non	Tout-ou-Rien	Stochastique
Oui	Équilibre	Équilibre stochastique

Source : adapté de ORTÚZAR et WILLUMSEN (1990)

Le principe de l'algorithme du Tout-ou-Rien est de calculer le chemin le moins coûteux entre chaque paire origine et destination et d'affecter toute la demande à transporter sur ce chemin unique. L'algorithme du ToR présente de ce fait des limites car on observe souvent que les flux de transport entre deux nœuds donnés sont répartis sur plusieurs itinéraires alternatifs. Deux raisons principales peuvent expliquer ce phénomène : les contraintes de capacité du réseau et le fait que tous les utilisateurs, regroupés dans un centroïde, ne sont pas confrontés à des coûts identiques pour les différents itinéraires possibles.

Parmi les alternatives possibles, les algorithmes d'équilibre tiennent compte de la variation des coûts de transport en fonction des flux affectés, considérant que la distribution du trafic sur le réseau est le résultat d'une interaction entre l'offre et la demande de transport. Comme décrit précédemment, l'exécution de ces méthodes sur un réseau virtuel permet d'observer des transferts de flux non seulement entre différents itinéraires, mais également entre divers modes/moyens de transport. Ceci est une caractéristique intéressante qui pourrait être utile pour résoudre notre problème.

Différents algorithmes d'affectation qui essaient d'obtenir une distribution équilibrée des flux sur le réseau tenant compte des capacités et des flux peuvent être trouvés dans la littérature. L'application de ces algorithmes à des réseaux virtuels n'est toutefois pas immédiate, car la congestion est observée sur les liens réels et non pas sur des liens virtuels. Dans un réseau virtuel en effet, le même arc réel est représenté par plusieurs arcs virtuels, selon le nombre de moyens de transport (types de véhicules) pouvant l'emprunter. Il est ainsi nécessaire de consolider les flux obtenus sur les arcs virtuels associés au même arc réel afin d'obtenir le flux total réel.

Une description détaillée des techniques d'affectation d'équilibre sort du cadre de cet article. Nous nous limiterons ici à reprendre, au titre de référence, les résultats d'une étude antérieure (JOURQUIN, LIMBOURG, 2006)

appliquant les méthodes bien connues des moyennes successives (MSA, SMOCK, 1962) et de FRANK-WOLFE (FW, FRANK, WOLFE, 1956), adaptées aux réseaux virtuels.

Retenons que les méthodes d'équilibre amènent à des solutions qui ne sont que très légèrement plus coûteuses ($\pm 1\%$) que la solution ToR pour laquelle les coûts ont été calculés sur base d'un flux libre. Ce résultat ne doit pas surprendre, car VAN VIELT (1976) était déjà arrivé à la conclusion que ces méthodes n'étaient que peu adaptées aux réseaux interurbains, et, *a fortiori*, aux réseaux interrégionaux ou internationaux. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce résultat :

- Les matrices O-D utilisées contiennent des quantités totales sur une base annuelle. Il est difficile d'estimer ce qui est transporté à un moment donné d'une journée à un endroit précis ;
- Les algorithmes d'affectation mis en application sont des algorithmes statiques. Ceci pose un problème pour les expéditions sur de longues distances. Ces flux impliquent des temps de transport qui peuvent s'étaler sur plusieurs périodes de pointe ou de creux, alors que les affectations ne tiennent pas compte de la position des véhicules à un moment donné ;
- Dans la majorité des cas, la congestion est observée dans et autour des zones urbaines. Les réseaux de transport qui sont situés dans de telles zones représentent seulement une petite partie du réseau transport paneuropéen.

Rappelons que, outre la prise en compte de la congestion, une des motivations principales de la mise en œuvre des méthodes d'équilibre sur des réseaux virtuels était de s'assurer que les flux entre origines et destinations particulières soient répartis, de façon réaliste, entre différents chemins et modes alternatifs. Les restrictions de capacité ne sont pas un facteur explicatif assez important pour atteindre le résultat attendu, pour toutes les raisons qui viennent d'être décrites. En d'autres termes, dans le contexte particulier de l'utilisation des réseaux virtuel, d'autres approches doivent être explorées.

4. RECHERCHE D'ITINÉRAIRES ALTERNATIFS DANS UN RÉSEAU VIRTUEL

L'utilisation de méthodes d'affectation stochastique dont il a été question dans le Tableau 1 est souvent justifiée dans le cadre de la modélisation du transport de personnes par le fait que les usagers n'ont pas nécessairement les mêmes coûts ou qu'ils ne les perçoivent pas de la même manière. Cela résulte en un choix d'itinéraires alternatifs, à modéliser par un algorithme multi-flux, qui n'est pas nécessairement conditionné par un niveau de congestion réel. Une partie de cette justification perd de sa force dans le transport de marchandises pour lequel des facteurs subjectifs ne peuvent jouer un rôle aussi important. Toutefois, les coûts généralisés des différentes alternatives

peuvent varier d'une entreprise à l'autre en fonction de leur organisation et de leur localisation dans la région à laquelle elles appartiennent. Ils peuvent donc être bien différents du coût généralisé calculé entre centroïdes qui représentent les centres de gravité des régions considérées. Même pour les marchandises, il convient donc de répartir les flux, et une simple application de l'algorithme du ToR peut se montrer insuffisante. Le Tableau 2 propose une classification des méthodes d'affectation qui serait plus adaptée au problème qui nous occupe, dans la mesure où le choix d'une méthode d'affectation multi-flux est essentiellement justifié par le niveau d'agrégation des données disponibles sur la demande.

Tableau 2 : Classification alternative des techniques d'affectation

Contrainte de capacité	Niveau d'agrégation des matrices OD	
	Faible	Élevée
Non	Tout-ou-Rien	Multi-flux
Oui	Équilibre	Équilibre multi-flux

L'identification d'itinéraires alternatifs crédibles est une tâche difficile, pour laquelle deux approches principales peuvent être considérées. On peut tout d'abord supposer que chaque chargeur ou expéditeur peut choisir potentiellement n'importe quel chemin entre son origine et sa destination. S'il est facile d'identifier l'ensemble des itinéraires possibles, le nombre de solutions alternatives peut être très grand, posant des problèmes d'estimation et d'application du modèle. Cette hypothèse comportementale est de plus peu réaliste. En second lieu, un nombre restreint de chemins peut être considéré dans l'ensemble des choix possibles. La génération de cet ensemble peut être déterministe ou stochastique, selon la connaissance du problème par l'analyste.

DIAL (1971) propose d'inclure dans l'ensemble des choix possibles les chemins «raisonnables» composés de liens qui n'éloigneraient pas le voyageur de sa destination. L'approche de BEN-AKIVA et al. (1984) inclut des chemins remplissant des critères spécifiques, tels que le chemin le plus court, le chemin le plus rapide, le chemin le moins congestionné, le chemin avec le plus d'autoroutes, etc. Une telle approche nécessite toutefois des informations qui ne sont pas toujours disponibles pour de grands réseaux, tels que ceux qui couvrent un pays ou un continent, et c'est pourquoi nous proposons ici une méthode pragmatique permettant de calculer un ensemble d'itinéraires alternatifs réalistes sur lesquels les flux peuvent être répartis.

En première analyse, ces itinéraires pourraient être déterminés par des algorithmes tels que ceux des k -chemins les moins coûteux, qui classent les k chemins reliant deux points par ordre croissant de coût total. Le premier algorithme pour résoudre ce problème a été proposé par HOFFMAN et PAVLEY (1959). D'autres algorithmes ont ensuite été proposés. L'algorithme de

MARTINS et al. (2000) propose actuellement la solution la plus efficace en termes de temps de calcul. Cependant, ces algorithmes produisent un ensemble de chemins qui ne sont pas très utiles dans la classe de problèmes qui nous occupe. En effet, le deuxième meilleur chemin ne diffère souvent que très peu du chemin le moins coûteux. Un exemple classique est de quitter une autoroute pour la reprendre quelques centaines de mètres plus loin.

Nous avons donc opté pour une autre stratégie qui peut se résumer de la manière suivante : lorsqu'un chemin le moins coûteux a été calculé, les coûts sur tous les arcs qui constituent ce chemin sont artificiellement augmentés avant qu'un autre chemin soit calculé. Cette solution pragmatique (multi-chemins « simple ») peut être décrite comme suit :

- 0 $n = 0$;
- 1 Calcul du chemin le moins coûteux ;
- 2 Augmenter le coût sur chaque arc qui appartient au chemin calculé précédemment ;
- 3 $n = n + 1$;
- 4 Itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$.

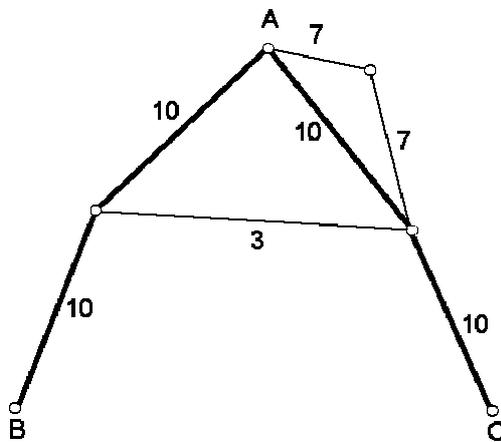
Une telle approche, qui s'apparente à la création d'une congestion artificielle importante qui force la recherche d'un nouveau chemin, est très simple à mettre en œuvre. Elle assure que chaque nouvel itinéraire essaye d'éviter les segments de réseau déjà utilisés puisque les coûts sur ces arcs ont été graduellement augmentés. Une alternative à l'augmentation des coûts est évidemment la suppression des arcs, ce qui aurait l'avantage de simplifier le graphe. Toutefois, on ne peut pas interdire à deux chemins alternatifs d'être partiellement communs. De plus, un arc donné peut très bien être utilisé vers une autre destination, partant de la même origine. Ce dernier point a toute son importance si on utilise un algorithme de recherche de chemin qui calcule tous les chemins les moins coûteux à partir d'un sommet source vers tous les autres sommets d'un graphe. Il a en effet été montré (JOURQUIN, LIMBOURG, 2006) que l'algorithme le plus efficace pour calculer les chemins les moins coûteux dans un réseau virtuel est l'algorithme de DIJKSTRA (1959)¹. Or, cet algorithme ne calcule pas uniquement le chemin le moins coûteux entre une origine et une destination, mais un arbre qui représente les chemins les moins coûteux d'une origine donnée à toutes destinations possibles. Cette caractéristique peut d'ailleurs poser un problème dans l'approche que nous proposons pour calculer un ensemble de chemins alternatifs, comme le montre l'exemple de la Figure 1.

Les valeurs numériques que l'on trouve sur la Figure 1 représentent les coûts associés aux arcs. Comme l'algorithme de DIJKSTRA calcule tous les chemins d'une origine déterminée vers toutes les destinations possibles, son applica-

¹ Le même article, qui se base entre autres sur les travaux de ZHAN et NOON (1998), discute également de l'implémentation informatique de l'algorithme et des structures de données qui peuvent optimiser ses performances.

tion à partir du nœud A donne comme résultat les itinéraires qui empruntent les arcs représentés en gras. Si l'algorithme décrit précédemment est employé pour calculer les deuxièmes meilleurs itinéraires, les coûts sur les liens déjà utilisés doivent être augmentés, par exemple de 50 %, comme sur la Figure 2. Cette dernière, qui se concentre uniquement sur l'itinéraire allant du nœud A au nœud C, montre également que, si le deuxième itinéraire le moins coûteux entre A et C est maintenant calculé, il emploiera les deux liens qui ont un coût (initial) de 7, alors qu'il devrait commencer à A en direction de B, mais rejoindre C au premier carrefour. Ce « vrai » second chemin n'a pas été identifié par notre algorithme parce que la première section a maintenant un coût augmenté (15 au lieu de 10), non parce qu'elle était déjà utilisée sur le chemin de A vers C, mais bien parce qu'elle a été employée sur le chemin le moins coûteux entre A et B. En d'autres termes, en employant DIJKSTRA, le choix du deuxième meilleur itinéraire entre une origine et une destination peut être influencé par d'autres itinéraires déjà identifiés vers d'autres destinations.

Figure 1: Un arbre de DIJKSTRA calculé à partir du sommet A



Une manière d'éviter ceci est d'employer un algorithme point à point pour calculer le chemin le moins coûteux. Le plus efficace est l'algorithme A* (HART et al., 1968 ; HART et al., 1972). Cependant, l'affectation au moyen de cet algorithme est beaucoup plus coûteuse en temps car l'algorithme doit être appliqué pour chaque cellule de la matrice O-D prise séparément, alors que l'algorithme de DIJKSTRA couvre en une fois toute une ligne de cette même matrice. Le Tableau 3 illustre ce problème pour une matrice qui contient environ 240 000 cellules sur un réseau virtuel produit à partir du réseau transport-Européen digitalisé, et qui est constitué de plus de 600 000 liens virtuels. Pour chaque paire O-D, trois chemins alternatifs ont été calculés. Les temps de calcul ont été obtenus sur un ordinateur équipé d'un processeur Pentium 4 HT, cadencé à 3.4Ghz, avec un système d'exploitation Linux Fedora Core 4 (noyau 2.6.14 SMP). Ces algorithmes ont été codés dans notre

logiciel Nodustm, écrit en Java 1.5.

Figure 2 : Ensemble « inexact » de chemins entre A et C

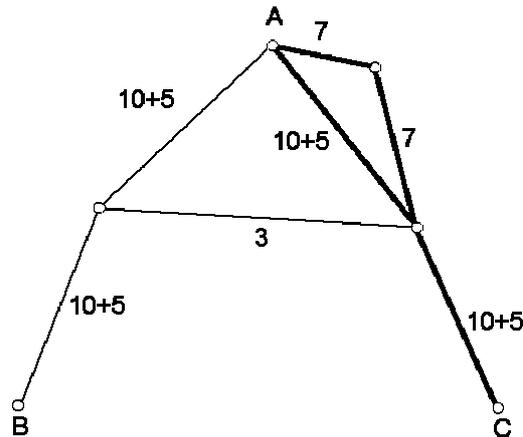


Tableau 3 : Temps de calcul pour les affectations

Méthode d'affectation	Temps de calcul
Tout-ou-Rien	5 min
Multi-flux rapide (Dijkstra)	15 min
Multi-flux exact (A*)	12 heures

L'algorithme exact nécessite réellement beaucoup plus de temps. Aussi, la question de la pertinence de son utilisation peut être soulevée. Une réponse définitive à cette question ne peut toutefois être donnée. Elle est influencée par la nature du problème à résoudre, et, dans la pratique, ce sera au modélisateur de faire son choix.

A ce stade, retenons que, quel que soit l'algorithme choisi, un ensemble de chemins alternatifs peut être obtenu. Reste maintenant à savoir si ces chemins alternatifs peuvent contribuer à la résolution du problème qui a été identifié plus haut.

La réponse reste malheureusement insuffisante lorsque l'on observe l'utilisation de plusieurs modes sur de mêmes origines-destinations et que l'on vise à étudier les parts modales. En effet, la différence de coût entre deux modes de transport différents sur une relation donnée est souvent plus grande que la différence de coût entre le chemin le moins coûteux et un itinéraire alternatif utilisant le même mode. Notre algorithme doit donc être amélioré pour « forcer » la recherche d'un autre mode :

0 $n = 0$;

1 Calcul du chemin le moins coûteux ;

2 Augmenter le coût sur chaque arc qui appartient au chemin calculé précédemment ;

- 3 Augmenter le coût pour chaque opération de chargement au nœud d'origine pour le mode de transport utilisé (en premier) sur l'itinéraire ;
- 4 $n = n + 1$;
- 5 Itérer. Retour au point 1 tant que $n < k$.

Maintenant, non seulement les coûts sur l'itinéraire identifié sont augmentés, mais les coûts d'accès au mode de transport choisi sont également revus à la hausse dans toutes directions à partir du nœud d'origine. Ainsi, lors de l'itération suivante, l'utilisation du même mode de transport sera découragée.

5. RÉPARTITION DES FLUX ENTRE ITINÉRAIRES DANS UN RÉSEAU VIRTUEL

Il est donc possible de produire un ensemble de chemins alternatifs plausibles qui inclut également, là où c'est possible, différents modes de transport. En d'autres termes, un partage modal peut être effectué pour toutes les relations représentées par les matrices de demande sans devoir mettre en œuvre un module de choix modal séparé.

Il ne reste donc qu'à répartir la demande entre les différents chemins identifiés et, si souhaité, pour différentes classes de produits, tels que les chapitres NST-R par exemple.

Historiquement, beaucoup de modèles ont été proposés pour résoudre ce problème, que ce soit de manière stochastique ou déterministe. Pour résumer, si on se limite à un choix entre deux itinéraires possibles, on peut faire appel à des formulations de type Probit. Le modèle Probit suppose que la loi de distribution du terme d'erreur sur les coûts perçus est une distribution normale. Si on postule l'indépendance entre les termes d'erreur relatifs aux différentes routes et que la distribution du terme d'erreur suit la loi de Weibull, le modèle Logit sera employé.

L'extension de deux à plusieurs itinéraires aboutit généralement à un modèle dans lequel les probabilités d'utilisation de ces itinéraires ne peuvent pas être estimées aussi facilement. Sur base de conditions très restrictives, le modèle Logit peut être reformulé en une forme connue sous le nom de modèle Logit Multinominal. Ces modèles souffrent toutefois d'une limitation importante pour certaines applications pratiques. Cette limite (BEN-AKIVA, LERMAN, 1985) est liée à l'hypothèse d'indépendance entre les termes d'erreur relatifs aux différents itinéraires, ce qui est évidemment problématique lorsque des routes ont en commun une partie importante des arcs empruntés. La détermination de notre ensemble d'itinéraires alternatifs peut toutefois donner une réponse intéressante à ce problème, nos itinéraires étant vraiment différents.

Le modèle Logit imbriqué surmonte en partie les limitations du modèle Logit Multinominal. Toutefois, il ne peut être appliqué aux chemins dans des réseaux virtuels, parce que les catégories (ici, les modes de transport) des chemins devraient être identifiables. Or, dans un réseau virtuel, un chemin est une suite finie d'opérations de transport, y compris l'utilisation d'un ou

plusieurs modes de transport. En d'autres termes, la simple notion de mode, et donc de catégorie, disparaît d'une certaine façon.

Quoiqu'il en soit, il faut encore estimer le modèle retenu sur base de données collectées par enquête. Si ces données ou études adéquates ne sont pas disponibles, ou que l'on souhaite une approche plus déterministe, on peut envisager de répartir la demande entre les différents chemins alternatifs de manière proportionnelle au coût de chaque chemin. Cette approche, très simple et pragmatique, peut cependant être justifiée dans les modèles stratégiques lorsque les fonctions de coûts généralisés, qui incluent le temps et des aspects liés à la qualité, sont employées pour les différentes opérations de transport décomposées dans le réseau virtuel. Le niveau d'agrégation des matrices de demande utilisées plaide également en faveur d'une telle approche par les coûts relatifs, car l'information sur la demande est limitée de centroïde à centroïde et non pas de firme à firme : ainsi, il est possible de garder une approche de minimisation des coûts tout en tenant compte du manque de détails sur les origines et destinations exactes des marchandises. L'affectation multi-flux devient ainsi purement déterministe.

Quelle que soit la méthode de répartition employée, l'affectation sur un réseau virtuel peut produire, en une seule étape, un résultat qui combine l'utilisation d'itinéraires et même de modes de transport différents entre une paire O-D déterminée. Ce résultat est évidemment très différent de ce qui peut être obtenu par la méthode ToR (ou même par les méthodes d'équilibre).

6. AFFECTATION SUR LES RÉSEAUX TRANSEUROPEËNS

Nous pouvons maintenant expérimenter le procédé d'affectation proposé sur un réseau réel. Pour ce faire, nous avons besoin d'un scénario de référence vraisemblable que nous avons essayé d'établir en utilisant uniquement des données publiques disponibles gratuitement.

Le premier problème est de déterminer l'offre et la demande sur le territoire européen. Une matrice O-D détaillée est nécessaire, mais malheureusement pas disponible publiquement. Les seules matrices qui sont disponibles pour les trois modes de transport considérés sur notre réseau (route, rail, voies navigables) ont été publiées par Eurostat et datent de 1991. Ces matrices fournissent des informations sur le type de produit transporté (10 chapitres NST-R) mais seulement entre pays. Nous avons besoin de données plus récentes et d'un niveau beaucoup plus désagrégé.

Eurostat publie heureusement une matrice O-D entre pays pour l'année 2000, mais dans laquelle toutes les catégories de marchandises sont fusionnées. La combinaison des matrices de 1991 et les données disponibles pour 2000 rendent possible l'obtention d'un nouvel ensemble (par mode et produit) de matrices, mais qui doit être affiné puisque nous ne pouvons pas considérer que les quantités transportées ont évolué de la même manière pour tous les groupes de marchandises sur la période.

C'est une fois de plus la base de données Eurostat qui a été employée pour calculer un ensemble de coefficients qui représentent l'évolution générale des transports pour les différentes catégories de marchandises entre 1991 et 2000. Ces coefficients ont été employés pour obtenir un ensemble complet de matrices O-D pour toute l'Europe par mode de transport et chapitre NST-R. Même si nous savons que ces matrices O-D ne sont pas complètement exactes, elles représentent une bonne base pour notre exercice. Notons également que notre ensemble de données est une estimation pour l'année 2000, et qu'il ne contient pas des informations sur les « nouveaux » pays européens.

Ces matrices de pays à pays doivent être réparties entre les centroïdes des différentes régions du réseau. Nous avons considéré à cet effet les régions NUTS2, car leur taille est beaucoup plus homogène à travers l'Europe que celle des régions NUTS3. De nouveau, la base de données d'Eurostat a été très utile parce qu'elle fournit les quantités de marchandises (par chapitre NST-R) qui sont importées et exportées au niveau de chaque région NUTS3. On peut ainsi déterminer un poids pour chaque région d'un pays. Cette information permet de désagréger les matrices nationales en matrices régionales. Évidemment, les matrices pour les voies navigables et les chemins de fer ont été réparties uniquement sur les centroïdes qui peuvent être connectés à ces modes de transport. À la fin du processus, 30 matrices (3 modes, 10 groupes NST-R de produits) ont été générées.

Les matrices des différents modes ont ensuite été fusionnées puisque l'affectation sur un réseau virtuel doit elle-même effectuer la répartition modale. La matrice fusionnée, dans laquelle les informations sur les groupes de marchandises ont été conservées, a environ 240 000 entrées. L'affectation est donc multi-classes dans la mesure où chaque catégorie de marchandises est affectée séparément sur base de fonctions de coûts qui lui sont propres.

Une cartographie raisonnable des réseaux de transport pour la route, les chemins de fer et les voies navigables est également nécessaire. Nous avons utilisé la Digital Chart of the World (DCW), mise à disposition gratuitement par la Penn State University (<http://www.maproom.psu.edu/dcw>), pour ce qui concerne les voies ferrées et les routes en Europe. Nous avons nous-mêmes digitalisé le réseau de voies d'eau navigables, car le réseau hydrographique proposé dans la DCW ne permet pas d'identifier les voies qui sont navigables. Ces réseaux modaux ont ensuite été enrichis en introduisant, les lignes de ferry (et le Tunnel sous la Manche). Finalement, les frontières des régions NUTS 2 nous ont aimablement été communiquées par GISCO (le système d'information géographique de la Commission Européenne), ce qui nous a permis de calculer les centroïdes de chaque région, utilisés comme origines ou destinations pour les marchandises. Enfin, les réseaux ont été reliés entre eux à l'aide de connecteurs qui relient les centroïdes à chaque réseau modal (pour autant qu'il ne soit pas trop éloigné). On obtient ainsi un « graphe

géographique », de plus ou moins 110 000 arcs et de 90 000 nœuds, à partir duquel un réseau virtuel de plus de 600 000 arcs est généré et sur lequel nos différents algorithmes d'affectation peuvent être appliqués. Même si ce réseau paneuropéen n'est pas complètement à jour, il contient suffisamment de détails pour que nos simulations soient utiles et réalistes.

Utilisées telles quelles, les fonctions de coût utilisées ne donnaient pas une répartition modale correcte, car certains éléments tels que la qualité du service ou sa fréquence ne sont pas explicitement pris en considération. Un calibrage était donc nécessaire, dont les résultats sont donnés dans le Tableau 4. La procédure d'affectation employée est une « multi-flux déterministe avec répartition modale forcée », telle qu'elle a été expliquée plus haut. Il est tout de même important à ce stade de garder à l'esprit les éléments suivants :

- L'objet de ce papier est de proposer et de mettre en œuvre une méthode d'affectation appropriée aux modèles de transport de fret stratégiques utilisant une approche du type « réseaux virtuels » ;
- L'ensemble des données utilisées pour tester cette approche sont publiques. En particulier, les matrices de demande sont obtenues en utilisant une méthode (expliquée plus haut) assez grossière. Ces matrices n'ont pas été validées en les comparant par exemple à des matrices commerciales telles que celles maintenues par NEA aux Pays-Bas. Tout au plus peut-on dire que nos matrices sont vraisemblables et utilisables pour tester le bon fonctionnement des méthodes analysées ;
- Les fonctions de coût utilisées proviennent d'études antérieures, mais commencent sans doute à dater ; elles ne correspondent pas aux coûts de l'année de référence utilisée pour la construction des matrices OD ;
- Un travail de validation plus approfondi des résultats obtenus devrait être effectué, en calculant, par exemple, la corrélation entre l'utilisation des différents modes dans la matrice de référence et les résultats de l'affectation, et ceci pour toutes les paires OD. Ce travail doit encore être fait, mais devrait l'être sur des données de demande validées.

Tableau 4 : Performance globale des affectations

		Données	Modèle
Tonnes	Péniches	3,87 %	3,97 %
	Trains	5,08 %	5,30 %
	Camions	91,05 %	90,73 %
Tonnes.km	Péniches	5,00 %	3,73 %
	Trains	5,95 %	6,77 %
	Camions	89,05 %	89,50 %

Compte tenu de ces différentes remarques, on peut considérer que les premiers résultats sont tout à fait intéressants, alors qu'aucun module de répartition modale n'a été utilisé.

7. CONCLUSIONS

Les modèles de transport sont souvent basés sur une approche en quatre étapes, dans laquelle la génération, la distribution, la répartition modale et l'affectation sont autant de modules séparés. Une autre approche, employée par différents auteurs, est de générer un réseau alternatif, qui représente non seulement ses composantes géographiques mais également les différentes opérations qui sont possibles sur une chaîne de transport. Ces « super-réseaux » ou « réseaux virtuels » ouvrent des perspectives intéressantes, car ils permettent une analyse détaillée des chaînes de transport, qui peuvent être intermodales. Ils ont la caractéristique d'effectuer la répartition modale et l'affectation en une seule étape.

Toutefois, ces réseaux virtuels, lorsqu'ils sont utilisés pour la mise au point de modèles de transport sans faire appel à un module de choix-modal classique, nécessitent l'utilisation de méthodes d'affectation appropriées pour obtenir une répartition entre modes et itinéraires correcte alors que l'on ne dispose que de données agrégées sur la demande pour le transport inter-régional et international.

Il s'avère que l'utilisation des procédures d'affectation d'équilibre ne donne pas une solution adéquate lorsqu'elles sont appliquées à de tels réseaux. Ceci est dû au fait que les modèles d'équilibre cherchent à disperser les flux uniquement là où la densité de trafic est importante, ce qui n'est pas le cas sur une grande partie des grands axes de transport européens. De plus, les matrices d'origines-destinations pour le transport sur longues distances sont souvent construites sur une base annuelle. Il est ainsi difficile d'estimer ce qui se produit spécifiquement pendant les heures de pointe. Enfin, le transport sur longues distances peut prendre plusieurs heures, voire des jours, et il n'est donc pas possible, avec les modèles statiques, de connaître la situation précise d'un véhicule à un moment donné.

L'obtention d'un ensemble d'itinéraires alternatifs réalistes, c'est-à-dire des itinéraires n'ayant pas une partie commune trop importante, est possible si des algorithmes appropriés sont employés. Il apparaît rapidement que les algorithmes permettant de déterminer les k chemins les moins coûteux n'offrent pas une solution satisfaisante, parce que les itinéraires obtenus sont trop semblables entre eux. Un algorithme simple et pragmatique est proposé dans cet article, qui assure que l'ensemble des itinéraires calculés contient des itinéraires différents, utilisant des acheminements par des modes de transport différents.

Les méthodes à employer pour répartir les flux entre ces différents itinéraires sont également discutées. Si une approche stochastique, basée sur l'emploi d'un modèle Logit Multinomiale peut être une alternative intéressante, une solution plus pragmatique utilisant les poids relatifs des différents itinéraires a également été présentée et justifiée.

L'article présente enfin un modèle complet, dans lequel des données publiquement disponibles ont été employées pour établir un scénario de référence pour le réseau de transport européen. Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir un modèle calibré, à la fois sur les tonnes transportées et sur les flux exprimés en tonnes.km, en utilisant une affectation sur un réseau virtuel, sans qu'un module de répartition modale spécifique ne soit mis en œuvre.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le professeur Michel BEUTHE (FUCaM), ainsi que les deux lecteurs anonymes, pour leurs lectures attentives et leurs suggestions constructives. Ils ont largement contribué à nous aider à finaliser cet article.

BIBLIOGRAPHIE

BEN-AKIVA M., BERGMAN M. J., DALY A. J., RAMASWAMY R. (1984) Modelling Inter-Urban Route Choice Behavior. **Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory**, pp. 299-330.

BEN-AKIVA M., LERMAN S. R. (1985) **Discrete Choice Analysis**. Cambridge, MIT Press.

CRAINIC T.G., FLORIAN M., GUÉLAT J., SPIESS H. (1990) Strategic planning of freight transportation: Stan, an interactive graphic system. **Transportation research record**, n° 1283, pp. 97-124.

DIAL R. B. (1971) A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. **Transportation Research**, Vol. 5, pp 83-111.

DIJKSTRA E.W. (1959) A note on two problems in connection with graphs. **Numerische Mathematik**, Vol. 1, pp. 269-271.

FRANK M., WOLFE P. (1956) An algorithm for quadratic programming. **Naval Research Logistics Quarterly**, Vol. 3 , pp. 95-110.

HARKER P.T. (1987) **Predicting intercity freight flows**. VNU Science Press.

HART P. E., NILSSON N. J., 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.

HART P. E., NILSSON N. J., RAPHAEL B. (1972) Correction to "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths". **SIGART Newsletter**, n° 37, pp. 28-29.

HOFFMAN R., PAVLEY R.R. (1959) A method for the solution of the nth best path problem. **Journal of the association for Computing Machinery**, Vol. 6, pp. 506-514.

JOURQUIN B. (1995) **Un outil d'analyse économique des transports de marchandises sur des réseaux multimodaux et multi-produits: Le réseau virtuel, concepts, méthodes et applications**. Thèse de doctorat, Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgique.

JOURQUIN B., BEUTHE M. (1996) Transportation policy analysis with a geographic information system: the virtual network of freight transportation in Europe. **Transportation Research C**, Vol. 4, n° 6, pp. 359-371.

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**, Vol. 6, n° 3, pp. 205-228.

MARTINS E.Q.V., PASCOAL M.M.B., SANTOS J.L.E. (2000) A new improvement for a k shortest paths algorithm. **Investigação Operacional**, Vol. 21, n° 1, pp. 47-60, 2001.

ORTÚZAR J. DE D., WILLUMSEN L. (1990) **Modelling Transport**. John Wiley & Sons, New-York.

THOMAS R. (1991) **Traffic Assignment Techniques**. Avebury Technical, England.

SHEFFI Y. (1985) **Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

SMOCK R.J. (1962) An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. **Highway Research Board Bulletin**, Vol. 156, pp. 1-13.

VAN VIELT (1976) Road assignment – I. Principles and Parameters of Model Formulation. **Transportation Research**, Vol. 10, pp. 137-143.

ZHAN F.B., NOON C. E. (1998) Shortest Path Algorithms: An Evaluation using Real Road Networks, **Transportation Science**, Vol. 32, n° 1, pp. 65-73.