

Interface maritime et interface métropolitaine : vers la modélisation de l'axe Seine par les réseaux

Maritime interface and metropolitan interface : toward the modelling of the Seine Axis by networks

Thibaut Démare (thibaut.demare@univ-lehavre.fr)¹, Cyrille Bertelle
(cyrille.bertelle@univ-lehavre.fr)¹, Antoine Dutot (antoine.dutot@univ-lehavre.fr)¹ et
Laurent Lévêque (laurent.leveque@univ-lehavre.fr)²

19 Septembre 2013

Résumé Ce travail s'articule en deux parties. La première décrit le territoire de l'axe Seine : comment les flux de marchandises sont initiés ? Comment des acteurs de natures hétérogènes s'organisent ensemble et communiquent entre eux ? Quels sont les bâtiments logistiques et leurs fonctions ? Par où transitent ces flux de marchandises ? Les réponses à ces questions nous permettent ainsi de constituer une base de connaissances sur laquelle nous nous appuyons pour modéliser, dans la deuxième partie, cet environnement que nous percevons comme un système complexe. Nous nous servons de la théorie des graphes pour représenter les réseaux physiques du territoire et du modèle agent pour décrire le réseau d'acteurs. Cette conception autorise une communication entre ces deux représentations afin d'intégrer des mécanismes de rétro-action.

Mots-clefs flux de marchandises, chaîne logistique, axe Seine, modélisation, système complexe

Abstract This work is in two parts. The first one describes the Seine axis territory : how do flows of goods start ? How do actors of different natures organize themselves and communicate between them ? What are the logistics buildings and their functions ? What are the paths of these flows of goods ? The answers to these questions allow us to establish a knowledge base which help us to model, in the second part, the environment seen as a complex system. We use the graph theory in order to represent the physical network of the territory and the agent-based model to describe the actors' network. This concept allows a communication between these two representations in order to add retro-actions mechanisms.

Keywords flow of goods, supply chain, Seine axis, modelling, complex system

1. Université du Havre - LITIS - Informatique

2. Université du Havre - CIRTAI - UMR IDEES - Géographie

Introduction

Le travail présenté ici vise à modéliser les processus à l'origine des flux de marchandises sur l'axe Seine que l'on peut appréhender comme un système complexe. Cet axe est un espace géographique économiquement important. Il se compose en aval d'un port de marchandises de rayonnement international grâce au Havre, et en amont d'un hinterland riche de la métropole parisienne. Les villes de Rouen et de Paris offrent également une activité portuaire grâce à la présence de la Seine et de son estuaire. La problématique de la modélisation des processus présents au sein de cette région provient de la complexité d'un tel environnement. Effectivement, le transport de marchandise implique un nombre important d'acteurs différents. Que ce soient les importateurs, les exportateurs, les transporteurs maritimes et/ou terrestres, les logisticiens, les consommateurs, les autorités publiques, tous interviennent à un moment ou à un autre dans le transport. Mais surtout, ils interagissent entre eux de diverses manières. Certains collaborent, d'autres sont en compétition, et/ou négocient des contrats. La complexité ne s'arrête pas seulement à ce maillage d'interactions mais continue dans le monde physique. La marchandise elle-même peut faire partie de chaînes logistiques très diverses et emprunter des modes de transports variés grâce aux camions, aux wagons de fret ou encore aux barges fluviales.

Cette recherche s'inscrit dans une collaboration entre le LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes) et les membres de projet Devport. Le projet Devport³ regroupe des chercheurs de différentes disciplines tels que des géographes, des économistes, des mathématiciens ou encore des informaticiens. Ils travaillent autour de l'analyse des modèles d'organisation portuaire et cherchent à mieux appréhender les acteurs de l'économie maritime, portuaire et logistique. Le but final du projet est ainsi de concevoir des modèles permettant d'optimiser le transport de marchandise et de les appliquer à l'axe Seine. Le LITIS est réparti sur plusieurs sites, mais celui du Havre se compose principalement de l'équipe RI2C (Réseaux d'Interactions et Intelligence Collective). Celle-ci s'intéresse à la morphodynamique des réseaux d'interactions dynamiques et notamment ceux qui structurent les territoires tels que des réseaux routiers. Ces réseaux sont souvent considérés comme des systèmes complexes. Des outils de modélisation, comme la plateforme GraphStream ont notamment été développés par ses membres [1]. Celle-ci permet, entre autre, d'analyser comment la morphologie ou encore la topologie des réseaux interagissent avec des processus qui s'opèrent sur ces réseaux. Michel Nabaa avait par exemple étudié au cours de sa thèse [2] la vulnérabilité des zones urbaines lors d'évacuation de population dans le cas de risques majeurs. Il a ainsi mis en avant les relations existantes entre la structure (morphologie et topologie) du réseau viaire et la dynamique qui se produit sur celui-ci lors d'une évacuation. La figure 1 illustre ces rela-

3. Site Internet du projet Devport : <http://www.projet-devport.fr/>

tions en décrivant la rétro-action entre la structure et les processus formant une boucle systémique.

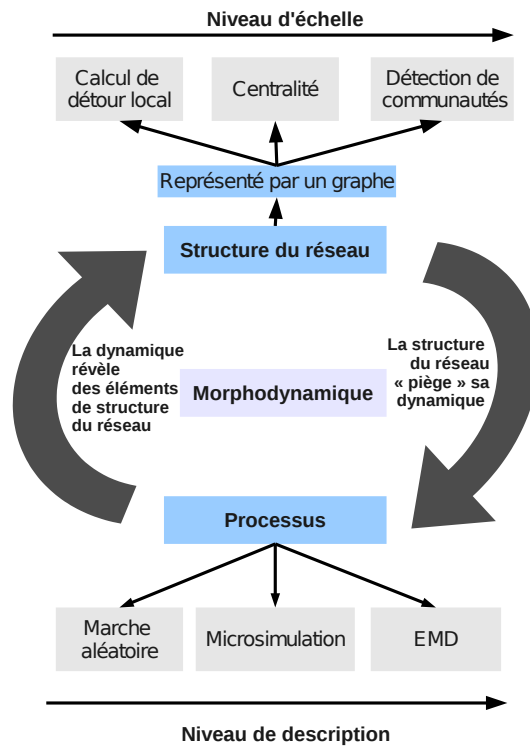


FIGURE 1 – La boucle systémique : entre structure et dynamique

Nous allons donc décrire dans un premier temps la logistique de l'axe Seine où le réseau des acteurs récupère des informations auprès du réseau physique (support du flux de marchandise) et agit sur celui-ci. On montrera qu'il existe aussi une dichotomie entre le maritime où les flux sont massifiés et l'hinterland où ils sont atomisés. L'un des enjeux est ainsi de faire ressortir la complémentarité qui existe entre ces composantes qu'a priori tout sépare. Nous développerons ensuite dans la deuxième partie un modèle composé de deux représentations de ces réseaux. Nous verrons qu'ils sont justement interconnectés grâce à des mécanismes de rétro-action, similaires à ceux mis en évidence par Nabaa. Ce travail permet donc de déterminer le niveau d'intégration nécessaire pour mettre en place dans le futur une simulation suffisamment précise.

1 La logistique de l'axe Seine

1.1 Un réseau d'acteurs support des relations entre les protagonistes du transport

1.1.1 L'interface métropolitaine

L'importateur et l'exportateur (à l'origine de tous processus de transport international) établissent entre eux *un contrat de ventes à l'international* qui décrit la quantité, le prix, l'adresse de livraison du produit, et d'autres détails comme le mode de règlement. On y négocie également les "International Commercial Terms" (ou "Incoterms®") qui seront utilisés. Dans le cas d'un approvisionnement, il est possible de statuer sur les fréquences et les quantités de chaque livraisons.

Les Incoterms® sont un panel de règles définissant l'ensemble des droits et devoirs de chacune des parties lors d'un accord de commerce international. La Chambre de Commerce Internationale les a défini afin de garantir une meilleure compréhension entre des acteurs de différentes cultures et de différentes langues [3, 4]. Elles précisent le point de transfert (voir figure 2) des frais et des risques (et non de propriété) ainsi que les documents dus par chaque partie [4]. Ces normes servent de base au contrat de vente tout en étant suffisamment flexibles pour permettre des modifications en cas de besoin.

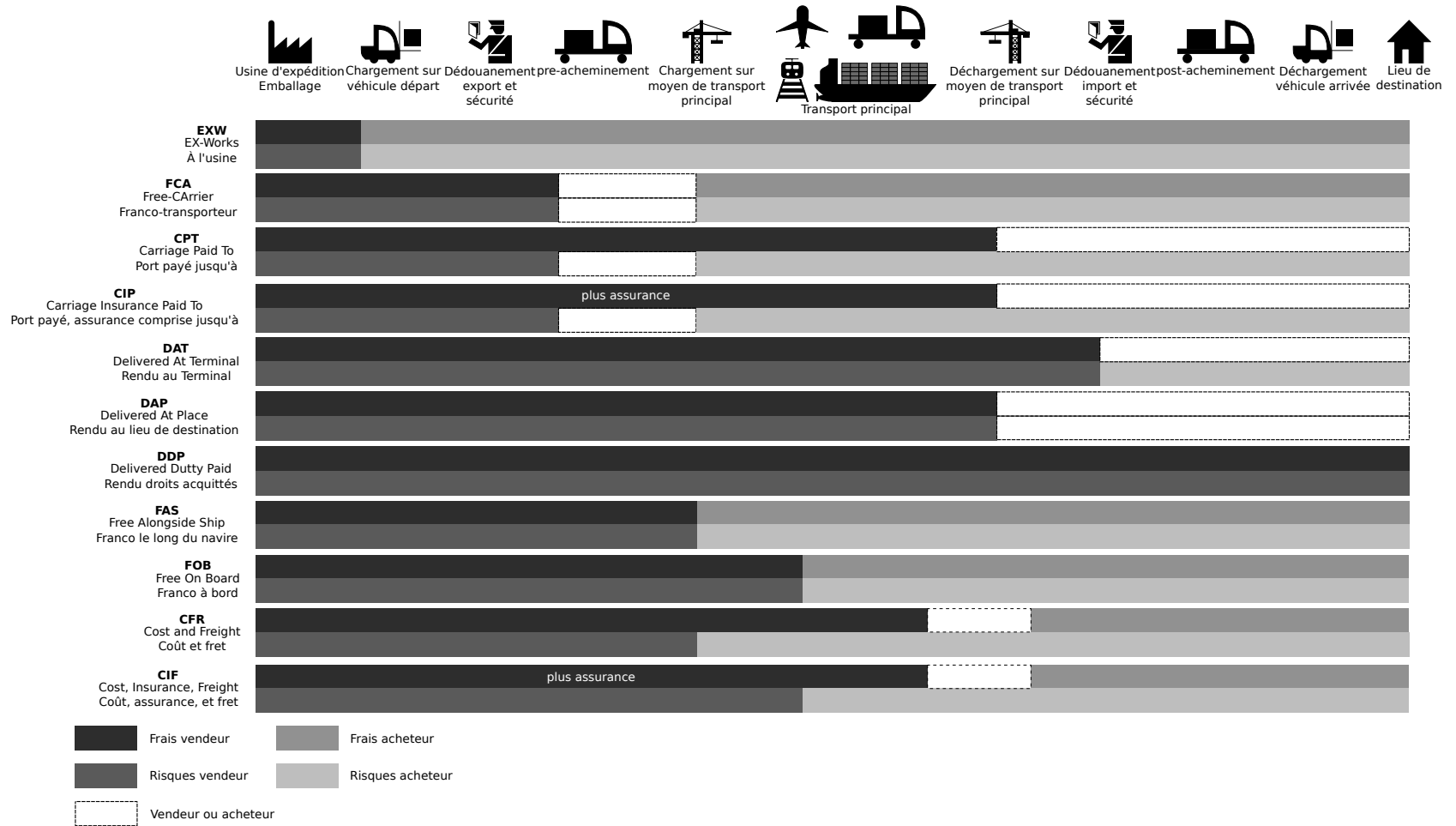
L'acheteur peut traiter directement avec le vendeur mais il peut également passer par une centrale d'achat [6]. Il s'agit d'une structure chargée de regrouper plusieurs commandes similaires à l'échelle régionale, nationale ou internationale, et dans le but de réduire les coûts (grâce aux négociations sur les quantités). Elles peuvent être intégrées si les acheteurs passant par la centrale appartiennent à la même entreprise que la centrale elle-même, ou coopératives si les acheteurs et la centrale d'achat ne font pas forcément partie de la même entreprise.

Le transport en lui-même peut être effectué par l'importateur et/ou par l'exportateur en fonction des Incoterms®. Toutefois, le plus souvent, ils vont sous-traiter auprès d'un commissionnaire de transport (organisateur du transport ou transitaire) cette opération qui s'avère complexe.

1.1.2 L'interface maritime

Le commissionnaire de transport est une profession réglementée de transitaire [5]. Il organise le transport de la marchandise en son nom et pour le compte d'un chargeur [5, 3]. Il est donc responsable juridiquement de la marchandise de son client et gère la chaîne de transport. Il doit ainsi trouver une compagnie maritime (l'armateur) qui propose

FIGURE 2 – Les Incoterms® [5]



une ligne régulière depuis le port d'exportation et vers le port d'importation. L'armateur possède les navires (porte-conteneurs, pétroliers,...) et les conteneurs et fixe les tarifs du transport maritime.

Le transport à l'international nécessite un contrôle aux frontières qui est effectué par les douanes. Leurs objectifs sont de percevoir les taxes de l'État, de vérifier que des marchandises prohibées (contrefaçons, produits non conformes aux réglementations,...) n'entrent ou ne sortent du territoire et enfin que les documents soient correctement renseignés [3]. Les douaniers peuvent ainsi bloquer un conteneur en attendant une régularisation. Le responsable du conteneur devra avoir payé les taxes douanières avant le départ du terminal sauf s'il en sort par barge fluviale. Si tel est le cas, les douaniers peuvent faire les contrôles et l'acquittement de la taxe sur la barge directement pendant le transport.

1.2 Un réseau physique support de la marchandise

1.2.1 L'interface maritime

Les terminaux maritimes et fluviaux sont assez similaires. Il s'agit de zones de manutention où l'on va faire décharger un conteneur d'un navire vers le quai (ou l'inverse pour l'export). Ce conteneur sera ensuite stocké sur le terminal en attendant d'être embarqué dans un véhicule (train, camion, barge fluviale). Tous les terminaux ne proposent pas tous les modes de transport à la fois. Dans certains terminaux, les conteneurs ne pourront en sortir que par camion. Le fait de stocker un conteneur sur le terminal a également un coût (plus faible dans un terminal fluvial [7]) qui dépend de la durée de stockage.

On pourra également noter que le temps nécessaire pour charger ou décharger un navire dépend de certains paramètres comme le nombre de manutentionnaires (dockers), le nombre de portiques ou encore le type de matériels employés. Par exemple, des portiques plus récents sont potentiellement plus performants que d'anciens (car plus grands ou plus précis) [8]. On pourra aussi remarquer que le nombre de conteneurs à déplacer avant de pouvoir sortir celui réellement voulu a une incidence forte sur le temps de manutention.

Viennent ensuite les gares ferroviaires qui sont connectés, entre autres, au port en étant parfois directement rattachées aux terminaux. On en distingue trois types :

- Les gares de marchandises : Elles permettent de placer la marchandise (comme un conteneur ou du vrac) sur un wagon. On peut ainsi obtenir des wagons isolés ou des trains complets selon les besoins. Afin de limiter les ruptures de charges, on s'arrange le plus souvent pour qu'elles fassent directement partie d'une autre infrastructure comme un terminal, ou un entrepôt.

- Les gares de triages : Elles permettent de grouper (resp. dégroupier) les wagons isolés (resp. les trains complets) pour former des trains complets (resp. des wagons isolés). Elles peuvent être légèrement plus isolées d’autres infrastructures mais on s’arrange tout de même pour que les wagons isolés ne fassent pas trop de route avant d’être regroupés.
- Les embranchements ferroviaires : certaines entreprises sont directement raccordées au réseau ferroviaire par des rails privées.

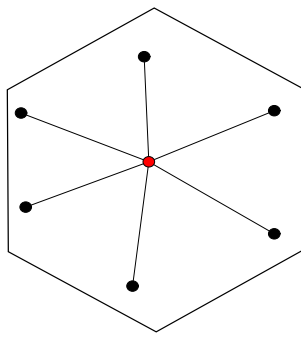
L’interface maritime est connectée à l’international par des lignes régulières (ou non) proposées par les armateurs. Ces lignes sont sujettes à des aléas, à des retards imprévus qui seront rattrapés le plus possible lors du passage portuaire et le transfert vers l’interface métropolitaine. Ces deux interfaces sont reliées grâce aux réseaux routier, ferroviaire et fluvial. Chacun de ces réseaux offrent des caractéristiques très différentes : le ferroviaire se montre plus complexe à gérer mais permet une massification plus importante ; le fluvial est limité en terme de destinations possibles mais autorise lui-aussi une plus grande massification ; le routier ne permet de transporter qu’un seul conteneur à la fois mais dessert tout le territoire et dans des délais très courts.

1.2.2 L’interface métropolitaine

Au cœur de l’hinterland, l’interface métropolitaine se compose de bâtiments logistiques. On entend par là les entrepôts et les plates-formes [9]. On les distingue principalement par le temps de stockage de la marchandise (on parle d’entrepôt lorsqu’elle est stockée plus de 24h et de plate-forme lorsqu’elle est stockée moins de 24h). De plus, dans un entrepôt, la marchandise est rangée sur des racks (ou des étagères), alors qu’en général, dans une plate-forme, la marchandise est placée directement sur le quai. On notera que le propriétaire d’un bâtiment logistique n’est pas nécessairement le propriétaire de la marchandise, il peut y avoir ainsi deux ou trois intermédiaires.

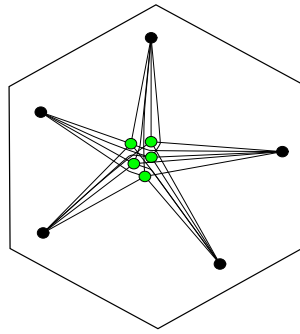
Les bâtiments logistiques peuvent être : non spécialisés (pouvant accueillir tout ou presque) ou spécialisés (textile, frigorifique, alimentaire,...). Et certaines marchandises ne peuvent être stockées ensemble : par exemple, l’alimentaire ne peut être placé dans le même entrepôt que des matières dangereuses.

La finalité des bâtiments logistiques est d’externaliser la gestion des marchandises d’autres infrastructures comme des magasins, des industries, voir même d’autres bâtiments logistiques. En règle générale, un seul bâtiment permet d’approvisionner plusieurs infrastructures. Ainsi, et afin de minimiser les distances parcourues pour les livrer, on répartit l’ensemble des bâtiments logistiques sur le territoire en fonction de modèles connus (voir figure 3).



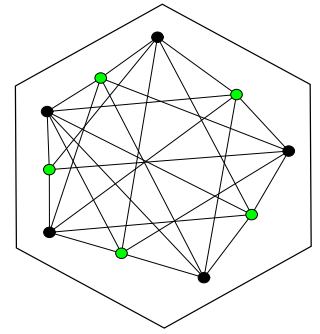
● Bâtiment logistique non spécialisé
● Magasin - industrie - autre

(a) Logistique concentrée - un bâtiment logistique non spécialisé est au barycentre des zones de livraison



● Bâtiment logistique spécialisé
● Magasin - industrie - autre

(b) Logistique polarisée - plusieurs bâtiments logistiques spécialisés sont placés au barycentre des zones de livraisons



● Bâtiment logistique spécialisé
● Magasin - industrie - autre

(c) Logistique répartie - plusieurs bâtiments logistiques sont répartis de façon homogène sur le territoire

FIGURE 3 – Représentation des différentes organisations spatiales des bâtiments logistiques

Les bâtiments logistiques peuvent également avoir une activité particulière⁴ en plus du simple stockage [10, 6, 9] :

- Le groupage/dégroupage : le groupage est l'opération consistant à former un flux important à partir de plus petit flux d'origines différentes mais à destinations identiques (ou similaires) afin de limiter le nombre de moyens de transports utilisés. Le dégroupage est l'opération inverse.
- Le cross-docking (voir figure 4) : cette méthode consiste à effectuer un routage de la marchandise. On considère qu'il y a plusieurs flux entrant d'origines différentes. Pris indépendamment, ces flux sont constitués de lots de marchandises dont les destinations sont différentes. Pourtant, sur l'ensemble des flux entrants, plusieurs lots ont des destinations identiques. On est alors capable de reconstituer des flux sortants chacun composés de lots ayant la même destination. Cette méthode est notamment utilisée en messagerie.
- L'empotage/dépotage : l'empotage est l'opération qui consiste à remplir un conteneur en respectant certaines contraintes (ne pas abîmer la marchandise, équilibrer le conteneur,...). Le dépotage est l'opération inverse.
- Le contrôle qualité : consiste à vérifier que les articles ne se sont pas abîmés pendant le transport. À la suite de ce contrôle, il est également possible de prévoir une réparation (dans la mesure du possible).
- Le reconditionnement : consiste à effectuer un traitement sur la marchandise avant de l'expédier (ex. : l'emballage, l'étiquetage, le défroissage, la mise sur cintre,...).

4. Par abus de langage, il est alors fréquent de parler de plate-forme logistique même si la marchandise y est stockée plus de 24h.

- La préparation de commandes (ou picking) : consiste à regrouper les articles d’une commande particulière et dans les bonnes quantités en vue de l’expédition.
- L’expédition : une fois la commande traitée, elle doit être placée dans le bon mode de transport au bon moment et qui ira à la bonne adresse.

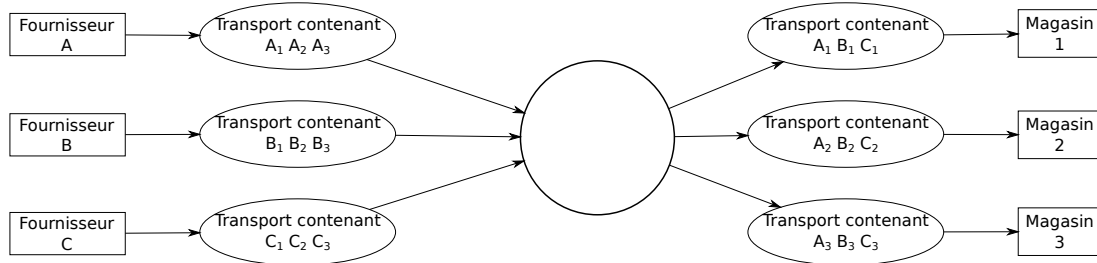


FIGURE 4 – Principe du cross-docking

À chaque étape, on peut également scanner l’article pour un traitement informatique (comme la mise à jour des bases de données). Ces informations peuvent servir à la traçabilité de la marchandise ou à effectuer un contrôle des stocks.

Les bâtiments logistiques font partie de chaînes logistiques qui se structurent sous la forme de réseaux de distribution [9]. On recense trois grandes topologies qui peuvent se mixer entre eux : le réseau en trompette (voir figure 5), le réseau en entonnoir (voir figure 6), et le réseau type messagerie ou cross-docking où plusieurs plates-formes de cross-docking sont réparties sur le territoire et sont reliées entre elles. On peut avoir plusieurs niveaux de plates-formes : national, régional,...

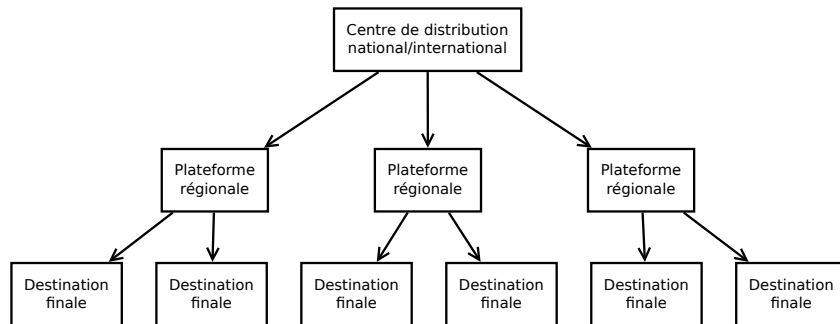
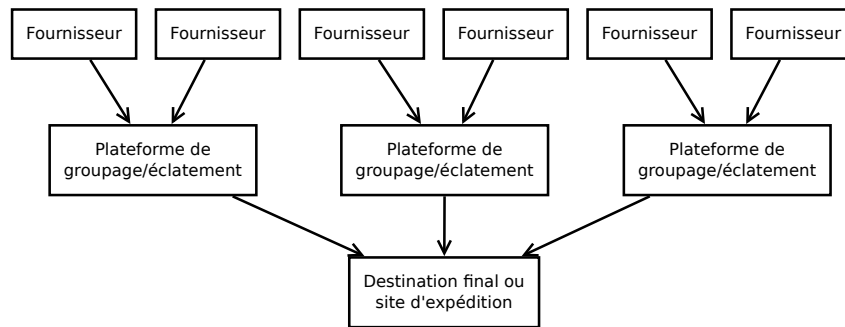


FIGURE 5 – Réseau de bâtiments logistiques en trompette

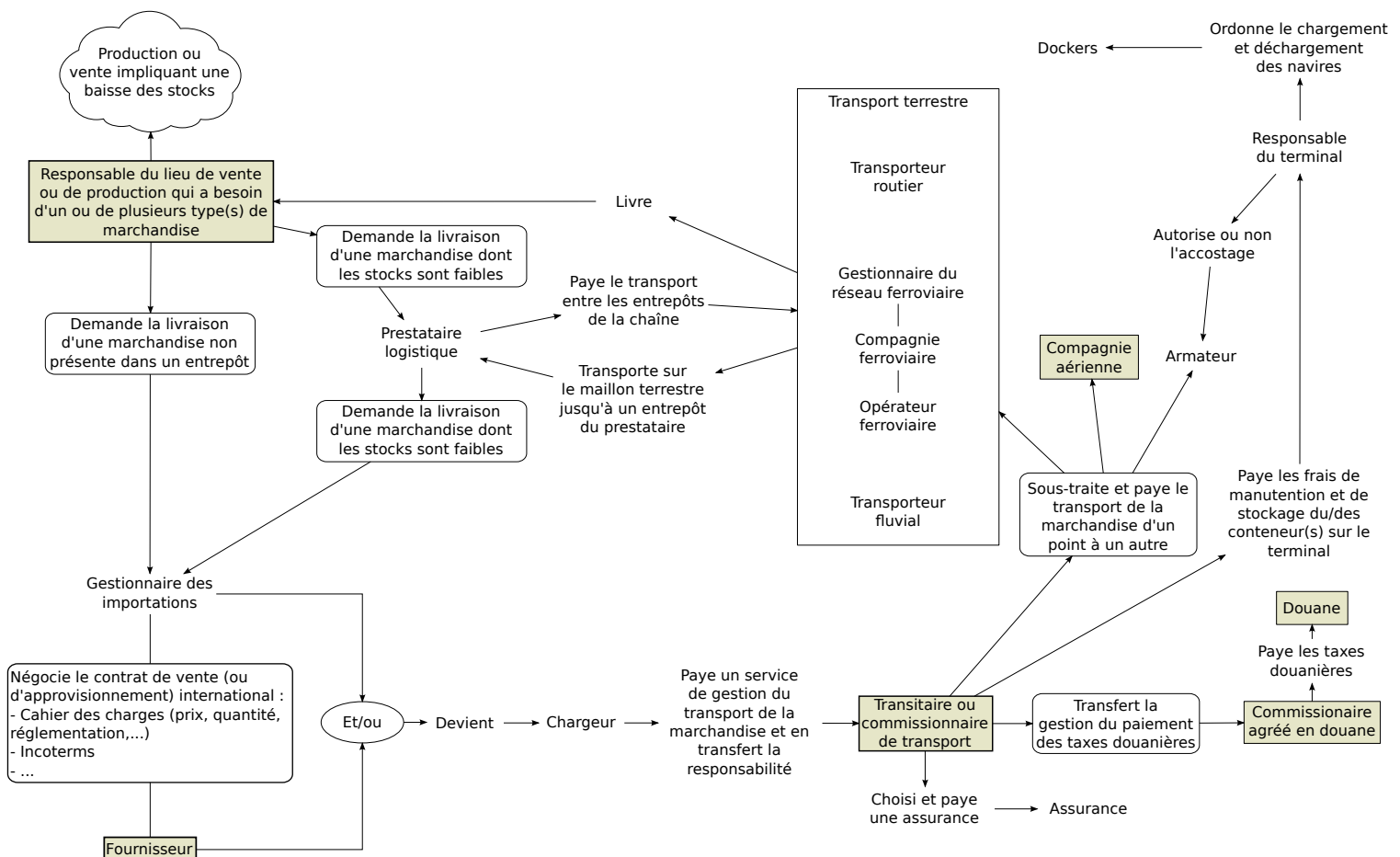
2 Le modèle

En reprenant les éléments de cette base de connaissances, nous allons étudier ici un modèle composé d’un côté, d’un réseau dynamique d’acteurs décrivant les interactions entre les protagonistes de différentes natures, et de l’autre, d’un réseau physique sur deux échelles.



2.1 Le réseau d'acteurs support du flux d'informations

La figure 7 représente les interactions possibles entre des acteurs prenant des décisions. Chacune de ces relations ne sont pas simultanément actives. Les flux d'informations peuvent être dupliqués, modifiés, ou encore revenir en arrière.



Le lieu de vente ou de production est l'endroit où les stocks de marchandises s'épuisent. Le responsable de ce lieu doit réapprovisionner ses stocks régulièrement. Si ce besoin ne

peut être assouvi par le prestataire logistique, une commande sera passée auprès de l'entité qui gère les importations et qui va déclencher une négociation auprès du fournisseur qu'il aura choisi. En fonction des incoterms® négociés, ces deux entités vont contacter des transitaires qui se chargeront d'organiser le transport sur leurs portions respectives et jusqu'à l'un des entrepôts du prestataire logistique. Ce dernier contacte lui-même les transporteurs terrestres pour déplacer les marchandises entre ses entrepôts.

L'utilisation du modèle agent permet de restituer le système d'interactions des acteurs. On cherche à obtenir à la fois un système dynamique et auto-organisé et en même temps une modularité suffisante pour faire évoluer notre modèle. Ainsi, chaque acteur de ce réseau est conçu comme une entité capable de communiquer avec autrui en fonction des interactions possibles détaillées sur la figure 7. De plus, le rôle que représente chaque entité déterminera ses capacités à interagir avec l'environnement (le monde réel). Par exemple, certains agents (les transporteurs) sont ainsi capable d'ordonner à un véhicule de transporter une marchandise d'un point à un autre, quand d'autres (les chargeurs ou les prestataires logistiques) sont capable d'observer l'évolution des stocks dans les entrepôts.

Une spécification de l'implémentation correspondante est décrite par le schéma UML de la figure 8 constitué d'agents dont la majorité sont des interfaces. Cela permettra de concevoir des agents qui accumuleront plusieurs rôles. Effectivement, une entreprise est libre de gérer elle-même sa logistique voir même son transport.

L'information en elle-même est en partie modélisée par un objet représentant le contrat de vente. Il contient des données telles que la quantité, le type de marchandise, ou encore les adresses d'expédition et de destination.

2.2 Le réseau physique support du flux de marchandises

Le réseau physique se présente sur deux échelles. La première est tout simplement le réseau global composé des réseaux maritime, routier, fluvial, aérien, et ferroviaire. C'est à partir de cette représentation que l'on peut calculer les itinéraires et c'est sur celle-ci que se déplacent les différents types de véhicules. La deuxième échelle est un réseau décrivant les itinéraires que peut emprunter chaque flux de marchandise. Effectivement, ceux-ci obéissent à des règles précises qu'il faut donc modéliser.

La figure 9 correspond au diagramme de classe de la première échelle. On peut voir que les infrastructures clés de la chaîne logistique, comme les entrepôts ou les terminaux, font parties intégrantes de ce réseau global car il s'agit de nœud particulier du réseau. On peut les voir comme des agents car ils sont capables d'effectuer des opérations particulières et d'interagir avec d'autres agents comme les véhicules. Ces derniers modifient les valeurs de flux du réseau lorsqu'ils se déplacent et peuvent également communiquer avec les

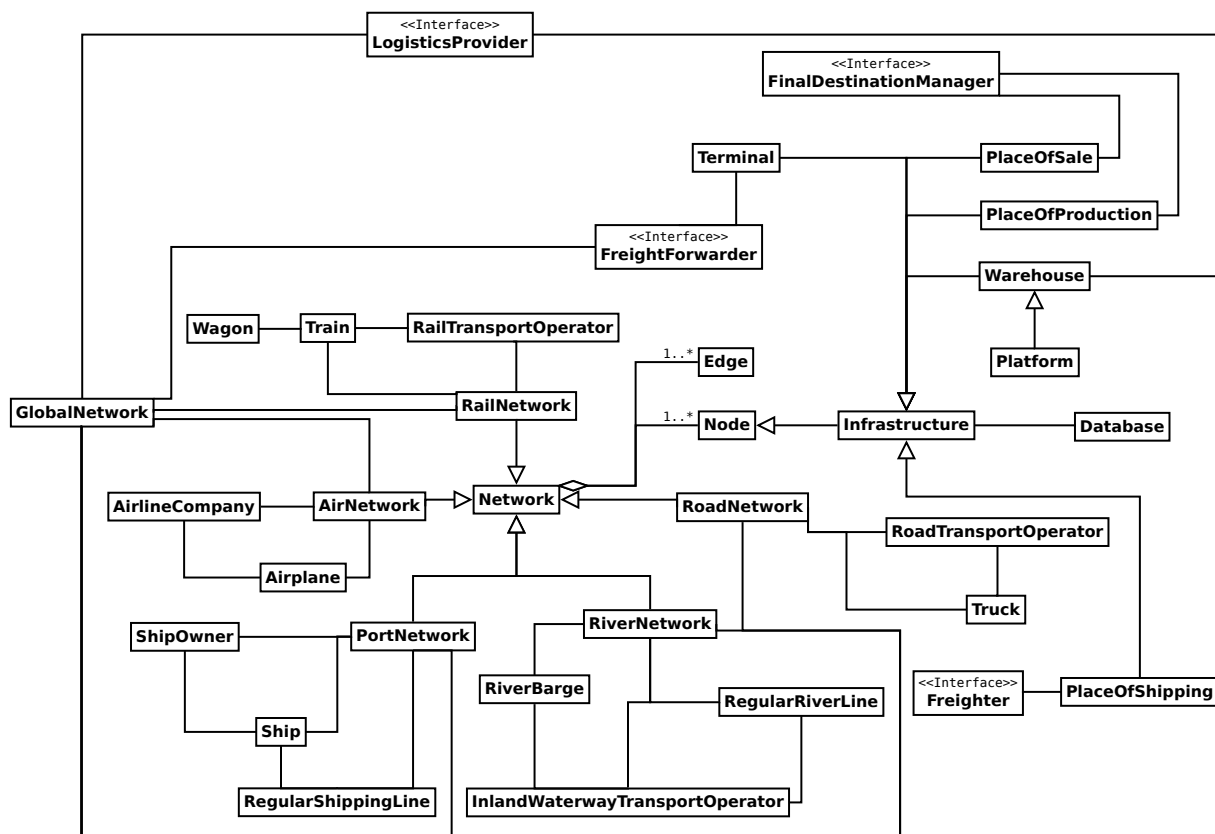


FIGURE 9 – Diagramme de classe UML de la conception du réseau physique

ainsi calculer des plus courts chemins pour minimiser les coûts de transport, le nombre de rupture de charges, favoriser un mode de transport à un autre, etc.. Le second peut quant à lui déterminer le meilleur emplacement des entrepôts correspondant au modèle de la chaîne logistique fournie par son client (en partie en calculant la connectivité des infrastructures avec le réseau, ou la distance aux destinations finales). Le prestataire peut d'ailleurs choisir ces entrepôts parmi ses propres entrepôts libres, ou parmi des entrepôts à vendre.

Les véhicules sont des acteurs mobiles présents sur le réseau physique. Pourtant, à l'inverse des agents du réseau d'acteurs, ils ne prennent pas de décisions car ils se contentent de suivre des ordres. Ils peuvent néanmoins transmettre certaines informations aux agents décisionnaires si nécessaire. Par exemple, les aléas du transport maritime peuvent obliger un navire à ne pas accoster au Havre s'il a pris trop de retard ou si le terminal qui devait l'accueillir est occupé. Le transitaire doit alors revoir aussitôt toute la chaîne du transport.

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, les infrastructures peuvent également déclencher des phénomènes similaires en envoyant des messages d'avertissement lorsque les stocks sont faibles ; ou en envoyant des messages informatifs lorsqu'une marchandise arrive dans ou quitte l'infrastructure.

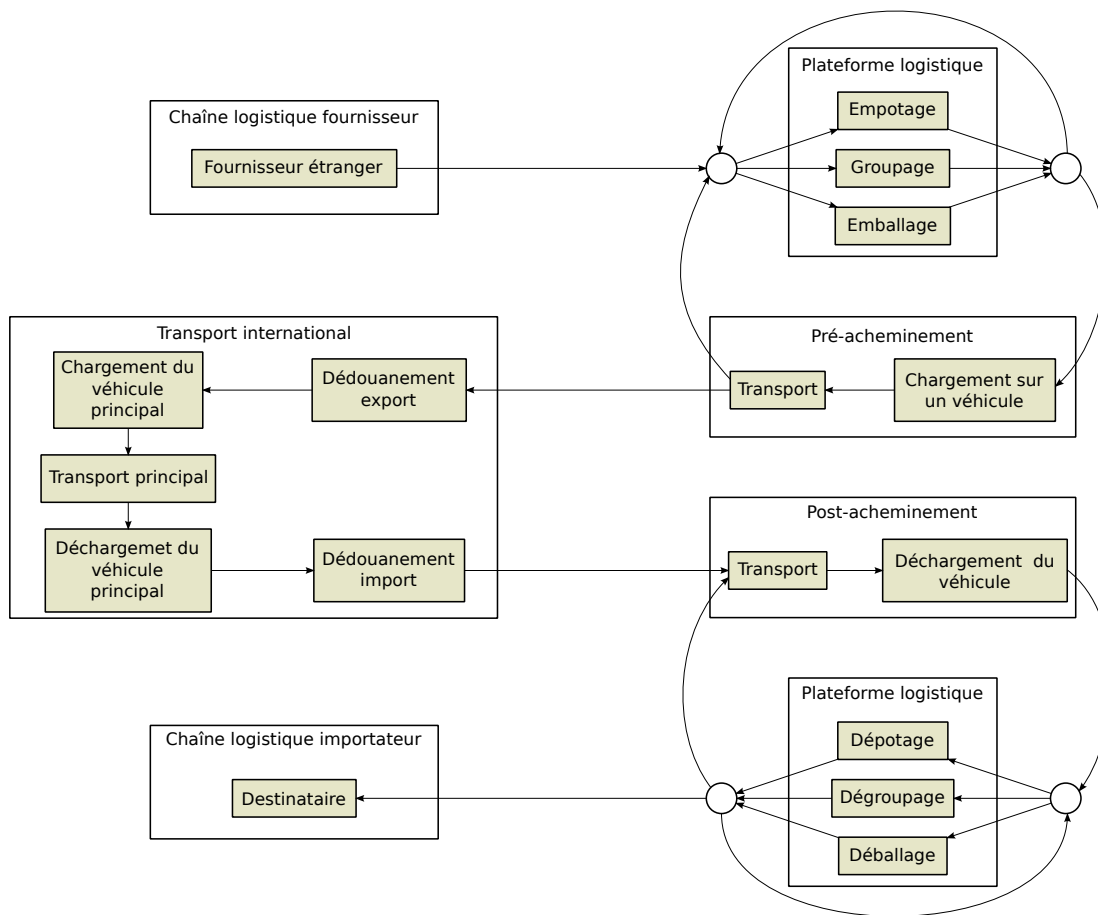


FIGURE 10 – Représentation simplifiée du graphe de contrôle du flux physique de la marchandise

Ainsi, le réseau d'acteurs est capable d'agir sur le réseau physique car les choix pris vont augmenter ou diminuer les flux sur certaines zones du réseau physique. À l'inverse et à l'image de la figure 1, la congestion de certains axes, les aléas du transport maritime, les problèmes techniques divers et variés vont déclencher des rétro-actions en obligeant le réseau d'acteurs à prendre en compte ces paramètres pour choisir un "bon" itinéraire, ou le corriger.

Conclusion

Nous avons décrit dans la première partie comment se structurait la logistique de l'axe Seine. Elle s'établit autour d'une interface maritime, ouverte à l'international, et d'une interface métropolitaine, au service de la distribution de la marchandise. Le réseau physique est constitué d'infrastructures nodales (comme les terminaux ou les bâtiments logistiques) et linéaires (comme les routes ou les rails). Les acteurs de la logistique (comme les commissionnaires de transport, les chargeurs ou encore les prestataires logistiques) forment un réseau de joueurs (au sens de la théorie des jeux).

Le modèle développé dans la deuxième partie reprend les éléments de cette base de connaissance. On retrouve donc un système multi agent qui correspond aux acteurs. Ce réseau dynamique s’auto-organise et permet une modularité dans son évolution. Le réseau physique est la représentation sous forme de graphe de la structure des réseaux routier, fluvial, ferroviaire, aérien ou encore maritime. Nous avons également proposé un modèle pour décrire les chaînes logistiques possibles. L’ensemble est interconnecté grâce à des mécanismes de rétro-action.

Références

- [1] [A. Dutot, F. Guinand, Y. Pigné, and D. Olivier, “Graphstream : A tool for bridging the gap between complex systems and dynamic graphs,” *CoRR*, vol. abs/0803.2093, 2008.](#)
- [2] [M. Nabaa, *Morphodynamique des réseaux viaires, application au risque*. PhD thesis, Université du Havre, 2011.](#)
- [3] S. Graumann-Yettou, *Commerce international : guide pratique*. Litec affaires, finances, Litec, 2002.
- [4] <http://www.searates.com/>. accédé le 06 Mai 2013.
- [5] M. Nguyen-The, *Importer : 4e édition*. Gestion industrielle, Eyrolles, 2011.
- [6] D. Orsini, “La logistique de la grande distribution,” *Sétra*, 2008.
- [7] *La place de l’Île-de-France dans l’hinterland du Havre : le maillon fluvial*. Institut d’aménagement et d’urbanisme de la Région d’Ile-de-France, 2008.
- [8] F. Giullo, “Les conséquences de la réforme portuaire sur les entreprises de manutention,” Master’s thesis, 2009.
- [9] O. Gavaud, P. Le Bourhis, and D. Orsini, “Les bâtiments logistiques - fonction et impacts sur les territoires,” *Sétra*, 2009.
- [10] S. Baillard, “Textile - les nouveaux modèles logistiques,” *Supply Chain Magazine*, no. 23, 2008.
- [11] [F. E. Allen, “Control flow analysis,” *SIGPLAN Not.*, vol. 5, pp. 1–19, July 1970.](#)