



HAL
open science

Une approche systémique à base d'agents et de graphes dynamiques pour modéliser l'interface logistique port-métropole

Thibaut Démare

► **To cite this version:**

Thibaut Démare. Une approche systémique à base d'agents et de graphes dynamiques pour modéliser l'interface logistique port-métropole. Modélisation et simulation. Normandie Université, 2016. Français. NNT : 2016LEHA0021 . tel-01432578v1

HAL Id: tel-01432578

<https://theses.hal.science/tel-01432578v1>

Submitted on 16 Jan 2017 (v1), last revised 18 Dec 2017 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité INFORMATIQUE

Préparée au sein de l'Université du Havre

Une approche systémique à base d'agents et de graphes dynamiques pour modéliser l'interface logistique port-métropole

Présentée et soutenue par
Thibaut DÉMARE

Thèse soutenue publiquement le 26 Septembre 2016
devant le jury composé de

M. Cyrille BERTELLE	Professeur à Normandie Université	Directeur de thèse
M. Antoine DUTOT	Maître de Conférences à Normandie Université	Encadrant
M. Laurent LÉVÊQUE	Maître de Conférences à Normandie Université	Encadrant
M. Abderrafiaa KOUKAM	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard	Rapporteur
M. Guy MELANÇON	Professeur à l'Université de Bordeaux	Rapporteur
M. César DUCRUET	Chargé de recherche HDR à l'UMR 8504 Géographie-Cités	Examineur
M. Robin POTÉ	Directeur de Critt Transport & Logistique	Invité

Thèse dirigée par Cyrille BERTELLE, laboratoire LITIS - EA 4108



À mon père

REMERCIEMENTS

Au cours de mes années à l'université, mes différents professeurs ont su éveiller en moi un intérêt sans cesse grandissant pour le monde de la recherche. J'y voyais un mélange étonnant de nouvelles choses à apprendre et à découvrir. L'envie, qu'un jour, je puisse à mon tour travailler dans ce monde, était né. Ces mêmes professeurs m'ont alors donné la chance de participer à cette aventure scientifique et humaine. Et alors que je termine ici l'écriture de ce manuscrit, j'essaie de me remémorer tous ces moments passés, pour remercier tous ces gens qui m'ont tant apporté et qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre. Ces personnes sont nombreuses et j'espère qu'on me pardonnera celles et ceux que je pourrais oublier. Et même si ces quelques lignes peuvent être empreintes d'une certaine formalité, c'est bien avec plaisir et enthousiasme que je leur dis merci.

Je vais commencer par la personne sans qui rien de tout cela n'aurait pu se faire : mon directeur de thèse, Cyrille BERTELLE. Il m'a fait confiance pour réaliser ce projet et je lui en serais éternellement reconnaissant. Il m'a toujours guidé efficacement pour adopter la bonne approche scientifique. Je le remercie également pour choisir les endroits les plus « calmes » pour passer des soirées à Agadir, entre deux journées de conférences.

J'en viens maintenant à remercier mes encadrants. Antoine DUTOT m'a si bien conseillé sur tant de choses. Il s'est toujours montré disponible et je ne pourrais jamais le remercier suffisamment pour cela. Je tiens d'ailleurs à m'excuser pour ses relectures si nombreuses que je lui ai fait subir. Je n'oublie pas non plus Laurent LÉVÊQUE qui a co-encadré cette thèse. Il est à l'origine de ce sujet passionnant et pluridisciplinaire. Ses explications captivantes sur les vastes sujets que sont la géographie et la logistique m'ont ouvert de nouveaux horizons de réflexions.

Je tiens maintenant à remercier MM. Abderrafiaa KOUKAM et Guy MELANÇON d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit. C'est avec un profond soulagement que j'ai accueilli leurs rapports. Ils témoignent de leur travail de lecture et d'analyses, mais leurs avis positifs sont également la récompense de quatre années de travail.

César DUCRUET fut l'un des premiers à me donner la chance de représenter mon travail auprès d'un public lors d'une journée d'étude. Après nous être revus quelques fois lors de conférences, il a aujourd'hui accepté d'être examinateur. Pour tout cela je l'en remercie. Un grand merci également à Robin POTÉ qui est aussi membre du jury et qui apporte son expertise de la logistique.

Ces années de thèse n'auraient pas été les mêmes sans les membres chaleureux et accueillant du LITIS et du LMAH. Merci à Éric d'avoir suivi l'évolution de mon travail depuis le début et avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer. Il me permet aujourd'hui de poursuivre avec plaisir ce travail, accompagné de Stefan et Dominique que je remercie également. Merci aussi à Damien pour ses qualités exemplaires de chercheur, de co-directeur de laboratoire, d'enseignant, et de collègue. Malgré toutes ces étiquettes, il a su se rendre disponible et no-

tamment dans cette dernière ligne droite pour apporter un avis éclairé sur mon travail. Bien sûr, un grand merci aussi à tous les autres : Véronique, Rodolphe, Yoann, Frédérique, Jean-Luc, Laurent, Claude, Fanny, Aziz, Cédric, Nathalie, Julien, François... Un merci tout particulier à Guilhelm : son template L^AT_EX pour rédiger ce manuscrit aura fait tout le travail de mise en page à ma place (quel bonheur !).

Merci à mes « colocataires » de bureau : Chouaib, Aymen, Mohamed et Long. Votre présence aura apporté de la bonne humeur entre ces murs. Je n'oublie pas non plus les bons moments passés avec les autres doctorants : Riadh, Fares, Alexandre, Haïfa,... Et je me dois aussi de faire un tour du côté des géographes avec Anne-Solène, Arnaud, Ronan,...

En dehors de l'université, je remercie tous mes amis. Je ne suis pas sûr d'avoir toujours su leur expliquer ce que je faisais vraiment, mais c'était toujours un plaisir d'être auprès d'eux. Ils m'ont soutenu dans les moments difficiles et m'ont toujours permis de passer de très bons moments en leur compagnie. En particulier je remercie Aurélie, Romain, Noé et David. Je pense aussi aux anciens du master, David et Meva, avec qui je prends toujours autant de plaisir à parler « geek » autour d'une bonne bière et/ou au cours d'un bon repas.

Bien sûr, la famille tient une place privilégiée dans ces remerciements. La place me manquerait pour tous les remercier comme il se doit. Merci à mon frère, Jérémy, et à sa femme Virginie et leurs filles Léonie et Kaly. Un énorme merci à ma mère pour tout ce qu'elle fait depuis toujours et aussi pour ses relectures récentes du manuscrit. La chasse aux fautes d'orthographe semble si facile avec elle. J'ai aussi une pensée pour mon père, parti trop vite et trop tôt et à qui je dédis ce manuscrit.

Et enfin, merci à Xavière. Merci pour tout, pour son soutien, pour son amour, pour avoir supporté ma thèse plus que les autres, et surtout pour le bonheur de partager ma vie avec elle.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	vii
Table des figures	xi
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	3
1.3 Contribution	3
1.4 Structure de la thèse	4
I Étude préliminaire	7
2 Outils scientifiques	9
2.1 L'approche systémique	10
2.1.1 Les systèmes et leur complexité	10
2.1.2 Les systèmes complexes pour modéliser la logistique	11
2.2 Les modèles agents	12
2.2.1 Une origine dans les modèles individus centrés	12
2.2.2 Les principes généraux des modèles agents	16
2.2.3 Les différents types de comportement	17
2.2.4 Les environnements des systèmes agents	18
2.2.5 Les modèles multi-agents	19
2.2.5.1 Les agents et la géographie	20
2.2.5.2 Les agents et la logistique	22
2.3 Les graphes comme outils de modélisation	24
2.3.1 Les graphes statiques	26
2.3.1.1 Différents types de graphe	26
2.3.1.2 Chaînes et chemins	27
2.3.1.3 Mesures locales d'un graphe	27
2.3.1.4 Mesures globales d'un graphe	29
2.3.2 Les graphes dynamiques	31
2.3.2.1 Réseaux complexes	31
2.3.2.2 Graphes cumulatifs	31
2.3.2.3 Graphes évolutifs	33
2.3.2.4 Graphes temporels	34
2.3.2.5 Graphes dynamiques par flux d'événements	34

3	Définition d'un système logistique	37
3.1	Les acteurs et leurs rôles	38
3.1.1	La logistique métropolitaine à l'origine du flux	38
3.1.2	La logistique portuaire	39
3.1.3	L'interface entre le port et les métropoles de son hinterland	40
3.2	Les infrastructures et leurs fonctions	41
3.2.1	Les infrastructures du port	41
3.2.2	La connexion avec l'hinterland	42
3.2.2.1	Le réseau de transport sur l'hinterland	42
3.2.2.2	Les infrastructure du réseau d'approvisionnement	43
3.2.3	Le transport de la marchandise dans les métropoles	45
3.3	Les systèmes logistiques : des territoires complexes	46
3.3.1	La marchandise : premier élément de complexité	46
3.3.2	L'auto-organisation : deuxième élément de complexité	46
4	Modèles existants	49
4.1	Modèles agrégés de trafic de marchandises	50
4.2	Modèles désagrégés de trafic de marchandises	52
4.3	Modèles portuaires	55
4.4	Modèles urbains	57
4.5	Contribution	62
II	Modélisation et expérimentation	65
5	Modèle conceptuel	67
5.1	Présentation du modèle	67
5.1.1	Objectifs	67
5.1.2	Fonctionnement général	68
5.1.3	Pré-requis en vue d'une implémentation	68
5.2	Modélisation du réseau de transport par des graphes dynamiques	69
5.2.1	Un sous-graphe pour chaque mode de transport	69
5.2.2	Le couplage avec les agents	71
5.3	Modélisation des acteurs par des agents	71
5.3.1	Les destinataires finaux	73
5.3.2	Les prestataires logistiques	73
5.3.3	Les fournisseurs	75
5.3.4	Les commissionnaires de transport	76
5.3.5	Les transporteurs	76
5.3.6	Un modèle rétro-actif	76
5.3.7	Perturbation du système et adaptation des agents	76
6	Implémentation générale	79
6.1	Choix d'une plateforme de simulation	79
6.1.1	Anylogic	80
6.1.2	Netlogo	80
6.1.3	Repast Symphony	81

6.1.4	GAMA	81
6.2	Méthodologie d'implémentation	81
6.2.1	Les agents	82
6.2.1.1	Les fournisseurs	82
6.2.1.2	Les destinataires finaux	82
6.2.1.3	Les prestataires logistiques	83
6.2.2	Le territoire	84
6.2.2.1	Les infrastructures nodales	84
6.2.2.2	Les réseaux	84
7	Étude de cas	87
7.1	Présentation du contexte	88
7.2	Implémentation de l'axe Seine	90
7.2.1	L'implémentation du territoire	90
7.2.1.1	Les données relatives au réseau de transport	90
7.2.1.2	La dynamique du territoire	91
7.2.2	La dynamique des stocks	91
7.2.2.1	Les données relatives aux acteurs et infrastructures	92
7.2.2.2	La consommation de marchandises	92
7.2.2.3	Les prises de commandes	93
7.2.3	La dynamique des interactions	93
7.2.3.1	Stratégies de création d'un réseau d'approvisionnement	94
7.2.3.2	Mesures d'efficacité du prestataire logistique	95
7.3	Analyse des résultats	96
7.3.1	Mesures statiques	96
7.3.1.1	Étude de la compétition entre les ports du Havre et d'Anvers	96
7.3.1.2	Étude de l'accessibilité des territoires fournissant des surfaces d'entreposage	97
7.3.1.3	Mise en évidence de clusters logistiques	100
7.3.2	Mesures dynamiques	103
7.3.2.1	Atomisation du flux de marchandise	103
7.3.2.2	Réseau de transport et trafic	104
7.3.2.3	Évolution des ruptures de stocks	107
7.3.2.4	Comportements adaptatifs	110
8	Conclusion	115
8.1	Bilan	115
8.2	Perspectives	116
III Bibliographie et publications		119
Bibliographie		121
Publications		135

TABLE DES FIGURES

1.1	Représentation simplifiée du modèle proposé	4
2.1	Deux approches différentes pour simuler l'évolution d'un trafic routier (Treuil et al., 2008).	13
2.2	Quatre exemples de motifs du jeu de la vie de Conway.	14
2.3	Exemple de deux motifs qui ont émergé grâce à une fourmi de Langton (Langton, 1986 ; Gale et al., 1998).	15
2.4	Représentation d'un environnement ayant une topologie torique.	18
2.5	Le modèle SIMPOP (Pumain et al., 1995 ; Sanders et al., 1997).	21
2.6	Architecture du simulateur de terminal à conteneurs proposée par Henesey et al. (2003).	24
2.7	Trois exemples de graphes dans des domaines différents.	25
2.8	Le coefficient de clustering du nœud 1 dans les cas de trois topologies différentes.	29
2.9	Deux modèles de réseaux complexes.	32
2.10	Représentation d'un graphe évolutif $\mathcal{G} = (G, S_G)$	33
3.1	Schéma décrivant les points de transfert des différentes règles Incoterms®2010	39
3.2	Représentation des différentes organisations spatiales des infrastructures logistiques.	44
3.3	Les deux topologies principales de réseau d'approvisionnement	45
3.4	Chaque type d'acteurs ne gère qu'une partie du flux.	47
4.1	Architecture conceptuelle d'un système de transport de marchandises (Tavasszy, 2006).	51
4.2	Représentation du modèle agrégé de compétition entre les ports (Zondag et al., 2010).	52
4.3	Représentation du réseau de transport utilisé lors d'une simulation du modèle TAPAS (Holmgren et al., 2012).	54
4.4	Représentation de flux de conteneurs entre deux terminaux qui coopèrent (Schepler, 2015).	56
4.5	Représentation du système portuaire havrais et de ses connexion avec l'hinterland par Leriche et al. (2015).	57
4.6	Diagramme d'état d'une décision logistique liée au transport (Roorda et al., 2010).	60
4.7	Architecture du modèle de trafic urbain de marchandises par Gonzalez-Feliu et al. (2012).	61
5.1	Représentation du réseau multi-modal et du couplage avec le modèle agent.	69
5.2	Diagramme d'activité des agents représentant la marchandise en cours de déplacement sur le réseau de transport.	70
5.3	Représentation du graphe des interactions possibles entre les agents.	72

5.4	Diagramme d'activité des agents représentant les destinataires finaux.	73
5.5	Représentation simplifiée des différentes étapes empruntées par la marchandises conteneurisée au cours du transport international	74
6.1	Diagramme d'activité des agents représentant les infrastructures logistiques. . . .	85
6.2	Le réseau routier et la position des agents au cours d'une simulation exécutée au sein de la plateforme GAMA.	86
7.1	Trois exemples de relations entre le système portuaire et l'hinterland. Auteur : Laurent Lévêque.	88
7.2	Le territoire de l'axe Seine. Auteur : Laurent Lévêque.	89
7.3	Étude de la compétition entre les ports du Havre et d'Anvers à l'aide d'un modèle gravitaire.	98
7.4	Carroyage du territoire de l'axe Seine mettant en évidence les surfaces d'entreposage des différentes zones.	99
7.5	Carroyage du territoire de l'axe Seine mettant en évidence l'accessibilité des différentes zones.	100
7.6	Les cinq plus grandes composantes connexes du graphe de voisinage avec une distance de 3km.	102
7.7	Distribution des composantes connexes du graphe de voisinage construit avec une distance de 3km.	103
7.8	Le nombre cumulé d'agents « Véhicules » sur les routes.	104
7.9	La quantité cumulée de marchandises au sein des agents « Véhicules ».	104
7.10	État du trafic de marchandises dans des conditions normales.	105
7.11	État du trafic de marchandises suite à une petite perturbation sur l'axe Anvers-Paris.	106
7.12	État du trafic de marchandises suite à une perturbation très importante sur l'axe Anvers-Paris.	106
7.13	Deux simulations exécutées avec deux paramètres différents de seuil de réapprovisionnement.	108
7.14	Nombre cumulé de véhicules en fonction de la stratégie de réapprovisionnement utilisée par les prestataires logistiques.	109
7.15	Adoption des différentes stratégies de création d'un réseau d'approvisionnement.	111
7.16	Émergence des stratégies de réapprovisionnement lorsque la stratégie de sélection des entrepôts est fixée (partie 1/2).	112
7.17	Émergence des stratégies de réapprovisionnement lorsque la stratégie de sélection des entrepôts est fixée (partie 2/2).	113

INTRODUCTION

1.1 Contexte

La logistique regroupe l'ensemble des activités ayant pour but de gérer plusieurs types de flux : les flux de marchandises, mais également les flux financiers, douaniers, et d'information. Un système logistique est un ensemble d'acteurs et d'infrastructures qui interagissent pour faire circuler ces flux sur un territoire. L'espace géographique sur lequel se situe le système possède un ensemble d'aires urbaines qui attirent et génèrent des flux de marchandises. Ces derniers sont supportés par des infrastructures logistiques organisées. Ces flux matériels entrent ou sortent du territoire par des nœuds connus du réseau de transport : par exemple, les ports maritimes ou les aéroports. Au sein de ce type de système, on parle de corridors logistiques car les flux de marchandises tendent à emprunter des couloirs privilégiés depuis les nœuds d'accès au territoire mais aussi entre les aires urbaines. Pour une gestion optimale de ces flux, une organisation est primordiale au vue des quantités en jeu. Cette organisation implique qu'un nombre important d'acteurs spécialisés et hétérogènes interviennent au cours de phases particulières du transport de la marchandise. Ces acteurs ont des relations parfois paradoxales. Ils doivent collaborer entre eux pour garantir la satisfaction de leurs clients finaux, mais se retrouvent aussi et souvent dans des situations compétitives. Certains acteurs du transport international sont amenés à traiter des flux de marchandises massifiés et soumis aux aléas du transport maritime. À l'opposé, les acteurs présents sur le territoire métropolitain doivent traiter des flux atomisés et très réguliers. Il existe donc une interface intermédiaire faisant le lien entre la logistique maritime et la logistique métropolitaine.

L'environnement sur lequel se positionne le système logistique offre des contraintes spatiales particulières. Un port est toujours connecté à un arrière pays dont il fait office de nœud d'accès dans le sens des importations et des exportations. Cet arrière pays est appelé *l'hinterland*. La topologie du réseau de transport ou la géographie des paysages composant un hinterland contraignent certaines prises de décisions concernant le flux de marchandise. Il paraît évident que même si la voie fluviale peut se montrer intéressante en terme de coût de transport, la topologie d'un fleuve n'en reste pas moins immuable. À moins de lourds efforts, notamment économiques et écologiques, on ne peut desservir n'importe quelle destination uniquement

avec ce mode de transport. On peut aussi remarquer les différences de temps de transport entre différentes régions : au sein d'une zone urbaine, les vitesses sont plus facilement limitées, soit par le code de la route, soit par la densité de véhicules ; à l'inverse, entre deux zones urbaines, sur autoroute par exemple, la circulation se montre plus fluide et les temps de transport sont réduits pour des distances équivalentes. Au sein des grandes villes, il est en effet difficile de déplacer des marchandises, d'autant plus si les volumes sont importants. On pense notamment à Paris où la circulation y est très dense, et où les places réservées aux livraisons sont souvent occupées par des voitures en stationnement. L'ensemble de ces contraintes peut donc mener à une accumulation des retards et obliger les acteurs de la logistique à imaginer des solutions alternatives.

Mais ces contraintes au niveau spatial ne sont pas les seules. Certaines décisions politiques peuvent grandement jouer sur les difficultés à transporter efficacement la marchandise jusqu'à destination. On peut retenir, par exemple, la décision de certaines villes d'augmenter le coût du foncier pour empêcher la création de surface d'entrepôt sur certaines zones du territoire. On peut aussi constater l'interdiction pour les poids lourds de se déplacer au cours de certaines périodes (par exemple les week-ends lors des grands départs en vacances), ou d'accéder à certaines zones d'une ville. Il arrive également que des décisions politiques ne soient pas directement liées à la logistique mais vont pourtant engendrer d'importantes perturbations. Par exemple, des mouvements de grèves peuvent grandement paralyser l'économie d'un territoire en bloquant des parties importantes des chaînes logistiques. Il ne s'agit pas là de déterminer si ces contraintes politiques sont bonnes ou mauvaises, mais elles existent et les acteurs de la logistique doivent trouver des solutions pertinentes pour satisfaire leurs clients.

On retrouve également des contraintes écologiques. La société dans son ensemble est de plus en plus soucieuse des problèmes liés à l'environnement. De nombreuses décisions politiques sont prises afin de limiter l'impact écologique. On retiendra notamment la récente taxe carbone qui vise à limiter l'utilisation du tout routier pour le transport de marchandises. Ces contraintes écologiques conduisent les acteurs de la logistique à revoir leurs méthodes de travail et à adopter des modes de transport jusqu'alors peu usuels.

Les acteurs d'un système logistique font également preuve d'une certaine inertie. En effet, ils conservent volontiers leurs habitudes de travail. Ils ont par exemple tendance à garder les mêmes collaborateurs lorsqu'ils ont établi une relation de confiance, quand bien même un autre collaborateur potentiel pourrait se montrer plus efficace. Ils peuvent également être habitués à certaines méthodes de travail, par exemple relatives au choix d'un mode de transport, ou aux logiciels utilisés. En effet, il peut être délicat d'investir des sommes importantes d'argent dans des techniques innovantes mais qui n'ont pas encore fait leurs preuves.

Enfin, il existe de réelles disparités en terme de modes de fonctionnement entre les différentes parties d'un système logistique. La marchandise transite principalement à l'international par des voies maritimes au sein desquelles le maître mot est la massification, avec des navires toujours plus gros pour réduire les coûts sur de grandes distances. Mais cela se fait au détriment de la précision des temps de transport et de la personnalisation du service pour les clients. Les ports doivent donc gérer de très grands volumes de marchandises qui arrivent en vrac ou dans des conteneurs aux dimensions standardisées. À l'inverse, les destinataires finaux, éparpillés dans les aires urbaines, ne peuvent traiter que de petits volumes à la fois. En plus, ils souhaitent un service ponctuel, dynamique et personnalisable en fonction de leurs besoins, immédiats ou non. L'organisation du système doit donc se faire malgré l'ensemble de ces contraintes, parfois paradoxales.

Dans un secteur aussi compétitif que la logistique, il devient de plus en plus pertinent de

trouver des solutions efficaces afin d'améliorer ses performances. On peut ainsi tenter d'améliorer des points précis de la chaîne logistique, comme par exemple optimiser les méthodes de manutention sur un terminal à conteneur. Néanmoins, il paraît également intéressant de considérer le système à l'échelle d'une région afin d'en étudier son organisation et ses évolutions possibles.

1.2 Problématique

La finalité de ce travail est de comprendre, à de multiples échelles, comment des acteurs autonomes et très hétérogènes (dans leurs modes de fonctionnements et dans leurs objectifs), s'organisent collectivement autour des infrastructures à leurs dispositions pour gérer des flux de marchandises soumis à un ensemble de contraintes (temporelles, spatiales,...).

On cherche un modèle individu-centré qui représenterait les propriétés, contraintes et comportements locaux d'un système logistique pour en reproduire le fonctionnement global grâce à la simulation. Ce type de modélisation peut se montrer très délicat du fait de la diversité des acteurs et des interactions qui les unissent. Il est donc nécessaire de définir une méthode de travail afin de construire un modèle cohérent avec la finalité de cette recherche.

On souhaite ainsi déterminer les règles élémentaires de fonctionnement de chaque composante du système afin de représenter chaque véritable acteur ou infrastructure du monde réel par une entité simulée. La simulation permettra de rendre ces entités indépendantes et autonomes de sorte que les prises de décision seront distribuées sur l'ensemble des entités, à l'image de la réalité.

Cette modélisation permettrait, dans un premier temps, de mieux comprendre les différents niveaux d'organisation nécessaires aux processus ayant cours lors du transport de marchandises. On pourrait notamment mieux appréhender les mécanismes d'atomisation du flux de marchandises entre la logistique maritime et celle métropolitaine. Par la suite, nous souhaitons comprendre, grâce à la simulation, comment les décisions et propriétés locales impactent le système dans sa globalité.

En effet, en modifiant les paramètres locaux, on peut observer quels sont leurs impacts sur l'ensemble du système. Cela permet d'identifier ceux qui ont le plus d'effets globalement (positifs ou négatifs). On peut alors mieux comprendre comment contraindre le système, en agissant localement et à moindre coût, à suivre une évolution générale qui est profitable aux différents acteurs. Au delà d'une meilleure compréhension d'un système logistique, le modèle permettrait la réalisation d'outils apportant une aide à la décision. En effet, il serait possible de prédire l'évolution du système ou de simuler différents scénarios d'évolution.

1.3 Contribution

Afin de répondre à la problématique, on se propose d'élaborer un modèle orienté agent permettant de simuler le trafic de marchandises sur un territoire. Le modèle prévoit de décrire l'interface entre les flux internationaux et les flux urbains afin de comprendre comment les dynamiques portuaires et urbaines cohabitent au sein du système.

Nous n'utiliserons pas de bases de données en entrée du modèle qui décriraient à l'avance les interactions entre les acteurs, ou les quantités de marchandises produites ou consommées, ou encore l'organisation logistique. Ces données seront générées par le modèle lui-même grâce

aux comportements des agents, à leurs besoins et à leurs interactions entre eux et avec leur environnement. Le modèle utilisera donc un nombre limité de données désagrégées en entrée. Ces données se limiteront en effet aux caractéristiques et positions dans l'espace des acteurs et infrastructures. Nous voulons que les différents flux émergent des décisions locales et des interactions des agents.

Le modèle intégrera une dynamique structurelle et organisationnelle pour représenter l'évolution du système. On veut ainsi permettre aux agents de s'adapter au système qui évolue dans le temps.

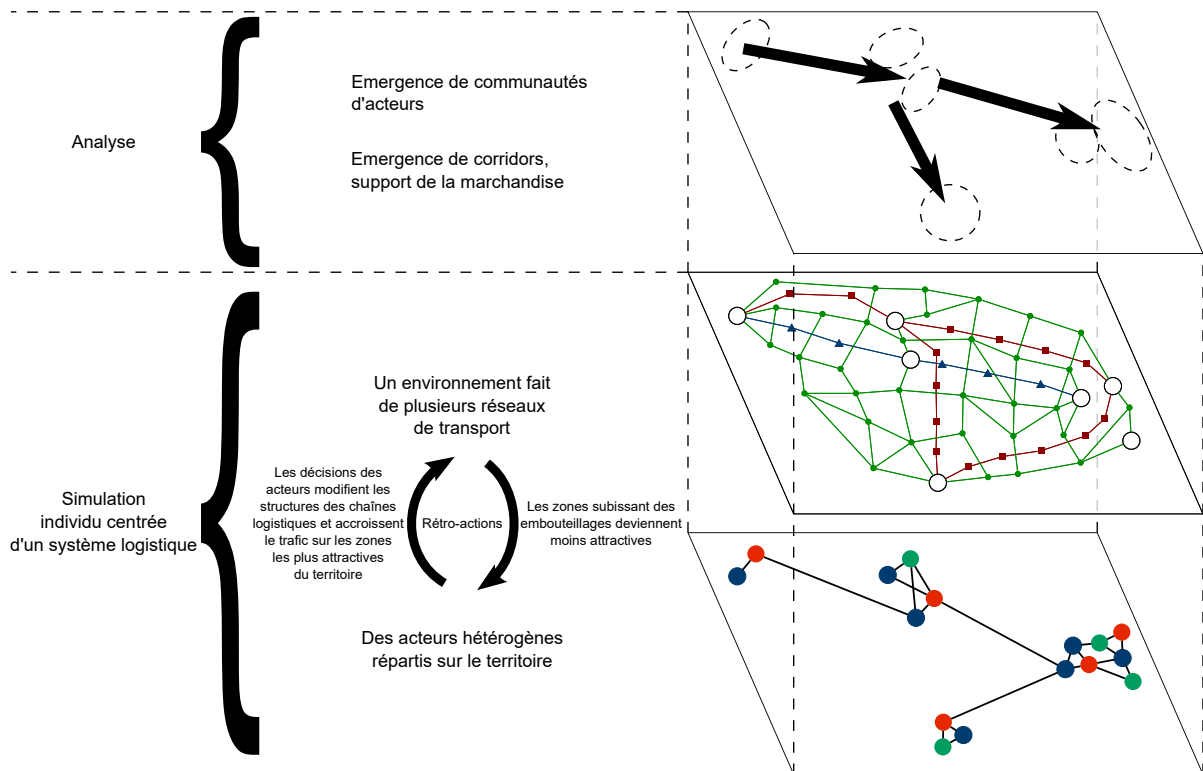


FIGURE 1.1 : Représentation simplifiée du modèle proposé

1.4 Structure de la thèse

La thèse se structure en deux parties principales : la première établit une étude préliminaire du sujet, tandis que la deuxième concerne la modélisation.

L'étude préliminaire est elle-même découpée en trois chapitres. Le premier décrit les différents outils dont nous disposons. Ils cadrent dans quel contexte scientifique on se positionne. On voit ainsi l'approche systémique, et plus particulièrement les systèmes complexes. On aborde ensuite les approches individus centrés au travers des modèles multi-agents. Enfin, on définit le cadre des graphes dynamiques. Le deuxième chapitre permet de décrire un système logistique. On montre qu'il existe des différences entre la dynamique portuaire et la dynamique au sein des villes. On met d'ailleurs en évidence l'existence d'une interface entre ces deux sous-systèmes. Tout en listant les différents acteurs et infrastructures, dont les caractéristiques et les modes de fonctionnement sont tous très différents, nous mettons en avant le caractère complexe de

ce type de système. Du fait de l'hétérogénéité des entités composant un système logistique nous envisageons déjà de concentrer notre modélisation sur les éléments essentiels de cet objet d'étude. Ce chapitre est en effet l'occasion de réfléchir aux entités et règles élémentaires et essentielles qui caractérisent le fonctionnement et l'évolution du système. Enfin, le dernier chapitre de cette partie est consacré à un état de l'art des modèles de systèmes logistiques. On a réparti les modèles existants en quatre catégories : les modèles utilisant des données agrégées, les modèles utilisant des données désagrégées, les modèles orientés sur le trafic au sein d'un port, et les modèles orientés sur le trafic au sein des villes. À partir de cet état de l'art, on détermine ensuite la contribution de notre modèle.

La partie sur la modélisation d'un système logistique est également décomposée en trois chapitres. Le premier décrit un modèle conceptuel qui peut s'appliquer théoriquement à tout système logistique. Il se compose d'un environnement (sous la forme d'un graphe dynamique et couplé à des agents-infrastructures) et d'agents représentant les acteurs essentiels d'un système logistique. Ce modèle dynamique prévoit un mécanisme de rétro-action entre l'environnement et les agents. Ces derniers peuvent s'adapter en temps réel à l'évolution du système. Cela permet de tester différents scénarios ou de mettre en avant la résilience du système. Le deuxième chapitre aborde l'implémentation du modèle au sein d'une plateforme de simulation nommée GAMA. Cette simulation est principalement orientée sur les flux physiques de marchandises. L'implémentation se veut d'être la plus générale possible et est compatible avec la plupart des systèmes logistiques existants. Le chapitre sept est consacré à une étude de cas concernant l'axe Seine. Après avoir décrit ce territoire et ses spécificités, nous apportons des compléments à l'implémentation générale pour les caractéristiques et règles qui différencient l'axe Seine des autres territoires. Nous terminons le chapitre par une analyse des résultats obtenus grâce au modèle. Cette analyse a été menée, d'une part, à des fins de validation du modèle, et d'autre part, afin de montrer comment la simulation pourrait être utilisée comme outils d'aide à la décision. Nous mettons par exemple en avant le processus d'atomisation des flux de marchandises sur le territoire ; nous nous attardons sur l'évolution locale des ruptures de stocks en fonction de différents comportements de gestion des agents ; et nous observons la réorganisation du trafic lorsque le système est perturbé par un blocage routier. Finalement, nous concluons en reprenant les points principaux présentés au cours de cette thèse. Nous évoquons également plusieurs perspectives de développement telles que : l'analyse des réseaux d'approvisionnement élaborés par les agents au cours des simulations ; l'implémentation du multi-modal dans la simulation finale ; ou encore la détection de communautés d'acteurs.

Première partie
Étude préliminaire

OUTILS SCIENTIFIQUES

2.1	L'approche systémique	10
2.1.1	Les systèmes et leur complexité	10
2.1.2	Les systèmes complexes pour modéliser la logistique	11
2.2	Les modèles agents	12
2.2.1	Une origine dans les modèles individus centrés	12
2.2.2	Les principes généraux des modèles agents	16
2.2.3	Les différents types de comportement	17
2.2.4	Les environnements des systèmes agents	18
2.2.5	Les modèles multi-agents	19
2.3	Les graphes comme outils de modélisation	24
2.3.1	Les graphes statiques	26
2.3.2	Les graphes dynamiques	31

Dans ce chapitre nous allons aborder les différents outils de modélisation qui entourent nos thématiques de recherche. Nous verrons dans un premier temps l'approche systémique et plus particulièrement les systèmes complexes. Ces derniers décrivent un ensemble d'entités en interaction, dont l'évolution adaptative conduit à des comportements émergents difficilement prédictibles autrement que par la simulation. On abordera ensuite les approches individus centrés. Ils permettent la modélisation de systèmes en décrivant directement les entités qui le composent. Cela a l'avantage de représenter le système avec un niveau de granularité pouvant être très fin. On a ainsi un plus grand contrôle sur l'ensemble des paramètres pour en observer les effets. Enfin, on étudiera les graphes car ils décrivent facilement des interactions (sociales ou économiques par exemple) ou des réseaux (tel que de transport).

2.1 L'approche systémique

2.1.1 Les systèmes et leur complexité

Le terme système trouve son origine dans le grec ancien avec le mot « σύστημα » (systema) qui signifie « ensemble ». Ce mot grec est lui-même dérivé du verbe « συνίστημι » (sunistēmi) qui se traduit par « mettre en relation ». On comprend ainsi que les dictionnaires actuels définissent un système comme étant un ensemble d'éléments en relation qui s'organisent pour former une entité propre.

L'approche systémique consiste donc à caractériser un objet d'étude en définissant l'ensemble des éléments qui le constitue et en décrivant les relations qui lient ces éléments. Cette représentation a pour but d'expliquer le fonctionnement global du système. Von Bertalanffy était un biologiste autrichien, et il est réputé comme le fondateur de la théorie systémique grâce à son livre « General System theory : Foundations, Development, Applications » (von Bertalanffy, 1968). Ses travaux furent illustrés par la suite dans de nombreux ouvrages comme « Le Macroscopie » de de Rosnay (1975). L'approche systémique est utilisée dans différents domaines scientifiques grâce à de nombreux chercheurs comme Le Moigne (1990). Pour mieux comprendre ce qu'est cette approche système, faisons l'analogie avec le mécanisme d'horlogerie d'une montre. Chaque pièce mécanique est un élément du système « montre ». Et les interactions entre ces pièces (tel qu'un rouage dont le mouvement en entraînerait un autre) permettent le fonctionnement global de la montre en donnant l'heure.

Néanmoins, certains systèmes sont plus compliqués que d'autres. On voit clairement que le niveau technologique d'un avion de chasse, comparativement à une montre, nécessite bien plus de temps pour comprendre son fonctionnement général et déterminer comment il vole. Mais la modélisation d'un avion seul n'est encore *que* compliquée. On connaît les plans pour le construire, ainsi que les lois de la physique qui le feront voler. Tant qu'on se contente de représenter l'avion comme un système isolé, il est possible de le modéliser dans son intégralité et de prédire précisément son comportement. Et c'est justement cette notion de prédiction qui nous amène à considérer un autre type de systèmes qui n'est plus compliqué mais *complexe*.

L'origine étymologique de l'adjectif « complexe » provient du latin « complexus » qui est le participe passé de « complector ». Ce verbe regroupe plusieurs traductions parmi : *enlacer*, *embrasser*, ou *comprendre*. « Complector » se compose du verbe « plecto » associé au préfixe latin « con- ». Ce dernier signifie « avec » ou « tous ensemble » mais c'est aussi utilisé en latin pour accentuer le sens du mot préfixé. Ici il s'agit de « plecto » qui provient lui-même du grec ancien « πλέκω » (plékô) et qui se traduit par « tresser ». Ainsi, aujourd'hui les différents dictionnaires donnent la définition suivante de « complexe » : ce qui est composé d'éléments divers et interconnectés, et qui n'est pas immédiatement compréhensible. L'expression *système complexe* caractérise donc un ensemble d'entités en interactions dont l'ensemble des mécanismes organisationnels ne nous sont pas entièrement compréhensibles.

Le système météorologique est un bon exemple de système complexe : il est difficilement prédictible en raison de la sensibilité aux conditions initiales et aux paramètres générant des comportements chaotiques. On se retrouve ainsi face à une situation d'incertitude. Pour estimer l'évolution que pourrait suivre le système, il faut simuler celui-ci en considérant un état initial, ainsi que les différentes variables et les règles d'interaction entre ces variables. Une des caractéristiques de ces systèmes est souvent le nombre important d'entités et d'interactions qui renforce sa complexité, mais ce n'est pas une condition nécessaire. On notera également qu'un système qui intègre une composante complexe et une autre qui est seulement compliquée, est

lui-même un système complexe. Ainsi, un avion en plein vol dans un orage est un système complexe.

Prenons maintenant un autre exemple : les essaims d'oiseaux. Eux aussi sont des systèmes mais dont la complexité prend une autre forme. Considérons les trois règles suivantes qui pourraient caractériser le comportement individuel des oiseaux : ils cherchent à se regrouper, ils essayent au maximum de se diriger dans la même direction que leurs congénères, et enfin ils évitent de se heurter les uns les autres. Il s'agit là de règles très simples qui modélisent le comportement des oiseaux conduisant à la formation d'un essaim (proposées par Reynolds (1987)). Pourtant, la moindre variation de paramètres va modifier radicalement le comportement global du système, tel que la forme de l'essaim. L'état du système n'est pas prévu par les règles comportementales des individus, mais il émerge des systèmes d'interactions entre les individus en prenant des formes variées. La complexité réside alors dans la sensibilité aux conditions initiales, aux paramètres et dans l'émergence de propriétés non prédictibles.

Dans un registre biologique, le cerveau, composé d'un ensemble de neurones, est un cas classique de système complexe. Un nombre important de travaux (Hodgkin and Huxley, 1952 ; FitzHugh, 1961 ; Nagumo et al., 1962) décrit depuis plusieurs années des modèles relativement complets du fonctionnement d'un seul neurone. D'autres recherches visent actuellement à comprendre les mécanismes d'émergence issus des interactions entre plusieurs neurones (Ambrosio et al., 2015). On est cependant encore loin de comprendre comment les réseaux neuronaux d'un cerveau conduisent à l'émergence de capacités cognitives tel que le langage ou la mémoire. Le problème réside, au moins en partie, dans le nombre très important d'interactions entre les neurones constituant le cerveau.

Les systèmes complexes se caractérisent par notre incapacité à prédire précisément leur évolution dans le temps. Cette inaptitude peut provenir de différentes causes cumulables : le nombre et l'hétérogénéité des entités et interactions, la sensibilité aux paramètres et conditions initiales, l'existence de propriétés émergentes, voir des mécanismes d'évolution qui génèrent des comportements chaotiques. Pour modéliser un système complexe et le comprendre, il devient nécessaire d'établir ses règles élémentaires d'évolution et de le simuler.

Au travers de mécanismes d'auto-organisation et de rétro-actions, les entités en interactions sont la source de phénomènes émergents. On distingue un niveau d'observation microscopique, avec les comportements individuels et locaux des entités, et un niveau macroscopique avec le comportement global du système. On parle d'approche multi-échelles pour décrire ces différents niveaux d'observation. On est ainsi en mesure d'examiner à différentes échelles la formation de structures, de propriétés ou de schémas particuliers qui caractérisent l'état et le comportement global du système.

Pour résumer, un système est dit complexe si son évolution émerge du comportement auto-organisé des entités qui le composent. Cette évolution n'est pas précisément prédictible au niveau microscopique mais la simulation nous permet d'estimer des tendances globales, observables au niveau macroscopique. Le caractère multi-échelle d'un tel système provient de l'opposition entre le niveau d'observation microscopique de ses entités et le niveau macroscopique de son état global.

2.1.2 Les systèmes complexes pour modéliser la logistique

L'étude des systèmes complexes est pluridisciplinaire puisqu'ils sont très largement répan- dus dans beaucoup de domaines. On retiendra entre autres la biologie (Leaning et al., 1983), la physique (Pietronero, 2008), l'éthologie (Bonabeau et al., 1997), la sociologie (Castellani and

Hafferty, 2009), l'économie (Arthur, 2014), la géographie (Bretagnolle et al., 2006), ou encore la logistique (Lakri et al., 2015).

Au cours de cette thèse nous nous intéresserons donc à l'approche des systèmes complexes appliquée au domaine de la logistique. Choi et al. (2001) expliquent dans leur article que la systémique a été utilisée depuis les années 1990 pour modéliser et mieux contrôler les chaînes logistiques. Pourtant, ces différents travaux ont vite trouvé leurs limites dans la taille, la dynamique et l'organisation distribuée de ces chaînes. Les auteurs ont donc proposé de considérer les réseaux d'approvisionnement comme des *systèmes complexes adaptatifs*. Selon Choi et al. (2001), ce terme désigne un système qui émerge au cours du temps selon une forme cohérente, et qui s'adapte et s'organise de lui-même sans qu'une entité spécifique ne le contrôle délibérément. Dans la suite de l'article, après avoir défini les caractéristiques de ce type de système, les auteurs décrivent dans quelles conditions les réseaux d'approvisionnement pourraient être modélisés. Les auteurs précisent toutefois que des enquêtes devraient être menées dans le but de déterminer plus clairement les règles d'évolution et les interactions possibles de ces systèmes.

Choi et al. (2001) évoquent à l'époque deux grandes approches pour modéliser les chaînes logistiques : les systèmes dynamiques et les modèles orientés agents (nous définirons plus en détails cette seconde approche dans la partie qui suit). Surana et al. (2005) et Schieritz and Grobler (2003) proposent des modèles couplant ces deux approches. Des équations différentielles sont en effet utilisées pour décrire l'évolution de la simulation, et sont intégrées aux comportements internes d'agents. Les modèles plus récents s'éloignent progressivement de l'utilisation de systèmes dynamiques, comme c'est le cas du modèle de Li et al. (2009) qui est exclusivement orienté agent. En effet, les règles de gestion, d'organisation ou d'évolution d'une chaîne logistique ne se prêtent pas toujours à une modélisation par un formalisme purement mathématique. Nous allons donc définir dans la partie qui suit les modèles orientés agents.

2.2 Les modèles agents

2.2.1 Une origine dans les modèles individus centrés

Les approches individus centrés consistent à modéliser les règles d'évolution d'un système au niveau des entités élémentaires qui le composent. Le terme d'individus n'est pas nécessairement dans le sens d'un être humain, il peut s'agir d'un être vivant comme un animal ou un végétal, mais il peut aussi s'agir d'un immeuble, d'une ville,... Pour comprendre cette approche, prenons l'exemple d'un trafic routier que l'on souhaite simuler. Une méthode classique de modélisation consiste à considérer que le trafic s'écoule comme un fluide à l'intérieur d'un canal (Lighthill and Whitham, 1955 ; Richards, 1956). Il s'agit d'une approche globale qui tend à généraliser les véhicules en homogénéisant leurs manières de se déplacer grâce à des valeurs moyennes représentées par des variables macroscopiques. La figure 2.1a est un schéma de cette approche. La fonction $v(x, t)$ correspond à la vitesse du flot, $q(x, t)$ est le débit, et $k(x, t)$ est la densité de véhicules. L'un des avantages de ces approches globales est qu'elles sont relativement compactes et qu'elles permettent une résolution analytique. Pourtant, ces modèles macroscopiques souffrent parfois d'une trop grande simplification et peuvent conduire à des solutions peu réalistes. De plus, on ne peut tenir compte de l'hétérogénéité des entités composant le système. Dans l'exemple du trafic routier, les véhicules n'ont pas tous les mêmes dimensions ou les mêmes vitesses. Certains conducteurs peuvent aussi adopter des comportements dangereux... Enfin, les interactions entre les entités vont avoir une incidence sur l'en-

semble du système. Si un accident survient entre deux véhicules, cela va probablement créer un embouteillage. La figure 2.1b est alors une autre manière de représenter le trafic. Il s'agit d'une approche individus centrés dans laquelle chaque véhicule est représenté avec ses propres caractéristiques internes. Et les interactions entre ces véhicules vont modifier leurs comportements et donc l'état global du système. Les interactions et comportements locaux des individus permettent l'émergence d'organisations globales. Dans l'exemple du trafic routier, ce sont les véhicules qui créent l'embouteillage. Ce dernier est une structure abstraite du système. Celle-ci est pourtant observable globalement et a émergé des interactions entre les individus. Dans une approche macroscopique, l'embouteillage s'apparentera à une réduction globale de la vitesse lorsque le nombre de véhicules devient trop important. Mais il n'est pas possible de simuler un embouteillage qui est issu du changement de voie d'un camion. Les approches individus centrés et les approches macroscopiques (qui incluent également les systèmes dynamiques) sont donc des paradigmes différents de modélisation. Les modèles agents ont émergé de ces approches et nous verrons de quelle manière au cours de cette première partie.

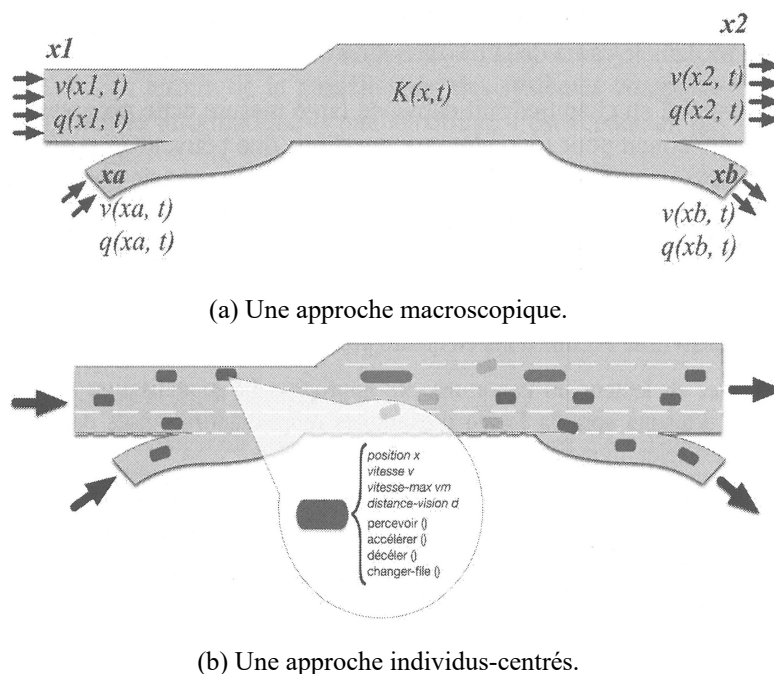


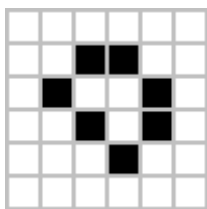
FIGURE 2.1 : Deux approches différentes pour simuler l'évolution d'un trafic routier (Treuil et al., 2008).

En 1966, Von Neumann (1966) décrit un système capable de se dupliquer lui-même et qu'il avait élaboré dans les années 1940. Son modèle est supporté par des automates cellulaires. Ces derniers sont constitués d'une grille régulière, et de dimensions finies, de cellules qui possèdent chacune un état et un ensemble de cellules voisines. Au temps $t = 0$, on assigne un état initial à chaque cellule, puis à chaque nouvelle étape $t + 1$, on détermine l'état de chaque cellule à partir de règles prédéfinies qui prennent en compte l'état de la cellule considérée, et les états de ses cellules voisines.

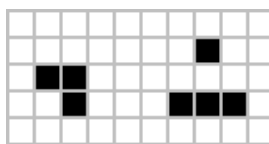
Ce modèle très simple fut largement repris depuis sa création. On retiendra notamment le jeu de la vie de Conway, présenté par Gardner (1970). Il s'agit d'un automate cellulaire dont l'utilisateur renseigne à l'état initial quelles cellules sont vivantes ou mortes. Ensuite, quatre règles vont déterminer si une cellule doit passer à l'état « vivante » ou « morte » :

1. Toute cellule vivante qui a moins de deux voisines vivantes doit mourir.
2. Toute cellule vivante qui a deux ou trois voisines vivantes reste en vie.
3. Toute cellule vivante qui a plus de trois voisines vivantes doit mourir.
4. Toute cellule morte qui a exactement trois voisines vivantes, devient vivante à son tour.

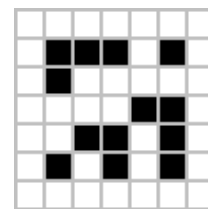
Ces règles très simples peuvent conduire un état initial simple vers des motifs complexes. Certains de ces motifs peuvent faire émerger un comportement chaotique, tandis que d'autres vont mener à un système stabilisé (voir les motifs de la figure 2.2).



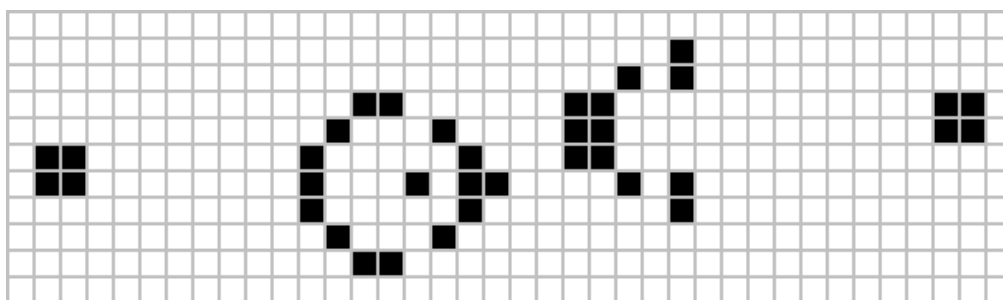
(a) Motif qui n'évolue pas et restera indéfiniment stable.



(b) Motif qui évoluera pendant 130 itérations mais finira par disparaître totalement.



(c) Motif qui subira une croissance infinie tant qu'il possède assez de place.

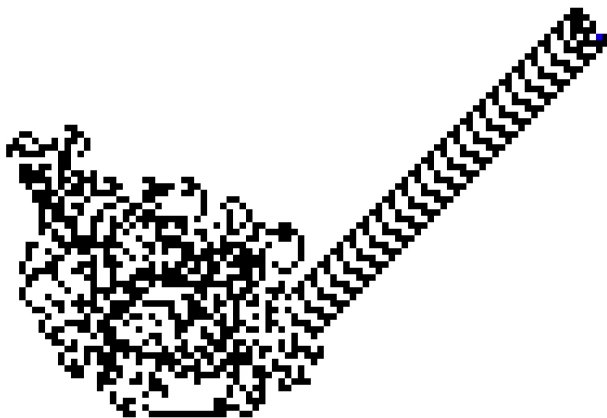


(d) Motif stabilisé sur une période de 30 étapes qui génère indéfiniment d'autres motifs. Ce motif particulier est appelé le canon à planeurs de Gosper.

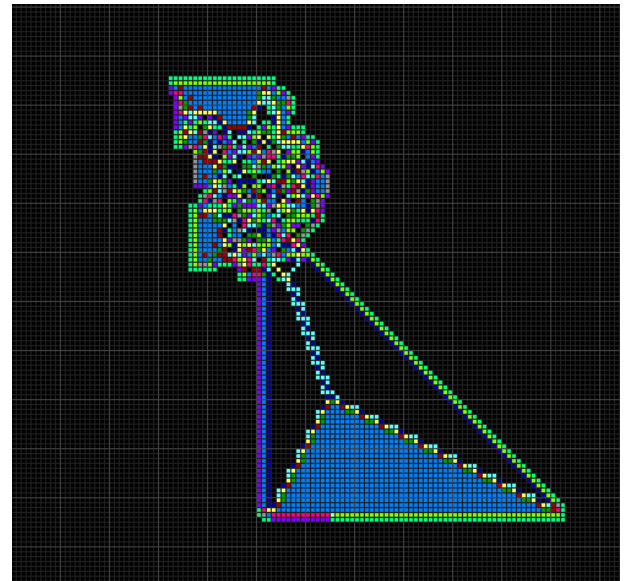
FIGURE 2.2 : Quatre exemples de motifs du jeu de la vie de Conway.

Schelling (1971) s'est ensuite servi des automates cellulaires pour définir un modèle de ségrégation au sein d'un territoire. Il voulait montrer que si des individus sont tolérants à la diversité, un phénomène de ségrégation émerge malgré tout. Ce type de dynamique ne pourrait pas être mis en place avec une approche macroscopique, car ce sont bien les décisions locales qui conduisent à l'apparition d'une ségrégation observable globalement.

Quelques années plus tard, on retrouve les travaux de Langton. Il proposa un premier automate cellulaire auto-répliquant (Langton, 1984) avant d'énoncer les règles d'un modèle appelé « la fourmi de Langton » (Langton, 1986). Ce dernier décrit les règles de déplacement d'une fourmi au sein d'un automate cellulaire en fonction de l'état de la cellule sur laquelle se trouve la fourmi. Ce modèle permet l'émergence de motifs grâce à un nombre vraiment très faible de règles. Ces motifs sont de forme rectiligne et sont appelés des autoroutes. En effet, une fois piégée dans ce motif, la fourmi ne s'arrêtera plus de le compléter. Le principe fut repris plus tard par Gale et al. (1998) qui ajoutèrent d'autres règles et d'autres états possibles aux cellules. Cela a permis de faire émerger d'autres motifs, notamment des triangles comme sur la figure 2.3.



(a) Fourmi de Langton classique. À gauche, la fourmi a dessiné un motif chaotique dans les premières étapes. Le motif rectiligne à droite a émergé à la fin. La fourmi continuera indéfiniment de dessiner cette « autoroute ».



(b) Fourmi de Langton avec plusieurs couleurs. Au centre, la fourmi a dessiné un motif chaotique dans les premières étapes. Le motif prenant la forme d'un triangle en bas a émergé comme pour l'autoroute et ne cessera de s'agrandir.

FIGURE 2.3 : Exemple de deux motifs qui ont émergé grâce à une fourmi de Langton (Langton, 1986 ; Gale et al., 1998).

Avec une autre approche, Reynolds (1987) a travaillé sur la modélisation en trois dimensions de nuées d'oiseaux en vol. Il a ainsi proposé un modèle simulant des entités, appelées boids, qui se comportent individuellement afin de se déplacer en fonction de leur voisinage. Voici les trois règles décrites par Reynolds :

1. Séparation : un boid doit éviter ses voisins à courte distance.
2. Alignement : un boid doit se diriger dans la direction moyenne de ses voisins.
3. Cohésion : un boid se rapproche des autres boids à moyenne distance.

Les résultats de ces recherches montrent des objets se déplaçant dans un environnement en trois dimensions dont le comportement ressemble à celui des nuées d'oiseaux. L'un des avantages de cette approche est ici de pouvoir positionner chaque entité individuellement dans l'espace, ce que ne permettrait pas une approche macroscopique.

Plus tard, dans le début des années 1990, c'est le travail de biologistes qui inspira une autre approche individus centrés. Deneubourg et al. (1990) proposent un modèle qui explique pourquoi les fourmis d'Argentine d'une même colonie ont tendance à adopter le chemin le plus court qui mène à de la nourriture. En effet, ils ont mis en évidence que les fourmis semblent se déplacer aléatoirement mais sont attirées localement par des phéromones déposées précédemment par leurs congénères. Ces phéromones s'évaporent rapidement à l'air libre. Plus la concentration est forte, plus cela attire de fourmis. Le chemin le plus court est celui qui permet aux fourmis de faire le plus d'allers-retours entre la nourriture et la colonie au cours d'une même durée. Ainsi, ce chemin aura progressivement une concentration plus importante de phéromones, attirant ainsi davantage de fourmis, qui à leur tour vont amplifier le phénomène. On parle alors de *stigmergie*. Il s'agit d'un mécanisme de coordination indirecte entre des indi-

vidus. Ici, c'est au travers de l'environnement et grâce aux phéromones, que les fourmis se coordonnent pour mettre en évidence un plus court chemin. Le modèle proposé par [Deneubourg et al. \(1990\)](#) permet donc de passer d'un état instable dans lequel chaque fourmi explore aléatoirement l'environnement, à un état stable dans lequel le plus court chemin aura émergé grâce à un mécanisme distribué et auto-organisé.

Cela inspira de nombreux chercheurs en informatique qui proposèrent les algorithmes de colonies de fourmis ([Colorni et al., 1991](#) ; [Dorigo, 1992](#) ; [Bonabeau et al., 1999](#)). Ces algorithmes permettent de calculer des plus courts chemins dans un graphe en simulant le déplacement de fourmis virtuelles sur ce graphe. Les fourmis déposent des traces le long des chemins, sur les arêtes, qui représentent les phéromones. En quelques itérations, le plus court chemin va émerger comme dans le cas des véritables fourmis. L'un des intérêts de cette méthode par rapport à des algorithmes plus classiques comme celui de [Dijkstra \(1959\)](#) se trouve dans la ré-optimisation de la solution lorsque le graphe évolue. En effet, comme dans la réalité, les fourmis virtuelles sont capables de s'adapter à une modification de l'environnement. Ce modèle est donc résilient aux perturbations. De plus, le calcul est distribué sur l'ensemble des fourmis, il est donc possible de faire du calcul en parallèle.

2.2.2 Les principes généraux des modèles agents

Comme on a pu le voir, les approches individus centrés permettent de représenter certains systèmes à l'aide d'entités autonomes en interactions. Le concept d'agent fait partie de cette famille de modèle en faisant référence à la notion d'entités hétérogènes et d'interactions avec un environnement. En effet, si on regarde un automate cellulaire, d'une part, il n'y a pas d'environnement et d'autre part, chaque cellule se comporte selon le même ensemble de règles prédéfinies. Tout comme pour les boîs de [Reynolds \(1987\)](#), ce sont plutôt les interactions avec le voisinage qui créent l'émergence d'un comportement global. Pourtant, il existe plusieurs systèmes dans lesquels les différentes entités peuvent se comporter différemment. Les systèmes logistiques que nous modéliserons dans la suite de cette thèse en sont un parfait exemple. Plusieurs acteurs aux rôles différents font partie de ces systèmes.

Les modèles orientés agents sont encore très récents. Il est assez difficile de remonter la trace des premiers modèles agents car le concept concrétise plusieurs niveaux d'abstraction et de nombreux travaux peuvent correspondre à des modèles agents bien qu'ils n'en aient pas le nom. Toutefois, un des papiers souvent cité comme le premier à utiliser le terme d'agent est celui de [Holland and Miller \(1991\)](#). C'est donc dans les années 1990 que ces modèles se sont répandus grâce à des chercheurs comme [Gilbert and Doran \(1994\)](#) ; [Gilbert and Troitzsch \(2005\)](#) ou [Wooldridge and Jennings \(1994, 1995\)](#). En France, on retrouve également les travaux de [Ferber \(1995, 1999\)](#).

Pourtant, malgré la diversité des travaux menés à l'aide de ces modèles, il est difficile de définir un formalisme universel. En effet, puisqu'ils sont orientés vers un haut niveau de conception, les caractéristiques précises d'un modèle agent dépend de l'objet d'étude modélisé. On retrouve tout de même dans la littérature un ensemble de concepts clés que nous allons décrire. On reprendra particulièrement les définitions proposées par [Ferber \(1999\)](#) car la suite de ce travail est basée sur celles-ci.

Un agent est une entité autonome, physique ou virtuelle, qui peut modéliser toute partie d'un système, et qui s'intègre dans un environnement. Un agent peut ainsi représenter un être humain, un bâtiment, une communauté, ou même un pays complet... L'environnement sur lequel évolue un agent peut être représenté par différentes topologies (tel qu'une surface continue,

un graphe,...) sur lesquelles nous reviendrons dans la partie 2.2.4. L'environnement peut aussi être constitué d'objets qui ne sont pas nécessairement des agents (par exemple, un mur ou un meuble). Chaque agent possède localement des propriétés qui modélisent son état interne à une date t . Certaines de ces propriétés peuvent évoluer à tout moment de la simulation, tandis que d'autres seront immuables. Les agents peuvent également se comporter selon différentes règles à leur disposition. Elles leur apportent la capacité de percevoir et/ou de manipuler leur environnement. Elles leur permettent également d'interagir avec d'autres agents.

2.2.3 Les différents types de comportement

Le degré de sophistication des comportements modélisés permet de regrouper deux grandes catégories d'agents : les agents réactifs et ceux cognitifs. La frontière qui sépare ces deux approches extrêmes reste néanmoins floue et la plupart des modèles adopte en réalité une forme hybride entre réactif et cognitif pur.

Les agents réactifs purs consistent à modéliser l'agent par des règles simples, assimilables à des réflexes. Il réagit à des stimulus en fonction de règles pré-définies et sans conserver d'état interne. Un stimuli qui ne serait pas prévu par une règle, ne serait pas pris en compte par l'agent et n'enclencherait donc pas d'action.

À l'opposé, les agents cognitifs purs se comportent davantage comme des entités intelligentes. Ils maintiennent un état interne (pouvant inclure un historique de leur évolution), possèdent leur propre représentation de leur environnement (issues de leurs perceptions, de leur croyance et de leurs connaissances), et ont des buts à atteindre. Un modèle cognitif très répandu s'appelle le BDI : Beliefs-Desires-Intentions¹. À partir des connaissances de l'agent et de ses objectifs, il détermine des plans d'actions qu'il essaiera de réaliser. Les agents cognitifs vont chercher à prédire les effets des actions de chacun pour prendre la meilleure décision. Pour cela, on intègre le plus souvent des algorithmes d'intelligence artificielle. Il est courant d'adopter des bases de connaissance et/ou des méthodes d'apprentissage pour représenter les connaissances de l'agent et déterminer les actions à exécuter.

L'avantage des agents réactifs est de permettre une mise en place facile d'un modèle. Leurs comportements ne demandent que peu de ressources informatiques, on peut donc simuler un nombre important d'agents en même temps. Par contre, leurs comportements peuvent être peu réalistes du fait de cette simplicité. Concernant les agents cognitifs, ils sont plus délicats à mettre en place (en partie à cause des algorithmes d'intelligence artificielle). De plus la charge de calcul pour un ordinateur est également plus importante. Il est donc difficile d'avoir beaucoup d'agents cognitifs au sein d'une même simulation. On rappellera tout de même que cette dichotomie entre agent réactif et cognitif n'est pas aussi stricte. De nombreux modèles agents font preuve d'une certaine hybridation afin de tirer profit de ces deux catégories.

Qu'ils soient réactifs ou cognitifs, les agents peuvent avoir un comportement déterministe ou non. Néanmoins, dans tous les cas les interactions et les paramètres initiaux de la simulation peuvent conduire le système à produire des événements non-prédictibles. Dans certains cas, on observe même l'apparition de phénomènes chaotiques car le système fait preuve d'une sensibilité aux paramètres. L'approche agent peut donc aider à comprendre quand, comment, et pourquoi le système reste ou devient stable. Il suffit d'observer l'impact que peut avoir les différents paramètres initiaux ou confronter le système à des perturbations. Puisque les modèles

1. Croyances-Désirs-Intentions.

agents peuvent faire cohabiter de nombreux paramètres, on peut mieux comprendre comment contraindre globalement le système, en agissant localement.

2.2.4 Les environnements des systèmes agents

Comme on a pu le voir, l'environnement prend une place très importante dans les approches agents mais il peut prendre de nombreuses représentations différentes en fonction de l'objet d'étude.

Dans certains cas, l'environnement peut être abstrait, dans le sens où il n'aura pas de véritable représentation stricte et ne sera pas spatialisé. Il ne servira alors que de support aux interactions entre les agents en fournissant une zone de partage des ressources communes. Avec ce type d'environnement, deux agents peuvent échanger, de manière non synchronisée, des informations ou des objets.

Ensuite, l'environnement peut être spatialisé. Dans ce cas, les agents peuvent se déplacer selon une certaine vitesse. Leur perception pourra être limitée, voir inexistante, au-delà d'une certaine distance. Si le système étudié s'y prête, les agents évoluant dans ce type d'environnement pourront être capables d'interagir avec les objets à leur portée. Lorsque l'environnement est spatialisé, il peut également avoir d'autres propriétés. Il peut ainsi être de taille infinie et s'agrandir au fur et à mesure en fonction des besoins de l'agent. Ou au contraire, il peut être de dimensions finies. Dans ce cas, les agents seront cloisonnés au sein d'un territoire délimité. Néanmoins, même si la surface de l'environnement est finie, les frontières peuvent ne pas être bornées. En effet la topologie de l'environnement peut prendre des formes variées afin d'éviter les biais liés à une surface plane et bornée. On retrouve par exemple les topologies en forme annulaire, sphérique ou torique (voir figure 2.4). Cela permet de se rapprocher d'un environnement infini tout en limitant les problèmes techniques que cela suppose (notamment liés à la mémoire limitée d'un ordinateur).

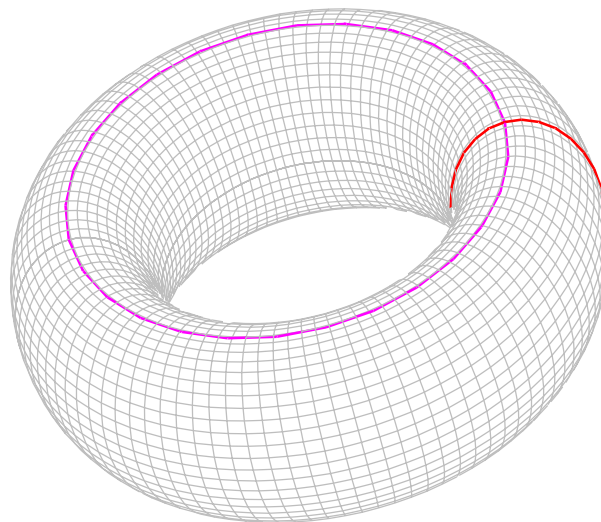


FIGURE 2.4 : Représentation d'un environnement ayant une topologie torique.

L'environnement peut également être défini de manière continue ou discrète. Dans ce dernier cas, on décompose le territoire en un treillis de point ou de cellules interconnectés localement selon certaines règles (par exemple une grille avec un voisinage de von Neumann, ou

les diagrammes de Voronoï). L'exemple le plus simple et le plus courant d'environnement discret est d'ailleurs une grille. À l'inverse, un environnement continu n'opère pas ce découpage. Le territoire offre donc une infinité de position dans l'espace. On remarque cependant qu'il est fréquent de préférer un environnement discret car les calculs de déplacement dans l'espace sont moins coûteux. En effet, un agent aura un nombre limité de directions pour se diriger et de position à occuper. Les risques de collision entre deux agents en mouvement sont donc limités.

Enfin, un environnement peut être représenté par un graphe. Il s'agit d'une représentation particulière que nous traiterons en détails dans la partie 2.3. Un graphe est une structure mathématique discrète permettant de représenter des interactions (appelées arêtes ou arcs) entre des entités (appelées nœuds). On dit qu'un graphe est spatialisé lorsque les nœuds et les arêtes du graphe disposent elles-mêmes d'une dimension spatiale. Par exemple, un réseau routier peut être modélisé par un graphe spatialisé dans lequel les intersections sont les nœuds, et les routes sont les arêtes : l'environnement est ainsi discrétisé. Dans la réalité, les véhicules se déplacent de manière continue le long des routes et si on les représente par des agents, eux aussi peuvent circuler de manière continue le long des arêtes. Ainsi, les graphes spatialisés sont l'exemple même qu'un environnement peut faire preuve d'une certaine hybridation et cumuler des caractéristiques discrètes et continues. Il est d'ailleurs possible qu'un modèle agent possède plusieurs représentations simultanées d'un même environnement, dont certaines seront discrètes et d'autres seront continues.

2.2.5 Les modèles multi-agents

Les modèles agents font intervenir la plupart du temps plusieurs agents en même temps mais ce n'est pas une obligation. Selon l'objet d'étude, on peut tout à fait se contenter d'un seul agent qui n'interagit qu'avec l'environnement. Mais dans le cadre d'une approche multi-agent, l'un des grands avantages est de pouvoir faire cohabiter des agents de différentes natures. Par exemple, un agent peut représenter une proie, et un autre sera le prédateur. Dans un contexte urbain, certains agents peuvent modéliser des humains, et d'autres seront des immeubles, ou même une ville toute entière. Meignan et al. (2007) décrivent un modèle dans lequel les agents sont des bus ou des voyageurs. Chacun de ces agents auront des comportements différents. Comme l'expliquent Treuil et al. (2008), on peut parler d'*espèces* (parfois aussi appelés *classes*) qui regrouperont l'ensemble des agents modélisant les mêmes types d'entités du système. Ils partageront ainsi les mêmes caractéristiques et obéiront aux mêmes comportements. D'ailleurs, il est possible de faire cohabiter des agents réactifs et des agents cognitifs, notamment lorsque l'on modélise plusieurs niveaux d'échelles. Pour exemple, on pourrait représenter au sein d'un même modèle des véhicules à l'aide d'agents réactifs, et des villes avec des agents cognitifs.

Les modèles multi-agents sont utilisés dans de nombreux domaines. D'ailleurs, à l'image des travaux cités précédemment sur les fourmis, on retrouve ces approches multi-agents dans la modélisation des comportements d'insectes sociaux (Miramontes and DeSouza, 2008). The-raulaz et al. (1998) avaient notamment travaillé sur la formation de nids d'insectes sociaux : des architectures complexes en trois dimensions qui émergent du comportement collectif des individus composant la colonie (tel que des abeilles, des termites,...). Dans ces travaux, on voit clairement que l'aspect spatial de l'environnement, la mobilité des insectes, et les différentes formes d'interactions jouent un rôle important. On retrouve ces caractéristiques dans les travaux appliqués à la géographie (Heppenstall et al., 2012) et à la logistique (Swaminathan et al., 1998 ; Davidsson et al., 2005) sur lesquels nous allons nous attarder afin d'illustrer l'approche multi-agent.

2.2.5.1 Les agents et la géographie

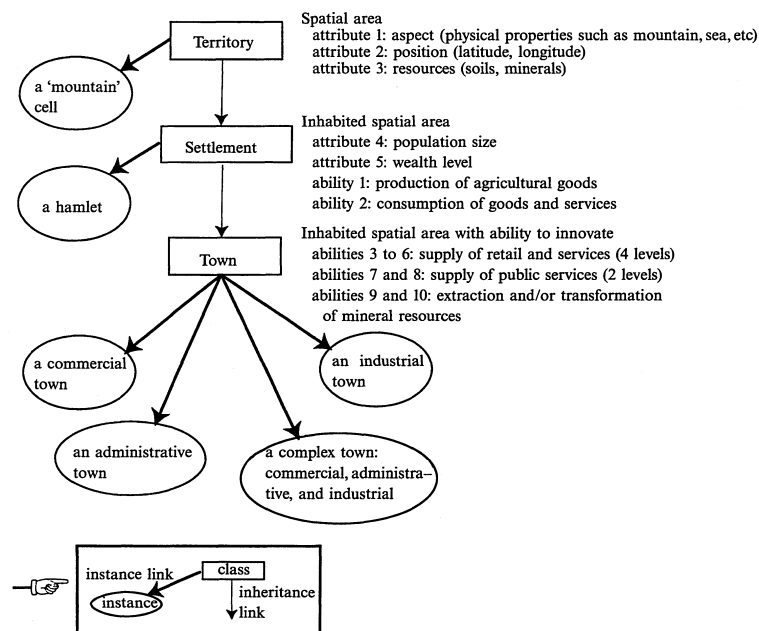
Crooks et al. (2008) présentent les différents défis de la simulation multi-agent dans un contexte spatial et géographique. Ils illustrent leur propos avec trois exemples : un modèle d'évacuation de piétons en cas d'urgence, un modèle de ségrégation résidentielle, et un modèle d'interactions spatiales entre des zones de résidences et des zones d'emplois. Ils expliquent que les systèmes d'information géographique (SIG) traditionnel permettent de représenter la nature géo-spatiale des territoires mais ils ne sont pas adaptés à la dynamique de ceux-ci. Il est donc courant d'utiliser une approche agent pour modéliser la dynamique, et un SIG pour représenter les entrées ou les sorties du modèle. Une fois le système simulé, on peut effectuer les analyses spatiales à l'aide des outils classiques fournis par les SIG (essentiellement des outils d'analyse statistique). Les auteurs montrent également qu'il est souvent intéressant de ne considérer qu'un échantillon des entités d'un système pour effectuer les simulations. En effet, le comportement global de l'échantillon a de forte chance de se comporter comme le système dans sa totalité. Cela permet donc de limiter le nombre de calculs. Enfin, ils expliquent que les agents décrits dans leurs travaux sont avant tout des individus mobiles. Les autres parties du modèles correspondent en fait à l'environnement.

Patrice Langlois a d'abord travaillé sur les automates cellulaires avec notamment le modèle RuiCells (qui permet de simuler le ruissellement de surface) (Langlois and Delahaye, 2002) et le modèle SpaCelle (qui vise à simuler la croissance urbaine) (Dubos-Paillard et al., 2003). Il a ensuite travaillé sur les approches agents comme en témoigne la réalisation d'une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent pour les sciences humaines (Langlois et al., 2015). On retiendra notamment ses travaux de simulation de trafic routier en collaboration avec Tranouez et al. (2012). Dans cet article, les auteurs modélisent des agents réactifs représentant les véhicules qui se déplacent sur des agents-routes. Contrairement à l'article de Crooks et al. (2008), les agents ne sont donc pas nécessairement mobiles. Ils peuvent aussi correspondre à des objets inertes dont la dynamique se situe dans l'évolution des propriétés (tel que la variation de vitesses dans une approche eulérienne plutôt que lagrangienne). Lorsque des événements viennent perturber le système (fermeture d'une route ou d'un quartier dans le cadre d'une évacuation d'urgence par exemple), les véhicules adoptent un comportement plus cognitif en modifiant leur stratégie de déplacement (choix prioritaire des routes les moins engorgées par exemple). Les auteurs ont implémenté six comportements différents que peuvent adopter les agents lors d'une évacuation :

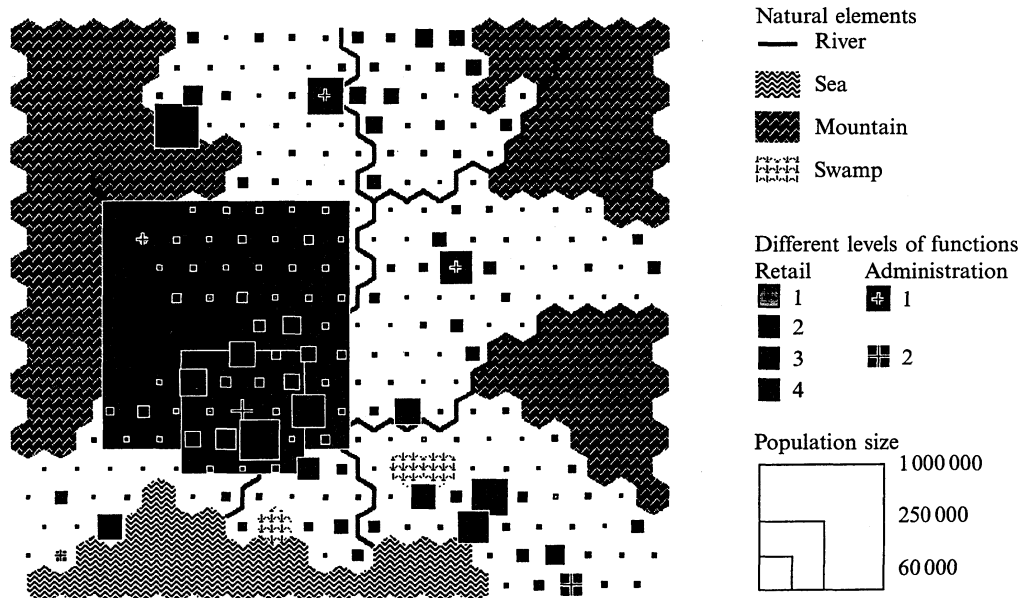
- La stratégie de la « poule » : fuir dans la direction opposée de la perturbation.
- La stratégie du « spectateur » : se diriger en direction de la perturbation et y rester.
- La stratégie du « pragmatique » : le véhicule choisit une destination quelque part sur le réseau et s'y rend (permet de représenter les personnes qui souhaitent récupérer un proche).
- La stratégie de la personne « errante » : le véhicule est en détresse et se déplace aléatoirement sans but précis.
- La stratégie du « coureur » : le véhicule choisit la route la moins congestionnée.
- La stratégie du « mouton » : le véhicule suit la foule, quelque soit la direction.

À des fins de validation, ils ont voulu comparer globalement le trafic simulé avec le véritable trafic. Malheureusement, les données dont ils disposent pour la validation sont trop anciennes, rendant la comparaison non-significative. Ils peuvent néanmoins mettre en évidence, grâce à une analyse spatiale, les zones du réseau routier dont l'évacuation semble plus difficile. L'utilisation d'un modèle multi-agent permet ici de comparer les résultats en fonction des différents

comportements individuels des véhicules. Il permet aussi de comprendre comment la présence d'individus adoptant un comportement à risque (comme la stratégie du spectateur) peut influencer sur l'évacuation des autres véhicules qui n'auraient pas adopté ce comportement dangereux.



(a) Hiérarchie des agents et propriétés d'héritage pour la spécialisation.



(b) Représentation spatiale de la population à la fin de la simulation. On peut observer l'émergence de villes très peuplées.

FIGURE 2.5 : Le modèle SIMPOP (Pumain et al., 1995 ; Sanders et al., 1997).

Vers la fin des années 1990, une équipe de chercheurs en géographie a élaboré un modèle multi-agent pour simuler l'évolution de l'urbanisation d'un territoire (Pumain et al., 1995 ; Sanders et al., 1997). Ce modèle, nommé SIMPOP, possède un environnement découpé en grille (voir figure 2.5). Chaque cellule représente un morceau du territoire qui est caractérisé par l'un

des types de sols possibles (montagne, marécages, plaine,...). Initialement, la population est répartie uniformément sur l'ensemble du territoire. Chaque cellule produira une certaine quantité de ressources en fonction du nombre d'habitants et du type de sols. Ensuite, à l'aide de règles d'évolution des cellules au niveau local et grâce à un mécanisme d'interactions entre ces cellules, des structures durables, plus peuplées, émergent peu à peu. Elles constituent l'apparition de villages qui pourront grandir et devenir plus tard des villes. Celles-ci finiront ensuite par se spécialiser. Les auteurs ont pu montrer que l'introduction de nouvelles fonctions (commerciales, administratives, industrielles,...) permettant de spécialiser davantage une zone était une condition nécessaire à l'apparition d'une hiérarchie entre ces villes.

SIMPOP inspira plus tard d'autres modèles à ses auteurs dont EUROSIM (Sanders et al., 2007). Celui-ci s'intéresse plus précisément à l'évolution des villes européennes sur la période de 1950 à 2050. Puisqu'il concerne un territoire réel, et non théorique comme pour SIMPOP, les auteurs ont dû affiner les règles et les propriétés des agents, mais ont aussi dû calibrer le modèle selon des données réelles. Ainsi, pendant les cinquante premières années, le modèle se calibre sur la réalité, puis il simule un scénario d'évolution possible. EUROSIM génère différentes cartes à différentes échelles : macro pour l'Europe, méso pour les pays ou les régions, et micro pour les villes. Ces cartes sont associées à un ensemble de graphiques et d'indicateurs, et elles permettent d'effectuer une analyse spatiale et organisationnelle du système. On peut ainsi observer l'évolution des populations ou les flux d'échanges entre les villes. On notera également que Sanders et al. (2007) soulèvent un point capital de la modélisation multi-agent dans leur conclusion :

“ Les systèmes urbains sont des entités tellement complexes, les interactions entre les villes sont à la fois si nombreuses et si mal connues et mesurées, que la sélection des entités pertinentes comme celles des règles supposées intervenir dans la dynamique des villes comportent une part d'arbitraire, ou au mieux d'intuition non démontrable. ”
Sanders et al. (2007)

En réalité, cette citation peut s'appliquer à tous systèmes complexes. Il s'agit de l'un des défis majeurs de leur modélisation.

2.2.5.2 Les agents et la logistique

L'état de l'art proposé par Davidsson et al. (2005) montre un net intérêt des approches multi-agents dans le domaine de la logistique. Les auteurs distinguent différentes ambitions derrière les nombreux modèles.

Une partie d'entre eux concerne la modélisation du transport de marchandises. Cela renvoie au déplacement d'une ou plusieurs cargaisons d'un endroit à un autre et dont le transport est organisé collectivement par les mêmes acteurs. Les problèmes liés à ces modèles concernent la planification de routes multi-modales, la gestion d'un parc de véhicules ainsi que des problèmes d'ordonnancement. Ces modèles impliquent un nombre limité d'acteurs qui collaborent et se coordonnent pour organiser le transport de ces cargaisons.

Un autre partie des travaux présentés porte sur la modélisation du trafic, qui désigne l'ensemble des flux sur un réseau quelque soit l'origine et la destination. Ainsi, contrairement au modèle de transport de marchandises, ceux concernant le trafic n'impliquent pas que tous les

acteurs se coordonnent simultanément et collaborent tous ensemble. Nous reviendrons sur ces modèles de trafic dans le chapitre 4.

Enfin, [Davidsson et al. \(2005\)](#) évoquent également la modélisation des terminaux et autres infrastructures nodales faisant transiter des marchandises. Les problèmes liés à ces modèles concernent l'allocation des ressources humaines ou matérielles, l'ordonnancement du traitement des marchandises entrantes et sortantes,...

[Zhu and Bos \(1999\)](#) présentent un modèle de transport intermodal de marchandises. L'objectif de ce travail est de proposer un système de communication décentralisée permettant une organisation collaborative du transport de marchandises. Les auteurs proposent ainsi un modèle multi-agent dans lequel des agents interagissent selon un protocole de communication conçu pour faciliter la coordination du transport. Les auteurs décrivent deux grandes familles d'agents : les agents « entreprises », et les agents « ressources ». Chacune de ces grandes familles est elle-même décomposée en plusieurs classes. Ainsi, les agents « entreprises » peuvent être des chargeurs, des transitaires, des transporteurs, ... Les agents « ressources » font références à des camions, des avions, des terminaux, ou des machines de chargement/déchargement. Les « ressources » ont un comportement réactif assez simple au contraire des « entreprises » qui se montrent plus cognitives. Ces dernières intègrent, d'une part, des comportements liés à la gestion interne de l'entreprise, et d'autre part, ils ont des comportements d'interactions sociales qui suivent un protocole de communication. Ces comportements sont associés à des objectifs que les agents doivent réaliser.

Une étude de cas a été menée dans le secteur du transport aérien dans lequel les compagnies de lignes aériennes subissent une rude compétition face aux grands intégrateurs de transports comme DHL ou UPS. En effet, ces derniers ont des moyens humains et techniques très importants. Ils possèdent différents types de véhicules comme des avions ou des camions. Les auteurs indiquent que certains intégrateurs possèdent également leurs propres infrastructures comme des aéroports ou terminaux. Enfin, ils communiquent le plus souvent directement avec les chargeurs. Ainsi, ces intégrateurs ont une plus grande maîtrise du transport car ils ont les moyens de l'opérer de bout-en-bout. Lorsqu'un chargeur choisit un intégrateur pour s'occuper de son transport, les prises de décisions seront centralisées. Mais le chargeur peut aussi choisir un transitaire. Dans ce cas, un processus de coordination devra se mettre en place. Le transitaire devra entre autres sélectionner une compagnie aérienne. Celle-ci ne maîtrise qu'une petite partie du transport et elle n'interagit qu'avec des intermédiaires et non directement avec le chargeur. En passant par un transitaire, les prises de décisions seront donc décentralisées. [Zhu and Bos \(1999\)](#) expliquent ainsi dans quelles mesures leur modèle multi-agent pourrait être utilisé pour faciliter ce processus décisionnel distribué.

[Henesey et al. \(2003\)](#) ont quant à eux travaillé sur un modèle multi-agent permettant de simuler les relations des acteurs de la logistique intervenant au sein d'un port. Ils sont partis du constat que la performance de ces relations était aussi importante que la qualité des infrastructures portuaires pour garantir l'efficacité globale du port. Ils ont donc proposé un modèle capable de simuler différentes politiques de gestion dans un contexte où les objectifs des parties prenantes sont parfois convergents et d'autres fois divergents. Les auteurs ont identifié deux formes de relations : celles « physiques » car liées à la manipulation de la marchandise, et celles « incorporelles » car liées aux contrats, à la supervision ou aux échanges d'information. Une autre difficulté de la modélisation est d'ailleurs de pouvoir représenter des relations informelles comme des pressions de groupes d'intérêts locaux.

La conception du modèle qui est présentée dans l'article se restreint à la communauté liée aux terminaux à conteneurs. Il s'agit d'une plus petite communauté qui est donc plus facile à

étudier, néanmoins leur méthodologie pourrait s'appliquer à la totalité du port si besoin. Pour concevoir leur modèle, les auteurs ont basé leur travail sur un ensemble d'enquêtes et d'entretiens auprès de chaque acteur impliqué. Ce travail a permis d'identifier tous les acteurs et de caractériser les relations statiques qui les lient. Ils ont également déterminé l'ensemble des rôles et compétences nécessaires au passage des conteneurs sur un terminal. Enfin, les auteurs ont identifié les acteurs ayant ces compétences. Le simulateur (voir figure 2.6) est quant à lui décomposé en deux parties : d'un côté il y a les agents qui prennent les décisions, et de l'autre, il y a l'environnement physique. Ce dernier reçoit les décisions prises par les agents, simule le processus physique lié à chaque décision et renvoie le résultat aux agents décideurs. [Henesey et al. \(2003\)](#) précisent toutefois que l'implémentation n'est pas totalement fonctionnelle car seuls deux agents sont implémentés. L'approche multi-agent porte néanmoins un intérêt majeur car elle se montre très descriptive et permet de croiser des acteurs aux comportements très hétérogènes. Une approche macroscopique aurait échoué à ce niveau en simulant des caractéristiques moyennes.

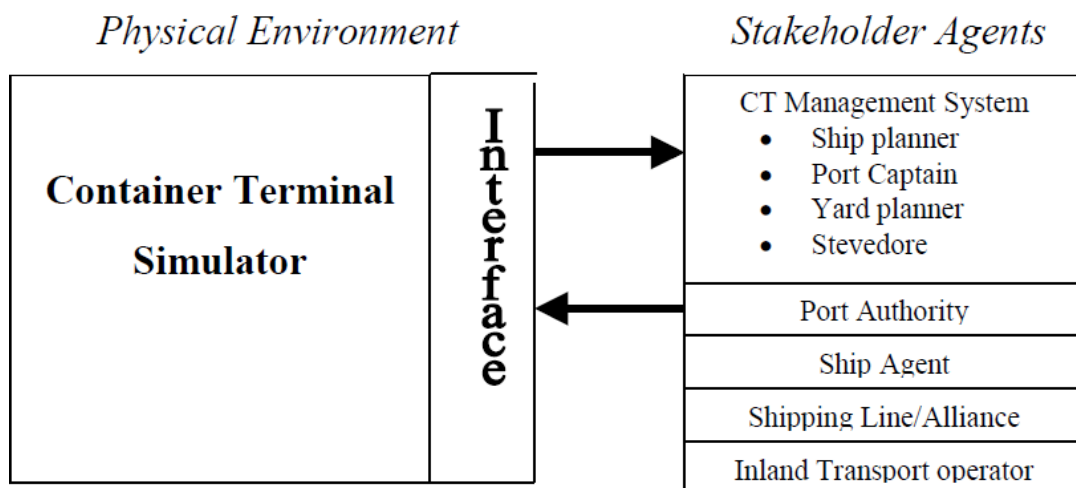
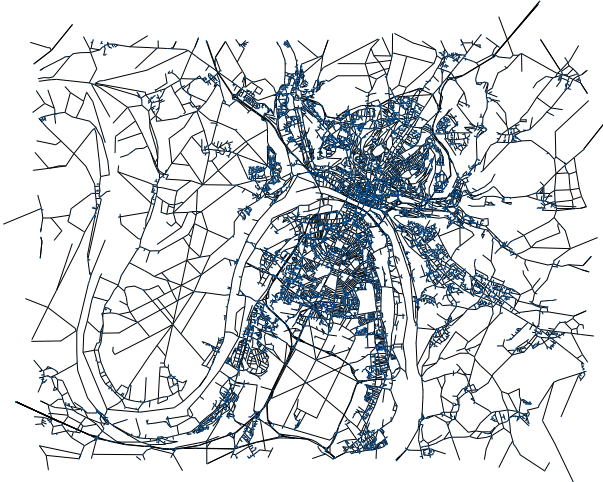


FIGURE 2.6 : Architecture du simulateur de terminal à conteneurs proposée par [Henesey et al. \(2003\)](#).

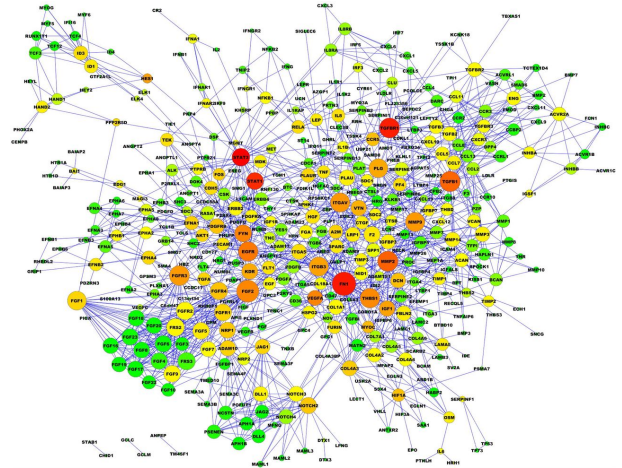
2.3 Les graphes comme outils de modélisation

La théorie des graphes est un champ des mathématiques et de l'informatique. L'article sur les sept ponts de Königsberg écrit par Euler ([Euler, 1741](#)) est considéré comme le premier article décrivant cette notion. Un graphe est une structure mathématique qui définit des relations entre des entités. Il s'agit d'un outil très puissant de modélisation qui est utilisé dans de nombreux domaines (voir figure 2.7) comme la sociologie, la biologie ou l'informatique. On retrouve également les graphes en géographie comme en témoigne le livre de [Rozenblat and Melançon \(2013\)](#). Ces deux auteurs ont notamment contribué à développer dans un contexte pluridisciplinaire, des approches multi-échelles de réseaux hiérarchiques de systèmes géographiques. Des applications concrètes ont été développées et expliquent comment la topologie des réseaux impactent sur des fonctionnements de systèmes de villes en réseaux ou encore dans l'organisation d'entreprises multinationales. Dans la suite de cette thèse nous nous servirons des graphes pour représenter, par exemple, des réseaux de transport ou des interactions entre

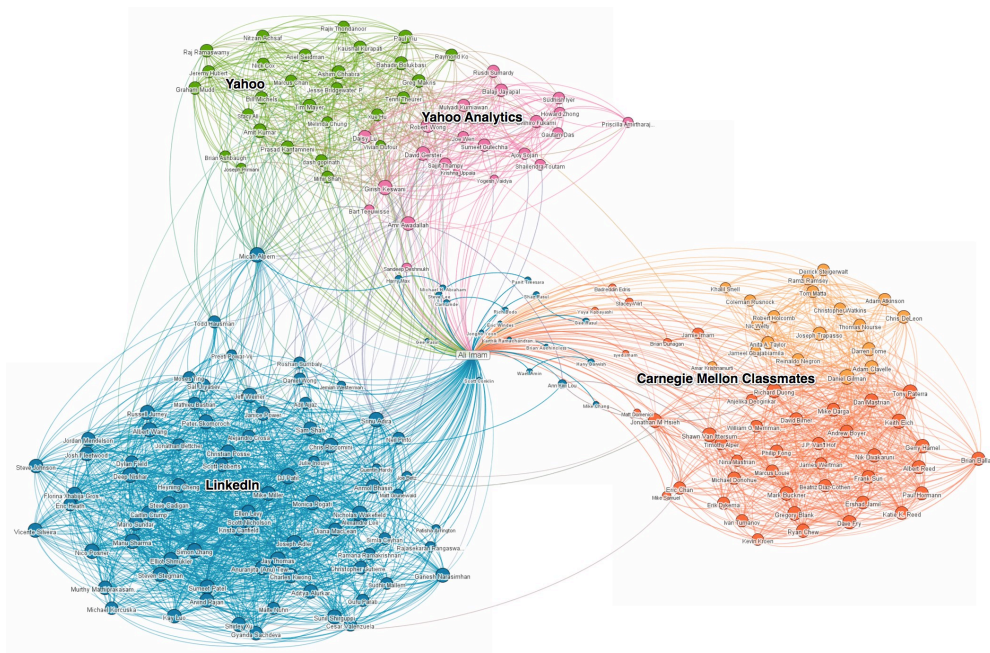
des individus. L'avantage de cet outil, au delà de sa capacité modélisatrice, est que la théorie des graphes a bénéficié de nombreuses recherches qui ont fourni des outils d'analyse. Ces derniers permettent de tirer des informations d'un graphe (par exemple un plus court chemin) ou de caractériser ses éléments (comme le nombre de relations d'une entité).



(a) Réseau routier de l'agglomération de Rouen. Source : données NAVTEQ converties en graphe avec la bibliothèque GraphStream.



(b) Graphe d'interactions biochimiques entre des protéines par Chu et al. (2012).



(c) Réseau social généré à partir des relations LinkedIn d'un membre du site internet. Source (consulté le 01/06/2016) : <https://blog.linkedin.com/2011/01/24/linkedin-inmaps>. La coloration identifie des communautés d'individus.

FIGURE 2.7 : Trois exemples de graphes dans des domaines différents.

On distingue aujourd'hui deux grandes classes de graphes : ceux statiques, et ceux dynamiques. On verra rapidement dans les deux parties qui suivent comment on les définit précisément.

2.3.1 Les graphes statiques

Comme leur nom l'indique, les graphes statiques n'ont pas vocation à évoluer. Ils représentent des relations immuables entre des entités. La manière la plus classique de les formaliser est la suivante :

Definition 1 *Un graphe G est une paire ordonnée (V, E) tel que $V = \{u, v, \dots\}$ est un ensemble de sommets (aussi appelés nœuds) et $E \subseteq \{\{u, v\} | u, v \in V\}$ est un ensemble de paires non ordonnées d'éléments de V , appelées arêtes.*

De cette formalisation découle plusieurs définitions ou propriétés des graphes qui sont décrites pour la plupart dans des ouvrages comme ceux de Newman (2010) ou Gross and Yellen (2005). Par exemple, le degré d'un nœud v , noté $d(v)$, est le nombre d'arêtes reliées au nœud v .

Dans les parties qui suivent, nous allons revenir sur les principales définitions que nous utiliserons par la suite. Nous verrons tout d'abord les différents types de graphes qui dérivent de la définition classique. Nous verrons ensuite la notion de chemin avant d'aborder les différentes méthodes d'analyse en décrivant les mesures locales et enfin globales d'un graphe.

2.3.1.1 Différents types de graphe

Les premiers types de graphes qui dérivent de la définition classique s'appellent les graphes orientés.

Definition 2 *Un graphe orienté G est une paire ordonnée (V, E) , tel que $V = \{u, v, \dots\}$ est un ensemble de sommets, et $E \subseteq \{(u, v) | u, v \in V\}$ est un ensemble de paires ordonnées d'éléments de V , appelées arcs.*

En fonction du contexte, les graphes orientés peuvent décrire plus précisément la nature de la relation. Par exemple on peut représenter sous la forme d'un graphe des relations sociales hiérarchisées. Les arcs peuvent aussi représenter le sens de circulation d'un réseau routier. Dans un graphe orienté, on distingue le nombre d'arêtes dirigées vers un nœud (appelé le degré entrant et noté $d^+(v)$) du nombre d'arêtes dirigé depuis un nœud (appelé le degré sortant et noté $d^-(v)$). On a alors $d(v) = d^+(v) + d^-(v)$.

On parle ensuite des graphes étiquetés et pondérés :

Definition 3 *On dit qu'un graphe est étiqueté si on associe aux arêtes ou aux sommets des étiquettes (mots, symboles, valeurs,...). On pourra noter ce graphe $G = (V, E, L)$ tel que $L = (k, l)$ avec $k \in V \cup E$ et l est un mot ou un symbole.*

On dit qu'un graphe est pondéré si on associe une valeur aux éléments du graphe. On pourra noter ce graphe $G = (V, E, p)$ tel que $p : V \cup E \rightarrow \mathbb{R}$. Ainsi, $p(v)$ (avec $v \in V$) est appelé le poids de l'arête v .

On notera que certaines définitions des graphes pondérés restreignent l'attribution d'une valeur aux arêtes uniquement. De plus, certains algorithmes ont comme pré-requis que le poids soit strictement positif. Les graphes pondérés permettent d'intégrer des données supplémentaires. On peut ainsi indiquer la longueur d'une route ou sa capacité pour un réseau routier.

2.3.1.2 Chaînes et chemins

Les graphes ont notamment l'avantage de déterminer des chemins entre deux nœuds d'un graphe. Un chemin est défini ainsi :

Definition 4 Soit $G = (V, E)$ un graphe. On nomme P un chemin tel que $P = \{(u_i, u_{i+1}) : 0 \leq i \leq k - 1\}$ avec $u_i \in V$, correspondant à une suite consécutive d'arcs (on parle de chaîne dans un graphe non orienté). On dit qu'un chemin est élémentaire s'il ne repasse pas par un même sommet.

Dans un graphe non pondéré, la longueur d'un chemin est le nombre d'arêtes qui le compose. Si le graphe est pondéré, la longueur correspond à la somme des poids des éléments (arêtes et sommets) qui composent le chemin. Si la longueur est de poids minimal, on dit qu'il s'agit du plus court chemin.

Un chemin dont les nœuds de départ et d'arrivée sont identiques est appelé un circuit.

La notion de plus court chemin est très importante dans la théorie des graphes car elle est à la base d'un nombre important de mesures comme nous allons le voir dans la partie qui suit. De plus, lorsqu'on modélise un réseau de transport par un graphe, plusieurs algorithmes (tel que celui de [Dijkstra \(1959\)](#)) permettent de déterminer efficacement le plus court trajet que doit emprunter un véhicule.

L'existence ou non d'un chemin entre deux nœuds va témoigner de la connexité du graphe. Pour définir plus précisément la notion de connexité, nous allons définir ce qu'est un sous-graphe :

Definition 5 Soit $H = (V_H, E_H)$ et $G = (V_G, E_G)$ deux graphes. On dit que H est un sous-graphe de G si $V_H \subset V_G$ et $E_H \subset E_G$

Definition 6 Un graphe $G = (V, E)$ est dit connexe s'il existe un chemin entre toutes ses paires de nœuds. Dans le cas d'un graphe orienté, on parlera de graphe fortement connexe si, pour tout couple de nœuds (u, v) , il existe un chemin entre u et v et entre v et u .

Si G possède un sous-graphe connexe maximal², ce sous-graphe est appelé une composante connexe.

2.3.1.3 Mesures locales d'un graphe

La théorie des graphes bénéficie d'un large panel de mesures comme en témoigne les nombreux états de l'art tel que [Barthélemy \(2011\)](#). Ces mesures permettent d'analyser les propriétés et la structures des graphes. On distingue deux grandes familles de mesures : celles locales qui s'appliquent à un nœud (et parfois à une arête), et celles globales qui s'appliquent au graphe tout entier ou à une partie de celui-ci.

[Ducruet \(2010\)](#) présente les mesures locales de voisinage et les mesures locales d'ensemble. En effet, certaines mesures, comme le degré d'un nœud, caractérisent un nœud uniquement en fonction de ses voisins immédiats. D'autres mesures vont caractériser un nœud en fonction de tous les autres nœuds du graphe. On remarquera cependant que la plupart des mesures locales de voisinage peuvent être dérivées afin de prendre en compte un certain degré de profondeur. C'est à dire qu'il est possible de considérer les voisins des voisins d'un nœud.

2. C'est à dire qu'il n'existe pas de sous-graphe connexe contenant ce sous graphe maximal et contenant plus de nœuds.

Les premières mesures locales de voisinage concernent le degré des nœuds. On a vu précédemment que le degré est la somme des arêtes liées à un nœud. Mais il est également possible de pondérer ce degré en fonction des poids sur les arêtes. On note le degré pondéré d'un nœud v : $d_p(v)$. Dans le cas d'un graphe représentant des flux de marchandises, cela permet de mettre en avant des nœuds qui font transiter une part importante de marchandises bien qu'ils aient un degré peu élevé.

Le degré classique traduit une certaine redondance des liens mais il ne permet pas de caractériser la force de ceux-ci. Au contraire le degré pondéré met en avant la force des liens mais ne donne aucune information sur leur redondance. Opsahl et al. (2010) combinent ces deux mesures grâce à cette formule :

$$C_D^{w\alpha}(v) = d(v) \times \left(\frac{d_p(v)}{d(v)} \right)^\alpha$$

Le paramètre α est à configurer en fonction du domaine d'étude et permet de donner plus d'importance au degré ou au degré pondéré.

Nous allons maintenant aborder les mesures locales d'ensemble. Il s'agit pour la plupart de mesures qui traduisent une notion d'accessibilité du nœud. On retiendra en premier lieu l'indice de Shimbel (1953). L'auteur le définit ainsi : l'indice d'accessibilité d'un nœud d'un graphe est la somme des longueurs des plus courts chemins entre ce nœud et tous les autres. Donc plus la valeur de l'indice d'un nœud est faible, plus le nœud est considéré accessible. Certaines mesures dérivent de l'indice de Shimbel. C'est le cas de la centralité de proximité (Bavelas, 1950) qui est l'inverse de cet indice.

La centralité d'intermédiarité est une mesure issue de la sociologie. Elle a été proposée par Freeman (1977) et se calcule par la formule suivante pour le nœud v :

$$g(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

tel que σ_{st} est le nombre total de plus courts chemins entre les nœuds s et t , et $\sigma_{st}(v)$ est le nombre de ces plus courts chemins qui passent effectivement par v . On notera que la centralité d'intermédiarité peut tout aussi bien se mesurer sur les arêtes d'un graphe plutôt que sur ses nœuds.

Les nœuds ayant une forte centralité d'intermédiarité seront plus critiques que les autres car leur disparition entraînerait un allongement d'un plus grand nombre de plus courts chemins, voir la disparition de la connexité du graphe. Pour assurer la résilience d'un graphe, il est donc avantageux de réduire le nombre de nœuds avec une forte centralité. Girvan and Newman (2002) ont d'ailleurs établi un algorithme qui utilise la centralité d'intermédiarité pour détecter des communautés au sein de réseaux complexes. Leur algorithme consiste à supprimer progressivement les arêtes de plus fortes centralités pour mettre en avant des composantes connexes correspondantes aux communautés.

L'excentricité d'un nœud (aussi appelé nombre de Koenig par les géographes) est la longueur maximale des plus courts chemins entre le nœud étudié et n'importe quel autre nœud du graphe. Plus l'excentricité d'un nœud est faible, plus il sera facile d'accéder aux autres nœuds du graphe. Ce type de nœud possède donc une meilleure position dans le réseau. On remarquera par ailleurs que le diamètre $D(G)$ d'un graphe est égale à l'excentricité maximale de ses nœuds.

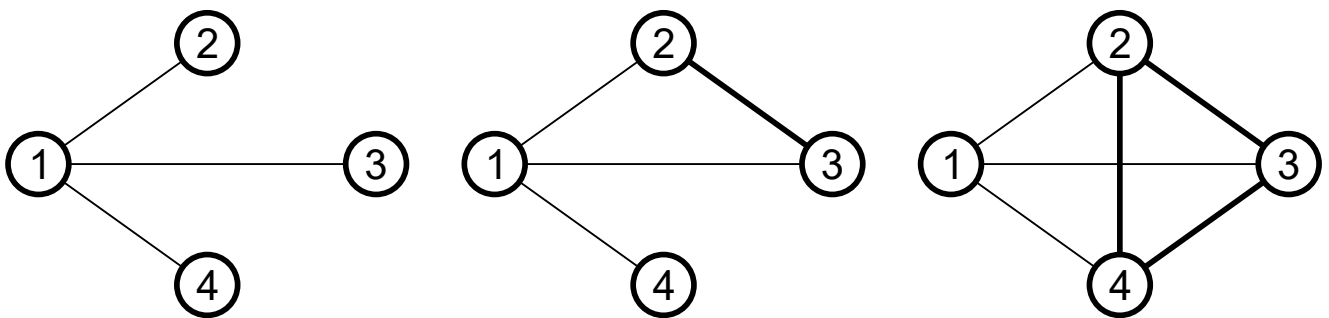
La portée r_{ij} (*range* en anglais) d'une arête $e_{ij} = (i, j)$ est égale à la longueur du plus court chemin entre les nœuds i et j si on supprime l'arête e_{ij} (Watts, 1999). Si la suppression de

l'arête e_{ij} rompt la connexité entre les deux nœuds, alors on note $r_{ij} = \infty$. Un graphe dont la portée moyenne de ses arêtes est faible sera plus résilient.

Le coefficient de clustering se mesure au niveau d'un nœud et permet d'établir si les voisins de celui-ci sont connectés entre eux. En effet, [Watts and Strogatz \(1998\)](#) montrent qu'on retrouve dans certains graphes des comportements communautaires. C'est notamment le cas en sociologie où les personnes interagissent préférentiellement avec les autres membres d'un même groupe (un cluster). Voici la formule pour calculer le coefficient de clustering :

$$C_i = \frac{2 \times |\{e_{jk} : v_j, v_k \in N_i, e_{jk} \in E\}|}{k_i(k_i - 1)}$$

tel que : N_i est l'ensemble des sommets voisins du sommet i et k_i est le nombre de voisins du nœud i .



(a) Le coefficient de clustering du nœud 1 est de 0. En effet, ses trois voisins ne sont pas connectés entre eux, ce qui ne permet pas la formation d'un triangle.

(b) Le coefficient de clustering du nœud 1 est de $1/3$. En effet, deux de ses trois voisins sont connectés entre eux permettant la formation d'un triangle sur les trois qui pourraient exister.

(c) Le coefficient de clustering du nœud 1 est de 1. En effet, tous ses voisins sont connectés entre eux permettant la formation de trois triangles.

FIGURE 2.8 : Le coefficient de clustering du nœud 1 dans les cas de trois topologies différentes.

Enfin, un moyen simple à mettre en place pour rendre compte de toutes ces mesures locales est d'effectuer leur distribution sur un graphique en dénombrant les éléments ayant obtenus des scores identiques. Cela permet de mettre en avant des nœuds particuliers ou des tendances générales propres au graphe étudié. Par exemple, la distribution de degrés peut révéler une loi de puissance caractéristique de réseaux invariant d'échelle comme ceux décrits par [Albert and Barabási \(2002\)](#).

2.3.1.4 Mesures globales d'un graphe

Les mesures globales d'un graphe permettent de comprendre la structure de celui-ci, à quoi il ressemble, s'il est « efficace » et comment sont organisés les sommets. [Rodrigue et al. \(2013\)](#) décrivent un ensemble de ces mesures et expliquent qu'elles peuvent être utilisées en géographie notamment pour analyser l'efficacité des réseaux de transport.

Les premières mesures les plus simples se basent sur le calcul de plus courts chemins. On avait par exemple déjà abordé le diamètre d'un graphe qui est la longueur du chemin entre les nœuds les plus distants. Dans des graphes spatialisés, tel qu'un réseau routier, plus le diamètre est élevé, moins le graphe tend à être connecté ([Rodrigue et al., 2013](#)).

Il est également possible de reprendre la plupart des mesures locales et d'en calculer la moyenne pour l'ensemble des éléments du graphe. Par exemple, on peut mesurer la longueur moyenne des plus courts chemins ou le coefficient de clustering moyen. Il est d'ailleurs possible de faire des analyses statistiques plus élaborées en étudiant, par exemple, l'écart type de ces mesures afin de mettre en évidence des inégalités qui peuvent traduire des défauts ou avantages structurels. [Watts \(1999\)](#) décrit notamment les réseaux « petit monde » comme ayant des diamètres faibles et des coefficients de clustering élevés par rapport à ce que l'on observe dans des graphes aléatoires de même taille et même densité en nombre d'arêtes.

Dans les graphes spatialisés, on peut définir des mesures qui mixent des distances de chemins de graphes et des distances euclidiennes. Par exemple, l'indice de détour, décrit par [Rodrigue et al. \(2013\)](#) et [Ducruet \(2010\)](#), se mesure entre chaque paire de nœuds d'un graphe spatialisé (tel qu'un réseau de transport). Elle est le rapport entre la longueur du plus court chemin et la distance euclidienne qui sépare les deux nœuds :

$$Q_{(i,j)} = \frac{D_s(i,j)}{D_e(i,j)}$$

tel que $Q_{(i,j)}$ est l'indice de détour entre les nœuds i et j , $D_s(i,j)$ est la longueur du plus court chemin entre i et j sur le réseau, et $D_e(i,j)$ est la distance euclidienne entre ces deux nœuds.

On peut ensuite construire la matrice de détour entre toutes les paires de nœuds du graphe afin d'identifier les indices de détour minimaux et maximaux du graphe, mais aussi de calculer l'indice de détour moyen. Plus les indices sont proches de 1 plus le graphe se montre efficace.

[Kansky \(1963\)](#) présente également l'indice Π . À l'image de la valeur de π calculée pour un cercle, cet indice est le rapport entre la circonférence du réseau et son diamètre. Kansky décrit ici la circonférence d'un réseau comme étant la somme des longueurs de toutes les arêtes du graphe. L'indice se calcule ainsi :

$$\Pi = \frac{\sum_{(u,v) \in E} d(u,v)}{D(G)}$$

Plus l'indice Π est élevé, plus le réseau est développé. Une autre mesure qui traduit un certain développement d'un réseau de transport est appelée la densité du réseau ([Rodrigue et al., 2013](#)). Il s'agit du rapport entre la somme des longueurs (en km) de chaque route et la surface (en km^2) occupée par le réseau. Cette mesure n'est pas nécessairement une preuve d'efficacité mais elle peut montrer l'existence de zones inaccessibles.

Ces différentes mesures font partie des plus répandues dans l'étude de réseaux de transport et d'autres graphes liés à la géographie. Pourtant, comme la plupart des mesures de graphes, il peut être difficile de les interpréter car on ne peut comparer efficacement les résultats obtenus auprès de deux graphes sémantiquement différents. Il est donc fréquent d'étudier plutôt l'évolution d'une mesure après certains changements opérés sur le graphe. Par exemple, on peut observer l'impact de la construction d'une nouvelle autoroute sur l'indice de détour moyen d'un réseau de transport. Beaucoup de graphes ne sont pas totalement immuables. Ils subissent des évolutions plus ou moins rapides qui modifient leurs structures et propriétés. Un graphe n'est donc pas toujours statique mais peut-être dynamique. La définition classique s'avère donc restrictive : comment peut-on représenter les évolutions structurelles d'un réseau social ? Comment peut-on modéliser la dynamique du trafic d'un réseau viaire ? C'est l'objet de la partie qui suit.

2.3.2 Les graphes dynamiques

Le concept de graphe dynamique existe depuis longtemps mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années que les recherches à ce sujet ont réellement pris leur essor avec des chercheurs comme [Harary and Gupta \(1997\)](#). Ces derniers ont proposé les bases d'un formalisme général décrivant des graphes dynamiques. Ils listent d'ailleurs tout un ensemble de domaines dans lesquels l'utilisation de graphes dynamiques peut avoir un intérêt, en allant de la chimie à la psychologie, et en passant par l'étude de réseaux physiques (informatique ou de transport par exemple). Un graphe est dit dynamique si des arêtes et/ou des sommets peuvent apparaître ou disparaître, ou encore si les étiquettes ou les pondérations évoluent au cours du temps.

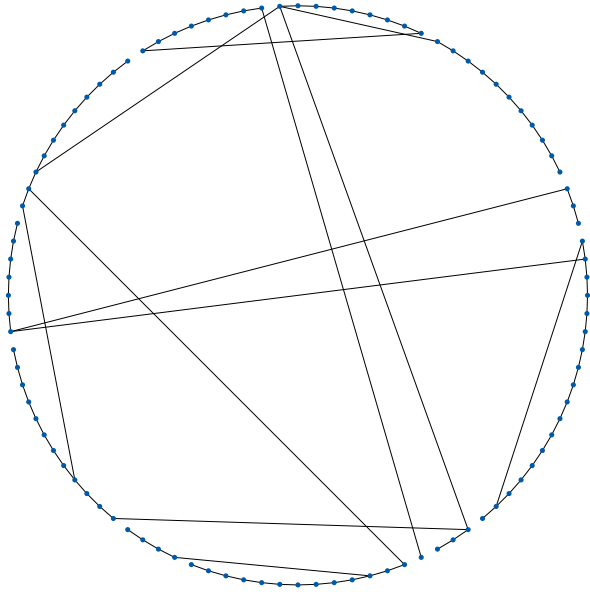
2.3.2.1 Réseaux complexes

En réalité, le dynamisme peut avoir des origines et des manières de se manifester très différentes d'un domaine à l'autre. On retrouve donc plusieurs termes et définitions en fonction du cadre d'application. Parmi les différentes familles de graphes dynamiques on retrouve les réseaux complexes décrits par [Boccaletti et al. \(2006\)](#). Ces graphes sont composés d'un nombre très important d'éléments et leur nature est à la base de leur dynamique. On retiendra par exemple le graphe du Web dont la taille, la vitesse d'évolution et son caractère distribué rend impossible la cartographie complète à un instant t . On utilise donc des algorithmes d'exploration afin de construire progressivement le graphe en parcourant les pages Web d'URL³ en URL. La dynamique du graphe est alors liée à la méthode d'exploration et la manière de maintenir à jour l'information déjà récupérée. Pour la cartographie du Web, les arêtes n'ont pas besoin d'être pondérées, la dynamique fait ici évoluer uniquement la topologie. Lorsque les mêmes auteurs évoquent la propagation d'opinions dans des réseaux sociaux, ils décrivent plusieurs modèles dans lesquels la topologie ne change pas, mais c'est uniquement une variable au sein des sommets qui se transmet de proche en proche selon certains processus. L'article de [Boccaletti et al. \(2006\)](#) ne s'intéresse pas tant à comment représenter les graphes dynamiques mais il cherche plutôt à décrire les processus à l'origine de cette dynamique. L'étude des réseaux complexes est d'ailleurs à l'origine de modèles de graphes tels que les réseaux petit-monde de [Watts and Strogatz \(1998\)](#) ou le modèle d'attachement préférentiel de [Barabási and Albert \(1999\)](#) (voir figure 2.9).

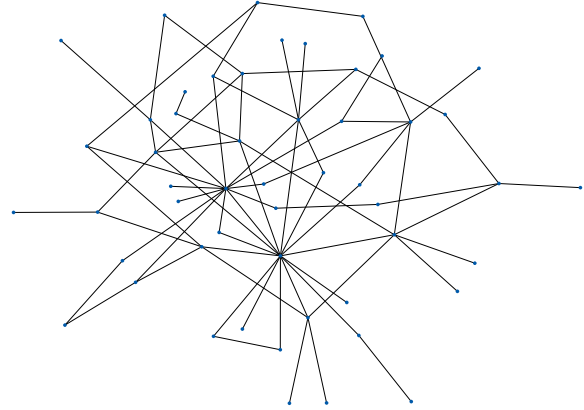
2.3.2.2 Graphes cumulatifs

L'article de [Cortes et al. \(2003\)](#) décrit un type de graphe dynamique appelé *graphe cumulatif*. Leur objectif était d'effectuer des analyses, notamment statistiques, de réseaux de communication dans lesquels les nœuds sont des terminaux de communication et les arêtes représentent des communications entre deux terminaux. Au cours de l'observation du réseau, le graphe sera donc dynamique car on observera la fin de certaines communications et le début de nouvelles. Le problème est qu'une communication est relativement courte par rapport au délai d'observation faite du réseau. Les auteurs expliquent donc qu'il n'est pas utile de comparer deux captures à des dates différentes. Ils ont préféré adopter une méthode qui gardera une trace des événements passés. Les auteurs ont donc défini un graphe comme étant l'accumulation progressive d'événements : un graphe est alors la somme (ou plutôt l'union des ensembles qui le compose) de sous-graphes correspondants aux captures effectuées à des intervalles de

3. URL : Uniform Resource Locator.



(a) Graphe « petit monde » (Watts and Strogatz, 1998).



(b) Graphe d'attachement préférentiel (Barabási and Albert, 1999).

FIGURE 2.9 : Deux modèles de réseaux complexes.

temps régulières. Les arêtes sont alors pondérées par le nombre total d'appels ou du temps total de communications.

Definition 7 Soit \mathcal{G}_t un graphe cumulatif à l'instant t .

Soit g_n , un sous-graphe représentant la capture du réseau à l'instant n .

On définit l'opérateur \oplus entre deux graphes $g = (V_g, E_g)$ et $h = (V_h, E_h)$ tel que $g \oplus h$ est un graphe $(V_g \cup V_h, E_g \cup E_h)$.

On a ainsi :

$$\mathcal{G}_t = g_1 \oplus g_2 \oplus \dots \oplus g_t = \bigoplus_{i=1}^t g_i = \mathcal{G}_{t-1} \oplus g_t$$

Avec cette méthode, le nombre d'arêtes et de nœuds ne cessera de grandir au sein du graphe cumulatif, ou en tout cas ne pourra se réduire. Afin d'autoriser l'oubli d'événements trop anciens (et qui n'aurait plus d'intérêt), Cortes et al. (2003) proposent dans le même article d'adapter ce modèle en utilisant un historique des k derniers événements. Le graphe \mathcal{G}_t est alors défini ainsi :

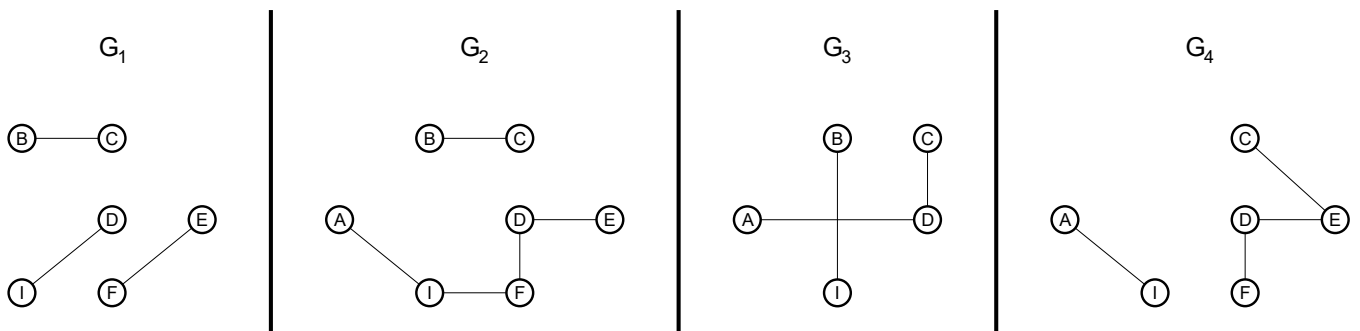
$$\mathcal{G}_t = g_{t-k} \oplus g_{t-k+1} \oplus \dots \oplus g_t = \bigoplus_{i=t-k}^t g_i$$

Toutefois, ce type de représentation nécessite de garder en mémoire les k derniers sous-graphes qui composent \mathcal{G}_t .

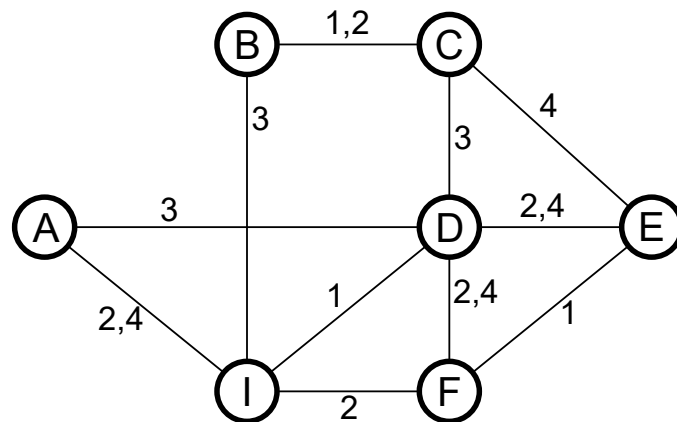
2.3.2.3 Graphes évolutifs

Les *graphes évolutifs* sont apparus à la même époque dans un article de Ferreira (2002). Il définit un graphe dynamique comme étant la séquence de sous-graphes statiques G_i .

Definition 8 Soit $G = (V, E)$, un graphe orienté avec V un ensemble de sommets et E un ensemble d'arcs dont les extrémités appartiennent à V . Soit S_G une séquence ordonnée de sous-graphes de G tel que $S_G = G_0, \dots, G_i$ avec $i \in \mathbb{N}$. Alors, le système $\mathcal{G} = (G, S_G)$ est appelé un *graphe évolutif*.



(a) Sous-graphes de S_G .



(b) Représentation du graphe évolutif reconstruit à partir des sous-graphes de S_G .

FIGURE 2.10 : Représentation d'un graphe évolutif $\mathcal{G} = (G, S_G)$.

Avec ce modèle, Ferreira définit la dynamique séquentiellement avec des intervalles de temps discrétisés. On peut construire le graphe évolutif \mathcal{G} à partir de l'ensemble des sous-graphes qui le composent. Chaque élément du graphe est alors étiqueté avec l'indice des sous-graphes dans lesquels ils apparaissent comme sur la figure 2.10.

Mais avec cette représentation, la dynamique n'apparaît que sur la structure du graphe. Pourtant il existe de nombreux exemples dans lesquels la dynamique intervient aussi sur les poids ou étiquettes associés aux éléments.

2.3.2.4 Graphes temporels

Casteigts et al. (2011) se sont donc penchés sur un modèle qui répondrait à ce besoin. Les auteurs ont donc regroupé sous la même définition plusieurs concepts présentés dans d'autres modèles, parfois sous des termes différents. Ils en sont arrivés à cette définition :

Definition 9 Soit $\mathcal{G} = (V, E, \mathcal{T}, \rho, \phi, \zeta)$, un graphe temporel tel que :

- V est l'ensemble des nœuds.
- E est l'ensemble des arcs tel que $E \subseteq V \times V \times L$, où L est un alphabet permettant de décrire les propriétés des arcs⁴.
- \mathcal{T} est un laps de temps avec $\mathcal{T} \subseteq \mathbb{T}$, tel que \mathbb{T} est le domaine temporel. \mathbb{T} peut être discret ou continu.
- $\rho : E \times \mathcal{T} \rightarrow \{0, 1\}$ est la fonction de présence des arcs. Elle indique si un arc est disponible à une date donnée.
- $\phi : V \times \mathcal{T} \rightarrow \{0, 1\}$ est la fonction de présence des nœuds. Elle indique si un nœud est disponible à une date donnée.
- $\zeta : E \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{T}$ est la fonction de latence des arêtes. Elle indique la durée nécessaire pour traverser un arc à une date donnée.

Cette définition permet donc d'instaurer une dynamique sur la topologie avec des arcs et des nœuds qui peuvent apparaître ou disparaître grâce aux deux fonctions ρ et ϕ . De plus, la fonction ζ permet d'apporter une dynamique sur le poids des arêtes.

Par contre, le modèle décrit dans cet article ne prévoit pas la pondération ou l'étiquetage des sommets d'un graphe. La dynamique se trouve donc uniquement au niveau de la topologie du graphe et des pondérations des arêtes. En réalité, que ce soit les graphes évolutifs ou les graphes temporels, il est possible d'adapter ces modèles pour intégrer la dynamique que l'on souhaite (sur les nœuds, les arcs, les pondérations,...) comme l'explique d'ailleurs Pigné (2008) dans sa thèse. Néanmoins, ces deux derniers modèles supposent une connaissance *a posteriori* de la dynamique qui s'opère sur le graphe. En effet, les définitions des graphes évolutifs ou temporels contiennent tous deux les ensembles fixés des nœuds et des arêtes qui font partie du graphe à un moment donné, ainsi que le moment de leur présence. Ces modèles sont adaptés pour *rejouer* la dynamique d'un graphe, et non pas pour générer cette dynamique en temps réel. Nous allons donc nous attarder sur un dernier modèle de graphe dynamique basé sur des flux d'événements.

2.3.2.5 Graphes dynamiques par flux d'événements

Au cours de sa thèse, Savin (2014) a élaboré un modèle dans lequel la dynamique d'un graphe n'est pas définie dans le graphe lui-même mais au travers d'un processus d'évolution. On retrouve un concept similaire dans les travaux de Demetrescu and Italiano (2001, 2007). Les éléments du graphe pourront apparaître progressivement comme pour les graphes cumulatifs. La différence avec ces derniers est que des éléments anciens pourront être conservés, et des éléments récents pourront être éliminés si la dynamique le décide. D'autre part, comme pour des versions adaptées de graphes évolutifs ou temporels, la dynamique peut s'appliquer à la fois sur la topologie du graphe mais également sur les poids associés aux éléments du graphe.

4. Les auteurs considèrent que L peut être multi-valeur et est spécifique au domaine d'étude.

Nous allons donc commencer par définir un graphe statique. De notre point de vue, tous les éléments d'un graphe, nœuds ou arêtes, peuvent être pondérés et étiquetés. De plus, les éléments peuvent posséder plusieurs informations hétérogènes simultanément. Par exemple, un nœud qui représenterait un entrepôt peut contenir la surface d'entreposage, le nombre d'employés, ou le trafic journalier. Ainsi :

Definition 10 Soit $G = (V, E, p_V, p_E)$ un graphe orienté et pondéré tel que :

- V est l'ensemble des sommets.
- E est l'ensemble des arêtes (des paires ordonnées de sommets).
- p_V (resp. p_E) sont des fonctions qui associent une clé K_V (resp. K_E) et un nœud (resp. une arête) à une valeur tel que :

$$p_V : V \times K_V \rightarrow \mathbb{V}_V$$

$$p_E : E \times K_E \rightarrow \mathbb{V}_E$$

$K_V, K_E \in L_{clés}$ sont les deux ensembles des mots de l'alphabet L qui représentent les clés.

\mathbb{V}_V et \mathbb{V}_E sont les deux ensembles des valeurs possibles pour les attributs des nœuds et des arêtes. La nature de \mathbb{V}_V et \mathbb{V}_E est dépendante du domaine d'étude et peut représenter à la fois des nombres ou des mots.

Nous avons donc défini un graphe statique dont les nœuds et les arêtes peuvent, d'une part, être pondérés ou étiquetés, mais d'autre part, peuvent contenir plusieurs informations hétérogènes simultanément. Nous allons maintenant étudier comment [Savin \(2014\)](#) définit le flot d'événements générés par un processus P_G qui permet d'intégrer la dynamique à un tel graphe :

Definition 11 Soit \mathcal{U} l'ensemble des événements possibles. Chaque $u \in \mathcal{U}$ est un triplet de la forme (\mathcal{O}, w, e) , tel que :

- \mathcal{O} est une date indiquant le moment où l'événement se produit.
- $w \in W$ est l'une des actions possibles (addition ou suppression d'un nœud ou d'une arête, mise à jour de l'une de ses valeurs,...).
- e est l'élément impliqué par cet événement.

Le processus P_G est défini comme un ensemble d'événements tel que :

$$P_G = \begin{array}{l} \mathbb{T} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{U}) \\ (t, t') \rightarrow \{u = (\mathcal{O}, w, e) \mid t < \mathcal{O} \leq t'\} \end{array}$$

Et enfin, on définit l'opérateur \oplus entre $G = (V, E, p_V, p_E)$ et un ensemble d'événements $U \in \mathcal{U}$ qui permet d'appliquer les événements de U à un graphe G .

Ainsi, si on connaît G_0 au temps t_0 , on peut construire itérativement G_i avec $i > 0$ de cette manière :

$$G_i = G_{i-1} \oplus P_G(t_{i-1}, t_i)$$

Ce modèle de graphes dynamiques par flux d'événements a été implémenté dans la bibliothèque de graphe nommé GraphStream ([Dutot et al., 2008](#)). Cette implémentation a été utilisée à de nombreuses reprises pour modéliser des comportements dynamiques notamment par [Nabaa \(2011\)](#) au cours de sa thèse pour représenter et analyser l'évolution d'un réseau routier.

DÉFINITION D'UN SYSTÈME LOGISTIQUE

3.1	Les acteurs et leurs rôles	38
3.1.1	La logistique métropolitaine à l'origine du flux	38
3.1.2	La logistique portuaire	39
3.1.3	L'interface entre le port et les métropoles de son hinterland	40
3.2	Les infrastructures et leurs fonctions	41
3.2.1	Les infrastructures du port	41
3.2.2	La connexion avec l'hinterland	42
3.2.3	Le transport de la marchandise dans les métropoles	45
3.3	Les systèmes logistiques : des territoires complexes	46
3.3.1	La marchandise : premier élément de complexité	46
3.3.2	L'auto-organisation : deuxième élément de complexité	46

Ce chapitre est consacré à la description d'un système logistique. Le transport de marchandise est organisé par un large ensemble hétérogène d'acteurs. Chacun d'entre eux est responsable d'une partie seulement des flux de marchandises. Il n'existe pas de réelle autorité possédant un contrôle sur l'ensemble de la chaîne de transport (Roorda et al., 2010). Ils doivent donc s'auto-organiser afin de mettre en place et maintenir des flux structurés de marchandises. Nous détaillerons dans un premier temps le comportement des acteurs principaux de la logistique et comment ils interagissent entre eux afin de gérer ces chaînes logistiques ordonnées de bout en bout. Nous étudierons ensuite les différentes infrastructures logistiques ainsi que leurs fonctionnements. Ce chapitre est également l'occasion d'aborder une première approche systémique du problème puisque le système y est décrit selon différents niveaux d'échelle afin de mettre en évidence certaines propriétés. La notion d'interface entre la logistique maritime et celle métropolitaine y est abordée dans ce sens. Toutefois, la complexité d'un système logistique est telle qu'il est nécessaire de se concentrer sur ses composants principaux. Ainsi, cette étude ne présente pas une liste exhaustive des acteurs, infrastructures et interactions d'un système logistique. Notre choix s'est porté sur les acteurs et infrastructures essentiels qui renaient le plus souvent dans la littérature car ce sont les plus présents au sein de ce type de

système et qu'ils sont les plus représentatifs. Toutefois, comme nous l'avons fait remarqué dans la partie 2.2.5.1 avec la citation de Sanders et al. (2007), la sélection des entités et règles pertinentes à la modélisation et à la description d'un tel système est, au moins en partie, subjective et sa logique ne peut être démontrée formellement.

3.1 Les acteurs et leurs rôles

3.1.1 La logistique métropolitaine à l'origine du flux

En tout premier lieu, on peut commencer à décrire les systèmes logistiques en parlant des importateurs et des exportateurs. Ce sont principalement des commerçant de gros ou de détails, ou encore des industriels,... Leur rôle est de déterminer les besoins supposés de leurs clients finaux. Quel type de produit ils désirent ? Mais aussi, quand, où et en quelle quantité ils la désirent ? Une fois que les importateurs et exportateurs ont réussi à établir cette information, ils vont pouvoir enclencher le processus de transport de la marchandise. En effet des stocks locaux peuvent se trouver à proximité des clients finaux, et lorsque ces stocks sont trop faibles pour répondre à la demande supposée, alors il devient nécessaire de faire venir de la marchandise.

On parle de flux tirés lorsque l'importateur fait la demande auprès de l'exportateur pour faire venir une marchandise. À l'inverse, si la demande provient de l'exportateur, on parle de flux poussés. À titre d'exemple, un fournisseur qui vient de lancer un nouveau produit sur le marché, par exemple un nouveau modèle de téléphone portable, va probablement pousser le flux auprès de grands distributeurs dans un premier temps. Lorsque la quantité de ventes se sera stabilisée, les grands distributeurs décideront eux-même si les stocks de ce produit doivent être réapprovisionnés et pourront ainsi tirer le flux. La part entre flux tirés et poussés est fonction de différents paramètres comme le nombre de vente d'un produit. Parfois cette part peut également varier selon la « renommée » des acteurs impliqués. Un distributeur peut connu des fournisseurs devra tirer les flux plus souvent.

La prise de contact entre un importateur et un exportateur peut se faire de plusieurs manières différentes. Le plus simple est qu'ils communiquent directement. Pourtant, il peut arriver qu'un intermédiaire intervienne dans cette démarche. C'est le cas des grossistes ou des centrales d'achat (Blair and Durrance, 2014). Le premier va acheter des marchandises en grande quantité selon les besoins *estimés* de ses entreprises clientes. L'achat en gros va lui permettre de négocier des prix et donc d'obtenir une marge sur la revente. La centrale d'achat est similaire au grossiste en ce qu'elle achète également en grande quantité. Par contre, elle n'achète que selon les besoins réels de ses clients. En effet, chacun de ses clients renseignent les produits qu'ils souhaitent acquérir et en quelle quantité. La centrale d'achat regroupe alors les demandes afin de passer une seule grosse commande auprès du fournisseur. Les grossistes sont des entreprises indépendantes de leurs clients. Par contre, il est fréquent de voir des centrales d'achat appartenir à la même entreprise que leurs clients. Dans ce dernier cas on parle de centrales d'achat intégrées, en opposition aux centrales d'achat coopératives pour lesquelles les clients ne font pas partie de la même entreprise. Par exemple, les magasins Leclerc sont des franchisés indépendants mais ils ont l'obligation de se fournir auprès d'une des centrales d'achat du groupe.

Dans tous les cas, un contrat de vente (ou de réapprovisionnement) doit être négocié entre les deux parties. Ce contrat décrit le type de marchandise qui est vendu, sa quantité ou encore son prix. Mais il définit aussi la part de responsabilité entre l'importateur et l'exportateur

pendant le transport à l'aide des « Incoterms® ». Il s'agit d'un panel de règles définissant l'ensemble des droits et devoirs de chacune des parties lors d'un accord de commerce international. Elles ont été proposées pour la première fois en 1936 par la Chambre de Commerce Internationale afin de garantir une meilleure compréhension entre des acteurs de différentes cultures et de différentes langues (International Chamber of Commerce, 2013 ; Graumann-Yettou, 2002). Depuis, elles ont évolué en suivant les habitudes des utilisateurs pour arriver à la dernière version : les Incoterms®2010. Ces règles précisent le point de transfert des frais et des risques ainsi que les documents dus par chaque partie. En aucun cas, il ne s'agit du point de transfert de propriété. Ces normes servent de base au contrat de vente tout en étant suffisamment flexible pour permettre des modifications en cas de besoin. Le contrat signé doit préciser l'endroit exact où se situe le point de transfert afin d'éviter tous conflits éventuels (Nguyen-The, 2011). Le schéma de la figure 3.1 représente les points de transfert pour chaque Incoterms®. On notera que pour certains, il est obligatoire de souscrire à une assurance alors que pour la plupart, c'est seulement conseillé. Il est également important de souligner que plus le vendeur est impliqué dans le transport, plus le coût payé par l'acheteur sera important (car le vendeur reportera les différentes charges sur le prix final). Ainsi, lorsque l'acheteur a les moyens d'effectuer lui-même le transport (grâce à ses compétences et ses moyens techniques), il est préférable qu'il le fasse afin de maîtriser le plus possible la chaîne de transport et par conséquent, le coût.

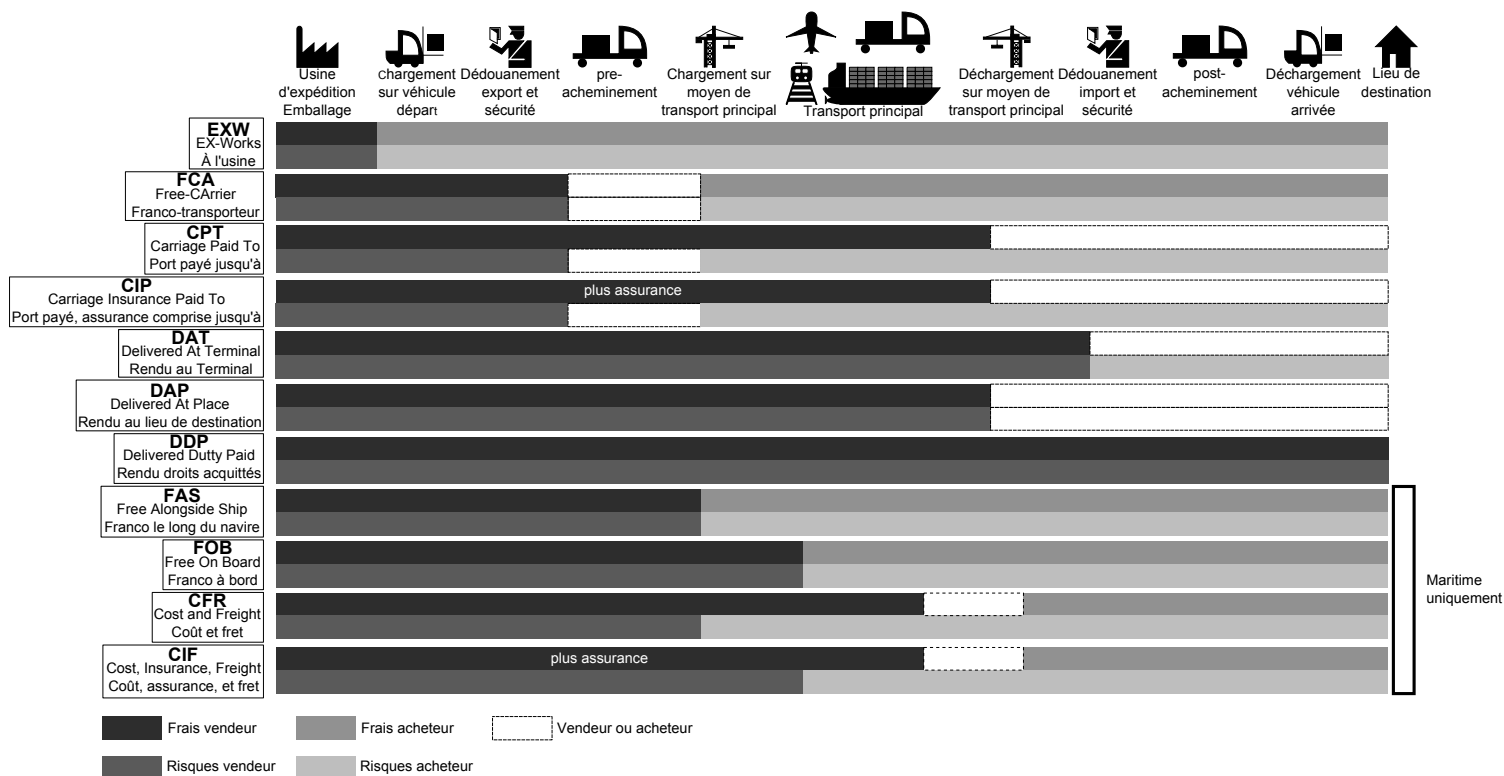


FIGURE 3.1 : Schéma décrivant les points de transfert des différentes règles Incoterms®2010

3.1.2 La logistique portuaire

En fonction du contrat négocié, l'exportateur et l'importateur sont responsables de la marchandise sur leur section respective. Ils peuvent organiser eux-mêmes le transport mais dans

la plupart des cas, ce travail complexe est sous-traité auprès d'un commissionnaire de transport, parfois appelé transitaire par abus de langage. Ce dernier devient lui-même responsable de la marchandise pour le compte de son client. Il doit prendre contact avec les transporteurs internationaux afin d'organiser le transport de la marchandise. Le plus souvent, celle-ci transite par navire. Le transitaire doit donc sélectionner une ligne maritime auprès d'un armateur. On notera d'ailleurs que certains armateurs sont eux-même commissionnaires de transport afin d'avoir un meilleur contrôle sur les coûts, mais aussi pour faciliter la gestion des containers vides (De Langen et al., 2013). Lorsque le transport terrestre est aussi opéré par l'armateur, on parle de « carrier haulage » en opposition au « merchant haulage » où le transport est effectué par le chargeur (De Langen et al., 2013). Le commissionnaire doit également traiter avec les différents acteurs des ports d'importation et d'exportation tel que les douanes.

Les tarifs du transport international dépendent de plusieurs paramètres, dont les principaux sont le volume et le poids de la marchandise. Le type de marchandise pourra intervenir dans le calcul s'il s'agit de vrac. Mais dans le cadre d'un transport par container, le prix est surtout défini à partir du nombre d'équivalent vingt pieds (EVP) nécessaire au transport. Il est défini pour chaque ligne maritime par l'armateur bien que le commissionnaire puisse intervenir en négociant. On notera que le prix peut malgré tout différer s'il faut transporter la marchandise par container réfrigéré.

Une liste importante d'acteurs opère dans le port. Parmi eux il existe les autorités portuaires ou encore les opérateurs de terminaux. Les premiers ont en charge la gestion du port. De plus en plus, ces autorités portuaires suivent le modèle du « landlord port » qui décrit une organisation privée que l'état ou les collectivités territoriales peuvent présider (Lévêque, 2012). Leur rôle est de mettre en place les mesures et les infrastructures nécessaires à l'attractivité du port, en permettant de réduire les coûts, et en facilitant le passage portuaire. Les opérateurs de terminaux utilisent les infrastructures du port pour effectuer les différentes opérations de prise en charge de la marchandise tel que le déchargement. Sur un même port il existe plusieurs sociétés privées d'opérateurs de terminaux qui se partagent les terminaux proposés par l'autorité portuaire. La performance de ces opérateurs sur le terminal peut contribuer à la performance générale du port. Son efficacité dépend de différents paramètres comme le nombre de moyens humains et techniques attribué au chargement ou au déchargement d'un navire (Carlo et al., 2014 ; Giulio, 2009). L'efficacité des grues peut aussi impacter la performance (si elles sont plus grandes ou plus précises par exemple). On notera enfin que la configuration des containers dans le navire aura une incidence. En effet, il peut être nécessaire de déplacer beaucoup de containers avant de pouvoir sortir celui que l'on veut réellement.

3.1.3 L'interface entre le port et les métropoles de son hinterland

L'hinterland d'un port correspond à l'arrière pays dont les marchandises transitent par ce port sont à destination ou en provenance de ce territoire. On remarquera qu'une région peut être desservie par plusieurs ports. Ceux-ci seront alors en compétition et devront faire valoir leurs performances et la qualité de leurs voies de communications avec cette région.

La gestion de la marchandise, sur la partie entre un port et sa destination finale, est à la charge d'un prestataire logistique. Son rôle est de trouver des solutions afin d'aider le chargeur à effectuer les activités logistiques requises sur sa marchandise (transport, entreposage, emballage,...) (Liu et al., 2014 ; Jayaram and Tan, 2010 ; Rodrigue, 2012). Si le destinataire se trouve sur une région desservie par plusieurs ports, alors le prestataire pourra comparer les services fournis par ceux-ci pour sélectionner celui par lequel transitera la marchandise.

Il existe plusieurs types de prestataires logistiques en fonction du niveau d'intégration qu'ils fournissent. Les prestataires qui nous intéressent le plus dans cette étude sont ceux qui fournissent au moins une activité d'entreposage et de transport. Et plus précisément, on considère ceux qui utilisent un réseau multi-niveau d'entrepôts (voir 3.2.2.2). Ce réseau est le support physique de la chaîne logistique sur l'hinterland. Les prestataires doivent sélectionner les entrepôts qui le composeront, tout en s'assurant que l'ensemble des activités logistiques requises par la marchandise pourront être fournies par ce réseau.

Une fois ce réseau mis en place, le prestataire logistique doit gérer les opérations logistiques dans, mais aussi entre, ces entrepôts. Il peut notamment être amené à équilibrer les stocks entre les entrepôts. On peut alors se rendre compte que la manière de construire le réseau aura un impact sur la distance totale parcourue par la marchandise lorsqu'elle atteindra sa destination finale. Cela va donc influencer sur les coûts du transport. Le prestataire doit donc optimiser la création et la gestion du réseau afin de réduire les coûts logistiques.

3.2 Les infrastructures et leurs fonctions

Au cours du transport, les marchandises passent par différentes infrastructures nodales ou linéaires. Chacune d'entre elles a des caractéristiques particulières et des modes de fonctionnement que nous allons étudier dans cette partie.

3.2.1 Les infrastructures du port

Les ports sont connectés entre eux par des lignes maritimes, régulières ou non. Les navires qui se déplacent sur ces lignes peuvent transporter d'importantes quantités de marchandises à la fois. Aujourd'hui les plus grands porte-containers peuvent transporter jusqu'à environ 18 000EVP¹. Cela permet de réduire les coûts de transport mais implique dans le même temps une massification des flux en amont du port d'exportation.

Les terminaux quant à eux sont les infrastructures nodales du port. Ils permettent d'accueillir les navires pour effectuer les opérations de chargement et de déchargement de la marchandise. Un terminal est multi-modal par définition. Il permet donc de faire passer la marchandise vers ou depuis la route, le fleuve ou le ferroviaire. Avant de repartir d'un terminal, la marchandise est souvent stockée gratuitement et temporairement directement sur celui-ci. Toutefois, au delà d'un certain temps (dépendant de la politique portuaire) ce stockage devient payant et coûte relativement cher comparé à un stockage traditionnel en entrepôt (Martín et al., 2014). Certains logisticiens cherchent d'ailleurs à optimiser l'organisation de la chaîne logistique pour maximiser le temps où la marchandise reste gratuitement sur le terminal afin de minimiser les coûts de stockage.

Les outils présents sur un terminal, tels que les grues ou les cavaliers, ainsi que l'organisation du terminal lui-même permet de gérer des flux massifiés. Mais le trafic maritime est lui-même un système complexe qu'il est difficile de prédire. En effet il se compose d'un nombre important d'acteurs : ceux présents sur chaque port de ce système, mais aussi les navires. De plus, le système est soumis à un certain nombre d'aléas (climatique, politique, économique,...) qui viennent le perturber continuellement. À cause de cela, il est très difficile de prédire précisément le moment auquel un navire arrivera à destination. Les signaux AIS² sont des signaux

1. Équivalent Vingt Pieds, ou TEU en anglais pour Twenty-foot Equivalent Unit.

2. Automatic Identification System - Système d'Identification Automatique.

transmis par les navires. Ils fournissent notamment une donnée appelée « Estimated Time of Arrival »³ qui est recalculée en continu d'après la vitesse du navire et la distance qu'il reste à parcourir. Lorsqu'on étudie l'historique de cette information, on s'aperçoit assez rapidement que l'ETA définie au départ d'un navire est souvent très éloignée de la véritable heure d'arrivée. Différentes études scientifiques (Notteboom, 2006 ; Vernimmen et al., 2007 ; Nair et al., 2012), appuyées notamment par les rapports de SeaIntel ou de Drewry Shipping Consultant, montrent le manque certain de fiabilité des horaires des lignes maritimes. Vernimmen et al. (2007) expliquent par exemple qu'entre Avril et Septembre 2006, plus de 40% des navires de la flotte mondiale sont arrivés un ou plusieurs jours après la date d'arrivée prévue.

Ainsi, cette logistique portuaire se caractérise par des flux massifiés susceptibles de subir des retards importants (Lévêque and Serry, 2014). Les acteurs portuaires doivent donc être en mesure de traiter ces problèmes.

3.2.2 La connexion avec l'hinterland

3.2.2.1 Le réseau de transport sur l'hinterland

Les lignes fluviales proposent un mode de transport sur l'hinterland qui reste massifié. Un convoi de barges fluviales peut transporter plusieurs centaines d'EVP par voyage (environ 350 EVP sur la Seine). De plus, ce mode permet de sécuriser le transport des marchandises de valeur. Il est le second mode de transport dans certains corridors logistiques tel que l'axe Seine, ou les corridors des port d'Anvers et de Rotterdam. L'intérêt du mode fluvial est d'amener la marchandise le plus près possible des métropoles en conservant la massification grâce aux barges. Cela permet de réduire les coûts financiers relatifs au transport, mais en plus ce mode est considéré écologique. Il permet donc de réduire l'empreinte carbone. On notera aussi que selon les réglementations (telles qu'en France) il est possible de faire sortir une marchandise du port sans la faire contrôler aussitôt par les douanes. En effet, le contrôle peut s'effectuer au moment de la sortie du terminal fluvial. Cela peut être intéressant pour l'organisateur du transport. Par contre, sur l'axe Seine, le trafic fluvial est encore assez faible. Les flux n'y sont pas encore suffisamment massifiés et ne permettent pas de faire des économies d'échelles.

Les stations ferroviaires font également parties des infrastructures multi-modales. Elles peuvent d'ailleurs être intégrées à des terminaux, des usines ou encore des entrepôts. Elles permettent le chargement de la marchandise sur des trains qui offrent une massification moindre que les barges mais bien plus que des camions. On recense deux manières d'utiliser les voies ferrées. Soit on construit directement un train complet, ce qui sous-entend d'avoir un flux suffisamment important dès le départ, soit on regroupe des wagons isolés pour construire un train complet. Cette dernière méthode est néanmoins complexe à mettre en place. Chaque wagon n'aura pas nécessairement la même destination finale. Il faudra donc réorganiser le train en cours de transport. Ce mode est le moins utilisé sur l'axe Seine et dans d'autres corridors, alors qu'il est très bien intégré sur l'hinterland du port d'Hambourg.

Le réseau routier a cette particularité d'être connecté à presque toutes les infrastructures nodales d'un système logistique. Ainsi, un camion peut transporter une marchandise sur l'ensemble du territoire. Comme pour les trains, les durées nécessaires à la livraison sont très bien maîtrisées. Il est donc possible de prédire à la minute près l'heure d'arrivée. Cependant, les véhicules sur la route ne peuvent transporter que très peu de marchandise à la fois comparativement aux autres modes. Les coûts financiers liés au transport, ainsi que l'empreinte carbone

3. Heure d'Arrivée Estimée.

sont donc très importants. Pourtant, il s'agit du mode de transport le plus utilisé quelque soit le système logistique étudié. Sa flexibilité, la précision de ses durées de transport, ainsi que sa rapidité de mise en place en font un moyen de transport très attractif comme en témoigne sa large adoption.

3.2.2.2 Les infrastructures du réseau d'approvisionnement

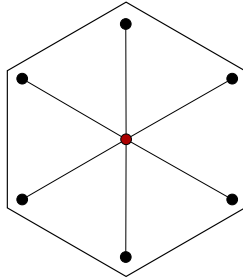
Les infrastructures nodales sur l'hinterland sont surtout représentées par les entrepôts, les centres de distribution et les plateformes logistiques. Un entrepôt est l'infrastructure la plus simple. Il permet de recevoir des marchandises, de les stocker (le plus souvent sur des racks), et de traiter les commandes. Son objectif principal est d'externaliser les stocks d'autres infrastructures comme un magasin ou une usine. On dit que les entrepôts fournissent un entreposage statique, c'est à dire que la marchandise reste plus de 24 heures. L'entrepôt peut être associé à une seule autre infrastructure, ou plusieurs. Les centres de distribution sont des entrepôts particuliers spécialisés dans la distribution des marchandises. Un centre de distribution est donc systématiquement connecté à plusieurs infrastructures, au contraire des entrepôts. Il propose également des activités logistiques plus élaborées qu'un simple entrepôt tel que la consolidation ou le cross-docking. Ces activités sont à l'origine du dynamisme d'un centre de distribution. En effet, les marchandises ne sont pas nécessairement stockées sur de longues périodes comme pour un entrepôt. Elles ne sont d'ailleurs parfois pas stockées du tout sur des racks et attendent juste d'être traitées avant de quitter le centre. Enfin, les plateformes logistiques, fortement dynamiques, fournissent le plus haut niveau d'intégration d'activités logistiques. Il ne s'agit pas forcément d'un seul bâtiment. Elles sont le plus souvent multi-modales et elles fournissent un large ensemble d'activités logistiques différentes. De plus, il n'est pas rare que ces plateformes soient gérées par plusieurs opérateurs distincts.

Un prestataire logistique gère une ou plusieurs de ces infrastructures. Cela lui permet de proposer à ses clients les activités qui suivent (liste non exhaustive) (Stefansson et al., 2006 ; Rodrigue, 2012 ; Gavaud et al., 2009) :

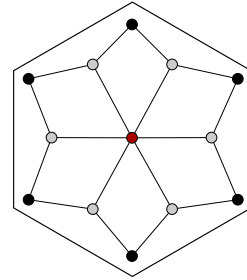
- Consolidation/déconsolidation : le processus de consolidation consiste à construire un flux sortant massifié à partir de plusieurs flux entrants atomisés d'origines différentes mais de destinations identiques. La déconsolidation est le processus opposé.
- Cross-docking : il s'agit d'une pratique au cours de laquelle les flux entrants ne sont pas stockés mais dont les marchandises sont directement réorganisées pour construire les flux sortants. C'est souvent utilisé dans la logistique du commerce de détail et la messagerie. Cette pratique peut être utilisée afin de changer de mode de transport, et/ou pour trier les marchandises en fonction de leur destination.
- Empotage (resp. dépotage) : il s'agit de charger (resp. décharger) la marchandise dans un conteneur. Cette opération se fait sous certaines contraintes car le chargement doit garantir que la marchandise ne va pas s'abîmer pendant le transport.
- Contrôle qualité : il s'agit de vérifier si les marchandises respectent la charte qualité du client (objets non cassés, textiles non déchirés,...).
- Reconditionnement : il s'agit d'effectuer un traitement particulier à la marchandise afin de modifier sa présentation : emballage, étiquetage, repassage de textile,...
- Préparation de commandes : récupérer le bon produit, dans la bonne quantité, pour le placer dans le bon véhicule au bon moment en fonction d'une commande.

Le prestataire logistique doit organiser le réseau d'approvisionnement d'après des critères particuliers (Stefansson et al., 2006 ; Gavaud et al., 2009) : il y a des contraintes sur la marchan-

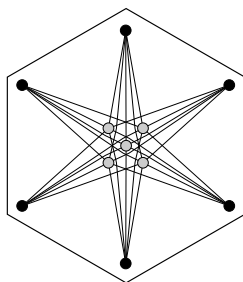
dise (nourriture ou produits chimiques par exemple) mais aussi des contraintes de performance ou de coûts. Ainsi cet acteur doit faire transiter les marchandises de ses clients au sein d'un réseau d'infrastructures qu'il aura déterminé et qui respecte ces contraintes (Rodrigue et al., 2013 ; Gavaud et al., 2009). Les figures 3.2 et 3.3 décrivent comment construire et organiser ce réseau. La première figure décrit comment déterminer la localisation d'un ou plusieurs entrepôt(s) par rapport aux zones à livrer afin de minimiser les distances parcourues par la marchandise. Cela va influencer sur les coûts financiers liés au transport ainsi que sur la réactivité à répondre aux demandes. La deuxième figure montre comment est organisé un réseau en plusieurs niveaux. Cela permet de massifier (en vue d'exporter grâce au réseau en entonnoir), ou par symétrie d'atomiser (en vue d'exporter grâce au réseau en fourchette), le flux de marchandises (Gavaud et al., 2009). Ces deux configurations sont symétriques. Le nombre de niveaux mis en œuvre va dépendre de la distance parcourue par la marchandise à partir du moment où on cherche à atomiser le flux. Sur un hinterland relativement petit, par exemple dont la portée n'est que régionale, on préférera mettre en place un réseau dont le nombre de niveaux est faible. Au contraire, si l'hinterland est à l'échelle d'un continent, on choisira un réseau à 3, 4 voir 5 niveaux.



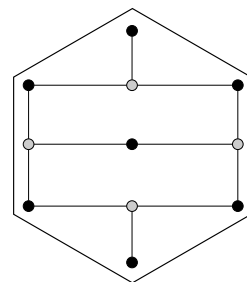
(a) Logistique centralisée : une infrastructure non spécialisée (en rouge) est sur le barycentre des zones de livraison (en noir). (Gavaud et al., 2009). L'infrastructure logistique a ici une place prédominante dans l'espace (Rodrigue et al., 2013).



(b) Logistique décentralisée : même s'il existe une infrastructure logistique au centre du territoire (en rouge), il y a d'autres infrastructures de plus bas niveau (en gris) (Rodrigue et al., 2013). Ces infrastructures de bas niveau peuvent être spécialisées ou pas.

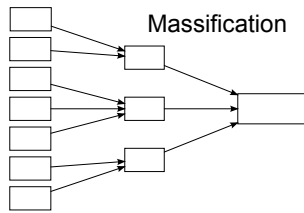


(c) Logistique clusterisée : plusieurs infrastructures spécialisées (en gris) se trouvent à proximité du barycentre des zones de livraisons (en noir) (Gavaud et al., 2009).

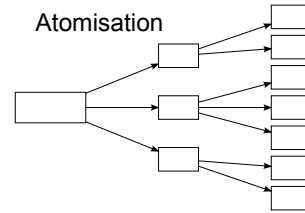


(d) Logistique distribuée : plusieurs infrastructures spécialisées (en gris) sont réparties de manière homogène sur le territoire (les zones de livraisons sont en noir) (Gavaud et al., 2009). Aucune de ses infrastructures logistiques n'a de supériorité hiérarchique sur les autres (Rodrigue et al., 2013).

FIGURE 3.2 : Représentation des différentes organisations spatiales des infrastructures logistiques.



(a) Réseau de massification du flux grâce à une organisation des infrastructures en « entonnoir ».



(b) Réseau d'atomisation du flux grâce à une organisation des infrastructures en « trompette »

FIGURE 3.3 : Les deux topologies principales de réseau d'approvisionnement

3.2.3 Le transport de la marchandise dans les métropoles

Les métropoles et autres zones urbaines sont les destinations finales du système. Les différentes entreprises destinataires sont réparties sur le territoire à proximité ou dans ces zones. Les magasins sont proches de leurs clients, et les usines sont proches de leurs employés. Chacune de ces entreprises possède des stocks locaux qui leur permettent de satisfaire leurs besoins immédiats. Pourtant, plus une zone est habitée, plus le foncier est élevé. Par conséquent, la surface allouée localement aux stocks est le plus souvent très limitée. On a vu que le rôle du prestataire logistique était de garantir une certaine réactivité dans le réapprovisionnement. C'est donc pour cela que les prestataires essaient au maximum de positionner les derniers maillons de leur réseau d'approvisionnement en périphérie des zones urbaines. Ainsi, les prestataires vont transférer régulièrement des marchandises depuis ces derniers entrepôts vers les destinations finales. Le transport étant rapide et effectué le plus souvent par des camions, le prestataire peut prédire précisément l'heure d'arrivée de la marchandise, ce qui contribue à la réactivité du réseau. La quantité de marchandise par déplacement sera donc faible malgré un nombre important de déplacements. Associé aux déplacements quotidiens de la population, cela contribue à engorger le trafic, accroissant les difficultés liées au transport, et augmentant les temps de livraison. Par exemple, il n'est pas rare que des livreurs ne puissent stationner leur véhicule dans Paris, à proximité de la destination. De plus, l'engorgement du trafic a aussi un impact écologique et certaines villes tentent de mettre en application des mesures pour le réduire. Parmi elles, certaines villes ont bloqué l'accès aux poids lourds, voir à tous les véhicules à moteurs, dans certaines parties du réseau. Les logisticiens cherchent donc à amener un flux le plus massifié possible au plus près des zones urbaines, mais cherchent aussi des moyens alternatifs (potentiellement écologiques) aux traditionnels camions. Par exemple, l'entreprise Franprix est une enseigne de vente de nourriture dont certains magasins sont situés dans le centre de Paris. Ils ont décidé de faire transporter leurs marchandises de leur entrepôt de Chennevières-sur-Marne (à 20km de Paris) par barge fluviale depuis le port de Bonneuil-sur-Marne jusqu'au quai de la Bourdonnais en plein coeur de Paris (Diziain et al., 2014). D'autres projets existent également comme le LaMiLo project⁴ qui prévoit l'utilisation de véhicules électriques pour le transport sur le dernier kilomètre dans la plupart des grandes villes d'Europe comme Paris, Londres ou encore Bruxelles.

4. Site Web du LaMilo Project : <http://www.lamiloproject.eu>

3.3 Les systèmes logistiques : des territoires complexes

3.3.1 La marchandise : premier élément de complexité

La marchandise est au cœur du système, il est donc important de la décrire. Tout d'abord, un produit va occuper un volume et aura un poids. C'est ce qui sera utilisé pour déterminer le coût du transport et d'entreposage. De plus, les marchandises ont des contraintes quant aux dispositifs pour les transporter. Certaines seront transportées en vrac, d'autres dans de simples conteneurs (pouvant être réfrigérés). Une fois sur l'hinterland, les produits devront peut être aussi subir certains traitements avant d'être livrés : certains textiles doivent être repassés par exemple. Il existe aussi certaines contraintes, notamment d'hygiène ou de sécurité, qui imposent des restrictions sur l'utilisation des conteneurs : par exemple, ces derniers doivent subir un nettoyage complet s'ils doivent transporter de la nourriture, alors qu'ils ont transporté des déchets auparavant. Une gestion intelligente des conteneurs vides est donc nécessaire.

La vitesse et la fréquence de consommation d'un produit a aussi un impact sur la chaîne logistique. Certains produits ont des dates d'expiration. Ils doivent donc être vendus rapidement et seront transportés préférentiellement au sein de circuits courts. On parle également de fréquence de consommation d'un produit : des produits d'usage courant comme le café, seront régulièrement achetés, et le flux sera relativement constant toute l'année. Par contre, certains produits sont saisonniers, comme les jouets au moment de Noël. Il faut donc ajuster dynamiquement la capacité des réseaux d'approvisionnement en fonction des contraintes de consommation de la marchandise.

Les produits transportés sur un territoire sont donc très hétérogènes. Leurs caractéristiques peuvent impliquer des organisations particulières de la chaîne logistique qui peut être modifiée dynamiquement : un circuit court contre un circuit long, un transport conteneurisé contre un transport en vrac,... Cette diversité contribue à la complexité du système tout entier. Les acteurs doivent prendre en compte ces caractéristiques avant de prendre leurs décisions.

3.3.2 L'auto-organisation : deuxième élément de complexité

La figure 3.4 reprend les éléments principaux des dernières parties à propos des acteurs et de leur gestion du flux au travers des différentes infrastructures. La figure représente un chemin que l'on retrouve souvent en logistique. Néanmoins, il peut être plus élaboré en fonction des contraintes de la marchandise transportée, ainsi que des habitudes de travail ayant cours sur les systèmes étudiés. Chaque acteur ne gère qu'une partie du flux. Pour réussir à maintenir la cohérence du flux, les acteurs doivent donc collaborer ensemble. C'est ce qu'on appelle l'auto-organisation.

Du côté métropolitain d'un système logistique, on observe donc des flux de marchandises atomisés dont l'heure d'arrivée est facilement prévisible. Pourtant, on a pu voir que la logistique portuaire traite des flux massifiés qui sont souvent en retard sur le planning du fait de la complexité du trafic maritime. L'interface logistique entre ces deux parties du système va donc permettre la cohérence entre leur mode de fonctionnement.

En informatique, le terme « zone tampon » désigne une zone mémoire utilisée afin de stocker temporairement les données échangées entre deux processus ou appareils qui n'ont pas la même capacité de transfert. Ainsi, l'interface, composée des prestataires logistiques et de leurs réseaux d'approvisionnement, joue le rôle de zone tampon entre le port et les métropoles. Les stocks externalisés en périphérie des zones urbaines permettent de livrer rapidement la mar-

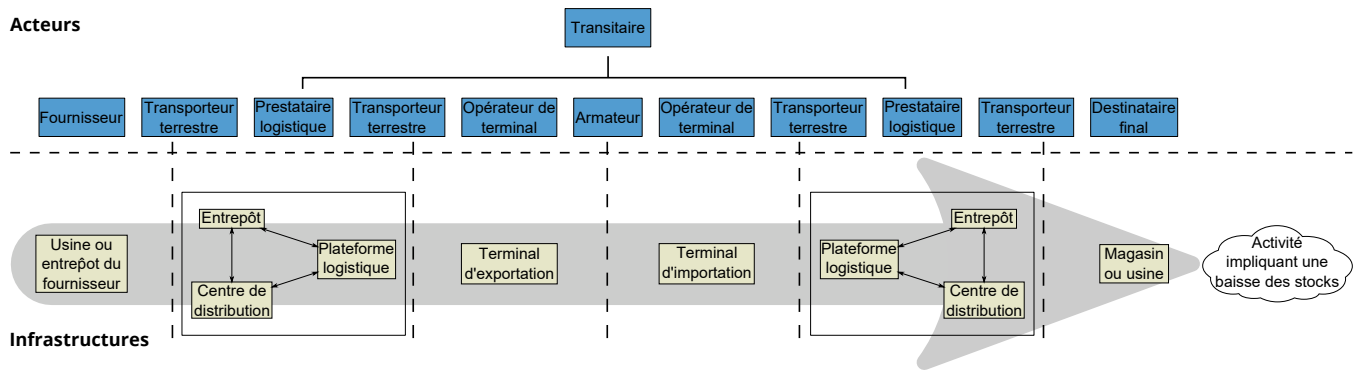


FIGURE 3.4 : Chaque type d'acteurs ne gère qu'une partie du flux. Ils doivent donc collaborer ensemble pour construire et gérer un flux cohérent avec les contraintes de la marchandise et du territoire.

chandise auprès de leurs destinations finales et ainsi d'éviter les ruptures de stocks. De plus, grâce aux activités logistiques et à la surface totale d'entrepôt du réseau, il est possible de répondre temporairement aux besoins des importateurs si des retards survenaient avant l'arrivée dans le port. Néanmoins, pour fonctionner efficacement, cette zone tampon a besoin d'être structurée et organisée grâce aux prestataires logistiques. Ils doivent sélectionner des topologies efficaces pour leurs réseaux d'approvisionnement et une position géographique optimale pour les nœuds qui les composent. Cette interface est donc au cœur du principe d'atomisation du flux global de la marchandise.

À un niveau micro, le processus d'auto-organisation provient des interactions, des réglementations, des contraintes sur le réseau ou sur la marchandise, des méthodes de travail de chaque acteur... Pris individuellement, le transport d'un seul produit ne permet pas de comprendre le fonctionnement du système dans sa globalité. Pourtant, on peut observer, à des niveaux d'observation supérieure, les flux de marchandises de façon agrégés. On remarque alors qu'il existe des motifs particuliers : les flux empruntent globalement des chemins spécifiques et identifiables. De plus, les différentes interactions issues des collaborations entre les acteurs tendent à faire apparaître, à faire émerger, des communautés locales d'acteurs fortement connectés, comme sur le port. Ces communautés contribuent à la performance du système ainsi qu'à sa résilience. Ces propriétés multi-échelles sont caractéristiques de la complexité d'un système logistique.

MODÈLES EXISTANTS

4.1	Modèles agrégés de trafic de marchandises	50
4.2	Modèles désagrégés de trafic de marchandises	52
4.3	Modèles portuaires	55
4.4	Modèles urbains	57
4.5	Contribution	62

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à un ensemble de modèles décrits dans la littérature. Cette étude va nous permettre d'identifier les contributions scientifiques du modèle que nous proposons dans cette thèse. Plusieurs articles qui établissent l'état de l'art dans ce domaine ont permis d'établir une classification qui servira de plan pour ce chapitre. On parlera d'abord dans les deux premières parties des modèles agrégés, puis désagrégés, de simulations des flux de marchandises. Ensuite, nous détaillerons des modèles de simulation axés sur le trafic au sein de ports maritimes puis au sein de zones urbaines.

Mais avant de commencer, on va d'abord spécifier quels types de modèles nous intéressent précisément. En effet, [Terzi and Cavalieri \(2004\)](#) ont établi un état de l'art des simulations de chaînes logistiques. Pourtant, malgré la présence de mots-clés proches, ces modèles sont éloignés de nos attentes car ils s'intéressent uniquement à la simulation de la chaîne logistique d'une seule entreprise, ou d'un groupe d'entreprises qui travaillent ensemble pour acheminer et assembler les pièces détachées d'un produit, pour enfin le transporter jusqu'à des clients finaux. À titre d'exemple, il peut s'agir de simuler la chaîne logistique complète de la production et de la distribution de téléphones portables. Les composants de tels appareils sont produits dans différents pays, et doivent être assemblés dans des usines avant le transport final vers plusieurs destinations à travers le monde. Ces simulations sont très proches de la réalité et ont vocation à effectuer de l'optimisation des coûts mais aussi à tester la mise en place de systèmes de résilience de la chaîne : par exemple, avoir plusieurs usines produisant le même composant afin de garantir la production si un problème survient dans l'une d'elles. Dans notre cas, nous nous intéressons plutôt aux modèles de flux de marchandises de plusieurs entreprises indépendantes qui se partagent un territoire pour approvisionner des régions communes. Pour reprendre la

classification de [Davidsson et al. \(2005\)](#), que nous évoquons dans la partie 2.2.5.2, il s'agit des modèles de trafic de marchandises.

4.1 Modèles agrégés de trafic de marchandises

[Jong et al. \(2004\)](#) écrivent en 2004 que le domaine de la modélisation de trafic de marchandises est relativement jeune comparé à celui de la modélisation du trafic de passagers. Dix ans plus tard, [Taniguchi et al. \(2014\)](#) écrivent encore que la plupart des modèles de trafic de marchandises ne sont pas aussi matures que les modèles de trafic de passagers.

Les premiers modèles dont nous parlerons, remontent aux années 1990 avec notamment le modèle SMILE ([Tavasszy et al., 1998](#)) sur lequel nous reviendrons par la suite. [Jong et al. \(2004\)](#) expliquent que les simulations existantes à cette époque sont surtout inspirées par l'approche en quatre étapes utilisées pour modéliser le transport de passagers. Cette approche se définit ainsi :

- Étape 1 : « production et attraction ». Cette étape consiste à déterminer la quantité de marchandises produites dans des zones « origine », et les quantités de marchandises qui sont attendues dans des zones « destination ». Ces quantités sont déterminées à partir des données agrégées en entrée du système. Tous les modèles listés par les auteurs de cette étude utilisent exclusivement des données agrégées pour réaliser cette étape. En effet, les chercheurs ne disposent à cette époque que de données agrégées qui caractérisent la taille des flux entre des régions du monde. Le modèle SMILE découpe le monde en 77 régions, dont 40 sont situées dans les Pays-Bas. Certaines zones sont donc très étendues (il n'y a qu'une seule zone pour l'Amérique du Nord).
- Étape 2 : « distribution ». À partir des estimations faites à la première étape, on détermine des couples Origine-Destination avec la part du flux qui doit transiter entre les deux zones.
- Étape 3 : « répartition modale ». Cette étape permet de déterminer avec quel type de transport sera transportée la marchandise. Pour cela, les modèles se basent sur des enquêtes qui décrivent les parts des différents modes entre les zones. Les données sont plus ou moins agrégées en fonction de l'enquête utilisée. Certains modèles sont un peu plus désagrégés dans leur approche à cette étape et calculent, à l'aide d'algorithmes, les chemins les moins coûteux entre deux zones à l'aide d'un réseau multi-modal.
- Étape 4 : « affectation ». On calcule à cette étape le nombre de véhicules nécessaires pour transporter les marchandises en fonction de la taille du flux et du mode de transport. Les auteurs précisent tout de même que la plupart des modèles s'intéressent surtout à la route au cours de cette étape.

Les modèles prévus pour faire de la prédiction extrapolent l'évolution des données en entrée. La dynamique de ces modèles n'est donc pas adaptative. De plus les modèles sont orientés sur des niveaux d'observation nationaux voir internationaux. Les auteurs proposent donc comme perspectives de recherches l'adoption de modèles plus fins qui intégreraient des niveaux régionaux voir urbains.

À la même époque, l'étude menée par [Tavasszy \(2006\)](#) explique en plus que l'approche en quatre étapes peut être complétée, ou adaptée, pour mieux s'appliquer au monde de la logistique. Les deux premières couches de la figure 4.1 correspondent aux deux premières étapes de l'approche classique, mais la répartition modale et l'affectation sont remplacées par trois étapes :

- la prestation logistique : cela peut être de l'entreposage par exemple.
- la prestation de transport : l'étape permet de choisir le ou les mode(s) de transport et le nombre de véhicules nécessaires par mode.
- et enfin la prestation de réseau : cette fois ci on détermine le chemin sur le réseau et on calcule les coûts.

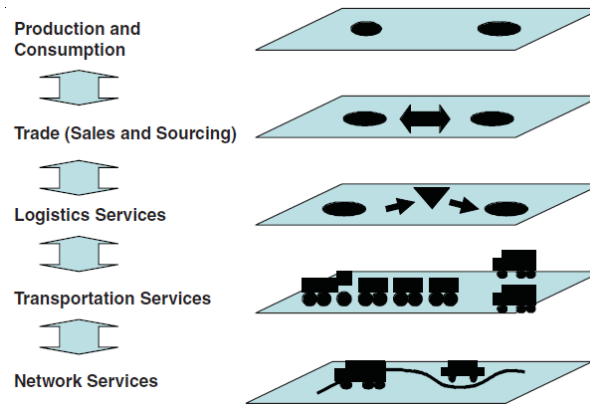


FIGURE 4.1 : Architecture conceptuelle d'un système de transport de marchandises (Tavasszy, 2006).

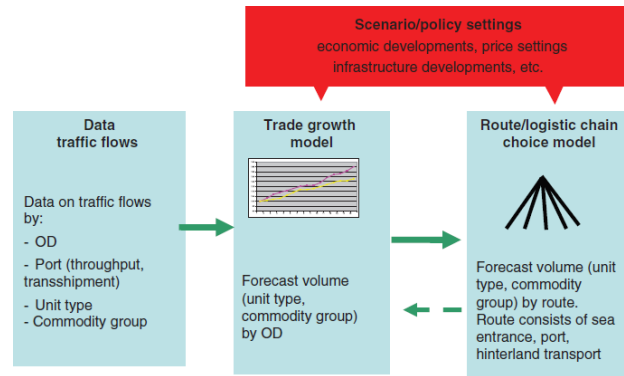
Dans cette même étude, les auteurs expliquent que les modèles qui intègrent le choix de la route sur le réseau physique sont encore rares car les données disponibles à ce sujet sont surtout agrégées alors qu'il faudrait qu'elles soient désagrégées. Par contre, ils évoquent l'introduction progressive de prises de décisions liées aux activités logistiques. Ils reprennent l'exemple du modèle SMILE (Tavasszy et al., 1998) qui prend en compte des décisions de consolidation des flux vers des centres de distribution. Ce modèle utilise une base de données agrégées sur les origines-destinations ainsi que sur des structures de chaînes logistiques qui n'évoluent pas au cours de la simulation. L'évolution de la simulation se fait année par année à partir de modifications apportées manuellement au sein de la base de données.

De nombreux autres modèles agrégés ont vu le jour (Tavasszy et al., 2001 ; Jin et al., 2005 ; Maurer, 2008), mais un en particulier a attiré notre attention car il étudie la compétition entre certains grands ports européens en prenant en compte les caractéristiques de leurs hinterlands. Ce modèle a été proposé par Zondag et al. (2010) en 2010. Le choix d'un port pour le transit de marchandises est une décision importante dans la création d'une chaîne logistique. Des critères déterminants, tel que la qualité de services et des infrastructures d'un port, auront des impacts sur la performance de la chaîne. De plus, certains ports ont des hinterlands qui se chevauchent au moins partiellement. Les auteurs intègrent donc au modèle un composant de compétition : l'augmentation des volumes passant par un port A peut affecter les volumes d'un port B.

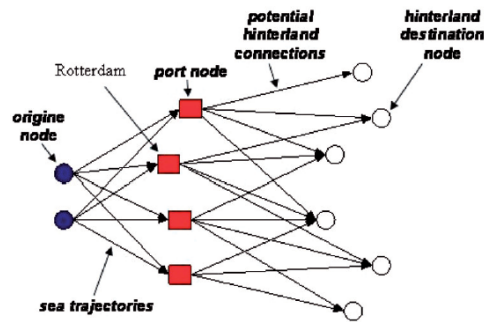
La figure 4.2 décrit l'architecture du modèle. En connaissant les volumes de marchandises à destination des zones prises en compte dans le modèle (toutes localisées en Europe), et en calculant les coûts de transit pour chaque route potentielle, les auteurs sont capables d'estimer les volumes de chaque port et la part de marché de ces ports pour chaque zone. L'évolution du modèle se fait année par année en utilisant un modèle de croissance des échanges commerciaux.

En 2010, Chow et al. (2010) identifient dans leur état de l'art sur les modèles de trafic de marchandises plusieurs classes de modèles dont :

- La classe C qui regroupe les modèles permettant de simuler des parcours agrégés de véhicules (surtout des camions) sur le réseau de transport. Les auteurs constatent que



(a) Architecture du modèle.



(b) Schéma des chaînes logistiques dans le modèle.

FIGURE 4.2 : Représentation du modèle agrégé de compétition entre les ports (Zondag et al., 2010).

ces modèles échouent à représenter les comportements économiques des entreprises, ou des consommateurs (par exemple des intérêts variables pour certains produits, ou des besoins logistiques différents selon le type de marchandises).

- La classe D qui regroupe les modèles permettant de simuler des flux agrégés de différents types de marchandises. À l'inverse des modèles de la classe C, ceux de la classe D représentent mieux les comportements économiques mais échouent par contre à modéliser les différents phénomènes liés aux déplacements des véhicules (notamment la congestion dans le cadre urbain où l'impact y est important).

À partir de ce constat d'échec, les auteurs montrent que de nouvelles approches se développent afin d'avoir des modèles plus désagrégés qui permettraient d'intégrer ces types de problèmes.

4.2 Modèles désagrégés de trafic de marchandises

Comme l'expriment Chow et al. (2010) et Tavasszy et al. (2012), les modèles se sont progressivement éloignés de l'approche en quatre étapes classiques. C'est notamment le cas du modèle ADA (Aggregated-Disaggregated-Aggregated) de de Jong and Ben-Akiva (2007) ; Ben-Akiva and de Jong (2013). Ces derniers utilisent des données agrégées en entrée concernant l'étape « production et attraction », mais elles sont désagrégées en prenant en compte le

nombre d'employés par entreprise afin d'obtenir des flux annuels inter-entreprises. C'est à partir de ces données désagrégées qu'ils effectuent des simulations. Une fois celles-ci terminées, ils agrègent de nouveau les données afin de valider les simulations mais aussi afin d'effectuer des analyses spatiales.

Chow et al. (2010) expliquent en 2010 que les modèles désagrégés ne sont pas encore à un stade d'avancement mature. En réalité, on retrouve des modèles désagrégés relativement anciens, comme celui de McFadden and Winston (1981). Mais ces approches semblent aujourd'hui peu pertinentes. Par exemple, pour le modèle de McFadden and Winston (1981), Winston (1983) expliquent déjà à l'époque que l'approche proposée se concentre sur une seule destination. De plus, le modèle ne tient pas compte de la localisation de l'entreprise (et donc de son aire de marché pour déterminer la consommation de ses stocks). Enfin, le transport entre l'origine et la destination de la marchandise est relativement simplifié et ne se montre pas suffisamment réaliste. Les implémentations des modèles désagrégés sont la plupart du temps freinées par le manque de données nécessaires concernant les flux. Plus tard, en 2013, de Jong et al. (2013) listent un nombre plus important de projets qui ont finalement réussi à aboutir comme le modèle FAME (Freight Activity Microsimulation Estimator) (Samimi et al., 2010, 2014). Ce dernier a été conçu pour simuler le trafic de marchandises entre des entreprises aux États-Unis. Les auteurs de FAME se servent de données désagrégées concernant les caractéristiques des entreprises et concernant le réseau de transport. Des données agrégées sont tout de même utilisées afin de déterminer les relations qu'entretiennent les entreprises entre elles. Le modèle prévoit le choix modal afin de tester la compétition entre le routier et le ferroviaire. Il intègre aussi d'autres comportements liés aux activités logistiques : par exemple, la possibilité d'intégrer des centres de distribution ou des entrepôts au sein de la chaîne logistique. Le choix du mode de transport est effectué à partir de différentes analyses du réseau qui permettent ensuite de paramétrer le comportement des acteurs. Les auteurs de FAME concluent dans un article récent (Samimi et al., 2014) que des efforts substantiels devraient être faits pour appliquer ce modèle à d'autres régions car bien que les données soient disponibles au sein des États-Unis, ce n'est pas forcément le cas pour d'autres territoires. Ils ajoutent d'ailleurs que les éventuelles améliorations prévues du modèle nécessitent elles aussi de nouvelles données que les auteurs n'ont pas toujours à disposition.

Le modèle TAPAS (Transportation And Production Agent-based Simulator) a été proposé par Holmgren et al. (2012). Comme son nom l'indique il s'agit d'un modèle orienté agent. Il est désagrégé car il modélise chaque client, producteur et transporteur par un agent différent. Le modèle connaît une architecture en deux parties : d'une part, un simulateur physique qui représente le réseau de transport multi-modal sur lequel se déplacent les véhicules (voir figure 4.3), et d'autre part, le simulateur de prises de décision au sein duquel les acteurs-agents agissent indépendamment et collaborent entre eux. Parmi les agents-acteurs, on retrouve :

- Plusieurs « clients » : ils passent une commande auprès de l'agent « coordinateur de la chaîne logistique » lorsque leurs stocks sont trop faibles.
- Plusieurs « planificateurs de la production » : lorsqu'ils reçoivent une commande pour un produit, ils informent le demandeur en établissant une « proposition de production » qui indique la date à laquelle les produits pourront être prêts si la commande est validée.
- Plusieurs « planificateurs de transports » : chacun de ces agents opère uniquement sur un territoire du système grâce à une flotte de véhicules. Pour chaque proposition de production, chacun de ces agents va faire une « proposition de transport » s'ils sont capables de livrer la marchandise dans le temps imparti. Ils ne pourront faire une proposition qu'à condition que leurs véhicules soient disponibles au moment souhaité.

- Un unique « coordinateur de la chaîne de transport » : il transmet chaque commande effectuée par un client aux « planificateurs de la production » (par le biais d'un unique agent « acheteur de produit ») et transmet ensuite les « propositions de production » aux « planificateurs de transports » (par le biais d'un unique agent « acheteur de transports »). Les « propositions de transport » sont ensuite retransmises au client demandeur qui choisira la proposition la moins chère.

Les propositions de transport s'effectuent à l'aide d'un algorithme de recherche de plus court chemin dans un réseau multi-modal. Cet algorithme calcule un chemin multi-modal entre un producteur et un client. Il prend en compte : la capacité des véhicules, les dates limites de livraisons, les distances, les coûts de passages de certaines routes (péages par exemple), ou enfin les coûts administratifs. L'intérêt de cet algorithme est de pouvoir déterminer dynamiquement les routes qu'emprunteront les véhicules en intégrant de nombreux paramètres. Le protocole d'interactions entre les agents et l'algorithme utilisé permettent donc de générer un trafic de marchandises sur le réseau afin de réapprovisionner les clients. L'implémentation qui en a été faite simule le trafic de trois clients répartis autour de la mer Baltique. Les auteurs ont pu comparer différents scénarios dont l'ajout d'une taxe au kilomètre sur les camions et qui peut s'appliquer uniquement dans certains pays, ou encore l'ajout d'une nouvelle ligne de chemin de fer entre deux villes du territoire modélisé. Néanmoins, ce modèle n'intègre pas de plateforme logistique intermédiaire au sein de la chaîne logistique qui s'avère donc assez simple. C'est notamment dû au fait que le modèle est prévu pour un territoire de taille relativement restreinte, avec un nombre limité d'acteurs, et un réseau de transport très simplifié. Il serait donc assez délicat de considérer des chaînes logistiques complexes. Concernant les comportements des agents, on notera malgré tout certaines limitations du modèle. Tout d'abord, les agents d'un même type adoptent tous des comportements identiques ce qui risque d'empêcher le modèle de s'adapter à des perturbations. Ensuite, chaque commande effectuée peut être réalisée par un producteur différent. Dans la réalité, les acteurs commercent en général avec les mêmes fournisseurs car il est souvent préférable d'établir une relation de confiance sur la durée.

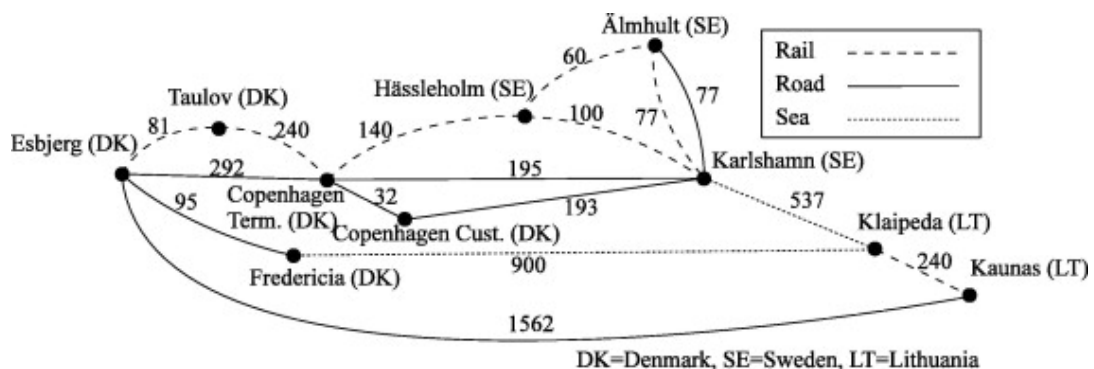


FIGURE 4.3 : Représentation du réseau de transport utilisé lors d'une simulation du modèle TAPAS (Holmgren et al., 2012).

Il existe de nombreux autres modèles désagrégés, mais ils sont le plus souvent appliqués à des territoires plus petits comme sur le port ou en ville. Nous allons donc aborder ces types de modèles au cours des deux prochaines parties.

4.3 Modèles portuaires

Les modèles présentés dans les deux parties précédentes ont tous une approche haut niveau, même ceux désagrégés. En effet ils s'intéressent aux flux sur des territoires assez vastes, à l'échelle d'un pays ou du monde. Les étapes intermédiaires des chaînes logistiques sont perçues comme de simples nœuds de passage à l'image des ports dans le modèle de [Zondag et al. \(2010\)](#) étudié précédemment. Ainsi, d'autres modèles ont vu le jour pour représenter des éléments plus spécifiques de la chaîne logistique. Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux travaux modélisant des ports.

Puisque le territoire considéré est beaucoup plus petit que pour les modèles précédents, le nombre d'acteurs est moins important et l'accès à des données désagrégées en est facilité. De fait, ces modèles offrent une granularité de représentation beaucoup plus fine. L'objectif de ces modèles est également varié. Certains s'orientent davantage sur des problèmes d'optimisation (comme la gestion de conteneur sur un terminal), tandis que d'autres cherchent à déterminer les meilleures stratégies pour organiser le passage portuaire.

Les travaux de [Schepler \(2015\)](#), établis au cours de sa thèse, concernent l'optimisation de la gestion des terminaux à conteneur. Son objectif était de minimiser les temps de rotation des navires, des barges fluviales et des trains en permettant la coordination entre les terminaux à conteneur. La figure 4.4 est une représentation du problème dans lequel un lot de conteneurs doit être déchargé d'un navire amarré le long d'un terminal pour ensuite être chargé dans un autre navire amarré le long d'un deuxième terminal. Schepler a donc simulé un trafic de conteneur dans un port afin de tester différentes solutions d'optimisation basées sur un programme linéaire en variables mixtes et sur plusieurs heuristiques. Il a ainsi pu montrer que ses solutions de coopération inter-terminaux permettaient d'améliorer significativement la performance globale des terminaux portuaires.

[Parola and Sciomachen \(2005\)](#) décrivent dans un article de 2005 une simulation à événements discrets modélisant des flux intermodaux de conteneurs de deux ports géographiquement proches et travaillant de pair. Le modèle adopté utilise une approche modulaire dans laquelle les terminaux sont considérés comme des modules interconnectés, et eux-même décomposables en sous-modules. Les auteurs peuvent ainsi modifier les paramètres internes de chaque module sans modifier le modèle tout entier. Leur travail consiste ensuite à observer globalement les impacts des variables définies localement. Cette méthode se rapproche donc de l'étude des systèmes complexes bien que les auteurs n'en fassent pas directement allusion. Les données de trafic en entrée et en sortie sont générées le plus souvent aléatoirement, suivant des distributions normales, et parfois extrapolées à partir d'enquêtes réalisées auprès des opérateurs de terminaux. Les résultats de la simulation permettent, entre autres, de mesurer le nombre de conteneurs qui ont transités au cours de la période et en fonction du mode de transport. En faisant jouer les paramètres initiaux, les auteurs peuvent ainsi mettre en avant des situations d'engorgement du système portuaire. Ils peuvent également tester l'ajout ou la suppression de certaines infrastructures telles qu'une voie ferrée ou de nouvelles grues.

Un travail similaire a été réalisé pour le port intérieur de Séville ([Cortés et al., 2007](#)). Les auteurs utilisent également une simulation à événements discrets constituée de plusieurs modules. L'originalité du modèle tient dans la configuration particulière du port dont l'accès est limité par l'estuaire et une écluse. De plus, contrairement au modèle de [Parola and Sciomachen \(2005\)](#), [Cortés et al. \(2007\)](#) ont intégré plusieurs types de marchandises incluant du vrac. Les données utilisées sont tirées des rapports annuels de l'autorité portuaire locale. Au cours d'une simulation, les auteurs peuvent mesurer différents indices de performance du port tels que le

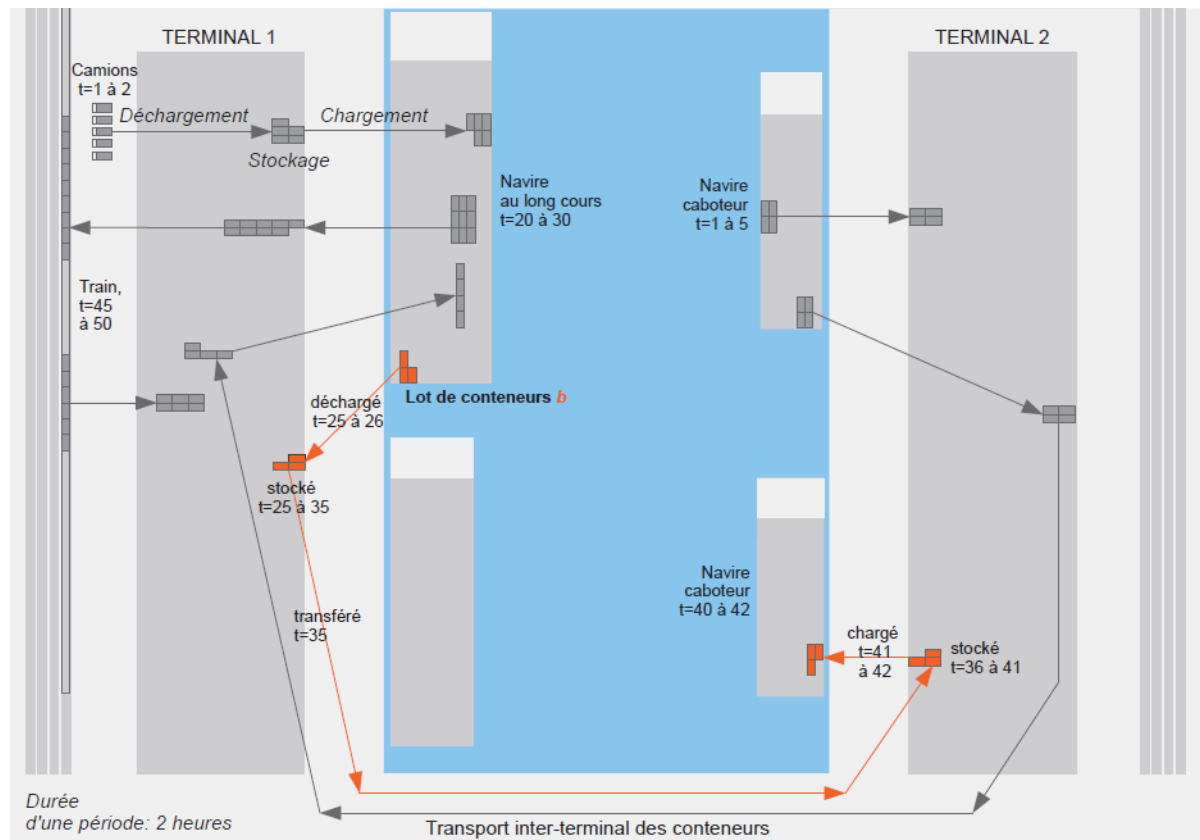


FIGURE 4.4 : Représentation de flux de conteneurs entre deux terminaux qui coopèrent (Schepler, 2015).

temps de navigation au sein du port, le taux d'occupation des terminaux et entrepôts, ainsi que le niveau de congestion de l'écluse ou des docks. Grâce à différents scénarios, les auteurs ont pu mettre en avant que le port de Séville devrait réussir à absorber un accroissement réaliste du trafic. Seul le trafic de conteneur pourrait subir quelques difficultés temporaires. De plus, l'ajout d'une nouvelle écluse, plus grande, serait bénéfique au port car elle permettrait à des navires de plus grande taille de faire escale.

Plus récemment, Leriche et al. (2015) ont conçu une simulation multi-paradigme qui s'applique plus spécifiquement au port du Havre puisqu'elle teste l'intégration de sa nouvelle plateforme multimodale. Celle-ci est un terminal servant de hub afin de consolider le trafic connecté avec l'hinterland (en import et en export). La figure 4.5 montre une représentation de l'organisation du port du Havre avec les connections entre les terminaux et l'hinterland. L'intérêt du modèle est de tester différentes stratégies de gestion pour comprendre quelles règles permettent de mettre le plus à profit cette nouvelle plateforme pour faciliter le passage portuaire. La simulation est multi-paradigme car elle combine un système multi-agent (pour représenter par exemple les équipements de manutention) et un modèle à événements discrets (pour définir l'arrivée des trains et des barges). Des données en entrée indiquent le nombre de conteneurs par trains, la date limite d'un conteneur,... Les données en sortie sont très précises et peuvent décrire des informations telles que le nombre de manipulations des conteneurs, le taux de remplissage des barges et des trains, ainsi que d'autres indicateurs écologiques et économiques.

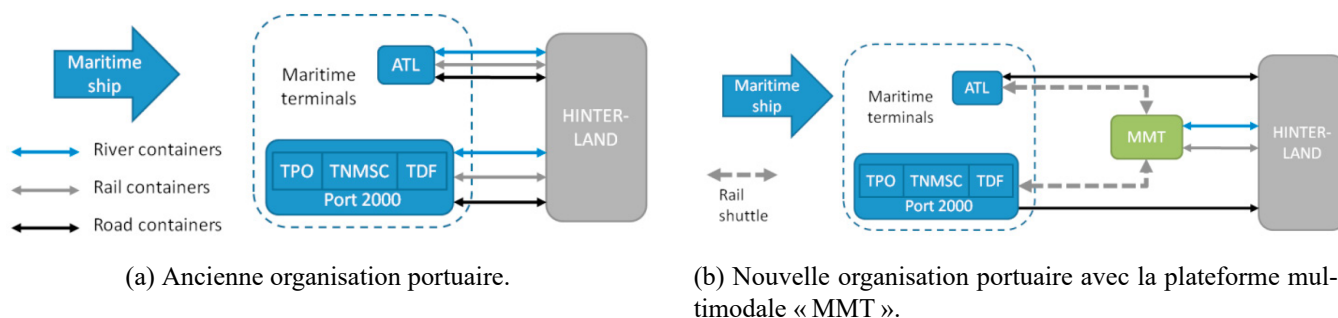


FIGURE 4.5 : Représentation du système portuaire havrais et de ses connexion avec l'hinterland par [Leriche et al. \(2015\)](#). ATL, TPO, TNMSC et TDF sont les terminaux à conteneurs du port du Havre. MMT est la plateforme multimodale.

4.4 Modèles urbains

Les travaux sur la logistique urbaine sont nombreux mais l'essor de la modélisation du trafic de marchandises en ville s'est très largement accéléré ces dernières années. En effet les impacts de la logistique urbaine sont multiples et de natures très diverses. Ils sont : sociaux, environnementaux, économiques, ou encore financiers. Les problématiques des différents modèles sont souvent liés à la congestion du trafic dans les grandes villes ou à la pollution (de l'air mais également sonore). Ces modèles permettent, grâce à la simulation de différents scénarios, de mettre en avant les effets de l'augmentation de la population, de la construction de nouveaux sites à livrer, ou encore de l'application de certaines restrictions (horaires des livraisons, dimensions maximales des véhicules,...).

En 2006, [Tavasszy \(2006\)](#) explique que les approches utilisées jusqu'à maintenant pour modéliser le trafic urbain sont très proches de celles utilisées pour des territoires plus vastes. [Chow et al. \(2010\)](#) rappellent d'ailleurs les travaux de [Wisetjindawat and Sano \(2003\)](#) ; [Wisetjindawat et al. \(2006\)](#) qui reprennent l'approche en quatre étapes. Leur modèle désagrégé permet de simuler des flux de différents types de marchandises entre des entreprises. À l'image des modèles des parties 4.1 et 4.2, celui-ci permet d'estimer les parts de trafic entre des origines-destinations. Dans sa version de 2006, le modèle vise à prendre en compte la spatialité dans les prises de décisions. En effet, leur hypothèse est que les choix des différents acteurs sont influencés par les choix des acteurs voisins. Le modèle s'applique sur le territoire autour de la ville de Tokyo et demande beaucoup de données de diverses natures afin d'être calibré. [Chow et al. \(2010\)](#) pointent d'ailleurs les difficultés d'acquisition de ces données pour d'autres territoires. En effet, les auteurs précisent eux-même qu'ils ont utilisé des données de 1982 car il s'agit de la base de données la plus complète. Enfin, les auteurs expliquent en conclusion de leurs articles que ce modèle pourrait être utilisé pour analyser les flux sur le réseau, notamment dans le cas de nouvelles infrastructures.

Beaucoup de modèles développés à cette époque n'intègrent pas tant les problématiques liées à une ville. Cela tient surtout du manque de données concernant les territoires étudiés. Un effort considérable devait d'abord être fait lors de la conception de ces modèles pour générer des données avant de pouvoir poursuivre vers des questionnements plus spécifiques. Seuls quelques modèles ont pu faire exception car leurs auteurs avaient accès à des données désagrégées et suffisamment complètes. C'est par exemple le cas du modèle de [Taylor et al. \(2005\)](#) que

nous détaillerons plus bas. Ainsi, dans les années qui suivent, les modèles se sont progressivement améliorés pour mieux répondre aux attentes des autorités publiques très demandeuses de ces simulations de trafic en ville.

En 2010, [Muñuzuri et al. \(2010\)](#) présentent un modèle dont l'objectif est de déterminer le nombre de véhicules qui entrent et qui sortent de chaque zone de la ville de Séville au cours de l'heure de pointe. Ils simulent deux types de mouvement de marchandises : ceux depuis un grossiste et vers un magasin, et ceux depuis un magasin et vers une habitation (dans le cadre d'une livraison à domicile). De plus, deux types de véhicules de tailles différentes sont représentés : les camionnettes et les camions. Le modèle détermine d'abord des origines-destinations en fonction des secteurs d'activité et à partir d'enquêtes sur le terrain. Puis, à l'aide d'une approche de maximisation de l'entropie, il détermine le nombre de trajets entre chaque zone. L'approche de maximisation de l'entropie avait déjà été utilisée pour estimer les matrices d'origines-destinations dans le cadre du trafic de passager ([Aerde et al., 2003](#)) et se calcule ainsi :

$$\text{Max} : W^k = \frac{(\sum_i \sum_j T_{ij}^k)!}{\prod_{ij} (T_{ij}^k)!}$$

tel que :

- $\sum_j T_{ij}^k = O_i^k \forall i, k$, avec O_i^k est le nombre de véhicules de la filière k et originaire de la zone i .
- $\sum_i T_{ij}^k = D_j^k \forall i, k$, avec D_j^k est le nombre de véhicules de la filière k et à destination de la zone j .
- $T_{ij}^k \geq 0, \forall i, j, k$

Les données de trafic de marchandises calculées par le modèle sont finalement couplées à une matrice origines-destinations correspondant au trafic de passagers. Ainsi, la simulation permet de mieux rendre compte de phénomènes de congestion au moment des pics de circulation lorsque les différents utilisateurs du réseau doivent se partager les routes. Les auteurs précisent néanmoins que le modèle est statique et que les origines-destinations n'ont pas vocation à varier au cours de la simulation. De plus, ils remarquent également que les modèles de transport de marchandises en milieu urbain sont difficiles à valider car il n'existe que très peu de données réelles. Dans leur cas, la validation semble fournir des résultats positifs mais les données réelles ne sont pas assez nombreuses pour que les statistiques soient considérées significatives.

[Roorda et al. \(2010\)](#) présentent en 2010 l'architecture conceptuelle d'un modèle agent très prometteur. Celui-ci vise à modéliser à la fois le trafic de marchandises et celui de passagers. Ils s'intéressent en particulier aux interactions entre les acteurs de la logistique urbaine. Les auteurs définissent des compagnies constituées d'une ou plusieurs entreprises. Certaines de ces entreprises ont des besoins en marchandises, d'autres peuvent fournir des produits, et d'autres encore proposent des services logistiques. Pour créer des interactions, les agents peuvent définir différents types de contrats (d'approvisionnement, de gestion logistique,...) qui peuvent être créés ou rompus dynamiquement. Ces contrats sont définis comme des relations d'affaires entre deux entreprises. Les auteurs distinguent trois types de contrats :

- Les contrats de marchandises identifient chacun un vendeur, un client, un prix et une liste de cargaisons de marchandises. Une cargaison est elle-même définie par une origine et une destination, une date, un poids, un type de marchandise et un prix. Les auteurs remarquent que le modèle n'intègre pas les spécificités de traitement des diffé-

rents types de marchandises (comme les fenêtres temporelles pour les livraisons ou les exigences particulières de manutention).

- Les contrats de services d’entreprises sont similaires au précédent type de contrat mais concernent les services inter-entreprises qui ne nécessitent pas de transport.
- Les contrats logistiques identifient une entreprise responsable d’une cargaison, un prestataire logistique, et une liste de cargaisons de marchandises qui doivent être transportées.

Un autre concept également très intéressant dans ce travail est la représentation du temps. En effet, de nombreux modèles proposent des représentations assez simples des mécanismes d’évolution du système. D’ailleurs, comme on vient de le voir avec l’article précédent, tous les modèles n’intègrent pas nécessairement de mécanismes d’évolution. Le plus souvent, les simulations se contentent de refaire, à chaque pas de temps régulier, l’ensemble des calculs définis par le modèle, mais en prenant en compte l’état du système à l’étape précédente. Ici, le pas de temps est journalier mais seules certaines décisions seront prises à certains moments. Les décisions liées à la logistique comme le réapprovisionnement d’un bâtiment ou le choix du mode de transport (voir figure 4.6) seront exécutées chaque jour. Les décisions qui concernent la gestion de la chaîne logistique (tel que l’augmentation du nombre de véhicules utilisés) seront effectuées une fois par mois. Les compagnies peuvent décider une fois par an si elles souhaitent ouvrir ou fermer une entreprise, ou se relocaliser. Enfin, les décisions liées au marché (changement des prix, choix d’un fournisseur) peuvent provenir de décision à court terme (quelques jours) ou à long terme (plusieurs années). Ce modèle propose donc plusieurs niveaux de temporalité, ce qui est très original dans ce domaine. Malheureusement, ce modèle souffre d’un problème majeur : son besoin très important en données. À la fin de l’article, les auteurs listent l’ensemble des données qui serait nécessaire à l’implémentation. Par exemple, il faut connaître à l’avance la flotte de véhicules et l’ensemble des bâtiments que possèdent chaque entreprise. Même si certaines de ces données sont disponibles pour leur territoire d’étude (l’aire urbaine de Toronto), d’une part, ce n’est pas le cas pour tous les territoires, et d’autre part, de nombreuses informations nécessiteraient d’être récupérées grâce à des enquêtes effectuées auprès des différents acteurs. Une implémentation partielle de ce modèle a été proposée en 2013 lors d’une conférence (Cavalcante and Roorda, 2013). FREMIS (Freight Market Interactions Simulation) implémente la partie du modèle concernant la formation des contrats logistiques. Toutefois, cette implémentation est toujours un travail en cours car les auteurs font toujours face aux manques de données.

Un autre modèle proposé par Gonzalez-Feliu et al. (2012) permet de prendre en compte les mouvements de marchandises entre les entreprises¹ ainsi que les mouvements effectués par les particuliers lorsqu’ils font des courses². La figure 4.7 décrit l’architecture générale du modèle qui se décompose en deux modules principaux : celui qui gère les mouvements inter-entreprises, et celui qui gère les mouvements des consommateurs finaux. Le premier module reprend le modèle FRETURB (Routhier and Toilier, 2007) qui suppose que le nombre de mouvements de marchandises depuis et vers une entreprise dépend du type d’activité qu’elle mène et de sa taille. Le deuxième module permet de connecter les différentes localisations des ménages avec des zones d’achats à l’aide d’un modèle gravitaire. Dans les deux modules, des données réelles sont utilisées pour déterminer les flux. Certaines données sont issues d’enquêtes effectuées sur le territoire français concernant les villes de Dijon, Marseille et Bordeaux.

1. IEM : Inter-Establishment Movements.

2. ECM : End-Consumer Movements.

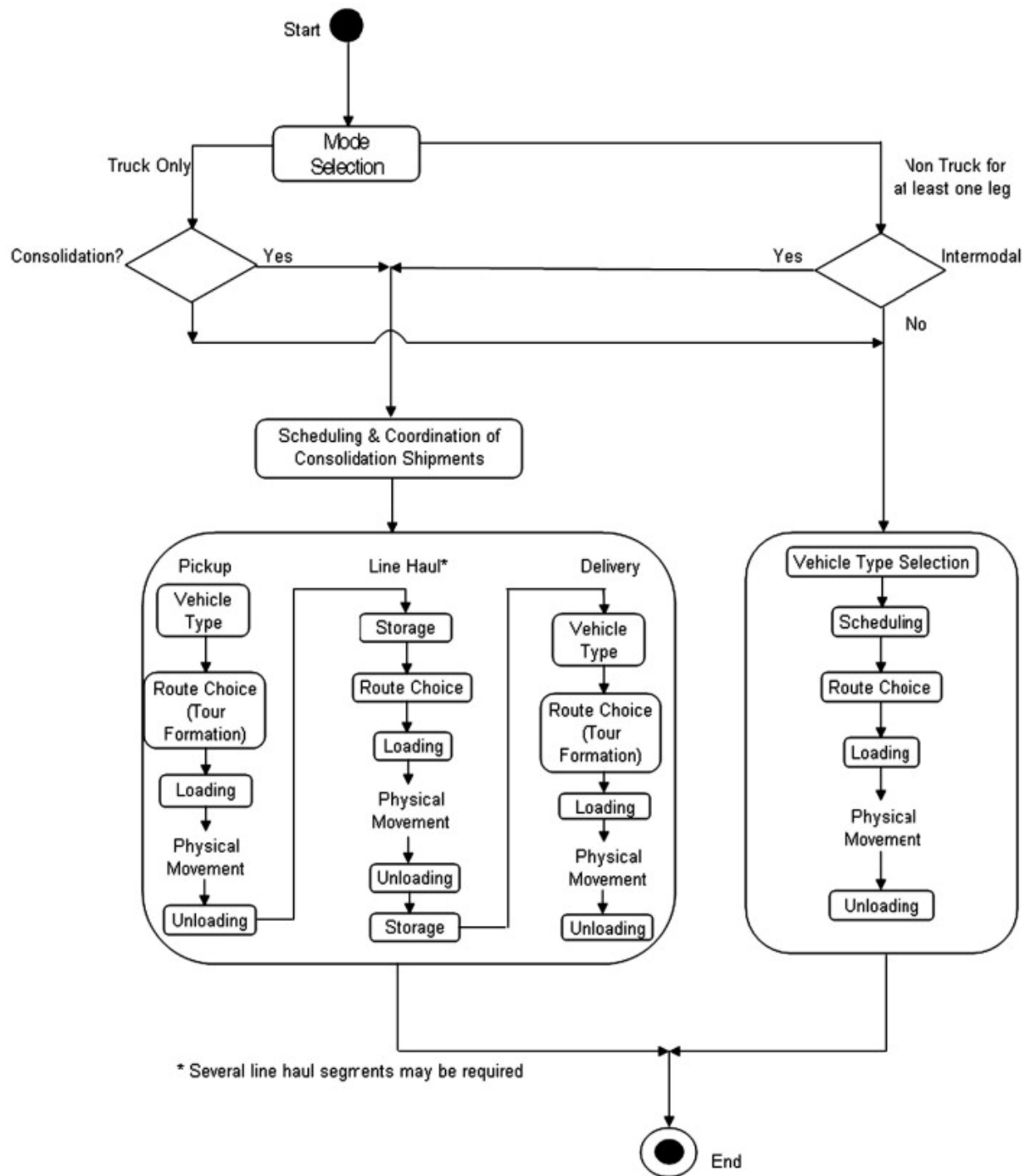


FIGURE 4.6 : Diagramme d'état d'une décision logistique liée au transport (Roorda et al., 2010).

D'autres données décrivent les caractéristiques géographiques et démographiques des villes de Lyon et de Dijon. Ces données permettent de calibrer les paramètres du modèle. Quand cela est possible, les calculs sont effectués de manière désagrégée au niveau des entreprises mais sont ensuite agrégées au sein des zones qui composent le territoire étudié. Cela permet une analyse macroscopique des résultats. La simulation permet d'étudier les problèmes d'occupation des routes en établissant différents scénarios tels que l'augmentation de la population dans certaines zones, ou l'ajout de nouvelles entreprises sur le territoire. Les auteurs espèrent à terme

améliorer ce modèle pour intégrer la logistique du e-commerce, ainsi que d'autres types de flux (ramassage des ordures, transport de matériaux de constructions pour les chantiers,...).

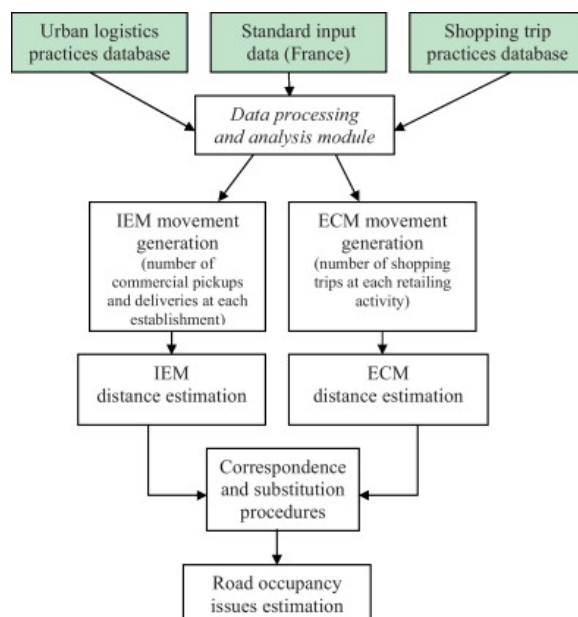


FIGURE 4.7 : Architecture du modèle de trafic urbain de marchandises par Gonzalez-Feliu et al. (2012).

Dans une étude de 2014, Taniguchi et al. (2014) inventorient les modèles récents de logistique urbaine. Les différentes approches présentées visent à résoudre des problèmes spécifiques de logistique. Ainsi, dans une première partie, les auteurs décrivent un ensemble de modèles traitant des questions liées à l'écologie afin de réduire les gaz à effet de serre. Il parle notamment du travail de Taylor et al. (2005) dont nous parlions plus tôt. Ce modèle a été développé afin d'évaluer les impacts de différentes politiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre libérées par le trafic routier de marchandises dans la ville de Sydney. Leur simulation tient compte des déplacements commerciaux et ceux des particuliers à partir de données datant de 1996. Ils ont pu montrer que les méthodes les plus efficaces pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre seraient, d'une part, l'utilisation de carburants plus écologiques, et d'autre part, l'utilisation de camions dont les facteurs de charges sont plus importants.

Dans la deuxième partie de l'article de Taniguchi et al. (2014), les problèmes liés à la logistique des soins médicaux sont évoqués. En effet, les auteurs partent du constat que le nombre de personnes âgées au sein des villes tend à croître, alors que dans le même temps, la capacité des hôpitaux et des cliniques reste limitée en terme de personnels et d'équipements. Ainsi, une partie des soins se fait à domicile, ce qui implique une gestion de plus en plus optimale de la logistique pour délivrer des soins. Taniguchi et al. (2014) listent donc un ensemble de travaux permettant cette optimisation (Bertels and Fahle, 2006 ; Rasmussen et al., 2012 ; Liu et al., 2013). La plupart des modèles proposés adoptent des techniques telles que des méthodes de programmation linéaire, d'optimisation combinatoire ou encore des meta-heuristiques.

Enfin, dans la dernière partie, Taniguchi et al. (2014) reviennent d'abord sur des modèles de prévisions des flux dont on a déjà évoqué certains travaux (Wisetjindawat and Sano, 2003 ; Samimi et al., 2010). Ils discutent ensuite de modèles qui s'appliquent au contexte très particulier de la logistique en cas de catastrophe. En effet, certaines mégapoles peuvent être soumises

à des tremblements de terre, à des ouragans, des tsunamis,... Dans ce genre de situation il est important de déterminer comment organiser la livraison de matériels ou de vivres. Certains modèles se concentrent sur la recherche des meilleurs emplacements pour localiser les différentes installations de secours, et sur la recherche des chemins pour les véhicules d'approvisionnement en limitant les risques. Ce genre de modèle demande d'avoir une connaissance assez fine des infrastructures existantes et des répartitions démographiques, c'est pourquoi certaines problématiques techniques sont assez proches des modèles plus classiques.

4.5 Contribution

Dans cette dernière partie du chapitre consacré aux modèles existants, nous allons nous intéresser aux perspectives de recherche qui serviront de base de réflexion pour l'élaboration de notre modèle.

Tout d'abord, on a pu remarquer que les modèles se sont progressivement détachés des approches classiques en quatre étapes et se sont dirigés vers des architectures plus désagrégées, avec entre autres des modèles agents.

L'article de [Tavasszy et al. \(2012\)](#) évoque plusieurs avancées possibles dans ce domaine. En premier lieu, les auteurs constatent que les structures logistiques évoluent dans le temps. En effet, de nouvelles zones de consommation, de nouveaux centres de distribution apparaissent régulièrement. De même, le réseau de transport évolue dans le temps. Ainsi, pour réussir à prédire l'évolution du système, il faut trouver un modèle capable d'intégrer ces changements dans le temps. Ce type d'évolution permettrait d'ailleurs de tester la résilience du système : que se passe-t-il en cas de grève bloquant des accès sur plusieurs jours ? Et en cas de catastrophe climatique : comment le système se réorganiserait si des plateformes logistiques étaient inondées ? Il faut pouvoir intégrer ce type d'évolution structurelle et organisationnelle. Les auteurs espèrent donc qu'un futur modèle intégrerait davantage le lien entre les flux de marchandises et, d'une part, le développement économique régional et, d'autre part, le développement des organisations logistiques. De plus, les nouveaux modèles devraient tenir compte de la qualité du service logistique grâce à des mesures de performances.

Les auteurs voient également dans le futur une meilleure intégration des interactions entre les acteurs et l'espace géographique, notamment concernant les décisions liées à la sélection des entrepôts intermédiaires dans une chaîne logistique. D'ailleurs, de manière plus générale, les acteurs modélisés doivent être en mesure d'adopter des comportements alternatifs et plus représentatifs de la réalité.

Les modèles devraient également mieux prendre en compte les mécanismes d'anticipation des besoins des acteurs concernant les réapprovisionnements de leurs stocks. Ils doivent être capables d'adopter des stratégies efficaces pour éviter les ruptures de stocks.

[de Jong et al. \(2013\)](#) parlent également des avancées probables qui vont survenir dans les prochaines années. Ils reprennent ainsi certaines des perspectives déjà citées, comme une meilleure intégration des comportements, mais ils discutent également d'un modèle qui couplerait la gestion des flux internationaux avec les flux urbains.

En complétant ces deux états de l'art qui ont élaboré quelques perspectives de recherche, nous avons également constaté un intérêt de plus en plus marqué pour des modèles dont la dynamique est davantage présente. C'est notamment le cas du modèle de [Roorda et al. \(2010\)](#). Ces derniers proposent une représentation du temps à l'aide de différentes échelles temporelles.

Un autre point très largement récurrent et qui pose problème dans de nombreux modèles concerne les données. Beaucoup de chercheurs ont des difficultés à obtenir les informations nécessaires à la réalisation de leur modèle. Et c'est d'autant plus difficile que le modèle est désagrégé. Il serait donc intéressant d'étudier la possibilité d'établir un modèle désagrégé dont les données en entrée sont limitées.

Enfin, nous avons remarqué le manque de modèle qui intègre la logique portuaire pour modéliser les flux sur l'hinterland. Seul le modèle de [Zondag et al. \(2010\)](#) semblait approcher cette idée mais il s'agissait d'un modèle agrégé.

Ainsi, nous proposons dans cette thèse un modèle de trafic de marchandises qui intègre la dynamique portuaire, la dynamique urbaine ainsi que l'interface qui existe entre ces deux sous-système. L'intérêt est ici de mieux comprendre comment les ports, qui gèrent des flux massifiés, et les villes, qui gèrent des flux atomisés, sont connectés malgré des modes de fonctionnement très différents. Pour cela nous intégrons une interface entre les ports et les villes qui permet cette connexion. Nous présentons un modèle individu centré qui tire profit de données désagrégées, et en quantité limitée, en entrée du modèle afin de caractériser et localiser chaque acteur et infrastructure. Ce modèle permet de représenter et simuler le passage de la marchandise d'une dynamique portuaire à une dynamique urbaine grâce à une interface logistique auto-organisée.

Les comportements internes et hétérogènes des agents du modèle leur permettent de s'organiser de manière autonome et distribuée en fonction de leurs besoins. Ainsi, les flux émergent des décisions locales et des interactions des agents. Le trafic ne provient donc pas d'une base de données pré-établies. Ce mode de fonctionnement permet aux agents de s'adapter au système qui évolue dans le temps, en pouvant subir des mutations. Les agents sont ainsi capables de se réorganiser lorsque certains événements se produisent. Le modèle fournit donc les outils nécessaires à l'étude de la résilience du système bien qu'il ne s'agisse pas nécessairement de notre objectif d'étude prioritaire.

Enfin, nous intégrons la notion d'aléas au modèle. Si des problèmes surviennent avant ou pendant le transport, cela peut avoir un impact en temps réel sur le reste du système et notamment sur les décisions des agents qui peuvent ou doivent s'adapter.

Deuxième partie

Modélisation et expérimentation

MODÈLE CONCEPTUEL

5.1	Présentation du modèle	67
5.1.1	Objectifs	67
5.1.2	Fonctionnement général	68
5.1.3	Pré-requis en vue d'une implémentation	68
5.2	Modélisation du réseau de transport par des graphes dynamiques	69
5.2.1	Un sous-graphe pour chaque mode de transport	69
5.2.2	Le couplage avec les agents	71
5.3	Modélisation des acteurs par des agents	71
5.3.1	Les destinataires finaux	73
5.3.2	Les prestataires logistiques	73
5.3.3	Les fournisseurs	75
5.3.4	Les commissionnaires de transport	76
5.3.5	Les transporteurs	76
5.3.6	Un modèle rétro-actif	76
5.3.7	Perturbation du système et adaptation des agents	76

5.1 Présentation du modèle

5.1.1 Objectifs

Cette partie présente la modélisation d'un système logistique. L'objectif final de cette modélisation est de fournir les clés nécessaires à la compréhension d'un tel système et de fournir une aide à la décision pour la planification territoriale et logistique. Tout d'abord, on recherche un modèle flexible qui a la capacité de s'adapter à différents types de corridors. En effet, comme on a pu le voir dans les parties précédentes, les contraintes appliquées sur ces systèmes ne sont pas toujours les mêmes. Le modèle doit aussi permettre aux acteurs de mettre à jour facilement leurs comportements en fonction des différents stimulus fournis par l'environnement et par les autres acteurs. On doit également être en mesure de modifier facilement les paramètres d'en-

trée du modèle (tels que la taille de certains entrepôts par exemple) afin de proposer différents scénarios. Enfin, le modèle doit fournir des indices de performance du système : par exemple, on devrait connaître l'état du trafic ou de la congestion de certains axes, le temps moyen de transport des marchandises, les coûts (financiers ou environnementaux)...

La suite de ce chapitre présente une architecture générale. Ainsi, nous nous attarderons sur des concepts globaux permettant d'établir la logique d'ensemble du modèle. Nous donnons essentiellement ici une description globale de l'architecture du modèle qui nécessite d'être spécialisé pour chaque cas d'étude. Les détails d'implémentation de ce modèle seront explorés dans les chapitres 6 et notamment dans 7 pour l'axe Seine.

5.1.2 Fonctionnement général

Le modèle proposé ici s'articule autour de différentes représentations des acteurs et des infrastructures du territoire afin de décrire leurs interactions, leurs comportements et leurs propriétés de base. Il se compose en deux parties principales. La première permet de représenter l'environnement qui sera le support des flux de marchandises. Le réseau de transport y est représenté à l'aide de graphes dynamiques. La deuxième partie décrit les acteurs et infrastructures nodales à l'aide d'une approche orientée agent. Chaque agent représente un acteur ou une infrastructure du système. Leurs décisions autonomes sont prises grâce à leur comportement interne dépendant du type d'acteur ou d'infrastructure qu'ils modélisent. Ces agents ont une connaissance imparfaite et incomplète du reste du système à l'image des acteurs qu'ils modélisent. À l'aide de différents mécanismes, tels que des rétro-actions, on couple ces deux représentations du réseau et des agents.

Lors de la modélisation d'un système logistique, un choix important doit se porter sur qui est à l'origine des flux. Par exemple, dans le monde réel un fournisseur peut proposer de nouveaux produits aux magasins du système. Ce magasin doit alors trouver les clients afin de vendre ce produit. Il arrive également fréquemment que ce soit les magasins ou industries qui décident d'eux même d'acheter les marchandises qu'ils souhaitent. Dans notre cas, nous avons préféré ne modéliser que cette deuxième option. Les flux sont uniquement tirés par la demande des destinataires finaux. En effet, le fournisseur est souvent étranger du territoire lié au système. Nous souhaitons donc borner le modèle et représenter les fournisseurs de manière plus simple.

5.1.3 Pré-requis en vue d'une implémentation

En prévision de l'implémentation du modèle, nous supposons que nous disposons d'un système d'information géographique. Celui-ci nous permet de récupérer certaines informations telles que la position des acteurs et infrastructures, ou leurs caractéristiques. Ces données désagrégées serviront d'entrées au modèle.

Certaines règles de fonctionnement doivent également être renseignées par l'utilisateur lors de l'implémentation. Cela permet d'adapter facilement le modèle à différents systèmes logistiques. Le modèle n'est donc pas dépendant des données géographiques mais il peut aussi s'adapter aux réglementations et habitudes de travail d'un système spécifique.

5.2 Modélisation du réseau de transport par des graphes dynamiques

5.2.1 Un sous-graphe pour chaque mode de transport

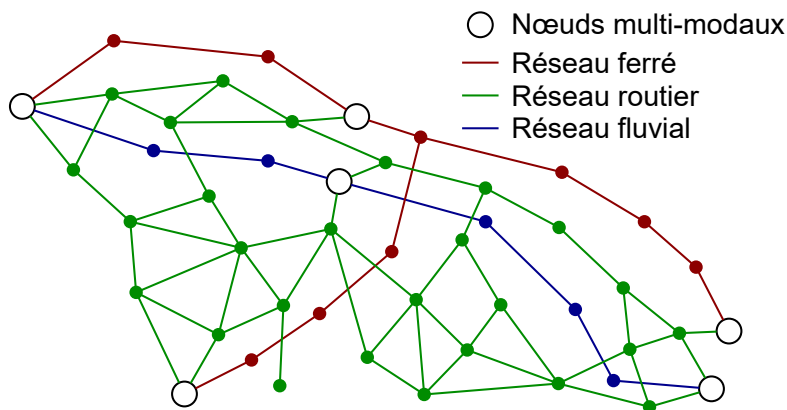


FIGURE 5.1 : Représentation du réseau multi-modal et du couplage avec le modèle agent.

La figure 5.1 décrit la représentation du réseau de transport. Il est modélisé par un graphe dynamique et orienté. Les modes de transport correspondent à des sous-graphes inter-connectés grâce à des agents représentant les infrastructures nodales telles que les terminaux ou les entrepôts. On notera d'ailleurs que dans le modèle, les entrepôts, les plateformes logistiques ou les centres de distribution sont regroupés au sein du même type d'agent, appelé simplement « entrepôt ». Chacun de ces agents diffuse la liste des réseaux auxquels il est rattaché, ainsi que la liste des activités logistiques qu'il est susceptible d'effectuer. En effet, ces infrastructures se distinguent surtout par leurs activités internes, mais on cherche ici un modèle de plus haut niveau. Il est donc inutile de surcharger davantage la conception. Néanmoins, une implémentation pourrait tout à fait distinguer davantage les différents agents si besoin.

Chaque sous-graphe correspond à un mode de transport et on leur attribue donc les propriétés associées : par exemple la vitesse maximale autorisée par type de véhicule, le coût unitaire de traversée, le nombre de voies s'il s'agit d'une route... Certaines de ces caractéristiques sont définies différemment en fonction du système étudié. Par exemple, les vitesses maximales peuvent varier d'un pays à l'autre car elles dépendent du code de la route qui n'est manifestement pas le même partout. C'est donc au moment de l'implémentation qu'il faudra adapter la représentation du réseau de transport.

Concernant la mobilité sur le graphe, c'est la finesse de l'implémentation qui décidera *in fine* du modèle de déplacement des véhicules. On retiendra surtout qu'on cherche ici à intégrer une mobilité en temps réel, avec si possible la gestion de phénomène de congestion. L'intérêt est de permettre à l'utilisateur de perturber le système en générant des imprévus comme des retards dans les livraisons. Il existe plusieurs modèles de déplacement de véhicules dans la littérature (Ni, 2003 ; Miller et al., 2004 ; Meignan et al., 2007). Les modèles qui s'intéressent à la mobilité de véhicules routiers sont plus nombreux comme en témoigne l'enquête établie par Chen and Cheng (2010). Le modèle proposé par Taillandier (2014) tient compte de nombreux paramètres définis individuellement pour chaque véhicule : leur longueur et largeur, leur distance de freinage, la distance qui les sépare des autres véhicules,... L'ensemble de ces para-

mètres locaux peuvent avoir un impact significatif sur la congestion globale. Les autres modes de transport étant moins sujets à congestion, il est envisageable de se contenter d'un modèle plus simple pour ceux-ci.

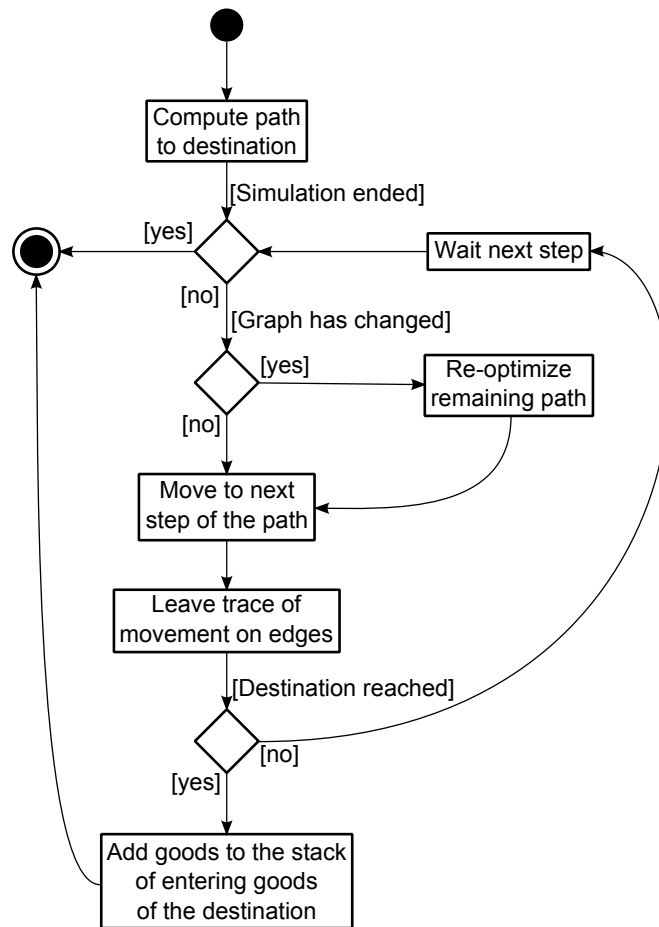


FIGURE 5.2 : Diagramme d'activité des agents représentant la marchandise en cours de déplacement sur le réseau de transport.

La marchandise en déplacement est modélisée par un agent « véhicule ». Le comportement de celui-ci est décrit par le diagramme d'activité de la figure 5.2. Son objectif est d'effectuer un déplacement sur un même sous-graphe entre deux agents représentant une infrastructure nodale. En fonction de la finesse de la modélisation recherchée, cet agent peut aller jusqu'à représenter un véritable véhicule, mais il peut aussi correspondre à l'agrégation de plusieurs véhicules si nécessaire (tel qu'un convoi de camions ou de barges). À la création de ces agents, un chemin entre le point de départ et la destination est calculé. L'agent peut ré-optimiser en temps réel le chemin si le réseau a été modifié. De plus, il laisse une trace de son passage sur les arêtes du graphe. Cette trace correspond à la quantité de marchandise transportée par l'agent. L'ensemble des traces laissées par tous les agents passant par une même arête est agrégé dans un attribut de l'arête. À chaque étape, un coefficient est utilisé pour faire diminuer les traces laissées par l'ensemble des agents. Ce mécanisme est inspiré par les algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis (Coloni et al., 1991 ; Dorigo, 1992). Dans ces derniers, des phéromones sont déposées par les fourmis mais s'évaporent progressivement. C'est notamment utilisés pour mettre en valeur des plus courts chemins (voir la partie 2.2.1 pour plus de

détails). Dans notre cas, la trace met en évidence les arêtes les plus fréquentées par les véhicules. L'évaporation permet de suivre la dynamique des flux. On peut ainsi observer en temps réel l'évolution du trafic sur l'ensemble du réseau. Si une perturbation du système survient et contraint les agents à éviter une zone jusqu'alors très passagère, cette zone prendra moins d'importance du fait de l'évaporation des traces et sera moins mise en surbrillance.

Par ailleurs, dans le modèle nous définissons la notion de véhicules pouvant être éphémères ou persistants. C'est à dire :

- si les véhicules sont éphémères : les agents n'existent que le temps du transport de la marchandise. Ils sont créés directement là où se trouve la marchandise au point de départ, et disparaissent au point d'arrivée dès que la livraison est accomplie.
- si les véhicules sont persistants : tous les véhicules à disposition sont créés dès le début de la simulation et ne disparaissent qu'à la fin de celle-ci. Lorsqu'un véhicule a une livraison à accomplir, il doit d'abord se rendre à l'endroit où se trouve la marchandise. Lorsque la livraison est accomplie, soit il reste là où il se trouve, soit il repart directement vers une autre cargaison à livrer, soit il doit se rendre dans un lieu spécifique (par exemple, l'entreprise à laquelle est rattachée le véhicule). Les agents persistants permettent au modèle d'être plus réaliste mais sont également plus délicats à mettre en place car cela peut soulever des interrogations supplémentaires quant à la modélisation. Par exemple, les agents persistants sont *a priori* des véhicules désagrégés. Cela suppose d'avoir certaines données supplémentaires (comme la taille de la flotte de véhicules par entreprise de transport). L'utilisation de véhicules persistants est notamment utile si on souhaite intégrer les déplacements à vide des véhicules.

5.2.2 Le couplage avec les agents

Les agents infrastructures diffusent également la liste des marchandises qu'ils peuvent traiter. Par exemple, certains terminaux maritimes sont spécialisés dans le conteneur alors que d'autres vont plutôt traiter du vrac. La connexion entre deux sous graphes se fait alors à la condition que l'infrastructure puisse gérer le type de marchandise que l'on souhaite faire passer. La notion de plus court chemin sur ce réseau multi-modal peut être en terme de durée de transport mais aussi en terme de coût (financier ou autre), mais dans tous les cas, le calcul doit prendre en compte le type de marchandises.

Le passage de la marchandise se fait au niveau des infrastructures nodales. L'agent infrastructure possède une capacité de traitement de la marchandise. Cela représente les moyens humains et matériels employés. Ce type d'agent ne peut traiter qu'un nombre limité de marchandises dans un délai défini. S'il y a trop de marchandises entrantes ou sortantes, des retards peuvent ainsi s'accumuler : cela représente le temps de rupture de charge qui évolue dynamiquement. Un agent modélisant un acteur pourra alors décider d'intégrer ou non une infrastructure nodale dans sa chaîne logistique si le temps moyen de rupture de charge des marchandises que cette infrastructure traite est supérieur aux infrastructures concurrentes.

5.3 Modélisation des acteurs par des agents

La figure 5.3 décrit comment les différents types d'agents qui modélisent des acteurs interagissent entre eux. Nous allons décrire ces acteurs et leurs interactions dans la suite de ce chapitre. Ces interactions sont facteurs de transfert d'informations ou de biens matériels. La

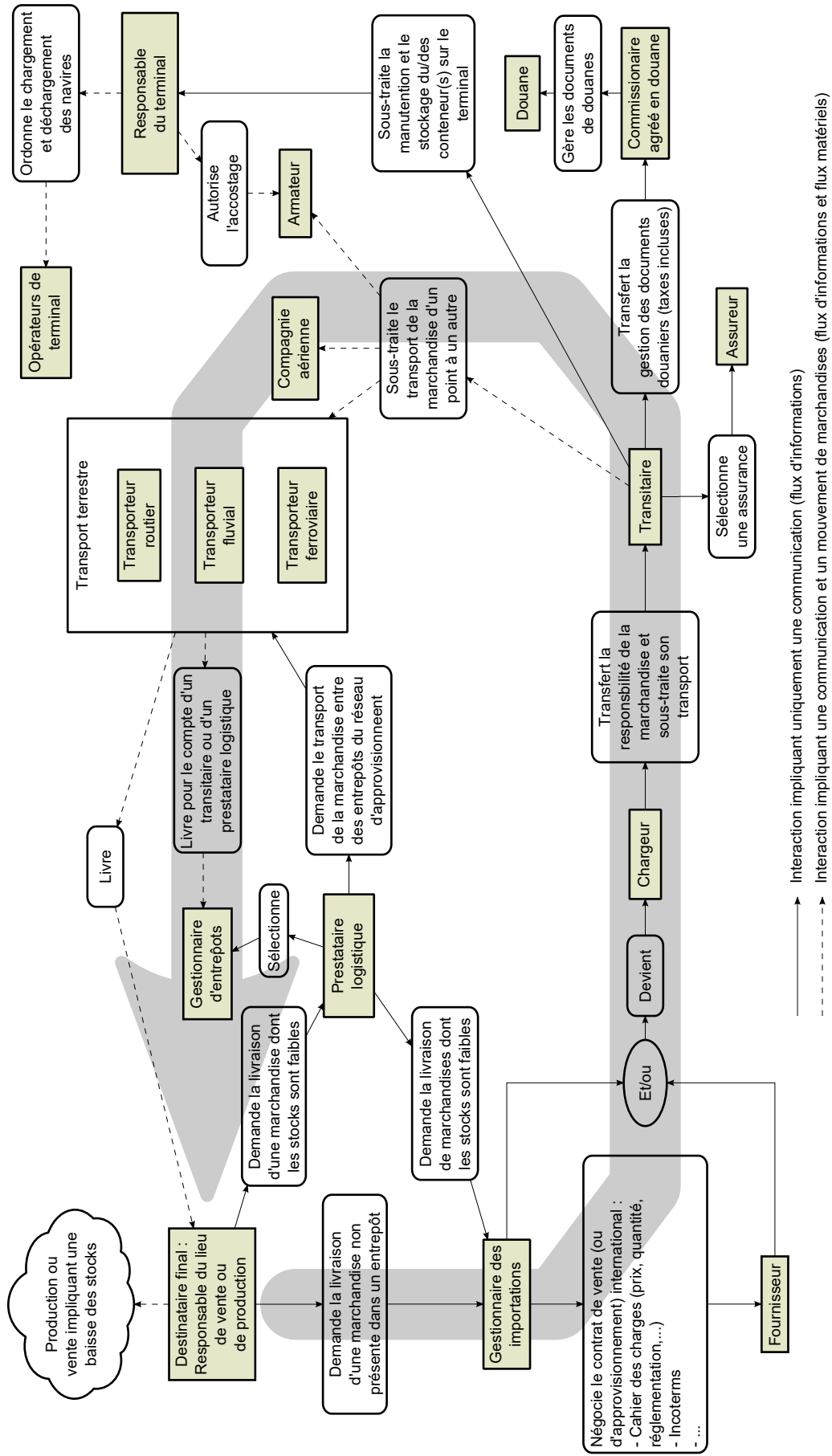


FIGURE 5.3 : Représentation du graphe des interactions possibles entre les agents.

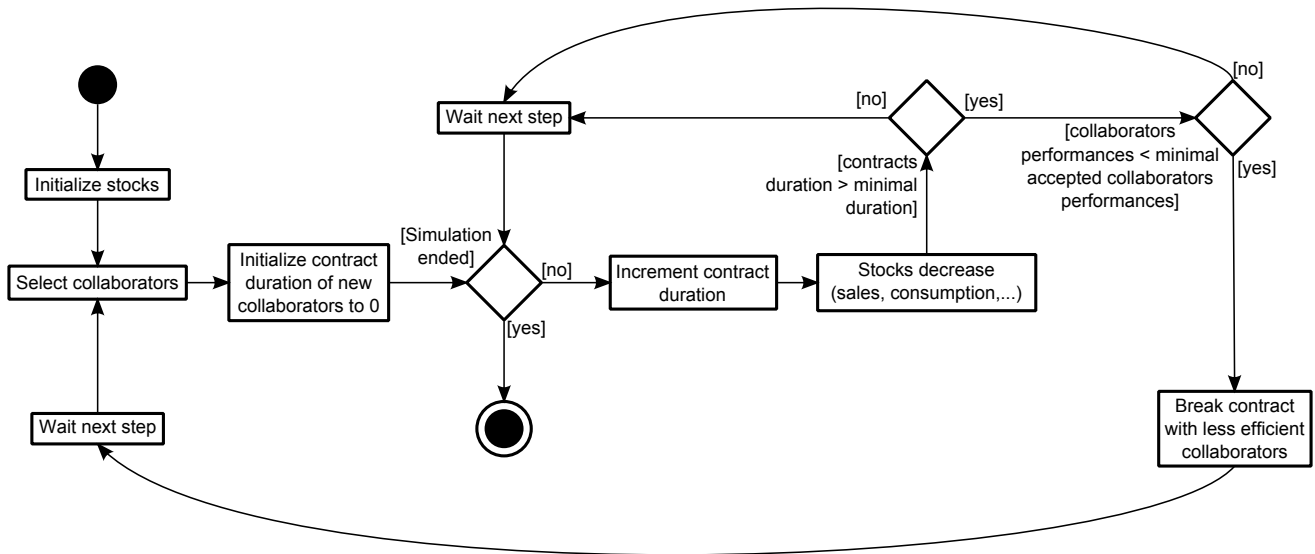


FIGURE 5.4 : Diagramme d'activité des agents représentant les destinataires finaux.

perception des agents de leur environnement ou leurs interactions avec d'autres agents peuvent modifier leurs comportements et donc leurs décisions. Il s'agit d'un mécanisme de rétro action conduisant à l'auto régulation du système simulé.

5.3.1 Les destinataires finaux

Le responsable de l'usine ou du magasin est ici considéré comme le destinataire final du système logistique. Cet agent est au cœur du modèle car il est à la fois celui qui initie la boucle du transport de la marchandise en générant le besoin, et il est celui qui la conclut en réceptionnant la marchandise. Il gère un stock local (au sein de son magasin ou de son usine) et sélectionne un prestataire logistique qui se chargera d'externaliser une partie de ses stocks dans des entrepôts. Le stock local de cet agent diminue selon une variable aléatoire biaisée. Par exemple, pour un magasin, le biais pourrait être introduit en fonction de la proximité et de la quantité d'acheteurs potentiels puisqu'il s'agit des principaux facteurs de ventes. Les travaux de [Huff \(1964\)](#) sur l'estimation de l'aire de marché d'un magasin serait alors un point de départ pour paramétrer le biais. Dans le cas d'une usine, la diminution du stock peut dépendre d'autres paramètres comme la vitesse de production. La figure 5.3 montre que le destinataire final collabore directement ou indirectement avec plusieurs agents. La figure 5.4 décrit les règles comportementales de cet agent qui définissent les circonstances dans lesquelles il sélectionne ses collaborateurs et le moment où il peut en changer. La sélection se base sur les performances moyennes des acteurs qui peuvent être actualisées automatiquement et en temps réel. Elles sont calculées, par exemple, en fonction du nombre de produits en rupture de stock, ou du temps nécessaire à la livraison des marchandises, ou des coûts financiers ou éventuellement de l'empreinte carbone.

5.3.2 Les prestataires logistiques

Au moment où un prestataire est sélectionné, celui-ci doit choisir quels entrepôts vont permettre d'externaliser la marchandise de son client. Ces entrepôts peuvent être organisés en

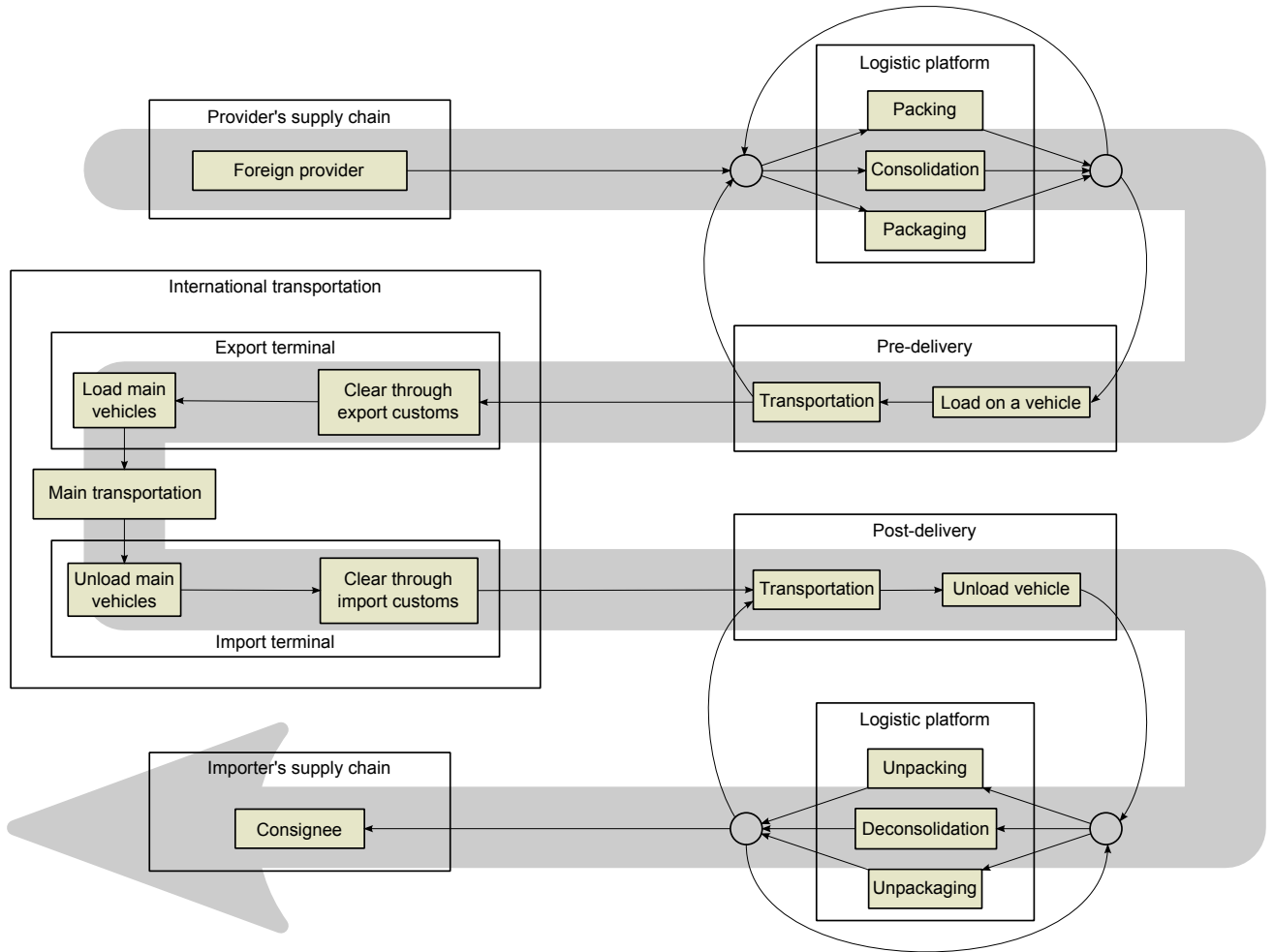


FIGURE 5.5 : Représentation simplifiée des différentes étapes empruntées par la marchandises conteneurisée au cours du transport international

réseau afin de limiter les coûts ou de satisfaire des contraintes vis à vis de la marchandise. Par exemple, la figure 5.5 décrit certaines étapes intermédiaires que des marchandises conteneurisées doivent subir au cours du transport tel que le dépotage. La manière d'établir le réseau d'entrepôts dépend de différents paramètres qui vont influencer sur le nombre de niveaux d'entrepôts, leur localisation et leur taille. Comme nous venons de le voir, le premier de ces paramètres concerne le type de marchandise :

- s'il s'agit de vrac, il faudra peut être intégrer un ou plusieurs silo(s) de stockage.
- s'il s'agit de biens conteneurisés, il faudra prévoir une infrastructure pour dépoter la marchandise du conteneur.
- s'il s'agit de denrées périssables, le prestataire préférera un circuit court avec moins de niveaux d'entrepôts.
- au contraire s'il s'agit de marchandises non périssables, tel que des meubles, on pourra utiliser un réseau d'atomisation (voir figure 3.3) de plusieurs niveaux.
- enfin, s'il s'agit de marchandises à forte valeur ajoutée, le prestataire devra investir dans des locaux sécurisés.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais on voit déjà la difficulté de concevoir un réseau d'entrepôt qui puisse satisfaire les contraintes de la marchandise et qui limite en même temps les coûts. Mais à cela s'ajoute également le deuxième paramètre qui dépend du système étudié. Par exemple, le système logistique rattaché au port d'Anvers est très ouvert à l'international. Il n'est donc pas rare de voir des réseaux de 3 niveaux ou plus, en commençant par un entrepôt de niveau continental. Le système rattaché au port du Havre est plus modeste. Les chaînes logistiques qui s'étalent sur tout le continent sont moins fréquentes et donc le nombre de niveaux du réseau est moins important en moyenne. Nous avons donc décidé que la méthode de sélection des entrepôts et de construction du réseau sera intégrée à l'implémentation et non pas au modèle général. On pourra ainsi créer plusieurs implémentations différentes qui traiteront de secteurs industriels différents (par exemple, parfumerie, alimentaire, ou divers,...) et qui s'appliqueront à différents systèmes logistiques (tels qu'Anvers ou le Havre).

Lorsque les stocks décroissent, le prestataire ordonne le réapprovisionnement depuis un autre entrepôt de la chaîne logistique. Et lorsque les stocks au sein de la chaîne sont trop faibles, il est nécessaire de faire une commande auprès d'un « fournisseur ». C'est alors le rôle du responsable d'importation de négocier un contrat de réapprovisionnement. Les comportements et propriétés de l'agent « importateur » peuvent être intégrés à l'agent « destinataire final » ou non. Cela permet de modéliser les cas où l'importation et la négociation des contrats sont effectuées par une centrale d'achat, par un grossiste, ou directement par le destinataire.

5.3.3 Les fournisseurs

Comme il a été dit précédemment, les fournisseurs sont à l'extérieur du territoire modélisé, mais ils font tout de même partie intégrante du système. Il est donc nécessaire de les modéliser à leur tour. Pour cela, il existe plusieurs possibilités qui dépendent notamment des besoins de la personne qui implémentera ce modèle ainsi que des données qu'elle possède sur ces fournisseurs. En effet, si on dispose d'une liste (exhaustive ou non) des fournisseurs qui travaillent avec les acteurs du territoire étudié, alors on peut représenter facilement chacun de ces fournisseurs par un agent. Ces agents « fournisseurs » pourront alors diffuser la liste des marchandises qu'ils sont susceptibles de fournir, dans quelle quantité, et à quel prix.

Par contre, si on ne dispose pas de telles informations, il devient difficile de faire ainsi car il serait nécessaire de travailler sur des données estimées ou fictives et potentiellement fausses. Ainsi, on peut tout simplement agréger l'ensemble des fournisseurs en un seul super-agent dont on suppose qu'il est capable de fournir n'importe quelle marchandise et dans n'importe quelle quantité. En effet, on peut supposer que dans la réalité il y aura toujours au moins un fournisseur capable de livrer la marchandise voulue. Le lecteur notera tout de même qu'avec cette représentation, on ne peut intégrer la notion de coût de la marchandise à moins de se contenter de valeurs moyennes. Il n'existera donc pas, ou difficilement, de mécanisme concurrentiel pouvant faire varier les prix.

Cette modélisation des acteurs « fournisseurs » n'est bien sûr pas figée. La personne qui implémente le modèle est libre d'imaginer d'autres représentations, voir de coupler le modèle du système logistique avec d'autres modèles. L'intérêt du fournisseur est surtout d'intégrer une entrée au système. Dans le cas où on n'a pas de liste exhaustive des fournisseurs, on peut d'ailleurs utiliser plusieurs super-agents, chacun connecté à une entrée différente du territoire afin de mesurer la compétitivité entre celles-ci.

5.3.4 Les commissionnaires de transport

Un agent « commissionnaire de transport » est sélectionné en fonction du contrat, soit par le fournisseur, soit par le responsable d'importation. Cet agent se charge d'organiser une chaîne de transport de la marchandise depuis la localisation du fournisseur et vers les entrepôts gérés par le prestataire logistique. Il calcule ainsi un itinéraire potentiellement multi-modal (cela dépend des coûts ou éventuellement de ses habitudes ou spécialités) et prend contact avec chaque agent « infrastructure » afin d'organiser et de rémunérer leur service de gestion de la marchandise. Ensuite, il choisit pour chaque mode les agents « transporteurs » capables d'acheminer la marchandise sur ces sections du réseau. Il doit également sélectionner un agent « assureur » qui assurera la marchandise, et un agent « commissionnaire en douane » qui gèrera les documents douaniers. On notera que certains agents, comme dans la réalité, peuvent cumuler les rôles de commissionnaire de transport, de commissionnaire en douane, et/ou de transporteur. Toutefois, nous ne détaillerons pas dans cette thèse les agents « assureur » et « commissionnaire en douane » bien qu'un utilisateur du modèle pourrait les intégrer s'il est davantage intéressé par les échanges « sociaux ». En effet, leurs comportements n'influent que très peu, voir pas du tout, sur les décisions logistiques et donc sur les flux physiques.

5.3.5 Les transporteurs

Les agents « transporteurs » diffusent la liste des modes de transport qu'ils sont capables de gérer. Pour chaque demande d'un autre agent, ils informent du coût (financier ou autre) du transport d'une marchandise dont l'agent demandeur aura spécifié le type et le volume. Si l'agent demandeur est satisfait du prix, alors un agent « véhicule » est mis à disposition, et il transportera la marchandise jusqu'à destination. L'implémentation de ce type d'agent pourra en plus inclure un nombre de véhicules à disposition. Si l'ensemble des véhicules est utilisé, alors soit l'agent refusera de satisfaire de nouvelles demandes, soit la marchandise devra attendre la disponibilité d'un véhicule ce qui pourra entraîner des retards et donc des ruptures de stocks.

5.3.6 Un modèle rétro-actif

On notera que les agents-acteurs peuvent avoir un impact sur leur environnement. Leurs décisions vont agir sur le réseau en augmentant le trafic sur les zones les plus accessibles et/ou les plus efficaces. Cela va conduire à des congestions voir des embouteillages. Mais puisque les agents adaptent en temps réel leurs décisions à leur environnement, celui-ci va rétro agir sur ces décisions. Les zones du système qui sont congestionnées deviennent moins efficaces et moins accessibles. Elles sont donc moins attractives et seront moins sélectionnées, conduisant à moins de congestions. On est ainsi en face d'un mécanisme de rétro action du modèle qui devrait amener le système à rechercher un état d'équilibre optimal même dans le cas de perturbations.

5.3.7 Perturbation du système et adaptation des agents

L'un des intérêts d'une simulation est de pouvoir proposer des scénarios d'évolution. Il est ainsi intéressant d'introduire un agent « perturbateur ». Il aura le rôle d'exécuter des scénarios définis à l'avance, ou en temps réel, par l'utilisateur afin de limiter, voir de bloquer certaines capacités des agents, temporairement ou définitivement. On peut par exemple imaginer qu'un ou plusieurs fournisseur(s) ne seront pas en mesure de livrer un ou plusieurs type(s) de mar-

chandises. Il pourrait aussi ralentir les véhicules, bloquer certaines infrastructures spécifiques (comme un terminal) ou toute une zone. L'intérêt de cet agent serait de pouvoir observer le comportement du système lorsque celui-ci est confronté à une perturbation, mais également de déterminer dans quelles mesures le système peut revenir à un état stable. C'est donc la capacité de résilience du système qu'un tel agent pourrait tester.

Pour conclure cette partie, on remarquera la flexibilité du modèle. En effet, il intègre une dimension spatiale et dynamique qui peut s'adapter à plusieurs systèmes logistiques différents. Il intègre également une dimension complexe au travers des interactions entre les acteurs et l'environnement. Les phénomènes de rétro-actions qui s'opèrent rendent le modèle complexe, à l'image de la réalité.

IMPLÉMENTATION GÉNÉRALE

6.1	Choix d'une plateforme de simulation	79
6.1.1	Anylogic	80
6.1.2	Netlogo	80
6.1.3	Repast Symphony	81
6.1.4	GAMA	81
6.2	Méthodologie d'implémentation	81
6.2.1	Les agents	82
6.2.2	Le territoire	84

Ce chapitre est consacré à la description de la méthodologie mise en œuvre pour implémenter le modèle conceptuel dans une plateforme de simulation multi-agent. Les aspects principaux du modèle ont été développés progressivement afin de ne garder que ceux essentiels au fonctionnement de la simulation. Celle-ci se restreint aux aspects de flux physique des marchandises et de flux d'informations entre les acteurs. Elle n'intègre donc pas les flux financiers bien qu'il serait possible de les intégrer sous réserve de posséder certaines données supplémentaires. Cette implémentation tente d'être aussi générale que possible. La méthodologie décrite ici peut donc être appliquée quelque soit le système logistique que l'on souhaite représenter. La première partie de ce chapitre présente différentes plateformes de simulation et montre comment nous avons orienté notre choix sur la plateforme GAMA. Ensuite, nous décrivons la méthodologie d'implémentation : quels sont les différents agents ? Comment fonctionnent-ils ? etc.

6.1 Choix d'une plateforme de simulation

Avant d'aborder les différentes plateformes envisagées, on va se concentrer sur les critères de sélection. En tout premier lieu, nous savons que nous allons devoir intégrer des données géographiques. En effet, nous souhaitons intégrer un réseau de transport, ainsi que la position géographique des différents acteurs, dont les destinataires finaux. On verra d'ailleurs dans le chapitre suivant que ces données nous seront fournies sous la forme de Shapefile. Ensuite, on

recherche une plateforme qui puisse nous laisser la liberté d'ajouter des fonctionnalités, voir de modifier celles fournies par défaut. Cela permettra d'être au plus proche de notre vision du modèle. Enfin, on recherche une plateforme qui nous permettrait de gérer un nombre d'agents suffisamment grand afin d'obtenir une simulation réaliste. En effet, nous verrons plus tard que le réseau routier dénombre à lui seul un peu plus de 10 000 routes.

Au vue de nos propres compétences, et à la lecture de certaines études recensant et comparant les différentes plateformes (Railsback et al., 2006 ; Allan, 2010 ; Kravari and Bassiliades, 2015), quatre d'entre elles ont retenu notre attention : Anylogic (Borshchev, 2013), GAMA (Taillandier et al., 2012), Netlogo (Wilensky, 1999), et Repast Symphony (North et al., 2013). Zargayouna et al. (2013) avaient permis d'écarter Jade (Bellifemine et al., 2007), Mason (Luke et al., 2005), Swarm (Minar et al., 1996) ou encore Madkit (Gutknecht and Ferber, 2001) car ces plateformes ne permettent pas d'intégrer facilement des données géographiques, ou proposent des fonctionnalités limitées dans ce domaine.

6.1.1 Anylogic

Anylogic est développé par une société privée (The Anylogic Company) mais le logiciel trouve son origine auprès d'un groupe de chercheurs de l'université Technique de Saint-Petersbourg. Cette plateforme s'oriente vers la simulation de modèles pouvant être représentés par des systèmes dynamiques, des systèmes à événements discrets, ou encore par des systèmes multi-agents. Au vue de son site Web¹, Anylogic est clairement prévu pour simuler des modèles axés autour de la logistique, ou du transport de marchandise. Ses dernières versions permettent la manipulation de données géographiques. La plateforme propose également des fonctionnalités pour distribuer une simulation ce qui permettrait de simuler le comportement d'un grand nombre d'agents. Néanmoins, cette plateforme propriétaire n'est pas open-source et les licences d'utilisations sont de l'ordre de 3500\$ pour de la recherche universitaire. Cela conduit à de sérieux doutes concernant la réelle liberté de développement du modèle, mais il s'agit également d'un frein pour la ré-utilisabilité de son implémentation par d'autres personnes.

6.1.2 Netlogo

Netlogo est un environnement de développement de systèmes multi-agents très populaire dans l'enseignement et dans la recherche. Développé au sein de l'université de Northwestern, cet outil est largement adopté par la communauté scientifique pour décrire des phénomènes d'émergences dans différents domaines d'application comme en témoigne sa bibliothèque de modèles pré-installés. Sa notoriété et sa simplicité d'utilisation rendent les modèles développés avec cette plateforme facilement compréhensible et ré-utilisable. Netlogo peut également intégrer des données géographiques, et on peut configurer la plateforme pour qu'elle soit capable de gérer un grand nombre d'agents. Néanmoins, le langage Netlogo en lui-même est surtout procédural. Il ne nous semble pas adapté à la création de modèles dont les types d'agents sont très variés. On lui préférerait un paradigme orienté objet.

1. <http://www.anylogic.com/>

6.1.3 Repast Symphony

Repast Symphony a été développée à l'origine au sein de l'université de Chicago. Cette plateforme fournit tout un ensemble d'outils permettant la modélisation de systèmes multi-agents dans différents langages (mais principalement Java). Elle intègre des fonctionnalités de gestion des données géographiques et permet des performances suffisantes lors de l'exécution de simulations à grande échelle. Tout comme Netlogo, Repast est très populaire et a été utilisé dans différents domaines d'applications. Son environnement de développement offre donc une grande liberté dans la manière de créer une simulation. Puisqu'il s'agit d'un projet mature, open-source et très répandu, Repast permet une ré-utilisabilité des implémentations. Il s'agit donc d'un candidat sérieux.

6.1.4 GAMA

La plateforme GAMA est développée par plusieurs équipes de recherche, en France et au Vietnam, sous la direction de l'unité de recherche internationale UMMISCO². Son orientation première est la simulation de modèles orientés agents et spatialisés. L'intégration de données géographiques est donc l'une de ses fonctionnalités natives. De plus, GAMA prévoit d'exécuter des simulations à grande échelle (jusqu'à plusieurs millions d'agents). Elle propose de coupler plusieurs niveaux d'échelles, ainsi que différents types d'environnements (discrets ou continus, ou des réseaux). Enfin, GAMA est open-source et intègre un mécanisme autorisant la création de plug-ins personnalisés. Cela permettrait de modifier entièrement son comportement, ou simplement d'ajouter de nouvelles fonctionnalités. Tout comme pour Repast, GAMA se veut d'être un candidat sérieux pour la sélection d'une plateforme de simulation. De plus, GAMA nous a semblé plus facile à appréhender lors de nos tests préliminaires. Il faut également noter qu'un des développeurs de GAMA travaille dans le laboratoire UMR-IDEES à Rouen et sa proximité géographique nous a permis de le rencontrer. Cela a facilité les échanges pour approfondir nos connaissances de la plateforme GAMA que nous avons finalement choisie.

6.2 Méthodologie d'implémentation

Cette partie est consacrée à la méthode employée pour implémenter le modèle. Il s'agit ici de donner les clés nécessaires à la reconstruction de la simulation quelque soit le système étudié, et donc indépendamment des données. Une personne qui chercherait à implémenter le modèle afin de simuler un système particulier serait susceptible d'adapter, ou de compléter cette méthode. On notera que l'implémentation est axée sur le flux de marchandise sur le territoire. Elle comprend donc les interactions entre les agents et le déplacement physique des produits, mais elle n'inclut pas les échanges financiers. On abordera rapidement l'implémentation de la multi-modalité mais nous ne la détaillerons pas. En effet tous les systèmes logistiques ne proposent pas nécessairement plusieurs modes de transport (autres que maritime et route) ou ne sont que peu utilisés. Cela relève donc plus d'une implémentation spécifique à un système particulier.

2. Unité Mixte Internationale de Modélisation Mathématiques et Informatique des Systèmes Complexes.

6.2.1 Les agents

6.2.1.1 Les fournisseurs

Nous allons commencer par les agents de type « fournisseur ». Ils modélisent un agrégat de fournisseurs extérieurs au système. On suppose qu'un destinataire final pourra toujours trouver un fournisseur au sein de cet agrégat capable de satisfaire sa demande. Ainsi, un agent « fournisseur » est toujours capable de fournir des marchandises, quelque soit le produit recherché, et la quantité désirée. Chacun d'entre eux n'est connecté qu'à une seule entrée du système. Ils jouent donc ici le rôle de nœud d'accès. Chaque commande de marchandise passée par un acteur du système sera envoyée dans une structure de données de type « file d'attente »³. Un fournisseur ne peut traiter qu'un nombre limité de commande par unité de temps. Cela permet de représenter les différentes capacités des nœuds d'accès (et notamment les capacités portuaires).

6.2.1.2 Les destinataires finaux

Les agents « destinataires finaux » représentent les magasins ou industries répartis sur le territoire. Ils possèdent un stock local qui s'épuise du fait des ventes ou de la production d'autres produits. Chaque véritable acteur peut être représenté par son propre agent. On ne cherche pas ici à avoir un agent qui agrégerait plusieurs acteurs. La taille du stock de chaque agent est une donnée à fournir en entrée du système. Dans l'idéal cette donnée est sous la forme d'un volume disponible, mais *a minima*, on peut se satisfaire d'une surface d'entreposage. La vitesse à laquelle les stocks baissent dépend de l'agent puisque certains agents vendent ou produisent plus que d'autres. On peut supposer qu'un acteur est plus susceptible de vendre ou de produire, s'il a davantage de clients. Nous avons donc décidé d'utiliser un modèle gravitaire pour déterminer ce nombre de clients et ainsi paramétrer cette vitesse. Le calcul est fonction de la densité de population autour de l'agent, et de l'accessibilité de celui-ci au sein du réseau. Le modèle de Huff (1964) a été proposé en 1964 et permet de mesurer l'importance de l'aire de marché d'un magasin. Huff propose une formule mathématique calculant le nombre total de clients potentiels.

Soit, la probabilité P_{ij} d'un client, positionné à un endroit donné i , de se déplacer vers un magasin donné j , tel que :

$$P_{ij} = \frac{\frac{S_j}{T_{ij}^{\lambda_j}}}{\sum_{k=1}^n \frac{S_k}{T_{ik}^{\lambda_k}}}$$

Avec :

- S_j : la surface de vente du magasin.
- T_{ij} : le temps de trajet qu'un client doit effectuer pour aller de i à j .
- λ : un paramètre à déterminer qui permet de refléter la réticence (ou non) des clients potentielles à effectuer des trajets plus ou moins long en fonction du type de magasin. Par exemple, une personne est potentiellement prête à faire plus de route pour se rendre dans un magasin spécialisé que pour aller dans un commerce généraliste.

3. La première commande qui entre dans la file sera la première à pouvoir en sortir

Il est alors possible de calculer le nombre de clients potentiels du magasin j et provenant de i :

$$E_{ij} = P_{ij} \times C_i$$

Avec :

- E_{ij} : le nombre de clients attendus provenant de i et allant dans le magasin j .
- C_i : le nombre d'individus présent à i .

Le nombre total de clients potentiels du magasin j est donc :

$$T_j = \sum_{i=1}^n E_{ij}$$

En se basant sur le réseau de transport et le nombre d'habitants dans chaque commune du territoire, il est alors possible de classer chaque agent en fonction de son nombre de clients potentiels. En transposant ce classement sur une fonction affine (ou logarithmique éventuellement), il est possible de déterminer une vitesse de diminution des stocks pour chaque agent, comprise entre une borne minimale et une maximale. Une fois par jour, le stock d'un agent baisse donc d'une quantité aléatoire, mais biaisée en fonction de cette vitesse.

6.2.1.3 Les prestataires logistiques

La chaîne logistique d'un agent destinataire est gérée par un agent « prestataire logistique » dont nous détaillerons le comportement ci-après. Il est toutefois nécessaire de retenir que ces prestataires n'offrent pas tous le même niveau d'efficacité. Chaque agent destinataire est alors capable de mesurer la performance de son collaborateur et de déterminer si ce dernier est plus efficace que ses concurrents. Si ce n'est pas le cas, l'agent destinataire peut décider de changer de prestataire logistique. La mesure de performance employée peut varier d'une simulation à l'autre. Cela va dépendre si on souhaite mettre l'accent sur la durée de transport, ou sur son coût par exemple.

Les agents « prestataires logistiques » modélisent le rôle de superviseur de l'interface port-ville que nous évoquions dans la partie 3.1.3. Un agent destinataire n'est en relation qu'avec un seul prestataire à la fois. Par contre, un prestataire peut avoir plusieurs clients. Ils sont chargés de construire et de gérer un réseau d'approvisionnement pour leurs clients afin d'externaliser une partie de leurs stocks à moindre coût en mutualisant les surfaces d'entreposage. La manière de créer le réseau dépend du système et/ou de la filière étudié(s). En effet, certains systèmes sont plus disposés à intégrer des réseaux constitués de trois niveaux de centres de distribution, contre deux niveaux pour d'autres systèmes. Le type de marchandises influe également puisqu'on préférera des circuits courts pour les marchandises périssables, et des circuits longs pour des marchandises pouvant se conserver. La topologie du réseau d'approvisionnement et la localisation des entrepôts qui le constituent auront un impact important sur l'efficacité de l'agent. Ils lui permettront une meilleure mutualisation de la surface d'entreposage, mais aussi une meilleure réactivité et des coûts de transport plus faibles. À l'aide d'un algorithme de parcours de graphe (un simple algorithme de parcours en profondeur par exemple), le prestataire pourra vérifier une fois par jour si les stocks au sein d'un entrepôt sont faibles. Si c'est le cas, le prestataire devra ordonner le transfert de la marchandise manquante depuis un entrepôt de plus haut niveau, voir depuis le fournisseur.

Le fournisseur est le seul à pouvoir créer de la marchandise qui est représentée par un type d'agent « stock ». Ces agents s'apparentent plus à de simples structures de données car ils sont

inertes (au sens où ils n'ont pas de comportement particulier). Ils permettent d'associer un type de produit, une quantité, et un propriétaire. Ils sont localisés quelque part sur le territoire, dans un bâtiment ou dans un véhicule. La quantité va déterminer la place qu'occupe l'agent dans ces bâtiments ainsi que le nombre de véhicules nécessaires au transport. Si on implémente un système logistique pour n'étudier qu'une filière en particulier, alors il est intéressant d'avoir des données supplémentaires sur les produits. On peut déterminer le volume qu'occupe un produit par unité, ou encore les activités logistiques nécessaires. Par contre, si on n'étudie pas une filière en particulier, la diversité de produits dans la réalité est trop importante pour qu'ils soient tous modélisés. Il est alors possible de ne considérer que des produits factices dont on aura déterminé les caractéristiques (notamment le volume).

La demande de marchandises faite par un prestataire afin de livrer un entrepôt ou un de ses clients se fait au travers d'un agent « commande ». Comme pour la marchandise, cet agent est plus une simple structure de données. Il permet d'associer l'endroit où la marchandise doit être livrée, le type du produit et la quantité désirée, le prestataire qui fait la demande, et le propriétaire de la marchandise.

6.2.2 Le territoire

6.2.2.1 Les infrastructures nodales

Les agents « entrepôts » proposent une surface d'entreposage qui leur permet de contenir un nombre limité d'agents « stock ». Cette surface d'entreposage peut être partagée entre plusieurs prestataires. Dans le cadre où on n'implémente pas une filière en particulier et que les produits ne sont pas réels, alors on ne peut pas déterminer quelles activités doivent être effectuées. On se contente alors d'une activité d'entreposage seul.

La figure 6.1 décrit comment sont gérées les marchandises en entrée et en sortie de l'entrepôt. Lorsque l'entrepôt reçoit des marchandises, les stocks entrants sont placés dans une file d'attente. L'agent va traiter son nombre maximal de stocks dans le temps imparti afin d'intégrer les stocks entrants dans les stocks de l'entrepôt. Les commandes sont elles aussi intégrées dans une file d'attente et seront traitées au fur et à mesure en fonction des capacités de l'entrepôt. Chaque jour, l'entrepôt liste l'ensemble des commandes qu'il est capable de traiter, et va assembler des lots de marchandises ayant la même destination.

Les agents « terminaux » sont similaires aux entrepôts : ils ont une liste des lots de marchandises entrants et une autre des lots sortants. Ils ont également une capacité de traitement par unité de temps. Par contre, la marchandise n'est pas entreposée. Quand elle rentre, elle attend d'être traitée. Et une fois qu'elle est traitée elle est directement placée dans la liste des stocks sortants. L'intérêt d'avoir deux listes est qu'il est possible d'avoir des capacités de traitement différentes en entrée et en sortie. L'objectif de ces agents est uniquement de connecter deux sous-réseaux entre eux pour permettre la multi-modalité du réseau. Si on n'implémente pas un système qui inclut la multi-modalité, alors ce type d'agent est optionnel.

6.2.2.2 Les réseaux

Lorsqu'ils sont sur un réseau, les lots sont intégrés dans des agents « véhicules » qui agrègent l'ensemble des moyens de transport ayant une même origine-destination. Nous avons vu dans le chapitre précédant décrivant le modèle que le réseau de transport est en fait composé de

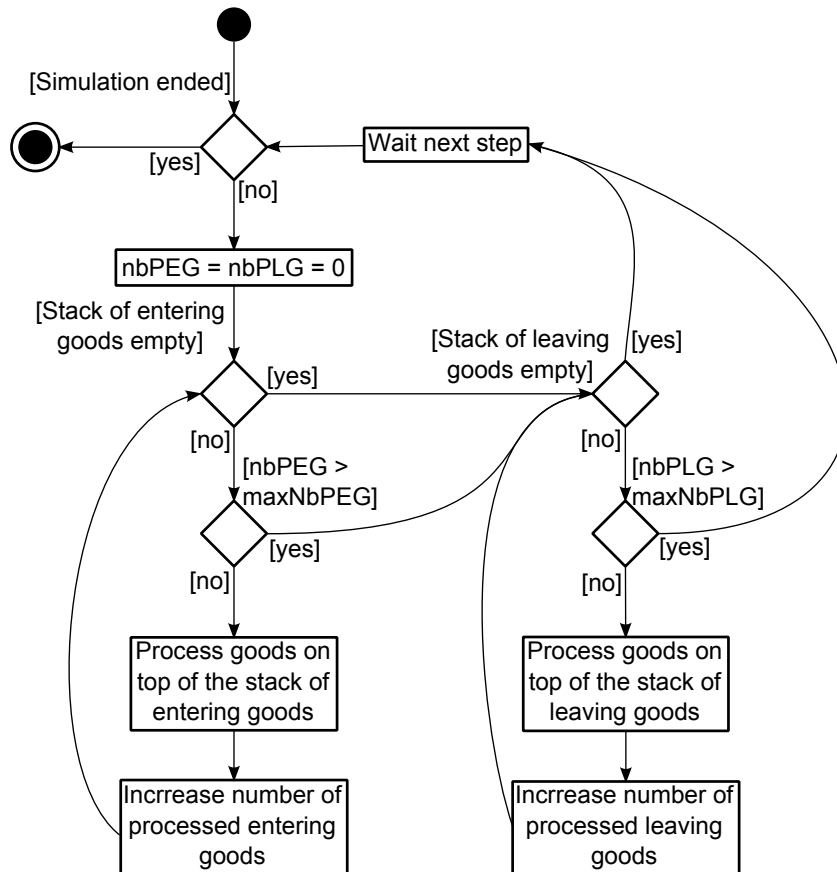


FIGURE 6.1 : Diagramme d'activité des agents représentant les infrastructures logistiques.
 - nbPEG : nombre de marchandises entrantes et traitées ; maxNbPEG : nombre maximal de marchandises entrantes pouvant être traitées par cycle ; nbPLG : nombre de marchandises sortantes et traitées ; maxNbPLG : nombre maximal de marchandises sortantes pouvant être traitées par cycle.

plusieurs sous graphes. Il existe donc un type de véhicule pour chaque sous graphe. Ainsi, les véhicules ne sont capables de se déplacer que sur le graphe qui leur est associé.

Au sein de l'implémentation, on va conserver plusieurs représentations du réseau. Premièrement, on stocke chaque sous graphe de manière indépendante pour que les véhicules sachent précisément au sein de quel réseau ils peuvent se déplacer. Ils effectuent la recherche de chemins à l'aide d'un algorithme classique de Dijkstra qui prend en compte les vitesses et les longueurs des arêtes du réseau sur lequel ils se déplacent. Deuxièmement, on garde en mémoire le réseau complet qui accumule chaque sous graphe. Ceux-ci sont interconnectés entre eux grâce aux agents « entrepôts » et « terminaux », eux-mêmes convertis en nœud. S'il n'existe pas déjà de nœud équivalent à l'agent dans les sous graphes, alors on crée le nœud et on le connecte aux nœuds les plus proches des sous graphes (uniquement au sein des graphes dont on sait que l'agent est connecté). Cette représentation du réseau complet permet aux prestataires logistiques de rechercher des chemins multi-modaux depuis ou vers un entrepôt. L'algorithme de recherche de plus court chemin doit alors être adapté pour prendre en compte le temps ou le coût nécessaire au transfert de la marchandise d'un sous-graphe à un autre. Ainsi, si un terminal est engorgé, un chemin multi-modal intéressant passant par ce terminal pourrait être écarté

des solutions envisageables.

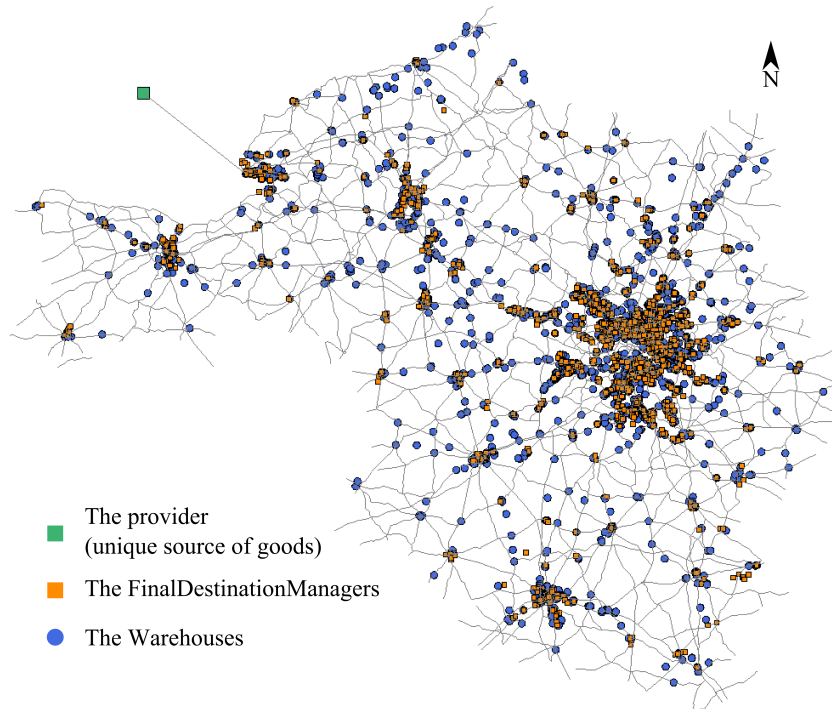


FIGURE 6.2 : Le réseau routier et la position des agents au cours d'une simulation exécutée au sein de la plateforme GAMA.

La figure 6.2 montre une partie des agents répartis sur le territoire. Le modèle est capable de s'adapter aux données qu'on lui fournit en entrée. Il est donc tout à fait possible de modifier la configuration spatiale des agents et du réseau sans ré-implémenter le modèle. Celui-ci s'avère donc très modulable et permet facilement de simuler différents scénarios : que se passe-t-il si on ajoute des entrepôts à tel endroit ? Comment le système va réagir si on supprime ou on ajoute une autoroute au cours de la simulation ? Ces capacités pourront apporter une aide à la décision à des logisticiens ou à des aménageurs du territoire.

ÉTUDE DE CAS

7.1	Présentation du contexte	88
7.2	Implémentation de l'axe Seine	90
7.2.1	L'implémentation du territoire	90
7.2.2	La dynamique des stocks	91
7.2.3	La dynamique des interactions	93
7.3	Analyse des résultats	96
7.3.1	Mesures statiques	96
7.3.2	Mesures dynamiques	103

En Europe, mais pas seulement, il existe de nombreux exemples de configurations qui lient un système portuaire avec un ensemble de métropoles comme sur la figure 7.1. C'est le cas des couples formés par la Tamise et le grand Londres, ou encore par les ports du Benelux et de l'hinterland autour du Rhin. On peut aussi évoquer les ports de la baie de Heligoland et les grandes villes de l'Europe centrale et orientale. Chacune de ces configurations forment des systèmes logistiques particuliers. Ils ont tous leurs propres contraintes, règles de fonctionnement,... L'objectif de ce chapitre est de montrer comment implémenter le modèle décrit dans les chapitres précédents pour le cas de l'axe Seine. Il est tout de même important de garder à l'esprit que cette simulation pourrait s'appliquer à d'autres systèmes à la condition d'effectuer certaines modifications en fonction des contraintes géographiques ou politiques du corridor choisi. Dans un premier temps, nous décrirons le territoire de l'axe Seine et son contexte économique et politique. Cela nous permettra ensuite de présenter comment nous avons implémenter le modèle pour ce système en particulier. Enfin, dans une dernière partie, nous présenterons des résultats qu'un ensemble de mesures et méthodes d'analyses nous a permis d'acquérir pour étudier le système.

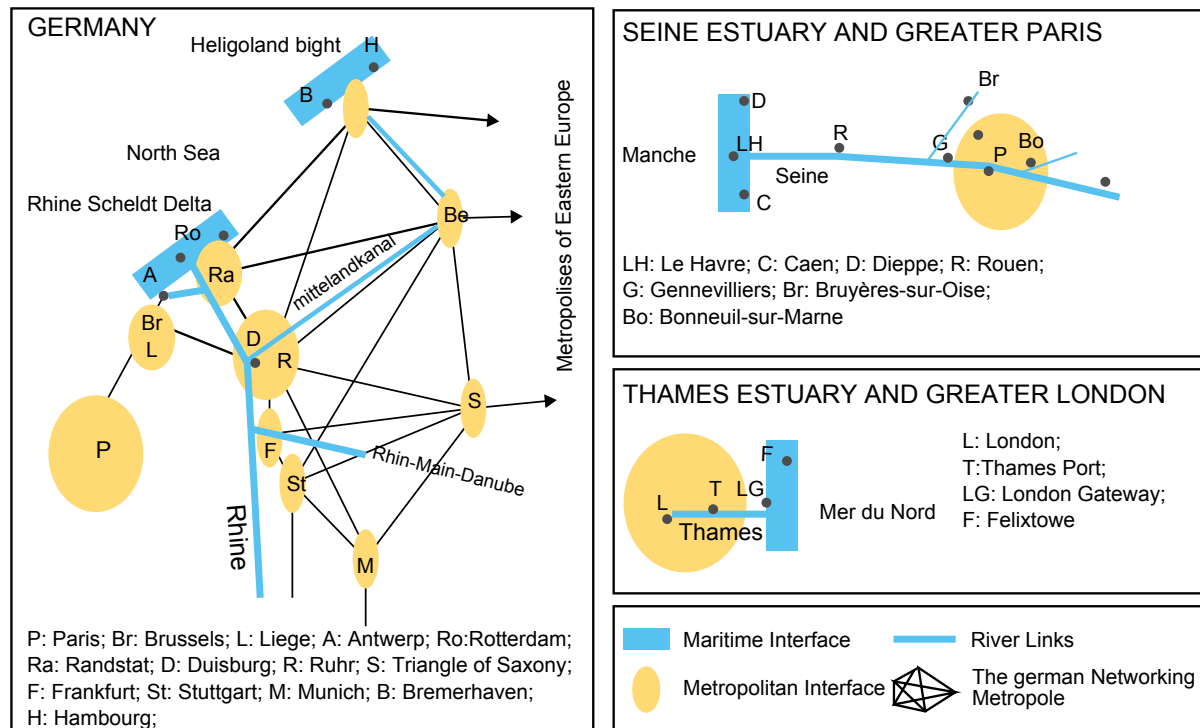


FIGURE 7.1 : Trois exemples de relations entre le système portuaire et l'hinterland. Auteur : Laurent Lévêque.

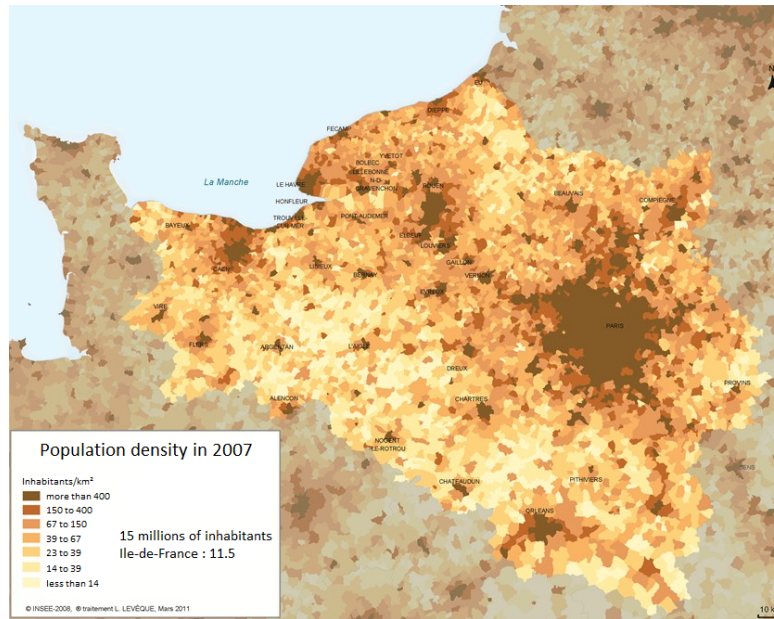
7.1 Présentation du contexte

Le fleuve de la Seine dessine un couloir naturel entre le port international du Havre et la région parisienne (voir figure 7.2). Cette dernière est l'aire urbaine la plus importante de cet espace géographique en terme de population. Elle représente à elle seule 11 millions d'habitants. Il existe également d'autres régions économiquement attractives telles que Rouen, Caen ou Orléans. Le système logistique abrite dans sa globalité environ 15 millions d'habitants¹ sans compter les visiteurs tels que les touristes (environ 32,2 millions de visiteurs par an à Paris en 2014²).

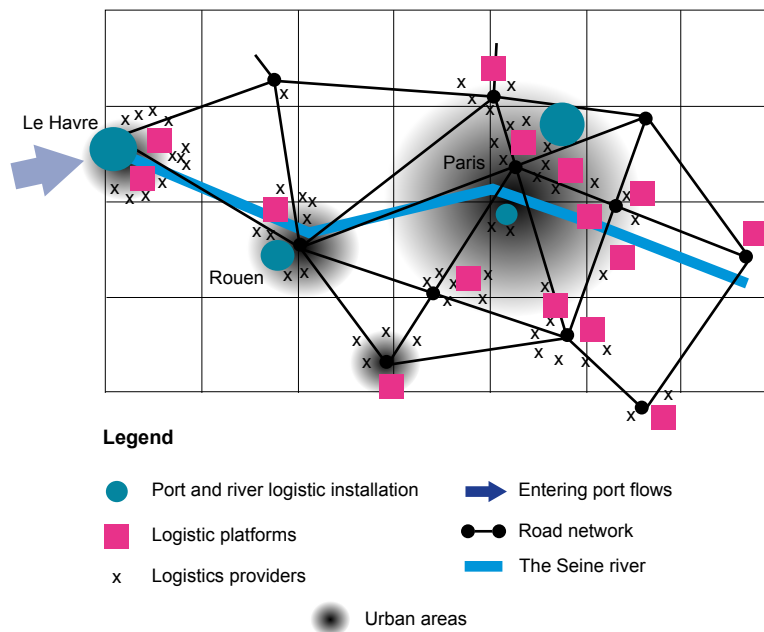
La proximité du port du Havre par rapport à la région parisienne fait de celui-ci une porte d'entrée naturelle de ce système. Pourtant la taille importante de la métropole parisienne attire également des acteurs qui ne se trouvent pas sur l'axe Le Havre-Paris. Et c'est donc ainsi qu'une part importante du flux de marchandises à destination de cette métropole provient également du port d'Anvers. Une compétition se manifeste en effet entre ces deux ports. Chacun voulant proposer les meilleurs services logistiques : des terminaux très efficaces, des plateformes logistiques très connectées aux différents réseaux, une fluidité optimale du trafic,... Plus généralement, c'est l'ensemble des ports du range Nord-Européen qui est en constante compétition. Il en résulte des enjeux économiques et politiques très importants afin de gagner des parts de marché.

1. Source (consulté le 25 septembre 2014) : INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) - Populations légales de 2011 des départements et des collectivités d'outre-mer.

2. Source (consultée le 22 Juin 2015) : Bilan de l'année touristique 2014 à Paris Île-de-France (février 2014) du Comité Régional de Tourisme de la région de Paris.



(a) Densités de population sur l'axe Seine



(b) Une représentation simplifiée de l'axe Seine et de ses acteurs et infrastructures.

FIGURE 7.2 : Le territoire de l'axe Seine. Auteur : Laurent Lévêque.

C'est dans cette dynamique compétitive que le gouvernement français a mis en place la réforme portuaire de 2008, et qu'un projet de réforme des douanes est en cours. Ces réformes ont pour ambition de faciliter le passage portuaire en simplifiant les démarches administratives liées aux ports. C'est ainsi qu'HAROPA est apparue. Il s'agit d'un *groupement d'intérêt économique* : une structure qui rassemble les Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen, et les Ports de Paris. Son objectif est d'unifier ces trois ports afin d'améliorer les conditions de transport des marchandises sur l'axe Seine grâce à une gestion collaborative.

À l'échelle européenne, certains projets ont également vu le jour pour permettre d'améliorer

les corridors logistiques. C'est par exemple le cas du projet Weastflows (West and East Flows) qui vise notamment à promouvoir le report modal vers le fluvial ou le ferroviaire à la place de la route qui est trop engorgée. D'ailleurs l'axe Seine est l'un des systèmes au sein duquel la route est le mode de transport le plus favorisé (à raison d'environ 90%) alors même qu'il possède un fleuve dont les conditions de navigation seraient particulièrement propices à cette activité. Le projet est d'ailleurs soutenu par l'Agence d'Urbanisme de la Région du Havre et de l'Estuaire de la Seine (AURH). Cette agence a vocation à soutenir les acteurs de la région pour l'aménagement du territoire et elle souhaite donc contribuer à la promotion du fluvial qui s'avérerait un atout économique pour l'axe Seine.

De nombreux projets de recherches scientifiques ont également été mis en place afin, d'une part, de mieux comprendre les systèmes logistiques et leur organisation, et d'autre part de déterminer les leviers permettant de les rendre plus performants et compétitifs. Au niveau de l'axe Seine, on retiendra les projets « Passage Portuaire », « Devport », ou plus récemment « CLASSE ».

L'ensemble de ces réformes et projets témoigne de la volonté importante d'améliorer le système. L'axe Seine est donc un cas d'étude pour lequel de nombreux acteurs pourraient trouver un intérêt à une meilleure compréhension du territoire.

7.2 Implémentation de l'axe Seine

Dans cette partie, nous allons décrire plus particulièrement comment la simulation a été implémentée pour le cas d'étude de l'axe Seine. Nous verrons d'abord quelles sont les caractéristiques du territoire et notamment du réseau de transport. Nous verrons ensuite quelles règles nous avons mises en place pour définir l'évolution de la consommation des stocks sur le territoire.

7.2.1 L'implémentation du territoire

7.2.1.1 Les données relatives au réseau de transport

Puisque la route est très majoritairement utilisée sur l'axe Seine pour le transport de marchandises, nous avons décidé de n'intégrer que ce mode de transport dans un premier temps. Le territoire n'inclut donc pas encore la capacité d'un transport multi-modal. Cela a permis d'effectuer de premiers tests sur le modèle grâce à une implémentation plus simple à mettre en œuvre et dans laquelle nous avons un plus grand contrôle sur l'impact de certains paramètres.

Actuellement, la simulation fonctionne grâce à des données provenant d'un système d'information géographique géré par les membres du projet Devport³. Pour le réseau de transport, nous avons utilisé des données provenant d'EuroGlobalMap sous forme d'un Shapefile, qui décrit le réseau des principales routes sur l'ensemble de l'Europe (autoroutes, nationales,...). Nous avons donc utilisé un fichier contenant uniquement les routes sur l'axe Seine. Toutefois, nous avons vu dans la partie précédente qu'il existe une compétition entre le port du Havre et celui d'Anvers. Afin de mettre en avant cette compétition, nous avons utilisé un deuxième fichier pour certaines simulations qui contenait en plus les routes partant du port d'Anvers et

3. Une équipe de recherche pluridisciplinaire qui travaille sur l'étude du système logistique de l'axe Seine afin d'acquérir une meilleure compréhension de ses acteurs et de ses infrastructures. Son site internet : <http://www.projet-devport.fr/en/>.

jusqu'au territoire de l'axe Seine. Cela a permis de faire de premiers tests concernant la compétition entre le Havre et Anvers.

7.2.1.2 La dynamique du territoire

Dans l'implémentation du modèle pour l'axe Seine, nous avons choisi de développer des agents véhicules éphémères et agrégés (cf. partie 5.2.1). Nous souhaitons pouvoir effectuer une analyse de la circulation sur le réseau en affichant en surbrillance les routes sur lesquelles le trafic est le plus important. Comme le système est dynamique, les choix des acteurs peuvent modifier la structure du trafic principal en temps réel. Il faut donc trouver une méthode pour conserver les données liées à la circulation récente tout en « oubliant » les données plus anciennes. Le principe d'évaporation évoqué dans la partie 5.2.1 va permettre cette résilience à moyen terme de l'information.

Chaque arête du réseau de transport possède un attribut local (qu'on appellera ici la variable de cumul) correspondant à la quantité cumulée de marchandises qui a transité par l'arête. En effet, à chaque étape de la simulation, chaque véhicule transportant une quantité q de marchandises et localisé sur une arête va incrémenter la variable de cumul de l'arête avec la quantité q . La méthode d'évaporation de l'information consiste à multiplier chacune des variables de cumul par un coefficient d'évaporation à chaque cycle de la simulation. La valeur utilisée comme coefficient doit être ajustée en fonction des paramètres liés à la dynamique des stocks car ceux-ci jouent un rôle sur la quantité de marchandises consommées, le nombre de livraisons et les quantités de marchandises transportées par livraison. Une évaporation trop forte ne permettra pas du tout la résilience de l'information, alors qu'au contraire, si l'évaporation est trop faible on sera incapable d'observer la dynamique des décisions. Les expérimentations ont pu montrer qu'une évaporation entre 5 et 10% de la quantité cumulée était suffisante.

L'utilisateur a également un rôle à jouer sur la dynamique du territoire. En effet nous avons implémenté un agent contrôlable par l'utilisateur permettant de perturber le réseau. Son rôle est de pouvoir bloquer (ou débloquer) à tout moment une route sélectionnée manuellement. La route ne disparaît pas, mais on remplace son temps de traversée par une durée infinie. Lorsque les véhicules effectuent leur calcul de plus court chemin, la route sera pour eux comme inaccessible. Néanmoins, si un véhicule est présent sur la route que l'utilisateur souhaite bloquer, alors l'agent pourra se déplacer sans encombre afin d'éviter tout problème technique. Ce mécanisme de perturbation vise à tester la résilience du système lorsque le trafic est perturbé. Si le blocage dure trop longtemps, certains agents pourraient choisir de restructurer entièrement leur réseau d'approvisionnement.

La dynamique du réseau de transport est notamment étudiée dans la partie 7.3.2.2 au cours de laquelle on perturbe le système pour observer comment le trafic se réorganise.

7.2.2 La dynamique des stocks

Cette partie décrit les différents paramètres mis en place permettant d'influer sur la dynamique des stocks. Cette dynamique est notamment due aux comportements des agents « destinataires finaux » et « prestataires logistiques ». Les destinataires sont localisés à l'aide de données décrivant la position et la surface des commerces de gros sur le territoire de l'axe Seine. Les données concernant les prestataires logistiques ont été regroupées par le projet Devport et proviennent de différentes sources, incluant des enquêtes qu'ils ont effectuées.

7.2.2.1 Les données relatives aux acteurs et infrastructures

Les quantités de marchandises vont donc évoluer au sein des bâtiments associés aux destinataires finaux, mais aussi au sein des entrepôts à la charge des prestataires logistiques. Les informations sur les entrepôts proviennent d'une base de données recensant l'ensemble des permis de construire de bâtiments de plus de $2000m^2$ sur la période entre 1980 et 2011. Ces données fournissent, en plus de la position du bâtiment, la surface d'entreposage en mètre carré. Malheureusement, nous n'avons pas d'idée précise du volume que peuvent proposer les entrepôts. On ne pourrait qu'estimer ce volume en se basant sur la surface. Néanmoins, comme la simulation n'est pas centrée sur des types de marchandises en particulier, il est délicat de définir le volume d'un seul produit (volume qui servirait de base pour déterminer les quantités). Ainsi, puisqu'on cherche uniquement à avoir une idée de l'évolution des quantités, on peut utiliser la surface (en m^2) comme unité de mesure pour estimer l'évolution de la quantité de marchandises au sein d'un entrepôt. Dans le cas où on implémenterait le modèle en connaissant précisément le type de marchandise en jeu, alors on pourrait envisager d'améliorer ce point. Cela permettrait notamment d'intégrer un modèle plus élaboré de véhicules. En effet, on a vu dans la partie précédente 3.2.2.2 que les agents véhicules représentaient des agrégations de véhicules. Mais il paraît délicat de désagréger ces agents sans avoir une notion précise du volume qu'occupe la marchandise puisque c'est ce qui permettrait de savoir s'il faut, par exemple, un seul conteneur ou plusieurs pour la transporter.

On notera tout de même qu'il est tout à fait envisageable de compléter ces données afin d'étendre le territoire (par exemple à toute la France). Les seules véritables contraintes sont surtout les capacités de calculs de l'ordinateur sur lequel la simulation est exécutée (un travail de parallélisation des calculs pourrait cependant être envisagé). L'extension du territoire permettrait de fournir des résultats plus précis concernant les routes empruntées par les flux par rapport à la réalité. En effet, dans la réalité, une partie des flux n'est pas à destination de l'axe Seine lui-même et cela peut conduire à des différences avec une simulation uniquement orientée sur l'axe Seine. La simulation pourrait également fonctionner de manière réaliste sur d'autres territoires que l'axe Seine si ceux-ci ont des comportements suffisamment proches. Dans les deux cas, le fait d'utiliser d'autres données initiales ne devrait pas nécessiter de modifications du code source de la simulation, ou alors elles seraient minimales. On pourrait également restreindre les données si l'on souhaite, par exemple, se concentrer sur une filière plus spécifique. Dans ce cas, on pourrait rendre l'implémentation encore plus proche de la réalité (notamment en incluant les notions de volume). Par contre, ces améliorations nécessiteraient d'apporter des modifications au code source.

7.2.2.2 La consommation de marchandises

Pour chaque agent « destinataire final », on associe un certain nombre de produits, différenciés par un identifiant. Le nombre de produit est un paramètre de la simulation. Chaque produit est représenté sous la forme d'un agent « Stock » qui indique la quantité de produit présente dans le bâtiment du destinataire à l'instant t , ainsi que la quantité maximale que le destinataire peut posséder. Tous les stocks des destinataires baissent automatiquement une fois par jour. Pour déterminer la vitesse à laquelle le stock disparaît, on utilise un « coefficient de diminution » que l'on multiplie par la quantité maximale. Cela nous donne la quantité maximale pouvant disparaître par jour. On génère ensuite, chaque jour, un nombre aléatoire entre 0 et cette quantité maximale. Cette valeur est déduite au stock du produit.

Le « coefficient de diminution » détermine donc la vitesse à laquelle la quantité d'un produit va décroître. À l'initialisation de la simulation, on trie par ordre croissant l'ensemble des n agents destinataires en fonction du nombre de clients potentiels calculé grâce au modèle de Huff (1964) (voir 6.2.1.2). On notera que la variable λ dont on parle dans la partie 6.2.1.2 a été paramétrée à 1 puisqu'on ne caractérise pas le type des marchandises dans la simulation. On calcule le coefficient de chaque agent grâce à une fonction $f(x)$ tel que :

$$f(x) = \frac{1}{((p - q)/(n - 1)) \times x + q}$$

tel que :

- x est l'indice d'un agent obtenu dans le classement.
- $1/q$ est le coefficient minimal.
- $1/p$ est le coefficient maximal.

7.2.2.3 Les prises de commandes

Les agents « prestataires logistiques » sont quant à eux en charge de vérifier au sein des entrepôts et des bâtiments des destinataires que les stocks ne sont pas trop bas. Si c'est le cas, ils ordonnent un réapprovisionnement depuis un entrepôt de niveau supérieur, au sein de leur réseau d'approvisionnement. Pour déterminer si la quantité d'un produit est trop basse, ils utilisent un paramètre de la simulation appelé « seuil de réapprovisionnement ». Ce paramètre est un pourcentage dont la valeur est déterminée par l'utilisateur selon deux méthodes : soit l'utilisateur fournit une valeur commune à tous les prestataires ; soit chaque prestataire est initialisé avec une valeur aléatoire comprise entre des bornes minimales et maximales définies par l'utilisateur. Un stock est considéré trop faible si :

$$q < q_{max} \times S$$

tel que q est la quantité actuelle d'un produit, q_{max} est la quantité maximale de ce produit, et S est le seuil de réapprovisionnement utilisé par ce prestataire.

7.2.3 La dynamique des interactions

La phase d'initialisation de la simulation permet de mettre en relation les différents agents. Chaque agent « destinataire final » est connecté à un agent « prestataire logistique », lui-même connecté à l'un des deux agents « fournisseurs » (celui connecté au système par le port du Havre et celui connecté par le port d'Anvers). Ce réseau de collaborateur permet de mettre en place les différents réseaux d'approvisionnement qui serviront de support aux flux de marchandises et qui sont à la charge du prestataire. Une fois que la simulation est en place, la dynamique des interactions est exclusivement initiée par un agent « destinataire ». En effet, un prestataire est toujours rattaché au même agent fournisseur, seul l'interaction entre le destinataire et le prestataire peut être rompu. Cela permet de conserver un plus grand contrôle sur la simulation et de mieux identifier l'origine des changements. Comme nous l'évoquions dans la partie 6.2.1.2, ces changements peuvent survenir lorsque l'agent destinataire estime que son prestataire n'est pas assez performant. L'efficacité d'un prestataire est directement dépendante de la stratégie adoptée par celui-ci pour construire le réseau d'approvisionnement. Nous détaillerons dans un

premier temps les stratégies à disposition des prestataires pour construire un réseau d'approvisionnement. Puis, nous verrons quelles méthodes nous avons mises en place pour mesurer la performance d'un agent.

7.2.3.1 Stratégies de création d'un réseau d'approvisionnement

Lorsqu'un agent « destinataire final » sélectionne aléatoirement un agent prestataire logistique, il lui fournit la liste des produits à externaliser. Le prestataire peut alors intégrer son nouveau client dans son réseau d'approvisionnement en suivant un certain protocole. Dans le cas de l'implémentation de l'axe Seine, ce réseau prend toujours la forme d'un réseau d'atomisation (voir la figure 3.3) sur deux niveaux : un premier niveau avec des entrepôts régionaux connectés à un agent fournisseur, et un second niveau dont les entrepôts sont locaux et connectés au client. En effet, c'est le type de réseau le plus courant sur cet axe puisque celui-ci est de taille relativement réduite et qu'ajouter un niveau national voir continental n'aurait que peu d'intérêt. Il reste donc à la charge du prestataire de sélectionner quels entrepôts seront considérés comme étant l'entrepôt régional et l'entrepôt local.

Avant de commencer la simulation, l'utilisateur doit définir deux paramètres qui seront utilisés pour déterminer la surface qu'occupera le stock à externaliser. Le premier paramètre concerne l'entrepôt régional, et le second concerne l'entrepôt local. La taille d'un stock dans un entrepôt est égale au produit du paramètre en question et de la taille du stock fourni par le destinataire. La surface que doit occuper le stock externalisé va permettre de filtrer les entrepôts qui n'ont pas une surface disponible suffisante. Au moment où le prestataire choisit un entrepôt de niveau régional (resp. de niveau local), on effectue un filtre supplémentaire en supprimant de la liste les entrepôts sélectionnés précédemment par le même agent en tant qu'entrepôt de niveau local (resp. de niveau régional). Ainsi, un entrepôt ne peut être à la fois de niveau régional et local dans un même réseau d'approvisionnement (mais il peut l'être dans des réseaux différents). Concernant plus particulièrement le niveau régional, nous avons décidé que si le prestataire utilise déjà un entrepôt de ce niveau qui est suffisamment grand pour externaliser le stock du client, alors il utilisera cet entrepôt plutôt que d'en choisir un nouveau. Cela traduit une certaine réalité puisque les acteurs de la logistique ont tendance à éviter d'éparpiller leurs ressources humaines et matérielles dans trop d'infrastructures différentes s'ils n'y sont pas obligés.

Le prestataire doit donc choisir deux entrepôts parmi ceux disponibles à l'aide de l'une des quatre stratégies à sa disposition. La stratégie qu'il adoptera tout au long de la simulation est définie à l'initialisation de la simulation.

La première stratégie est la plus simple puisqu'on se contente d'une sélection aléatoire. Ses différents avantages sont d'abord d'ordre technique puisqu'elle est facile à mettre en place, et qu'elle est peu gourmande en ressource de calcul. Mais elle a aussi un autre avantage puisqu'elle peut parcourir potentiellement tout l'espace de recherche, ce que n'offre pas toujours les autres méthodes. Elle est donc susceptible de fournir des solutions exotiques mais efficaces. Son inconvénient est bien sûr que la probabilité de trouver une solution efficace reste faible. Cette stratégie est donc plus de l'ordre de la stratégie témoin. La deuxième stratégie est également simple à mettre en œuvre : elle consiste à choisir l'entrepôt le plus grand pour le niveau régional, et l'entrepôt le plus proche du client final pour le niveau local. Cela traduit une certaine réalité puisque les acteurs de la logistique vont pouvoir mutualiser plus facilement leur entreposage grâce aux entrepôts régionaux, et ils vont aussi pouvoir être plus réactifs auprès du client final en étant au plus proche de celui-ci. La troisième stratégie est un mélange des deux

premières : on effectue une sélection aléatoire mais biaisée en fonction de la taille de l'entrepôt pour le niveau régional, et en fonction de la distance pour le niveau local. Cela permet de conserver le réalisme de la deuxième stratégie tout en offrant la possibilité de s'écarter d'une solution trop figée pour explorer un peu plus l'espace de recherche. Enfin, la dernière stratégie introduit une heuristique basée sur une propriété des entrepôts pour effectuer la sélection. En effet, de nombreuses recherches de la littérature (Demirel et al., 2010 ; Agrebi et al., 2015) montrent l'importance de certaines propriétés dans la sélection d'un entrepôt. Il s'agit en effet d'un problème difficile très documenté. L'un des critères qui revient souvent concerne l'accessibilité des entrepôts : c'est-à-dire la facilité de se rendre à, ou de partir d'un entrepôt. Cela dépend de sa position dans l'environnement et de sa connexion avec le réseau. Pour mesurer l'accessibilité d'un entrepôt nous avons choisi d'utiliser l'indice de Shimbel (1953) qui est une mesure d'accessibilité très répandue en géographie (voir 2.3.1.3). Dans notre cas, on calcule l'indice uniquement sur les entrepôts connectés au réseau de transport. De plus, on ne considère pas tous les nœuds du graphe comme destination mais uniquement les nœuds correspondants aux entrepôts, aux fournisseurs et aux destinataires finaux (puisque'il s'agit des seuls couples origine-destination qui nous intéressent ici). Une fois le calcul d'accessibilité effectué, l'algorithme de sélection consiste dans un premier temps à choisir les n entrepôts les plus grands pour le niveau régional, et les m entrepôts les plus proches du client pour le niveau local (n et m sont des paramètres définis par l'utilisateur avant le début de la simulation). Ensuite, parmi les entrepôts pré-sélectionnés, on choisit les deux qui ont la meilleure valeur d'accessibilité.

7.2.3.2 Mesures d'efficacité du prestataire logistique

Tous les destinataires finaux doivent conserver le même prestataire logistique au moins pendant une période minimale. La durée de cette période est définie par l'utilisateur. À la suite de cette période, le destinataire teste chaque jour si la mesure de performance qu'il attribue à son prestataire est supérieure à la performance moyenne de tous ces agents. Si un destinataire trouve son prestataire inefficace, alors il enclenche le processus de changement de collaborateur. Sinon, rien ne change jusqu'au prochain test. Chaque destinataire final a sa propre perception de l'efficacité de son prestataire logistique. Ainsi, même si deux destinataires ont le même prestataire, celui-ci ne sera pas jugé de la même manière.

L'utilisateur a le choix entre deux heuristiques qui permettent de calculer la performance d'un prestataire. La mesure finale prise en compte par le destinataire est une moyenne des dernières mesures prises. Le nombre de mesures considérées pour la moyenne est un paramètre de la simulation qui aura été défini par l'utilisateur. Pour définir les heuristiques, on s'est appuyé sur les travaux de (Teresa and Evangelos, 2015) et de (Šrámková et al., 2015) qui ont mis en avant les facteurs de satisfaction des clients bénéficiant de services logistiques. L'un des critères principaux mis en avant par les différentes études concerne le fait que la marchandise arrive dans les temps. En effet si elle arrive en retard, le destinataire risque de subir des ruptures de stock. Ainsi, la première heuristique compte le nombre de produits en rupture de stock à chaque étape de la simulation. Le deuxième critère majeur concerne la réactivité. Plus le destinataire reçoit la marchandise tôt, plus il sera satisfait. La deuxième heuristique mesure donc le nombre d'heures écoulées entre le moment où une demande de réapprovisionnement est effectuée, et le moment où la marchandise arrive à destination.

Pour conclure cette partie, on a pu implémenter la simulation d'un corridor logistique en se basant sur les concepts du modèle général. Cette implémentation de l'axe Seine met en avant plusieurs paramètres que l'utilisateur peut configurer comme il le souhaite. Il est également

libre dans une certaine mesure de modifier les données initiales. Cela confère un intérêt important pour l'aide à la décision, et notamment dans le cadre de l'aménagement du territoire, car les effets d'un choix (tel que la construction d'une autoroute) peut être rapidement mis en valeur avant qu'il ne soit appliqué dans le monde réel.

7.3 Analyse des résultats

Dans cette partie, on va maintenant s'intéresser aux outils mis en place afin d'analyser le territoire de l'axe Seine. Ces méthodes d'analyse vont permettre d'une part de tester la validité du modèle, et d'autre part, vont montrer comment utiliser la simulation pour mieux comprendre l'évolution d'un système logistique. On va d'abord mettre en avant un ensemble de mesures statiques. C'est à dire que le résultat n'évoluera pas en fonction de la simulation mais uniquement en fonction des données et paramètres initiaux. Ensuite, on étudiera les mesures dynamiques qui peuvent donc varier selon l'évolution du système simulé.

7.3.1 Mesures statiques

7.3.1.1 Étude de la compétition entre les ports du Havre et d'Anvers

Pour cette première analyse, on cherche à déterminer le port d'origine théorique des marchandises arrivant au sein d'un entrepôt. Pour cela on se propose d'utiliser un modèle gravitaire. Historiquement, ces derniers ont été proposés par Stewart (1948) dans « Demographic Gravitation : Evidence and Applications ». L'auteur s'est inspiré de la physique avec la loi universelle de la gravitation de Newton (1687). Le modèle a été utilisé pour déterminer les mouvements de population entre les grandes villes. Il est parti de l'hypothèse qu'une ville peuplée attirera les populations à proximité qui habitent des villes moins peuplées. Il pose ainsi la formule suivante :

$$F_{\text{Stewart}}^{ij} = \frac{G \times P_i \times P_j}{D_{ij}^2}$$

tel que :

- F_{Stewart}^{ij} est la force d'attraction entre les villes i et j .
- P_i et P_j sont les populations des villes i et j .
- D_{ij} est la distance qui sépare les villes i et j .
- G est un paramètre à déterminer qui représente l'inertie des populations à se déplacer ou non. C'est donc un facteur de mobilité.

En nous inspirant de cette formule, nous proposons une méthode pour estimer l'origine des flux de marchandises d'un entrepôt :

$$F_{ij} = \frac{S_j \times A_i}{d_{ij}^2}$$

tel que :

- F_{ij} : est la force d'attraction entre un port i et un entrepôt j .
- S_j : est la surface d'entreposage d'un entrepôt j .
- A_i : est un critère à déterminer indiquant l'attractivité d'un port i .
- d_{ij} : est la distance qui sépare i et j .

À partir de F_{ij} , on peut ainsi établir la probabilité P_{ij} qu'un port i soit à l'origine du flux de marchandise de l'entrepôt j :

$$P_{ij} = \frac{F_{ij}}{\sum_k^n F_{kj}}$$

Pour adapter la formule de Stewart à notre problème nous avons supprimé le terme G car il n'a pas d'intérêt ici. En effet, on sait que la marchandise se déplacera, mais on ignore seulement son origine. Concernant les entrepôts, nous avons choisi un critère quantitatif facile d'accès : la surface d'entreposage. Il ne reste que le critère d'attractivité d'un port mais celui-ci est plus subjectif. Par exemple, si un port propose des services logistiques efficaces (rapidité de traitement des marchandises, coûts du passage portuaire plus faible qu'ailleurs,...), alors ce port sera considéré comme plus attractif. Grâce à l'expérimentation nous allons tester par la suite différentes valeurs d'attractivité des ports d'Anvers et du Havre.

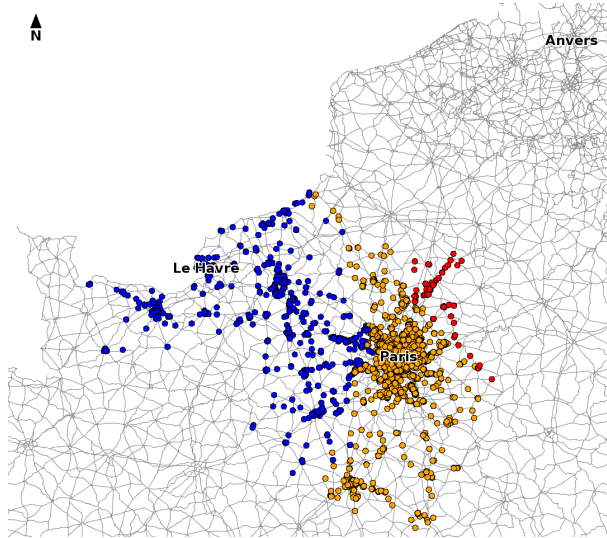
Afin d'effectuer les calculs on a utilisé trois Shapefiles : le premier contient l'ensemble des entrepôts du territoire ; le deuxième contient deux points correspondants aux ports d'Anvers et du Havre ; et le troisième intègre l'ensemble du réseau routier du territoire de l'axe Seine et qui est étendu jusqu'au port d'Anvers. En comparant les chiffres du trafic du [Port d'Anvers \(2015\)](#) et du [Port du Havre \(2015\)](#), on constate qu'il y a un rapport d'environ 3,5 en faveur d'Anvers sur l'année 2015 en ce qui concerne le trafic EVP. Si on considère le trafic en terme de tonnage, le rapport se réduit à environ 2,8. Toutefois, toutes les marchandises transitant par ces deux ports ne sont pas à destination de l'axe Seine. L'utilisation de ce ratio peut néanmoins être une première approche pour déterminer cette attractivité.

La figure 7.3 met en avant quatre scénarios de compétition entre les ports du Havre et d'Anvers. Ces scénarios ont été calculés en changeant uniquement les valeurs d'attractivité des ports. Si on se fie aux ratios déterminés d'après le trafic des deux ports, on peut supposer que les scénarios des figures 7.3b et 7.3c sont réalistes. Les figures 7.3a et 7.3d permettent quant à elles de faire des projections si l'attractivité d'Anvers tend à augmenter ou diminuer par rapport à celle du Havre.

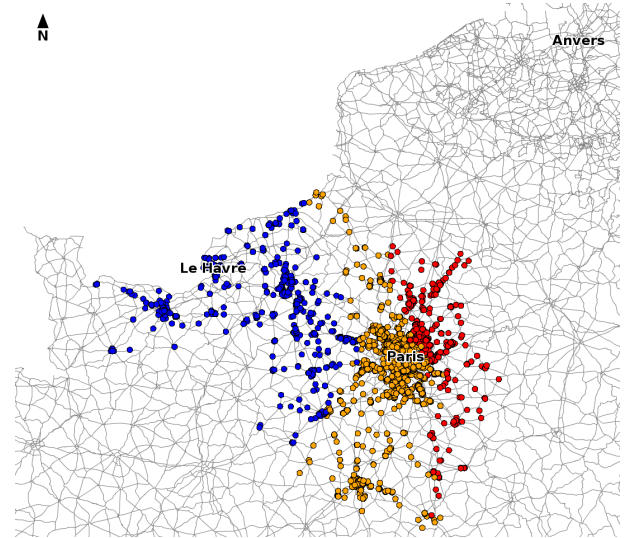
Cette méthode d'analyse repose donc sur le paramètre d'attractivité d'un port par rapport à ses concurrents. Une mesure objective, telle que le nombre d'EVP par an, permet d'établir des valeurs réalistes d'attractivité. L'intérêt ici peut être d'aider les acteurs d'un port à déterminer plus précisément leur aire de marché. Les acteurs peuvent d'ailleurs faire des projections dans le futur s'ils estiment que l'attractivité d'un port va augmenter dans les prochaines années. Un prestataire logistique pourrait aussi décider depuis quel port faire transiter des flux de marchandises à destination d'un entrepôt, et à l'aide d'une attractivité basée sur des coûts moyens.

7.3.1.2 Étude de l'accessibilité des territoires fournissant des surfaces d'entreposage

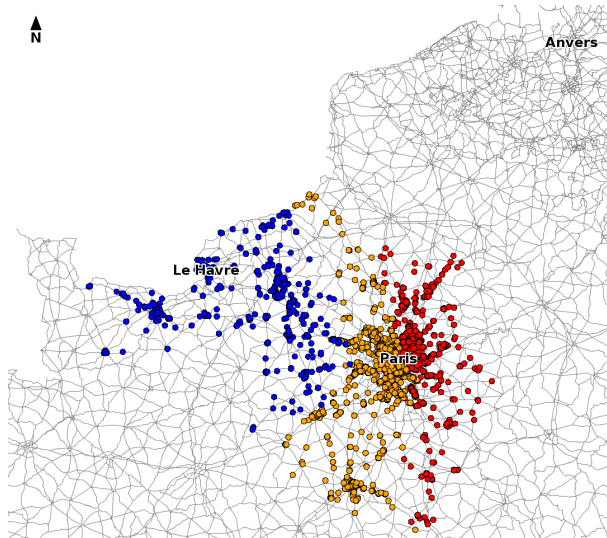
On va maintenant étudier le territoire afin d'identifier les zones les plus actives sur le plan de l'entreposage. Pour cela, on effectue un carroyage du territoire : c'est à dire qu'on découpe l'environnement en une grille de 50×50 cellules. Chaque cellule est ensuite colorée en fonction d'une valeur. Sur la figure 7.4, la valeur correspond à la somme des surfaces d'entreposage proposées par les entrepôts et les destinataires finaux au sein de la cellule. Plus la cellule fournit d'importante surface d'entreposage, plus elle sera colorée en rouge. Sur cette figure, on constate assez facilement que les zones proposant le plus de surface sont celles correspondantes aux principales aires urbaines : Paris, Orléans, Rouen, Le Havre, et Caen. On peut aussi remarquer



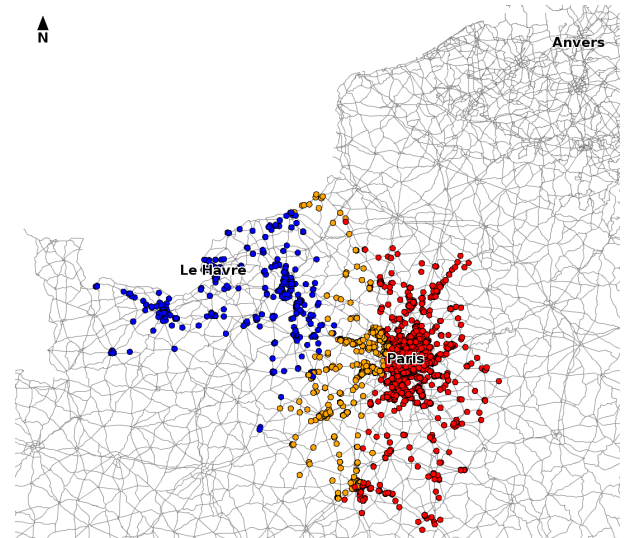
(a) Scénario 1 - Le port d'Anvers est 2 fois plus attractif que le port du Havre .



(b) Scénario 2 - Le port d'Anvers est 2,8 fois plus attractif que le port du Havre .



(c) Scénario 3 - Le port d'Anvers est 3 fois plus attractif que le port du Havre .



(d) Scénario 4 - Le port d'Anvers est 4 fois plus attractif que le port du Havre .

FIGURE 7.3 : Étude de la compétition entre les ports du Havre et d'Anvers à l'aide d'un modèle gravitaire.

Légende :

entrepôts de couleur bleu : la marchandise a une probabilité supérieur à 0,55 d'avoir transité par le port du Havre ;

entrepôts de couleur rouge : la marchandise a une probabilité supérieur à 0,55 d'avoir transité par le port d'Anvers ;

entrepôts de couleur orange : la probabilité que la marchandise proviennent majoritairement du port du Havre ou du port d'Anvers n'est pas significative.

que les surfaces se trouvent également le long des axes principaux entre les aires urbaines, comme c'est le cas entre Rouen et Paris.

On va maintenant chercher à comprendre comment ces zones logistiques s'intègrent sur le

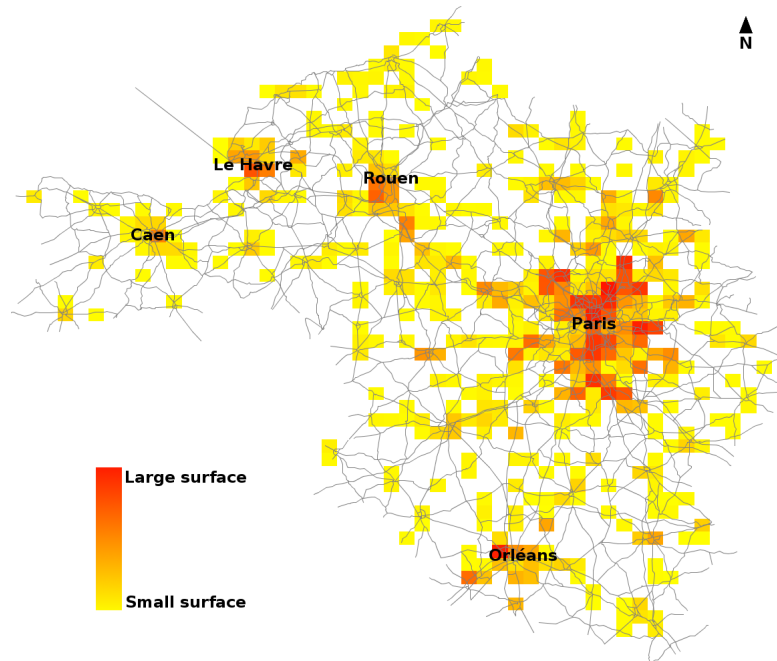


FIGURE 7.4 : Carroyage du territoire de l'axe Seine mettant en évidence les surfaces d'entrepôt des différentes zones.

territoire, et plus particulièrement, comment elles sont connectées au réseau de transport. On utilise de nouveau un carroyage, de mêmes dimensions que celui de la figure 7.4. Par contre, la valeur permettant de colorer la cellule est déterminée par une autre mesure : l'indice de [Shimbel \(1953\)](#) dont nous avons déjà parlé dans la partie 7.2.3.1. Cet indice mesure l'accessibilité de chacun des nœuds d'un graphe en calculant la somme de tous les plus courts chemins entre un nœud et tous les autres. Nous l'avons adapté à notre situation en concentrant les calculs uniquement entre les nœuds d'origine et de destination de la marchandise (c'est à dire les entrepôts et les destinataires finaux). La mesure attribuée à une cellule est l'accessibilité moyenne des entrepôts et destinataires finaux présents au sein de la cellule. La figure 7.5 est le résultat de ce carroyage. En comparant visuellement les figures 7.4 et 7.5, on peut émettre l'hypothèse que l'accessibilité au sein des cellules est corrélée avec la surface d'entrepôt proposée par les cellules.

Afin de valider cette hypothèse, on s'est intéressé à des méthodes d'analyse de la corrélation. Le coefficient de Spearman fournit une valeur entre -1 et 1 indiquant la dépendance qui existe ou non entre deux variables statistiques. Plus la valeur absolue de la mesure est proche de 1, plus les deux variables sont corrélées. Au contraire, plus la valeur est proche de zéro, moins les variables sont corrélées. Le calcul du coefficient de Spearman est en fait équivalent à la formule du coefficient de Pearson ; à la différence que les valeurs des variables statistiques sont remplacées par le rang que possède ces variables dans une liste ordonnée. L'avantage du coefficient de Spearman par rapport à la méthode classique de Pearson, est qu'il permet de détecter aussi une corrélation non linéaire.

Si nous avons deux échantillons associés aux variables X et Y , alors le coefficient de Spearman se calcule ainsi :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

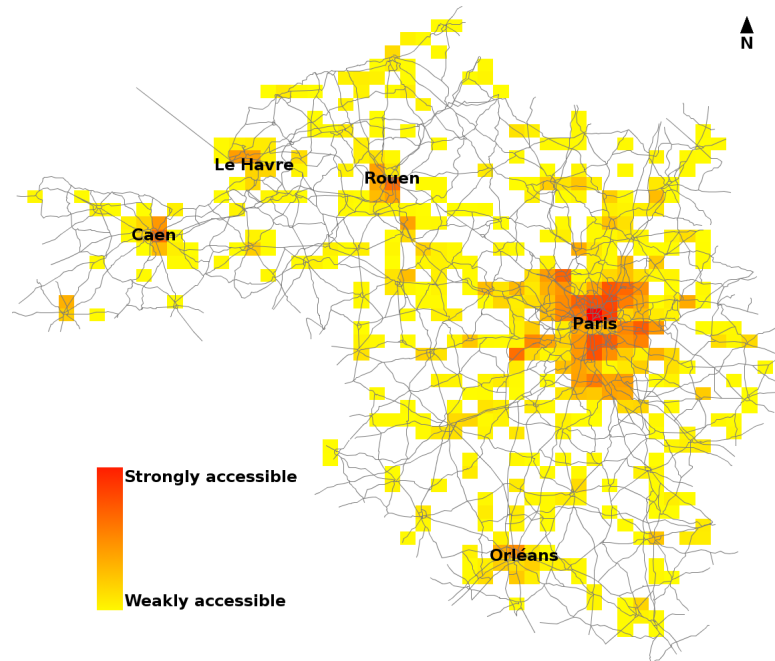


FIGURE 7.5 : Carroyage du territoire de l’axe Seine mettant en évidence l’accessibilité des différentes zones.

tel que : $d_i = rg(X_i) - rg(Y_i)$ est la différence entre les rangs des deux observations X_i et Y_i ; et n est le nombre d’observation.

Dans notre cas, les variables statistiques correspondent à l’accessibilité et à la surface d’entreposage des cellules des deux carroyages. On obtient $r_s = 0.77$, ce qui montre que les deux variables sont fortement corrélées (Wessa, 2016). De plus, la valeur p est d’environ 2×10^{-90} indiquant que la corrélation est significative. Ainsi, on a montré que les zones les plus importantes en terme de services d’entreposage sont également celles les plus accessibles.

Dans la réalité, lorsqu’on cherche à faire construire un entrepôt, on va d’abord chercher à le positionner au plus près des zones que l’on souhaite desservir. Cela permet d’améliorer la réactivité puisque les temps de transport sont réduits. Mais ce n’est pas toujours possible. En effet, un entrepôt peut être prévu pour approvisionner plusieurs zones distantes entre elles. Et parfois, on n’a pas la connaissance *a priori* de l’emplacement de ces zones. On va alors chercher à construire l’entrepôt à proximité d’axes de transport majeurs qui desservent d’importantes aires urbaines. Ces emplacements particuliers sont donc choisis car ils offrent une accessibilité plus importante qu’ailleurs. Sur un territoire comme l’axe Seine, le nombre de zones qui va satisfaire ces critères sont très limités et sont connus des différents acteurs de la logistique. Ceci est la raison qui explique la corrélation entre l’accessibilité et la surface d’entreposage qui caractérisent les cellules du carroyage.

7.3.1.3 Mise en évidence de clusters logistiques

Dans la partie précédente, on a pu mettre en avant la présence de zones dont l’activité logistique est plus importante qu’ailleurs. Nous allons maintenant nous interroger sur le nombre d’acteurs qui font partie de ces zones, ainsi que sur leur étendue. Pour cela, on va utiliser une autre technique qui consiste à construire un graphe dont les nœuds seront les agents du territoire.

On connecte ensuite deux nœuds par une arête si la distance qui les sépare est inférieure à une distance prédéfinie. Les résultats analysés ici considèrent deux distances différentes : 500m et 3km. La construction d'un tel graphe conduit à la formation de composantes connexes. La figure 7.6 représente les cinq plus grandes composantes connexes du graphe construit avec une distance de 3km.

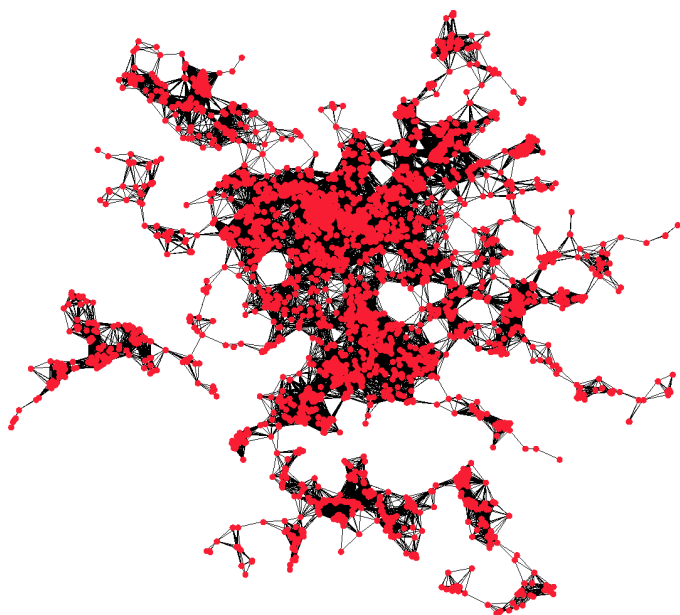
Les composantes connexes représentent des clusters géographiques au sein desquels les acteurs de la logistique se regroupent. L'absence de connexion entre deux composantes se traduit donc par des zones vides de toutes activités logistiques. Pour se rendre compte de l'importance d'une composante par rapport à une autre, on peut commencer par dénombrer les nœuds. Le tableau 7.1 présente les caractéristiques des cinq plus grandes composantes connexes, en terme de nombre de nœuds, du graphe de voisinage construit avec une distance de 3km. Il s'avère que ces composantes correspondent aux cinq plus grandes villes du territoire (Paris, Rouen, Orléans, Le Havre et Caen).

TABLE 7.1 : Composition des cinq plus grandes composantes connexes du graphe de voisinage avec une distance de 3km

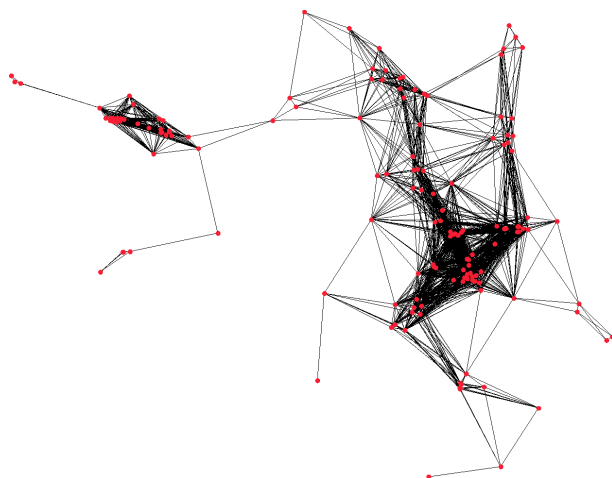
Rang de la composante connexe (tri en fonction du nombre de nœuds)	Nombre d'acteurs	Degré moyen des nœuds
1 st	8822 (dont 8803 en Île-de-France)	239
2 nd	523 (en Haute-Normandie, à proximité de Rouen)	53
3 rd	444 (en Haute-Normandie, à proximité du Havre)	56
4 th	361 (en Basse-Normandie, à proximité de Caen)	44
5 th	306 (dans le Centre, à proximité d'Orléans)	26

Le degré moyen des nœuds peut aussi apporter une information sur l'importance d'une composante connexe. En effet, au vu de la méthode de construction du graphe, si le degré moyen des nœuds est élevé, cela signifie que la densité d'acteurs est plus importante compte tenu de la surface de la zone dans laquelle ils se trouvent. Le tableau 7.2 présente les caractéristiques des cinq plus grandes composantes connexes, en terme de degré moyen des nœuds, du graphe de voisinage construit avec une distance de 500m. La présence d'autant d'acteurs dans des zones de taille réduite contribue à garantir la réactivité des acteurs du fait de leur proximité respective. Toutefois, si un travail d'aménagement du territoire n'est pas effectué, cela peut aussi conduire à l'engorgement du réseau de transport.

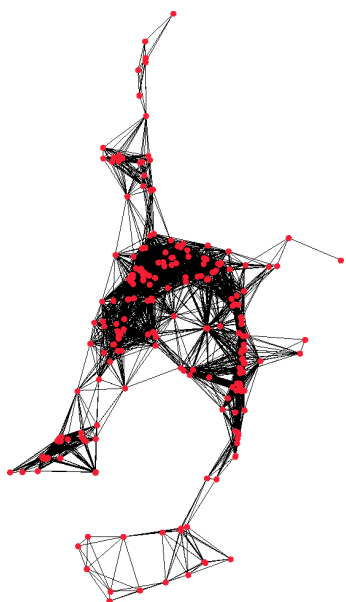
Enfin, la figure 7.7 représente la distribution des composantes connexes en fonction de leur taille (nombre de nœuds). L'échelle logarithmique met en évidence que la courbe suit une loi de puissance. Il existe très peu de composantes connexes de grande taille, et à l'inverse il existe beaucoup de composantes de petite taille. Cela signifie que les plus grandes composantes attirent la plus grande part des activités logistiques. Il est ainsi plus intéressant d'améliorer l'aménagement du territoire de ces zones puisque cela permet de concentrer les ressources pour en faire profiter le plus grand nombre.



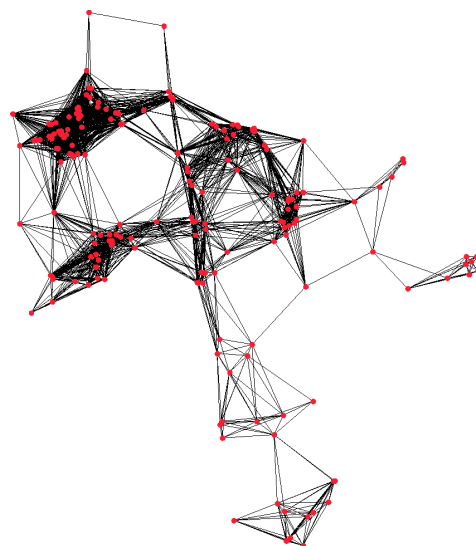
(a) La composante connexe correspondante à Paris.



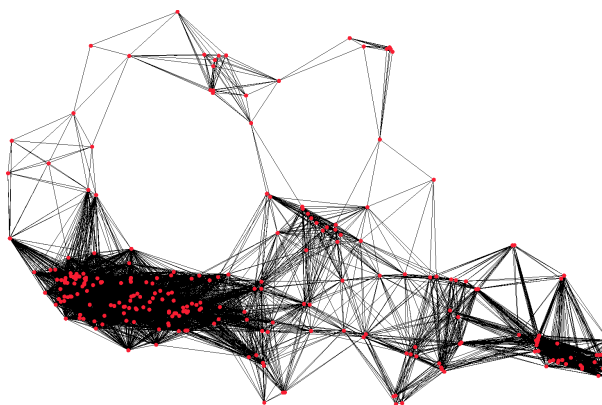
(b) La composante connexe correspondante à Caen.



(c) La composante connexe correspondante à Rouen.



(d) La composante connexe correspondante à Orléans.



(e) La composante connexe correspondante au Havre.

TABLE 7.2 : Composition des cinq plus grandes composantes connexes du graphe de voisinage avec une distance de 500m

Rang de la composante connexe (tri en fonction du degré moyen)	Nombre d'acteurs	Degré moyen des nœuds
1 st	1572 (tous en Île-de-France, au Nord de Paris)	224
2 nd	96 (tous en Île-de-France, au Nord de Paris)	47
3 rd	149 (tous en Île-de-France, au Nord de Paris)	37
4 th	203 (tous en Île-de-France, au Nord de Paris)	36
5 th	72 (tous en Haute-Normandie, près de Rouen)	35

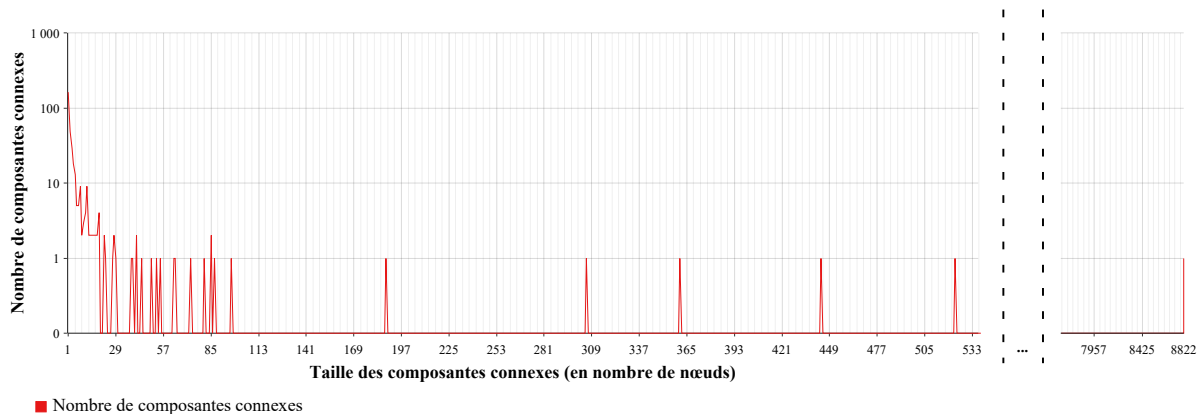


FIGURE 7.7 : Distribution des composantes connexes du graphe de voisinage construit avec une distance de 3km.

7.3.2 Mesures dynamiques

7.3.2.1 Atomisation du flux de marchandise

Dans cette première partie, on va montrer que la simulation reproduit des phénomènes particuliers, observables dans un système logistique. Plus exactement, on va mettre en avant un processus d'atomisation des flux de marchandises. Pour cela, on va s'intéresser aux agents « Véhicules » et aux quantités de marchandises qu'ils transportent.

La figure 7.8 décrit l'évolution du nombre cumulé d'agents Véhicules se déplaçant sur le réseau. Ces agents sont triés en trois ensembles distincts en fonction de leur position dans le réseau d'approvisionnement : s'ils sont issus d'un fournisseur, s'ils sont issus d'un entrepôt régional, ou s'ils sont issus d'un entrepôt local.

On peut observer que les courbes n'évoluent pas à la même vitesse puisqu'elles n'ont pas le même gradient. La courbe correspondant aux véhicules provenant d'un entrepôt local augmente plus vite que celles des véhicules provenant des entrepôts régionaux, qui va elle-même plus vite

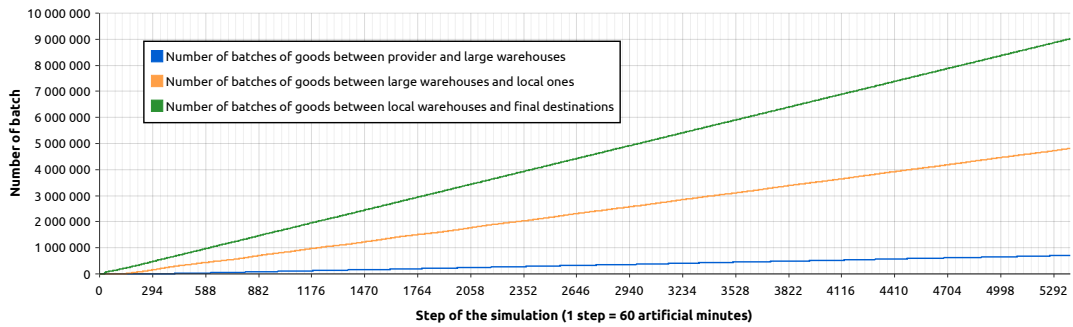


FIGURE 7.8 : Le nombre cumulé d'agents « Véhicules » sur les routes.

que celle des véhicules provenant d'un fournisseur. Il existe donc une hiérarchie. Cela se traduit ainsi : plus on se rapproche de la destination finale au sein du réseau d'approvisionnement, plus les véhicules sont nombreux.

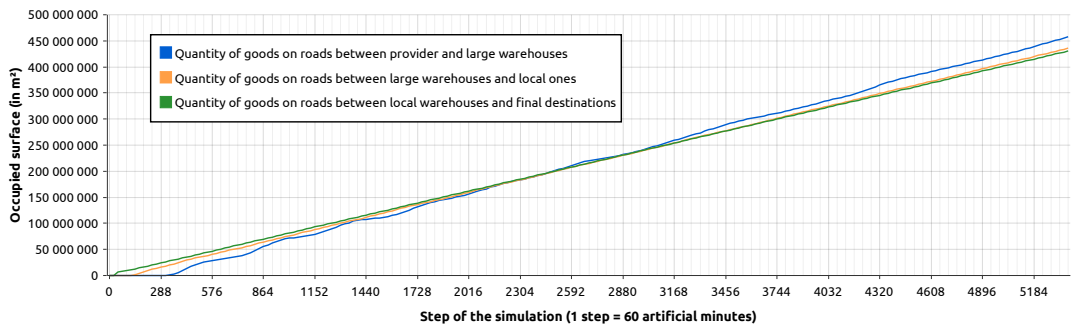


FIGURE 7.9 : La quantité cumulée de marchandises au sein des agents « Véhicules ».

Sur la figure 7.9 on peut observer l'évolution de la quantité cumulée de marchandises transportées par les véhicules (le tri a été réalisé selon le même principe que pour la figure 7.8). Cette fois-ci, on constate que les trois courbes évoluent globalement à la même vitesse puisqu'elles ont des gradients très proches. Il n'existe plus cette hiérarchie. Cela signifie que la somme des quantités de marchandises par type de véhicules est la même à chaque étape. Si on reconsidère le résultat précédent qui avait mis en avant le nombre plus important de véhicules à destination des destinataires finaux, alors on peut reconnaître le principe d'atomisation des flux de marchandises qu'on observe dans la réalité. La simulation décrit ainsi une caractéristique réaliste d'un système logistique. Ceci est dû aux contraintes spatiales de la simulation ainsi qu'aux comportements des agents. C'est donc grâce au modèle désagrégé qu'on peut observer ce type de phénomène.

7.3.2.2 Réseau de transport et trafic

Dans cette partie nous allons exploiter deux fonctionnalités de la simulation : la première est celle qui permet aux agents « Véhicules » de laisser une trace de leur passage sur chaque route afin d'observer le trafic ; la deuxième est celle qui permet de perturber le système pour rendre certaines routes inaccessibles. On souhaite ainsi observer comment le système se comporte

lorsqu'il est soumis à des dysfonctionnements de son réseau de transport. On notera par ailleurs qu'on a cherché à limiter les biais pouvant survenir à cause des interactions dynamiques entre les acteurs. Pour cela, la simulation a été exécutée en empêchant les acteurs de modifier leurs réseaux d'approvisionnement. De plus, tous les prestataires ont utilisé uniquement la stratégie numéro 2 pour construire ces réseaux.

On peut voir sur la figure 7.10 l'état du trafic lorsque la simulation n'a pas été perturbée. Cet état du système va servir d'état témoin. L'ensemble des différentes aires urbaines principales sont connectées entre elles par des flux de marchandises plus ou moins importants. On constate l'existence de deux corridors logistiques principaux : l'un sur l'axe Le Havre-Rouen-Paris, et un autre sur l'axe Anvers-Paris. La capitale étant la plus grande zone d'activité logistique, il est normal qu'elle soit autant attractive. La zone urbaine d'Orléans semble être réapprovisionnée par des flux à la fois du Havre et d'Anvers (au travers de Paris).

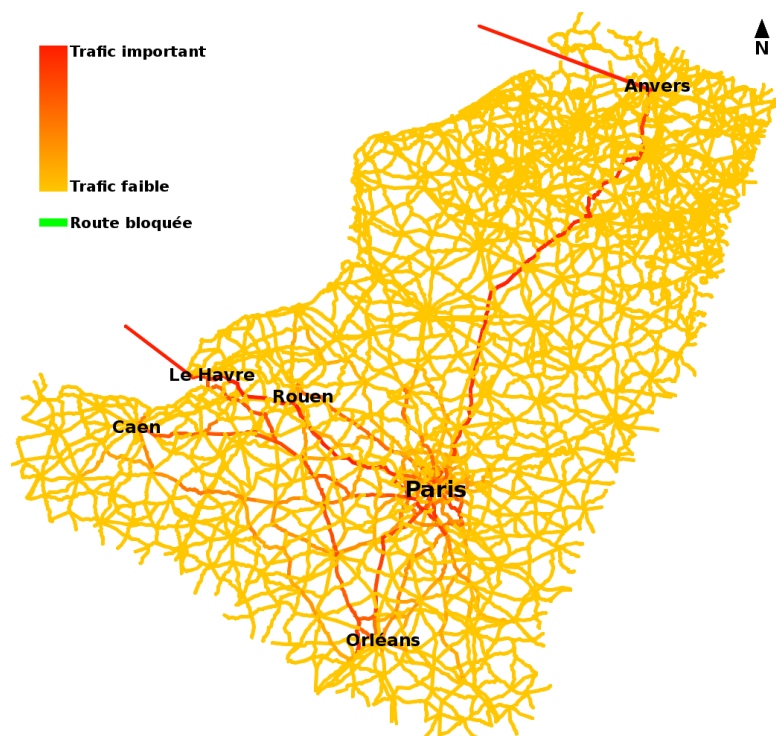


FIGURE 7.10 : État du trafic de marchandises dans des conditions normales.

Nous allons maintenant perturber le système en bloquant certaines routes de l'axe Anvers-Paris afin d'observer comment le flux se réorganise. Sur la figure 7.11, on remarque que le flux de cet axe a contourné la zone bloquée en passant par le Sud de celle-ci. Ce flux se décompose même en deux : une partie rejoint le Nord-Est de Paris (l'une des zones les plus actives de la région en terme de logistique), tandis qu'une autre passe au Sud-Est.

Si on amplifie la perturbation comme sur la figure 7.12, et qu'on bloque quasiment tout passages en provenance d'Anvers, on s'aperçoit que le système se réorganise de nouveau. Une partie du flux en provenance d'Anvers semble même passer par la zone urbaine de Rouen.

Cette méthode d'analyse du trafic met donc en avant les capacités de résilience du système. Elle permettrait à un utilisateur de mieux comprendre l'évolution du trafic en cas de dysfonctionnement. Cela permet de savoir comment le flux se réorganise et d'identifier par la même

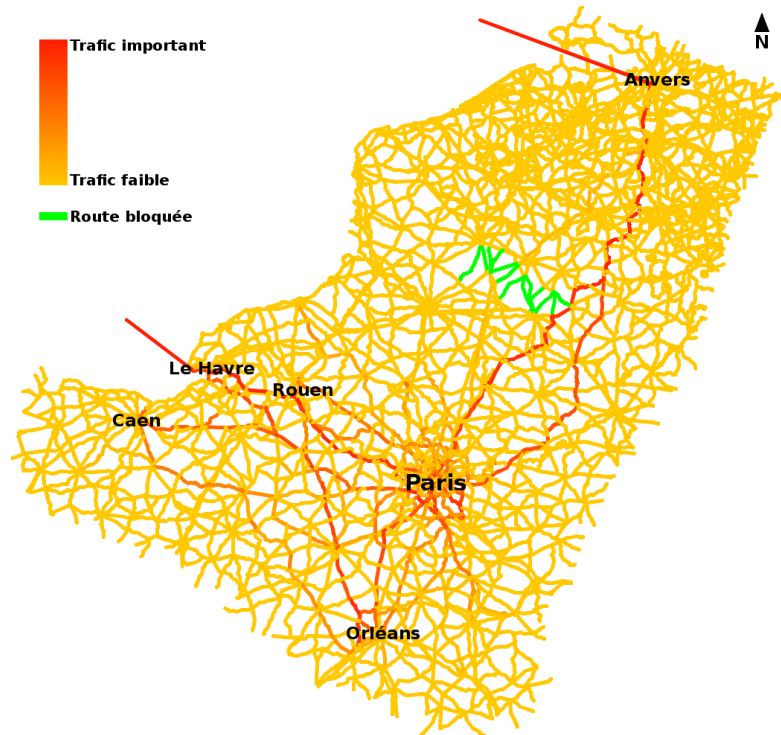


FIGURE 7.11 : État du trafic de marchandises suite à une petite perturbation sur l'axe Anvers-Paris.

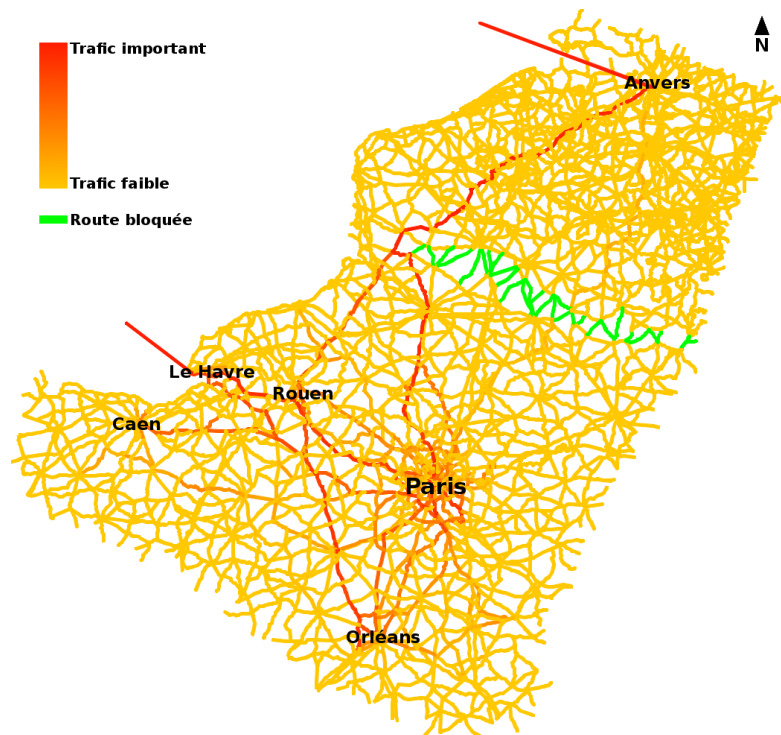


FIGURE 7.12 : État du trafic de marchandises suite à une perturbation très importante sur l'axe Anvers-Paris.

occasion les routes de secours. De plus, même si nous avons effectué une analyse à un niveau régional, il est tout à fait envisageable de mener une étude à un niveau local.

7.3.2.3 Évolution des ruptures de stocks

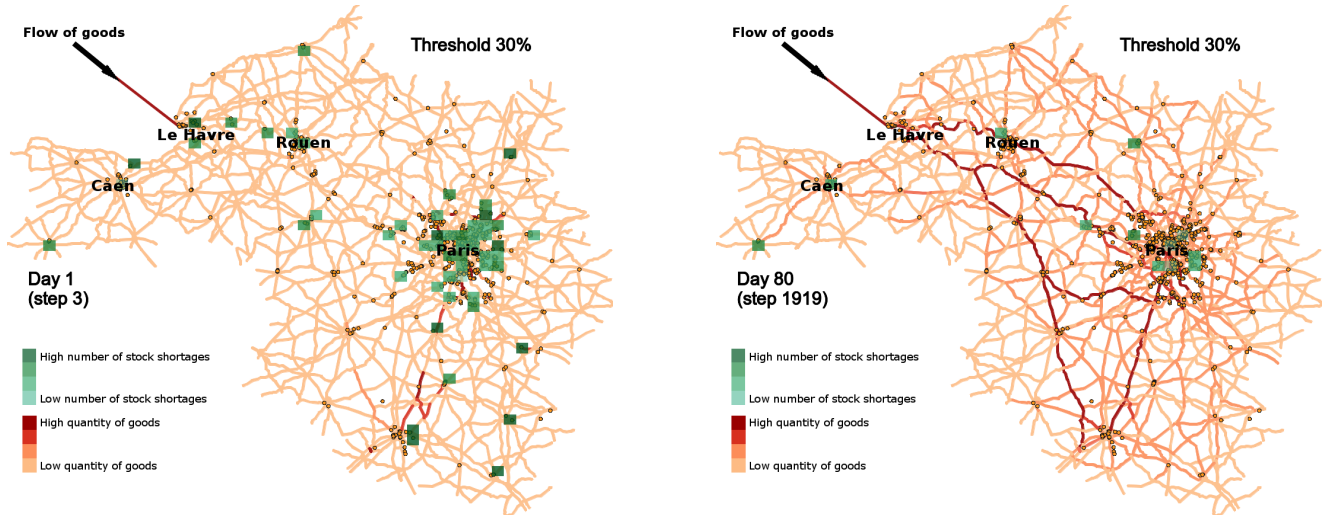
Nous cherchons dans cette partie à observer le comportement des agents en fonction de deux paramètres. Ces derniers ont un impact significatif sur les flux de marchandises : notamment sur la fréquence des livraisons, sur les risques de ruptures de stocks, ou encore sur les quantités transportées. On étudiera en premier les effets du seuil de réapprovisionnement puis on verra ceux du coefficient de diminution.

Seuil de réapprovisionnement Afin d'observer les effets du seuil de réapprovisionnement, nous avons exécuté deux simulations avec un paramétrage différent. Dans les deux cas, tous les prestataires d'une même simulation partagent la même valeur de seuil de réapprovisionnement. La simulation 1 est exécutée avec une valeur de 30%, et la simulation 2 est exécutée avec une valeur de 20%.

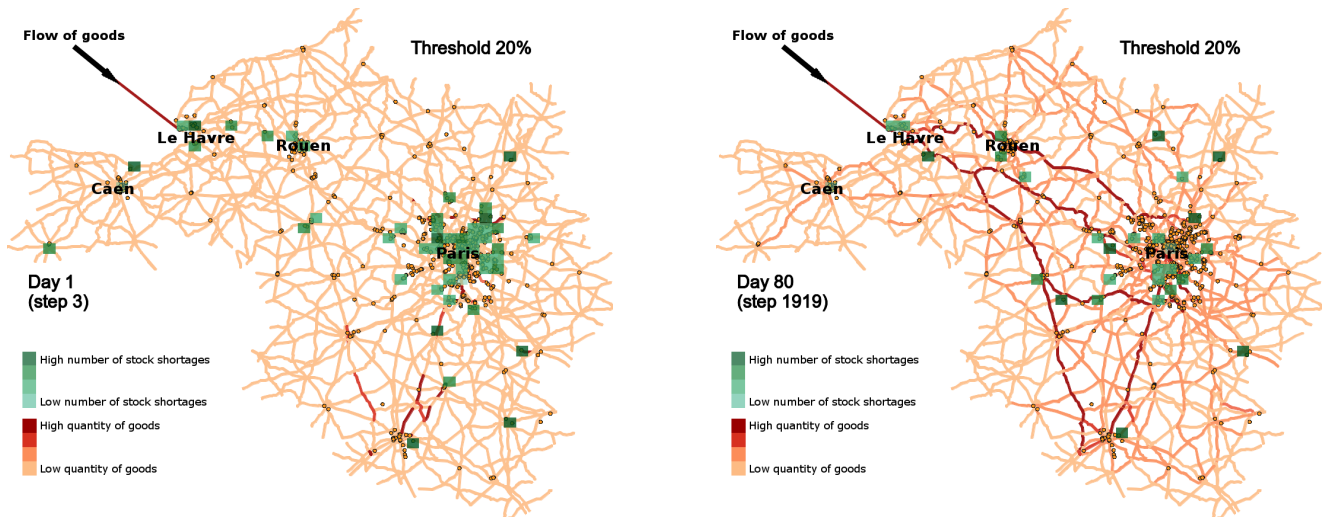
La figure 7.13 montre l'évolution de ces deux simulations. Le premier jour des simulations correspond à la fin de la période d'initialisation. Les quantités de marchandises au sein des entrepôts et des destinataires finaux viennent tout juste d'être initialisées aléatoirement. Le jour 80 correspond à une situation stabilisée de longue date. On a superposé au territoire un carroyage de 50×50 cellules. Chacune d'elles est colorée en vert en fonction du nombre de produit en rupture de stock répertorié au sein de la cellule. Plus une cellule est vert foncé, plus il y a de produits indisponibles, et plus elle est vert clair, moins il y en a. Lorsqu'il n'y a aucune rupture de stock, alors la cellule n'est pas affichée du tout. On remarquera à cette occasion l'utilité du carroyage pour effectuer une analyse au cours d'une simulation. En effet, on peut observer l'évolution dans l'espace d'une caractéristique locale. On pourra donc identifier plus facilement quelles zones sont les plus touchées par des ruptures de stocks au cours d'une simulation. Dans notre cas, le maillage est assez grand et met surtout en avant les principales zones urbaines que sont Paris ou Rouen. Mais grâce au modèle individu-centré, il est très simple d'affiner le carroyage puisque l'agrégation des données se fait automatiquement au niveau de chaque cellule : il suffit uniquement de modifier les dimensions de la grille.

On constate qu'au début de la simulation, il y a beaucoup de produits en rupture de stock sur l'ensemble du territoire quelque soit la simulation. Les deux situations sont comparables. Par contre, au 80^{ème} jour, les deux simulations affichent beaucoup moins de produits en rupture de stock. Toutefois, une nette différence existe entre les deux. En effet, on remarque que la simulation exécutée avec un seuil de 30% affiche moins de cellules colorées, et celles qui le sont, affichent des nuances plus claires. Ainsi, un seuil de réapprovisionnement plus élevé implique moins de ruptures de stock. En fait, avec un seuil plus faible, les prestataires logistiques ont moins de temps pour réagir entre le moment où la quantité de marchandise passe sous le seuil, et le moment où le produit est effectivement en rupture de stock. Cela confère une flexibilité plus faible au prestataire. Les produits sont donc plus facilement indisponibles. Un seuil de réapprovisionnement plus élevé correspond donc à une manière plus efficace de garantir la disponibilité des stocks.

Au cours de ces deux simulations, nous avons mesuré l'évolution du nombre cumulé de véhicules. Cette mesure suit une évolution linéaire comme on peut le voir sur la figure 7.14. On observe que la simulation exécutée avec un seuil plus élevé progresse plus rapidement. D'ailleurs, pour ces deux simulations, on a également mesuré le nombre moyen de véhicules



(a) Simulation 1 - Seuil de réapprovisionnement à 30%.



(b) Simulation 2 - Seuil de réapprovisionnement à 20%.

FIGURE 7.13 : Deux simulations exécutées avec deux paramètres différents de seuil de réapprovisionnement. Une étape correspond à une heure simulée correspond. Plus les cellules sont vert foncé, plus il y a de produits en rupture de stocks. Plus les routes sont rouge foncé, plus il y a des trafic.

par cycle : pour le seuil de 20%, cette valeur est de 70,5 alors qu'elle est de 75 pour le seuil de 30%. Ainsi, des prestataires logistiques ayant adoptés un seuil de réapprovisionnement plus élevé ordonneront plus de livraisons. Sur le long terme, cet écart aura un impact économique significatif sur ces prestataires car cela se traduira inmanquablement par une augmentation des coûts de transport qui seront répercutés sur le destinataire final. Un prestataire logistique doit donc optimiser le ratio entre un comportement économique mais qui risque d'augmenter les ruptures de stocks, et un comportement coûteux mais qui garantira la disponibilité des produits. La simulation permettrait de mieux comprendre dans quelles conditions tel ou tel seuil de réapprovisionnement est le plus adéquat.

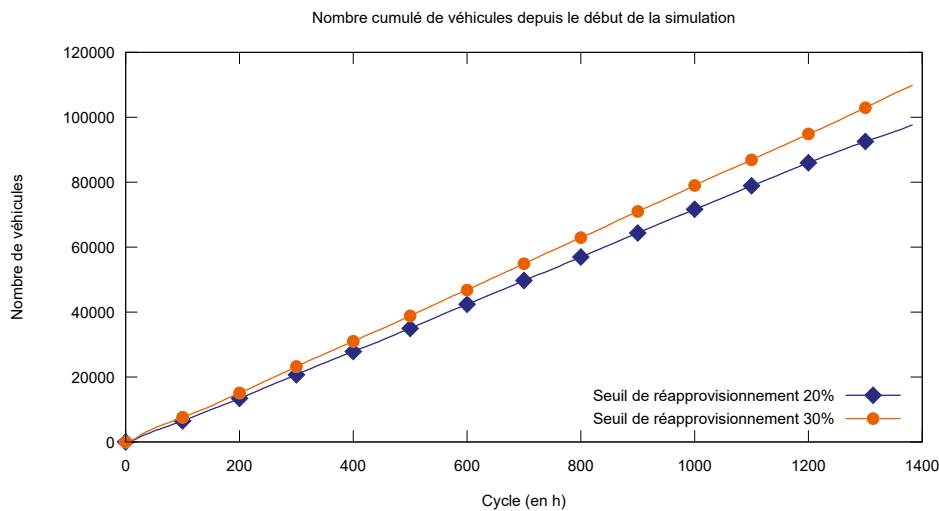


FIGURE 7.14 : Nombre cumulé de véhicules en fonction de la stratégie de réapprovisionnement utilisée par les prestataires logistiques.

Coefficient de diminution On va maintenant s'intéresser à ce coefficient en effectuant une série de simulations dans lesquelles on l'a fait varier. Pour chaque simulation, on mesure le nombre moyen de produits en rupture de stocks depuis le début de la simulation. Afin de mieux comprendre l'impact du coefficient, l'ensemble des destinataires finaux partage la même valeur de coefficient au sein d'une même simulation. Pour chacun des trois coefficients testés, nous avons également fait varier le seuil de réapprovisionnement. La tableau 7.3 regroupe donc les résultats obtenus pour chacune des six simulations.

On constate sur le tableau 7.3 que lorsque les destinataires finaux ont un coefficient élevé, le nombre de produits en rupture de stock est également plus important que lorsque le coefficient est plus faible. Un coefficient élevé indique un plus fort degré de consommation que le système doit satisfaire en fournissant un niveau de performance accrue. Toutefois, le système a ses propres limites dues aux autres contraintes. Par exemple, avec un coefficient de diminution de 1/5 et un seuil de réapprovisionnement de 20%, il est possible d'avoir plus de rupture de stock (ici 91 produits) qu'avec un coefficient de 1/4 mais un seuil à 30% (dans ce cas, le nombre de produits en rupture de stock est de seulement 35).

TABLE 7.3 : Évolution du nombre moyen de produits en rupture de stock en fonction de deux paramètres de la simulation : le coefficient de diminution et le seuil de réapprovisionnement

Coefficient de diminution	1/3		1/4		1/5	
Seuil de réapprovisionnement	20%	30%	20%	30%	20%	30%
Nombre moyen de produits en rupture de stock au 83 ^{ème} jour	654	114	234	35	91	31

L'intérêt du paramètre pour un utilisateur est de pouvoir tester la résilience du système lorsque celui-ci est soumis à une demande plus importante. De plus, puisqu'il s'agit d'un paramètre local, on peut augmenter ou diminuer artificiellement la demande au sein d'une zone spécifique. À titre d'exemple, cela permettrait de tester l'impact sur le système de la construc-

tion ou de la démolition d'une zone d'habitation qui augmenterait ou diminuerait localement la population et donc la consommation sur cet emplacement.

7.3.2.4 Comportements adaptatifs

Dans cette dernière partie nous allons nous intéresser aux changements de comportements opérés par les agents.

Comme nous l'avons vu dans la 7.2.3.1, les prestataires logistiques ont quatre stratégies différentes à disposition pour sélectionner les entrepôts qui feront partie de leur réseau d'approvisionnement. La figure 7.15 montre comment l'adoption de ces stratégies de création d'un réseau d'approvisionnement évolue au cours du temps. Pour rappel, on attribue l'une de ces quatre stratégies à chaque prestataire logistique à l'initialisation de la simulation. Les destinataires finaux choisissent aléatoirement l'un de ces prestataires et doivent conserver leur relation commerciale pendant une durée minimale. Au cours des expérimentations, nous avons testé avec une durée minimale de trois mois. Cette durée assez courte pour ce type de relation n'est pas réaliste mais les résultats sont identiques avec des durées plus longues. Toutefois, en allongeant les durées minimales de contrats, l'émergence de comportement met plus de temps à survenir. On notera également qu'à l'initialisation, la date de début de contrat entre certains destinataires finaux et prestataires est déclarée de telle sorte que le premier contrat pourra durer moins de trois mois. Cela permet de désynchroniser les agents et éviter qu'ils n'effectuent les mêmes actions exactement au même moment. Les cent premières étapes de la simulation ne varient pas car on laisse ce temps aux agents pour générer suffisamment de données pour calculer les mesures de performance. Au cours de la simulation de la figure 7.15, la mesure de performance utilisée consistait à évaluer la durée moyenne de livraison (le temps entre le moment où la commande est passée, et le moment où la marchandise arrive à destination). Plus les prestataires offraient une durée moyenne de livraison faible, mieux ils étaient perçus par leur client.

On observe sur la figure 7.15 que deux stratégies semblent émerger. Il s'agit de la stratégie 2 (sélection de l'entrepôt le plus proche ou du plus grand), et de la stratégie 3 (sélection aléatoire mais biaisée en fonction de la distance ou de la surface). La stratégie 2 est légèrement plus adoptée mais ce n'est pas significatif. De plus, on notera que puisque la simulation n'est pas déterministe, il peut arriver que la stratégie 3 soit la plus adoptée. La stratégie 4 (qui intègre l'accessibilité des entrepôts dans sa méthode de sélection) est par contre toujours la moins adoptée. La stratégie 1 (sélection par l'aléatoire) fournit des résultats similaires.

Les stratégies 2 et 3 sont effectivement les deux stratégies les plus « intelligentes » parmi ces quatre ci. L'adoption de ces méthodes de sélection par les agents semble donc normale. Mais il s'agit bien d'un processus auto-organisé qui émerge des interactions locales. On notera par contre que l'adoption de ces stratégies est particulièrement liée à la mesure de performance utilisée par les destinataires finaux pour évaluer les prestataires. Une mesure de performance et des stratégies plus élaborées permettraient d'obtenir des résultats plus réalistes. Néanmoins, l'intérêt premier de cette démarche est avant tout de montrer que le modèle met en œuvre un comportement d'émergence de comportements optimaux (selon un critère de performance prédéfini). Un utilisateur pourrait donc implémenter des stratégies plus élaborées et comparer leur adoption. De plus, si l'une de ces stratégies s'avère plus performante que l'autre lorsque le système est perturbé, alors l'utilisateur pourra mesurer son adoption en organisant un scénario de crise lors d'une simulation.

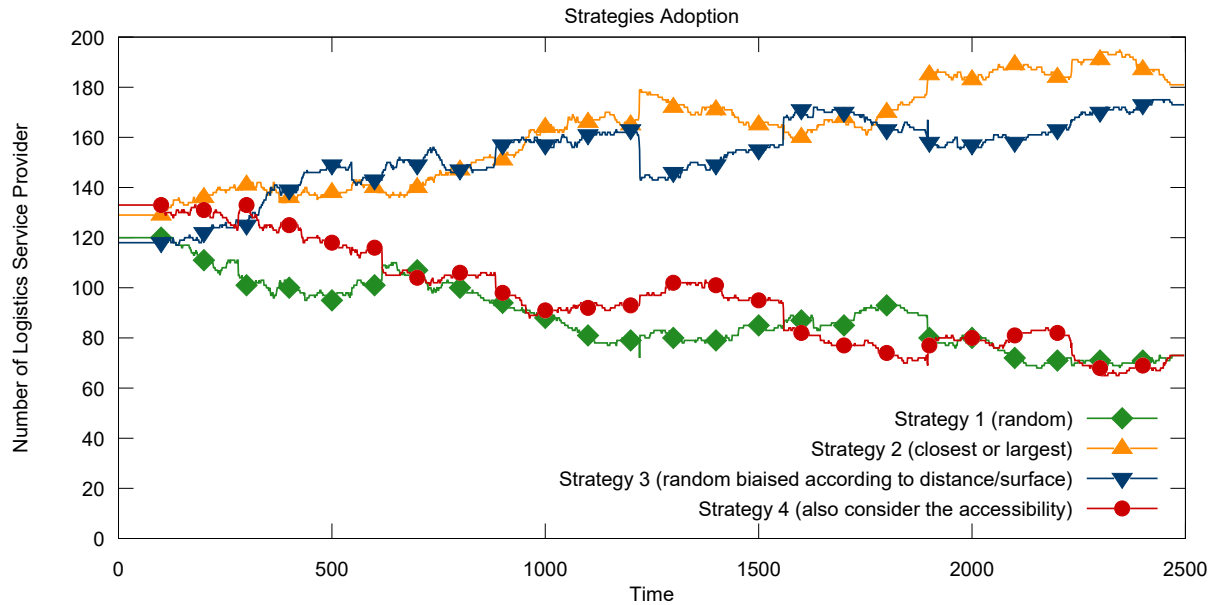
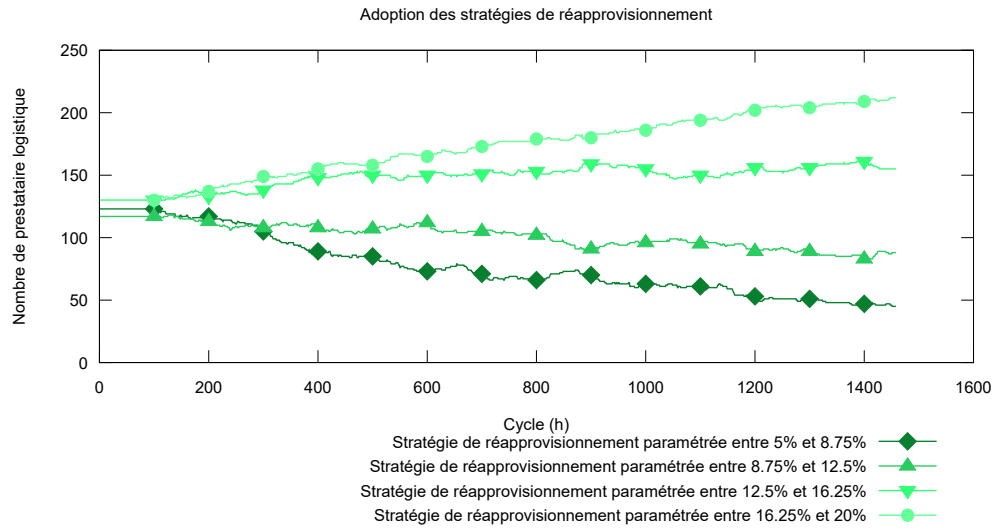


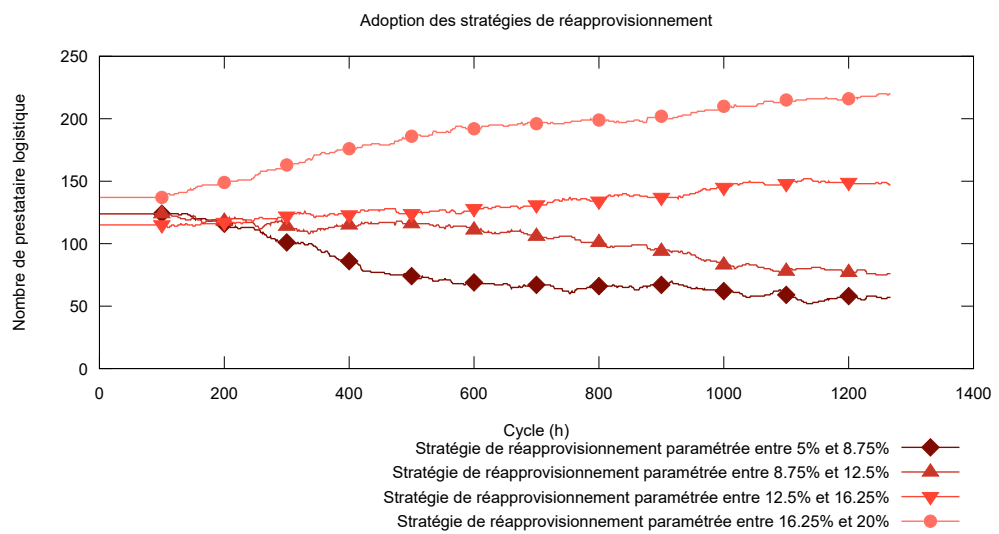
FIGURE 7.15 : Adoption des différentes stratégies de création d'un réseau d'approvisionnement.

Les figures 7.16 et 7.17 portent sur une méthode similaire mais elles concernent l'adoption des stratégies de réapprovisionnement. On a vu dans la partie 7.2.2.3 que chaque prestataire logistique se voyait attribuer un « seuil d'approvisionnement » en début de simulation. Les différentes valeurs de ce paramètre correspondent à des stratégies de réapprovisionnement dont le mécanisme est notamment analysé dans la partie 7.3.2.3. Nous avons souhaité observer comment les agents sélectionnent préférentiellement certaines stratégies avec des valeurs particulières. Afin de limiter les éventuels biais dans l'adoption des stratégies, nous avons exécuté quatre simulations dans lesquelles nous avons forcé tous les prestataires à adopter la même stratégie de création d'un réseau d'approvisionnement. Pour chacune de ces simulations nous avons initialisé chaque prestataire logistique avec un seuil de réapprovisionnement compris entre 5 et 20%.

On peut constater sur les figures 7.16 et 7.17 que le même ordre finit toujours par émerger quelque soit la stratégie de création d'un réseau d'approvisionnement utilisée par les prestataires. Les agents ayant les seuils de réapprovisionnement les plus élevés sont sélectionnés préférentiellement.

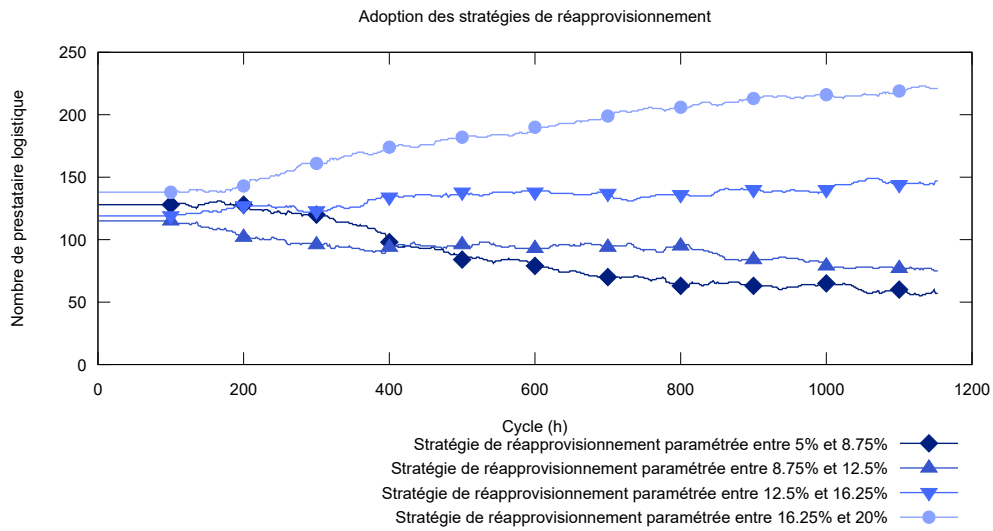


(a) Simulation 1 - Stratégie de sélection des entrepôts : aléatoire biaisé.

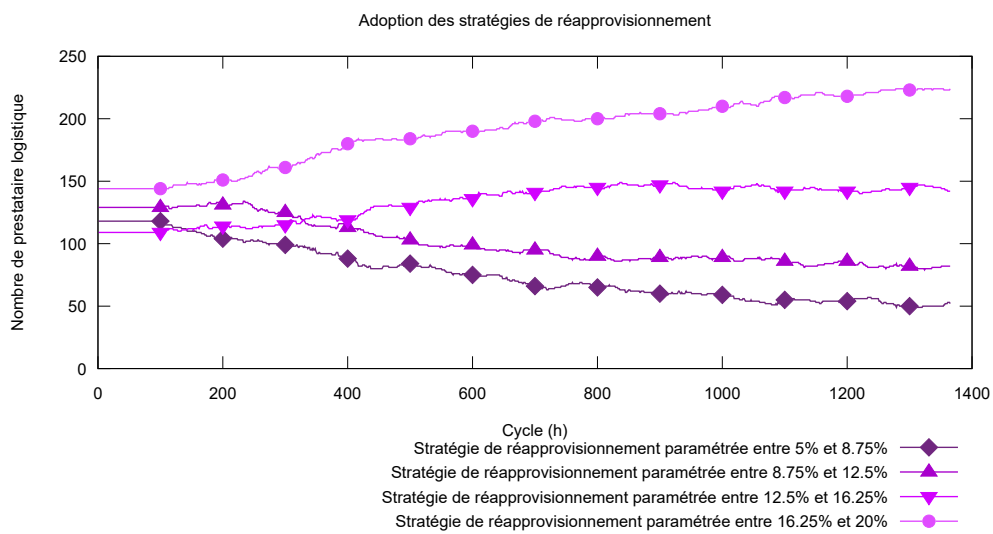


(b) Simulation 2 - Stratégie de sélection des entrepôts : prise en compte de l'accessibilité.

FIGURE 7.16 : Émergence des stratégies de réapprovisionnement lorsque la stratégie de sélection des entrepôts est fixée (partie 1/2).



(a) Simulation 3 - Stratégie de sélection des entrepôts : plus proche ou plus grand.



(b) Simulation 4 - Stratégie de sélection des entrepôts : pure aléatoire.

FIGURE 7.17 : Émergence des stratégies de réapprovisionnement lorsque la stratégie de sélection des entrepôts est fixée (partie 2/2).

CONCLUSION

8.1 Bilan

Au cours de cette thèse nous avons adopté une approche systémique pour modéliser l'interface logistique port-métropole. La complexité d'un tel système nous a conduit à développer un modèle orienté agents et à utiliser des graphes dynamiques.

Pour présenter le bilan de cette thèse, nous allons reprendre les résultats du chapitre précédent pour mettre en avant les contributions du modèle que nous avons présentées dans la partie 4.5.

Nous avons commencé l'analyse des résultats en présentant des mesures statiques. Celles-ci ont été rendues possibles car le modèle est à la fois individus centrés (et donc désagrégé) et spatialisé. En effet, dans la partie 7.3.1.1, nous avons pu déterminer localement, pour chaque entrepôt et destinataire final, le port d'origine probable de la marchandise à l'aide d'un modèle gravitaire.

Par la suite nous avons réussi à mettre en évidence des corrélations entre des mesures effectuées localement. Nous avons ainsi montré dans la partie 7.3.1.2 que les entrepôts les plus accessibles (au sens de l'indice de [Shimbel \(1953\)](#)) sont ceux qui offrent les plus grandes surfaces d'entrepôts.

Dans la partie 7.3.1.3, nous avons utilisé une méthode de construction de graphe afin de détecter des structures globales à partir de la position géographique individuelle des infrastructures logistiques. Cela a permis de mettre en avant des clusters logistiques plus ou moins grands selon l'activité logistique des régions.

Mais le modèle ne permet pas que des analyses statiques. Dès le début de la conception nous avons cherché à créer un modèle qui évolue dans le temps. La dimension temporelle des systèmes logistiques est au cœur de notre approche.

Ainsi, le processus dynamique d'atomisation des flux de marchandises a été mis en évidence dans la partie 7.3.2.1. Ce résultat en particulier montre comment les flux internationaux et massifiés transitent par le port avant d'être progressivement atomisés en flux urbains pour atteindre leurs destinations finales au cœur des métropoles.

Dans la partie 7.3.2.2, nous montrons comment le modèle tire profit de cette approche spa-

tialisée, dynamique et adaptative. Nous perturbons le réseau routier au cours de la simulation pour observer comment le trafic se réorganise. En modifiant leurs itinéraires, les agents véhicules agissent sur leur environnement. Certains axes majeurs du transport de marchandises disparaissent au profit d'axes secondaires. Cette transformation est auto-organisée à l'image de la réalité grâce à l'approche individus centrés.

La partie 7.3.2.3 s'intéresse aux impacts de certains paramètres de la simulation sur les ruptures de stocks. L'un de ces paramètres était lié à la capacité des agents à anticiper les ruptures de stocks grâce à une stratégie de réapprovisionnement. Au cours des tests présentés ces paramètres ont été fixés pour l'ensemble des agents pour mieux isoler et comprendre leurs effets. Néanmoins, ces paramètres ont vocation à être différents d'un agent à l'autre. L'approche agent permet de faire cohabiter des acteurs aux comportements hétérogènes. Deux agents de même rôle auront les mêmes objectifs mais leurs méthodes pourront être différentes.

Enfin, les derniers résultats présentés dans la partie 7.3.2.4 permettent de mettre en avant le fonctionnement adaptatif des agents par le biais d'un phénomène d'émergence de comportements optimaux.

8.2 Perspectives

Comme de nombreux travaux de recherche, cette thèse ouvre plusieurs perspectives que nous allons nous efforcer de présenter dans cette dernière partie. L'approche décentralisée à base d'agents permet d'envisager d'intégrer assez facilement des comportements très variés des acteurs de la logistique comme nous allons les évoquer dans la suite. L'utilisation de graphes dynamiques permet également d'avoir une souplesse sur les analyses de réseaux et des territoires qui sont les supports des corridors et des interfaces logistiques. Ils permettent aussi de mettre en place des mesures d'efficacité et des performances des chaînes logistiques. Nous évoquons des perspectives dans ce sens.

En premier lieu, nous souhaitons implémenter au sein de la simulation le réseau de transport multi-modal, et notamment la partie fluviale. Cela nécessiterait un travail technique conséquent mais cette amélioration serait également la porte d'entrée de nouvelles recherches pour approfondir notre compréhension d'un système logistique. Pour réaliser ce travail, il faudrait d'abord implémenter de nouveaux agents-acteurs, et en particulier les transitaires (ou commissionnaires de transport). Jusqu'à maintenant leur rôle d'organisateur du transport était limité puisque seul le réseau routier était présent. Mais en intégrant un nouveau mode de transport, ce rôle devient plus complexe. On ne pourra plus se contenter d'un simple algorithme de recherche de plus courts chemins, il faudra adapter la méthode pour prendre en compte différentes échelles ainsi que de nouveaux paramètres (tels que le temps de rupture de charge). De nouvelles infrastructures devront également être intégrées : comme les terminaux portuaires et fluviaux. Cela inclut la possibilité pour ces infrastructures d'interconnecter des réseaux de différentes natures.

Ensuite, les agents implémentés font partie de la catégorie des agents réactifs. Leur mode de fonctionnement est particulièrement simplifié et peut sembler manquer de réalisme à certains égards. Nous voudrions donc rendre leurs comportements plus cognitifs. Par exemple, les stratégies de sélection des entrepôts et la topologie du réseau d'approvisionnement pourraient sûrement être améliorées.

Un travail de validation plus complet serait également à fournir. Nous avons prévu de nous concentrer sur des filières spécifiques, comme le e-commerce, pour faciliter la comparaison entre des flux issus de données réelles et ceux issus de la simulation. En nous intéressant à

des secteurs particuliers, ce serait également l'occasion pour nous de caractériser davantage la marchandise lors des simulations. Cela permettrait d'implémenter des stratégies plus réalistes, par exemple pour construire les différents réseaux d'approvisionnement en fonction du type de marchandises. Le niveau de consommation de ces marchandises pourraient aussi suivre une évolution saisonnière et non constante comme c'est le cas actuellement.

Nous pensons également à développer de nouveaux moyens pour perturber le système. Par exemple, nous voudrions pouvoir perturber le système au niveau des nœuds du réseau. C'est-à-dire être capable de bloquer les livraisons en partance d'un entrepôt ou d'un fournisseur. On pourrait aussi augmenter ou diminuer significativement la consommation de marchandises dans des lieux précis. Enfin, nous souhaitons proposer à l'utilisateur de pouvoir ajouter (ou supprimer) en temps réel des destinataires finaux, des infrastructures (telles que des entrepôts), ou des routes. Cela permettrait d'observer la réorganisation du système lors d'un changement positif ou négatif.

L'article de [de Jong et al. \(2013\)](#) avait également soulevé une perspective de recherche intéressante : comment intégrer le trafic de passagers et de particuliers dans les modèles de transport de marchandises ? Nous pensons qu'il s'agit d'un travail nécessaire car le réseau de transport, et notamment le routier, subit des congestions du fait de ces différents types de trafics qui doivent cohabiter malgré tout. Un premier travail a d'ailleurs été initié dans ce sens par des étudiants de master en informatique.

Comme on a pu le voir dans la partie 7.3.2.4, les agents ont un comportement adaptatif, notamment dans la création d'un réseau d'approvisionnement. Ils cherchent à adopter les comportements qu'ils considèrent les plus « optimaux ». Bien sûr cela dépend d'un critère de performance. Mais, pour reprendre le cas de la création d'un réseau d'approvisionnement, si le critère de performance est correctement adapté au problème, alors les réseaux créés par les agents seront effectivement optimaux en fonction du critère mais également en fonction de l'ensemble du système (et donc dans un contexte collaboratif/compétitif). Il serait donc intéressant d'étudier les caractéristiques, comme la topologie, des réseaux émergeant des simulations.

En réalité, ces réseaux d'approvisionnement ne sont pas les seuls à émerger. Le graphe d'interactions entre les agents est également issu d'un processus dynamique auto-organisé qui subit plusieurs contraintes du système tout au long d'une simulation. On sait que dans un système logistique il existe des communautés d'acteurs au sein desquelles les interactions sont plus fortes. Grâce au modèle et à sa simulation, nous souhaiterions développer une méthode de détection de ces communautés pour en comprendre la formation, mais également pour identifier des groupes d'acteurs particuliers.

Troisième partie
Bibliographie et publications

BIBLIOGRAPHIE

- Michel Aerde, Hesham Rakha, and Harinarayan Paramahamsan. Estimation of origin-destination matrices : Relationship between practical and theoretical considerations. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1831 :122–130, 2003. doi : <http://dx.doi.org/10.3141/1831-14>.
- M. Agrebi, M. Abed, and M. N. Omri. Urban distribution centers' location selection's problem : A survey. In *4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 246–251, May 2015. doi : 10.1109/ICAdLT.2015.7136635.
- Réka Albert and Albert-László Barabási. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 74 :47–97, Jan 2002. doi : 10.1103/RevModPhys.74.47.
- R.J. Allan. Survey of agent based modelling and simulation tools. 2010.
- B Ambrosio, MA Aziz-Alaoui, and VLE Phan. Attractor and synchronization for a complex network of reaction-diffusion systems of fitzhugh-nagumo type. *arXiv preprint arXiv :1504.07763*, 2015.
- W.B. Arthur. *Complexity and the Economy*. Oxford University Press, 2014. ISBN 9780199334292.
- Albert-László Barabási and Réka Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439) :509–512, 1999. ISSN 0036-8075. doi : 10.1126/science.286.5439.509.
- Marc Barthélemy. Spatial networks. *Physics Reports*, 499(1–3) :1 – 101, 2011. ISSN 0370-1573. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002>.
- Alex Bavelas. Communication patterns in task-oriented groups. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(6) :725–730, 1950. doi : <http://dx.doi.org/10.1121/1.1906679>.
- Fabio Luigi Bellifemine, Giovanni Caire, and Dominic Greenwood. *Developing Multi-Agent Systems with JADE (Wiley Series in Agent Technology)*. John Wiley & Sons, 2007.
- Moshe Ben-Akiva and Gerard de Jong. The aggregate-disaggregate-aggregate (ada) freight model system. In Moshe Ben Akiva, Hilde Meersman, and Eddy van de Voorde, editors, *Freight Transport Modelling. 1st ed.*, chapter 4, pages 69–90. Emerald, Bingley, United Kingdom, 2013.
- Stefan Bertels and Torsten Fahle. A hybrid setup for a hybrid scenario : combining heuristics for the home health care problem. *Computers Operations Research*, 33(10) :2866 – 2890, 2006. ISSN 0305-0548. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2005.01.015>. Part Special Issue : Constraint Programming.

- Roger D. Blair and Christine Piette Durrance. Group purchasing organizations, monopsony, and antitrust policy. *Managerial and Decision Economics*, 35(7) :433–443, 2014.
- S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D.-U. Hwang. Complex networks : Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4–5) :175 – 308, 2006. ISSN 0370-1573. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
- Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, Jean-Louls Deneubourg, Serge Aron, and Scott Camazine. Self-organization in social insects. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(5) :188–193, 1997.
- Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, Inc., 1999.
- A. Borshchev. *The Big Book of Simulation Modeling : Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America, 2013. ISBN 9780989573177.
- Anne Bretagnolle, Eric Daudé, and Denise Pumain. From theory to modelling : urban systems as complex systems. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2006.
- Héctor J. Carlo, Iris F.A. Vis, and Kees Jan Roodbergen. Transport operations in container terminals : Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, 236(1) :1 – 13, 2014.
- Arnaud Casteigts, Paola Flocchini, Walter Quattrociocchi, and Nicola Santoro. Ad-hoc, mobile, and wireless networks : 10th international conference, adhoc-now 2011, paderborn, germany, july 18-20, 2011. proceedings. chapter Time-Varying Graphs and Dynamic Networks, pages 346–359. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-22450-8. doi : [10.1007/978-3-642-22450-8_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22450-8_27).
- B. Castellani and F.W. Hafferty. *Sociology and Complexity Science : A New Field of Inquiry*. Understanding Complex Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783540884620.
- Rinaldo A. Cavalcante and Matthew J. Roorda. Freight market interactions simulation (fremis) : An agent-based modeling framework. *Procedia Computer Science*, 19 :867 – 873, 2013. ISSN 1877-0509. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.116>. The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), the 3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013).
- Bo Chen and Harry H Cheng. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(2) : 485–497, 2010.
- Thomas Y Choi, Kevin J Dooley, and Manus Rungtusanatham. Supply networks and complex adaptive systems : control versus emergence. *Journal of Operations Management*, 19(3) : 351 – 366, 2001. ISSN 0272-6963. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00068-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00068-1).
- Joseph Y. J. Chow, Choon Heon Yang, and Amelia C. Regan. State-of-the art of freight forecast modeling : lessons learned and the road ahead. *Transportation*, 37(6) :1011–1030, 2010. ISSN 1572-9435. doi : [10.1007/s11116-010-9281-1](https://doi.org/10.1007/s11116-010-9281-1).

- Liang-Hui Chu, Corban G. Rivera, Aleksander S. Popel, and Joel S. Bader. Constructing the angiome : a global angiogenesis protein interaction network. *Physiological Genomics*, 44 (19) :915–924, 2012. ISSN 1094-8341. doi : 10.1152/physiolgenomics.00181.2011.
- Alberto Colorni, Marco Dorigo, and Vittorio Maniezzo. Distributed Optimization by Ant Colonies. In *European Conference on Artificial Life*, pages 134–142, 1991.
- Corinna Cortes, Daryl Pregibon, Chris Volinsky, and At&t Shannon Labs. Computational methods for dynamic graphs. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 12 :950–970, 2003.
- Pablo Cortés, Jesús Muñuzuri, J. Nicolás Ibáñez, and José Guadix. Simulation of freight traffic in the seville inland port. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3) :256 – 271, 2007. ISSN 1569-190X. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2006.11.004>.
- Andrew Crooks, Christian Castle, and Michael Batty. Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6) :417–430, 2008.
- P. Davidsson, L. Henesey, L. Ramstedt, J. Törnquist, and F. Wernstedt. An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 13(4) :255 – 271, 2005.
- Gerard de Jong and Moshe Ben-Akiva. A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. *Transportation Research Part B : Methodological*, 41(9) :950 – 965, 2007. ISSN 0191-2615. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2007.05.002>. Behavioural insights into the Modelling of Freight Transportation and Distribution Systems.
- Gerard de Jong, Inge Vierth, Lori Tavasszy, and Moshe Ben-Akiva. Recent developments in national and international freight transport models within europe. *Transportation*, 40(2) : 347–371, 2013. ISSN 1572-9435. doi : 10.1007/s11116-012-9422-9.
- Peter W. De Langen, Jan C. Fransoo, and Ben van Rooy. Business models and network design in hinterland transport. In James H. Bookbinder, editor, *Handbook of Global Logistics*, volume 181 of *International Series in Operations Research and Management Science*, pages 367–389. Springer New York, 2013.
- Joël de Rosnay. *Le Macroscopie : vers une vision globale*. Collection Civilisation. Éditions du Seuil, 1975. ISBN 9782020045674.
- Camil Demetrescu and Giuseppe F Italiano. Fully dynamic all pairs shortest paths with real edge weights. In *Foundations of Computer Science, 2001. Proceedings. 42nd IEEE Symposium on*, pages 260–267. IEEE, 2001.
- Camil Demetrescu and Giuseppe F Italiano. Algorithmic techniques for maintaining shortest routes in dynamic networks. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 171(1) : 3–15, 2007.
- Tufan Demirel, Nihan Çetin Demirel, and Cengiz Kahraman. Multi-criteria warehouse location selection using choquet integral. *Expert Systems with Applications*, 37(5) :3943 – 3952, 2010. ISSN 0957-4174. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.022>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409009646>.

- J. L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, and J. M. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3(2) :159–168, 1990. ISSN 1572-8889. doi : 10.1007/BF01417909.
- E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1) :269–271, 1959. ISSN 0945-3245. doi : 10.1007/BF01386390.
- Diana Diziain, Eiichi Taniguchi, and Laetitia Dablanc. Urban logistics by rail and waterways in france and japan. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125 :159 – 170, 2014. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1464>. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia.
- Marco Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- Edwige Dubos-Paillard, Yves Guermond, and Patrice Langlois. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle spacelle. *L'Espace géographique*, 32 :357–378, April 2003.
- César Ducruet. Les mesures locales d'un réseau. working paper or preprint, December 2010. URL <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00546814>.
- Antoine Dutot, Frédéric Guinand, Yoann Pigné, and Damien Olivier. Graphstream : A tool for bridging the gap between complex systems and dynamic graphs. *CoRR*, abs/0803.2093, 2008.
- Leonard Euler. Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, 8 :128–140, 1741.
- Jacques Ferber. *Les Systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. I.I.A. Informatique intelligence artificielle. InterEditions, 1995. ISBN 9782729605728.
- Jacques Ferber. *Multi-Agent Systems : An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1999.
- A. Ferreira. On models and algorithms for dynamic communication networks : The case for evolving graphs. In *4^e rencontres francophones sur les Aspects Algorithmiques des Telecommunications (ALGOTEL'2002)*, Mèze, France, May 2002.
- Richard FitzHugh. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical journal*, 1(6) :445, 1961.
- Linton C. Freeman. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1) : 35–41, 1977. URL <http://www.jstor.org/stable/3033543>.
- David Gale, Jim Propp, Scott Sutherland, and Serge Troubetzkoy. *Further Travels with My Ant*, pages 137–149. Springer New York, New York, NY, 1998. ISBN 978-1-4612-2192-0. doi : 10.1007/978-1-4612-2192-0_18.
- M. Gardner. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223 :120–123, October 1970.

- O. Gavaud, P. Le Bourhis, and D. Orsini. Les bâtiments logistiques - fonctions et impacts sur les territoires. *Sétra*, 2009.
- N. Gilbert and J. Doran. *Simulating Societies. The Computer Simulation of Social Phenomena*. UCL Press, London, 1994.
- Nigel Gilbert and Klaus G Troitzsch. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, 2005. ISBN 0335216005.
- M. Girvan and M. E. J. Newman. Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12) :7821–7826, 2002.
- F. Giullo. Les conséquences de la réforme portuaire sur les entreprises de manutention. Master's thesis, 2009.
- Jesus Gonzalez-Feliu, Christian Ambrosini, Pascal Pluvinet, Florence Toilier, and Jean-Louis Routhier. A simulation framework for evaluating the impacts of urban goods transport in terms of road occupancy. *Journal of Computational Science*, 3(4) :206 – 215, 2012. ISSN 1877-7503. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jocs.2012.04.003>. City Logistics.
- S. Graumann-Yettou. *Commerce international : guide pratique*. Litec affaires, finances. Litec, 2002.
- Jonathan L. Gross and Jay Yellen. *Graph Theory and Its Applications, Second Edition (Discrete Mathematics and Its Applications)*. Chapman & Hall/CRC, 2005.
- Olivier Gutknecht and Jacques Ferber. The madkit agent platform architecture. In *Revised Papers from the International Workshop on Infrastructure for Multi-Agent Systems : Infrastructure for Agents, Multi-Agent Systems, and Scalable Multi-Agent Systems*, pages 48–55, London, UK, 2001. Springer-Verlag. ISBN 3-540-42315-X.
- F. Harary and G. Gupta. Dynamic graph models. *Mathematical and Computer Modelling*, 25(7) :79 – 87, 1997. ISSN 0895-7177. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177\(97\)00050-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177(97)00050-2).
- Lawrence E. Henesey, Theo E. Notteboom, and Paul Davidsson. Agent-based simulation of stakeholders relations : An approach to sustainable port and terminal management. In *International Association of Maritime Economists Annual Conference*, pages 314–331, 2003.
- Alison J. Heppenstall, Andrew T. Crooks, L M See, and Michael Batty. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer, 2012.
- Markus Hesse and Jean-Paul Rodrigue. The transport geography of logistics and freight distribution. *Journal of Transport Geography*, 12(3) :171 – 184, 2004.
- A. L. Hodgkin and A. F. Huxley. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4) :500–544, 1952. ISSN 1469-7793. doi : [10.1113/jphysiol.1952.sp004764](https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764).
- John H Holland and John H Miller. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*, 81(2) :365–71, 1991.

- Johan Holmgren, Paul Davidsson, Jan A. Persson, and Linda Ramstedt. Tapas : A multi-agent-based model for simulation of transport chains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 23 :1 – 18, 2012. ISSN 1569-190X. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2011.12.011>.
- David L. Huff. Defining and estimating a trading area. *Journal of Marketing*, 28(3) :pp. 34–38, 1964.
- International Chamber of Commerce. *ICC Model International Sale Contract*. ICC International contracts series. International Chamber of Commerce, 2013.
- Jayanth Jayaram and Keah-Choon Tan. Supply chain integration with third-party logistics providers. *International Journal of Production Economics*, 125(2) :262 – 271, 2010.
- Y Jin, I Williams, and M Shahkarami. Integrated regional economic and freight logistics modelling : Results from a model for the trans-pennine corridor, uk, 2005.
- Gerard De Jong, Hugh Gunn, and Warren Walker. National and international freight transport models : An overview and ideas for future development. *Transport Reviews*, 24(1) :103–124, 2004. doi : [10.1080/0144164032000080494](https://doi.org/10.1080/0144164032000080494).
- K.J. Kansky. *Structure of transportation networks : relationships between network geometry and regional characteristics*. PhD thesis, University of Chicago. Department of geography, 1963.
- Kalliopi Kravari and Nick Bassiliades. A survey of agent platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(1), 2015.
- Siham Lakri, Jean-Claude Bocquet, Laurent Grégoire, Zied Jemai, and Yves Dallery. Designing supply chain performance measurement and management systems : A systemic perspective. In *The 4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 211–216, Valenciennes, France, May 2015. doi : [10.1109/ICAdLT.2015.7136625](https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2015.7136625).
- Patrice Langlois and Daniel Delahaye. Ruicells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, 12(4) :461–487, 2002. doi : [10.3166/ri.12.461-487](https://doi.org/10.3166/ri.12.461-487).
- Patrice Langlois, Baptiste Blanpain, and Eric Daudé. Magéo, une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent pour les sciences humaines. *Cybergeog : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, (741), 2015. doi : [10.4000/cybergeog.27236](https://doi.org/10.4000/cybergeog.27236).
- C G Langton. Studying artificial life with cellular automata. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 2(1-3) :120–149, October 1986. ISSN 0167-2789.
- Christopher G. Langton. Self-reproduction in cellular automata. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 10(1) :135 – 144, 1984. ISSN 0167-2789. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789\(84\)90256-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789(84)90256-2).
- Jean-Louis Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. AFCET systèmes. Dunod, 1990. ISBN 9782040197049.

- MS Leaning, HE Pullen, ER Carson, and L Finkelstein. Modelling a complex biological system : the human cardiovascular system—1. methodology and model description. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 5(2) :71–86, 1983.
- D. Leriche, M. Oudani, A. Cabani, G. Hoblos, J. Mouzna, J. Boukachour, and A. El Hilali Alaoui. Simulating new logistics system of le havre port. In Alexandre Dolgui, Jurrek Sasiadek, and Marek Zaremba, editors, *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, pages 418 – 423. IFAC-PapersOnLine, vol. 48, nb. 3, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.117>.
- Laurent Lévêque. Le nouveau rôle des autorités portuaires dans l’adaptation des clusters aux enjeux de la globalisation. *L’Espace Politique*, Avril 2012. doi : doi:10.4000/espacepolitique.2210. URL <http://espacepolitique.revues.org/2210>.
- G. Li, P. Ji, L.Y. Sun, and W.B. Lee. Modeling and simulation of supply network evolution based on complex adaptive system and fitness landscape. *Computers Industrial Engineering*, 56(3) :839 – 853, 2009. ISSN 0360-8352. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.039>. Intelligent Manufacturing and Logistics.
- M. J. Lighthill and G. B. Whitham. On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229(1178) :317–345, 1955. ISSN 0080-4630. doi : 10.1098/rspa.1955.0089.
- Qiong Liu, Chaoyong Zhang, Keren Zhu, and Yunqing Rao. Novel multi-objective resource allocation and activity scheduling for fourth party logistics. *Computers and Operations Research*, 44(0) :42 – 51, 2014.
- Ran Liu, Xiaolan Xie, Vincent Augusto, and Carlos Rodriguez. Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *European Journal of Operational Research*, 230(3) :475 – 486, 2013. ISSN 0377-2217. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.044>.
- Sean Luke, Claudio Cioffi-Revilla, Liviu Panait, Keith Sullivan, and Gabriel Balan. Mason : A multiagent simulation environment. *Simulation*, 81(7) :517–527, jul 2005. doi : 10.1177/0037549705058073.
- Laurent Lévêque and Arnaud Serry. Maritime interface and metropolitan interface : questions about the logistic integration of the seine axis. In *Transport Research Arena*, Paris, 2014.
- E. Martín, J. Salvador, and S. Saurí. Storage pricing strategies for import container terminals under stochastic conditions. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 68(0) :118 – 137, 2014.
- Hedwig Hildegard Maurer. *Development of an integrated model for estimating emissions from freight transport*. PhD thesis, The University of Leeds, 2008.
- Daniel McFadden and Winston. Joint estimation of discrete and continuous choices in freight transportation. In *Meeting of the Econometric Society*, 1981.

- David Meignan, Olivier Simonin, and Abderrafiâa Koukam. Simulation and evaluation of urban bus-networks using a multiagent approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(6) :659 – 671, 2007. ISSN 1569-190X. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2007.02.005>.
- Eric J Miller, John Douglas Hunt, John E Abraham, and Paul A Salvini. Microsimulating urban systems. *Computers, environment and urban systems*, 28(1) :9–44, 2004.
- N. Minar, R. Burkhart, C. Langton, and M. Askenazi. The swarm simulation system : A toolkit for building multi-agent simulations. Santa Fe Institute, 1996.
- Octavio Miramontes and Og DeSouza. Individual basis for collective behaviour in the termite, *cornitermes cumulans*. *Journal of Insect Science*, 8(22) :1–11, 2008. doi : <http://doi.org/10.1673/031.008.2201>.
- Jesús Muñuzuri, Pablo Cortés, Luis Onieva, and José Guadix. Modelling peak-hour urban freight movements with limited data availability. *Computers Industrial Engineering*, 59(1) :34 – 44, 2010. ISSN 0360-8352. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2010.02.013>.
- Michel Nabaa. *Morphodynamique des réseaux viaire, application au risque*. PhD thesis, Université du Havre, 2011.
- Jinichi Nagumo, Suguru Arimoto, and Shuji Yoshizawa. An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 50(10) :2061–2070, 1962.
- Rawindaran Nair, Jane Jing Xu, and Robert Mason. Delivery schedule reliability in the international container liner shipping service : Implications for research. 2012.
- Mark Newman. *Networks : An Introduction*. Oxford University Press, Inc., 2010.
- Isaac Newton. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. The Royal Society, London, 1687.
- M. Nguyen-The. *Importer : 4e édition*. Gestion industrielle. Eyrolles, 2011.
- Daiheng Ni. 2dsim : a prototype of nanoscopic traffic simulation. In *Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. IEEE*, pages 47–52. IEEE, 2003.
- Michael North, Nicholson Collier, Jonathan Ozik, Eric Tatara, Charles Macal, Mark Bragen, and Pam Sydelko. Complex adaptive systems modeling with repast symphony. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 1(1) :3, 2013. ISSN 2194-3206. doi : [10.1186/2194-3206-1-3](https://doi.org/10.1186/2194-3206-1-3).
- T. Notteboom. The relationship between seaports and the intermodal hinterland in light of global supply chains : European challenges. In *Port Competition and Hinterland Connections*, pages 25–75, Paris, Mar 2009.
- Theo E Notteboom. The time factor in liner shipping services. *Maritime Economics & Logistics*, 8(1) :19–39, 2006.
- Tore Opsahl, Filip Agneessens, and John Skvoretz. Node centrality in weighted networks : Generalizing degree and shortest paths. *Social Networks*, 32(3) :245 – 251, 2010. ISSN 0378-8733. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.socnet.2010.03.006>.

- Francesco Parola and Anna Sciomachen. Intermodal container flows in a port system network : Analysis of possible growths via simulation models. *International Journal of Production Economics*, 97(1) :75 – 88, 2005. ISSN 0925-5273. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.051>.
- Luciano Pietronero. Complexity ideas from condensed matter and statistical physics. *Europhysics news*, 39(6) :26–29, 2008.
- Yoann Pigné. *Modélisation et traitement décentralisé des graphes dynamiques Application aux réseaux mobiles ad hoc*. PhD thesis, Université du Havre, Dec 2008.
- Port d’Anvers. Faits chiffres. Technical report, Port of Antwerp, 2015.
- Port du Havre. Chiffres clés. Technical report, GPMH - HAROPA, 2015.
- Denise Pumain, Lena Sanders, Hélène Mathian, France Guérin-Pace, and Stephane Bura. Simpop : a multi-agents model for urban transition. *Recent development in spatial information modelling and processing. Budapest, Geomarket*, pages 71–85, 1995.
- Steven F. Railsback, Steven L. Lytinen, and Stephen K. Jackson. Agent-based simulation platforms : Review and development recommendations. *SIMULATION*, 82(9) :609–623, January 2006.
- Matias Sevel Rasmussen, Tor Justesen, Anders Dohn, and Jesper Larsen. The home care crew scheduling problem : Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :598 – 610, 2012. ISSN 0377-2217. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.10.048>. Feature Clusters.
- Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. In *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH ’87*, pages 25–34, New York, NY, USA, 1987. ACM.
- Paul I. Richards. Shock waves on the highway. *Operations Research*, 4(1) :42–51, 1956. ISSN 0030364X, 15265463.
- E. Šrámková, E. Niko, P. Kolář, and J. Huňak. Decision-making factors leading to customers’ satisfaction in container transportation. In *4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 105–110, May 2015. doi : 10.1109/ICAdLT.2015.7136603.
- Jean-Paul Rodrigue. The geography of global supply chains : Evidence from third-party logistics. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3) :15–23, 2012.
- Jean-Paul Rodrigue, C. Comtois, and B. Slack. *The Geography of Transport Systems*. Routledge, 2013.
- Matthew J. Roorda, Rinaldo Cavalcante, Stephanie McCabe, and Helen Kwan. A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(1) :18 – 31, 2010. ISSN 1366-5545. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.002>.

- Jean-Louis Routhier and Florence Toilier. FRETURB V3, A Policy Oriented Software of Modelling Urban Goods Movement. In *11th WCTR*, Berkeley, United States, June 2007.
- Céline Rozenblat and Guy Melançon. *Methods for Multilevel Analysis and Visualisation of Geographical Networks*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2013. ISBN 9400766769, 9789400766761.
- Amir Samimi, Abolfazl Mohammadian, and Kazuya Kawamura. A behavioral freight movement microsimulation model : method and data. *Transportation Letters*, 2(1) :53–62, 2010. doi : 10.3328/TL.2010.02.01.53-62.
- Amir Samimi, Abolfazl Mohammadian, Kazuya Kawamura, and Zahra Pourabdollahi. An activity-based freight mode choice microsimulation model. *Transportation Letters*, 6(3) : 142–151, 2014. doi : 10.1179/1942787514Y.0000000021.
- Lena Sanders, Denise Pumain, Hélène Mathian, France Guérin-Pace, and Stephane Bura. Simpop : a multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B : Planning and design*, 24(2) :287–305, 1997.
- Lena Sanders, Jean-Marc Favaro, Hélène Mathian, Denise Pumain, and Benoit Glisse. Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM (2007). *Cybergéogéographie*, 2007. URL <http://www.cybergeogeo.eu/index8962.html>.
- Guilhelm Savin. *Intelligence en essaim pour la distribution de simulations dans un écosystème computationnel*. PhD thesis, Université du Havre, January 2014.
- Thomas C. Schelling. Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1(2) :143–186, 1971. doi : 10.1080/0022250X.1971.9989794.
- Xavier Schepler. *Solutions globales d'optimisation robuste pour la gestion dynamique de terminaux à conteneurs*. PhD thesis, Université du Havre, October 2015.
- Nadine Schieritz and Andreas Grobler. Emergent structures in supply chains-a study integrating agent-based and system dynamics modeling. In *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, page 9 pp. IEEE, Jan 2003. doi : 10.1109/HICSS.2003.1174226.
- Alfonso Shimbel. Structural parameters of communication networks. *The bulletin of mathematical biophysics*, 15(4) :501–507, 1953. doi : 10.1007/BF02476438.
- Gunnar Stefansson, Britta Gammelgaard, and Remko van Hoek. Collaborative logistics management and the role of third-party service providers. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 36(2) :76–92, 2006.
- J. Q. Stewart. Demographic Gravitation : Evidence and Applications. *Sociometry*, 11(1/2) : 31–58, 1948.
- Amit Surana, Soundar Kumara, Mark Greaves, and Usha Nandini Raghavan. Supply-chain networks : a complex adaptive systems perspective. *International Journal of Production Research*, 43(20) :4235–4265, 2005. doi : 10.1080/00207540500142274.

- J.M. Swaminathan, S.F. Smith, and N.M. Sadeh. Modelling supply chain dynamics : a multi agent approach. *Decision Sciences*, 29(3), 1998.
- Patrick Taillandier. Traffic simulation with the gama platform. In *International Workshop on Agents in Traffic and Transportation*, pages 8–p, 2014.
- Patrick Taillandier, Duc-An Vo, Edouard Amouroux, and Alexis Drogoul. Gama : A simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. In Nimit Desai, Alan Liu, and Michael Winikoff, editors, *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, volume 7057 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 242–258. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- Eiichi Taniguchi, Russell G. Thompson, Eiichi Taniguchi, Russell G. Thompson, and Tadashi Yamada. Recent trends and innovations in modelling city logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125 :4 – 14, 2014. ISSN 1877-0428. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1451>. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics.
- LA Tavasszy, CE Cornelissen, and E Huijsman. Forecasting the impacts of changing patterns of physical distribution on freight transport in europe. In *The 9th World Conference on Transport Research*. Elsevier, 2001.
- Lorant Tavasszy. Freight modeling : An overview of international experiences. *Freight Demand Modeling : Tools For Public-sector Decision Making*, page 47, 2006.
- Lóránt A Tavasszy, Kees Ruijgrok, and Igor Davydenko. Incorporating logistics in freight transport demand models : state-of-the-art and research opportunities. *Transport Reviews*, 32(2) :203–219, 2012.
- Lóránt A Tavasszy, Ben Smeenk, and Cees J Ruijgrok. A dss for modelling logistic chains in freight transport policy analysis. *International Transactions in Operational Research*, 5(6) : 447 – 459, 1998. ISSN 0969-6016. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6016\(98\)00045-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6016(98)00045-8).
- Michael A. P. Taylor, Rocco Zito, Nariida Smith, and Glen M. D’Este. Modelling the impacts of transport policies to reduce greenhouse gas emissions from urban freight transport in sydney. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6 :3135–3150, 2005. doi : [10.11175/easts.6.3135](http://dx.doi.org/10.11175/easts.6.3135).
- G. Teresa and G. Evangelos. Importance of logistics services attributes influencing customer satisfaction. In *4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 53–58, May 2015. doi : [10.1109/ICAdLT.2015.7136590](http://dx.doi.org/10.1109/ICAdLT.2015.7136590).
- Sergio Terzi and Sergio Cavalieri. Simulation in the supply chain context : a survey. *Computers in Industry*, 53(1) :3 – 16, 2004. ISSN 0166-3615. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00104-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00104-0).
- Guy Theraulaz, Eric Bonabeau, and Jean-Louis Deneubourg. The origin of nest complexity in social insects. *Complexity*, 3(6) :15–25, 1998. ISSN 1099-0526. doi : [10.1002/\(SICI\)1099-0526\(199807/08\)3:6<15::AID-CPLX3>3.0.CO;2-V](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-0526(199807/08)3:6<15::AID-CPLX3>3.0.CO;2-V).

- Pierrick Tranouez, Eric Daudé, and Patrice Langlois. A multiagent urban traffic simulation. *Journal of Nonlinear Systems and Applications*, 3(3) :98–106, 2012.
- J.P. Treuil, A. Drogoul, and J.D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents : Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Informatique. Dunod, 2008.
- Bert Vernimmen, Wout Dullaert, and Steve Engelen. Schedule unreliability in liner shipping : Origins and consequences for the hinterland supply chain. *Maritime Economics and Logistics*, 9(3) :193–213, 2007.
- Ludwig von Bertalanffy. *General system theory : foundations, development, applications*. International library of systems theory and philosophy. G. Braziller, 1968.
- John Von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA, 1966.
- Mitchell M. Waldrop. *Complexity : The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. Simon & Schuster, New York, 1992. ISBN 0671767895.
- Duncan J Watts. *Small worlds : The dynamics of networks between order and randomness*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
- Duncan J. Watts and Steven H. Strogatz. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684) :440–442, June 1998. URL <http://dx.doi.org/10.1038/30918>.
- P. Wessa. Free statistics software, office for research development and education, version 1.1.23-r7, Avril 2016. URL <http://www.wessa.net/>.
- Uri Wilensky. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999. URL <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Clifford Winston. The demand for freight transportation : Models and applications. *Transportation Research Part A : General*, 17(6) :419 – 427, 1983. ISSN 0191-2607. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607\(83\)90162-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607(83)90162-0).
- Wisinee Wisetjindawat and Kazushi Sano. A behavioral modeling in micro-simulation for urban freight transportation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5 :2193–2208, 2003.
- Wisinee Wisetjindawat, Kazushi Sano, and Shoji Matsumoto. Commodity distribution model incorporating spatial interactions for urban freight movement. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1966 :41–50, 2006. doi : 10.3141/1966-06.
- Michael Wooldridge and Nicholas R Jennings. Agent theories, architectures, and languages : a survey. In *International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, pages 1–39. Springer, 1994.
- Michael Wooldridge and Nicholas R Jennings. Intelligent agents : Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2) :115–152, 1995.

- Mahdi Zargayouna, Besma Zeddini, Gérard Scemama, and Amine Othman. Agent-Based Simulator for Travelers Multimodal Mobility. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 252 :81–90, Jan 2013.
- Keqiang Zhu and Andre Bos. Agent-based design of intermodal freight transportation systems. In *NECTAR Conference*, 1999.
- Barry Zondag, Pietro Bucci, Padideh Gützkow, and Gerard de Jong. Port competition modeling including maritime, port, and hinterland characteristics. *Maritime Policy & Management*, 37(3) :179–194, 2010.

PUBLICATIONS

- Thibaut Démare, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, and Laurent Lévêque. Interface maritime et interface métropolitaine : vers la modélisation de l'axe seine par les réseaux. In Laurent Beauguitte (coord.), editor, *Les réseaux dans le temps et dans l'espace, Paris, Actes de la deuxième journée d'études du groupe fmr (flux, matrices, réseaux)*, pages 249–263, 2013.
- Thibaut Démare, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, and Laurent Lévêque. Agent-based model and networks : the modelling of the maritime and metropolitan interfaces of the seine axis. In *Devport international conference for ports, maritime transport and regional development : Adaptation of maritime, port and logistics actors to hazards of globalization*, June 2014.
- Thibaut Démare, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, and Laurent Lévêque. Logistic corridors modelled with agent-based approach and dynamic graphs. In *4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 199–204, May 2015. doi : 10.1109/ICAdLT.2015.7136619.
- Thibaut Démare, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, and Laurent Lévêque. Agent-based approach and dynamic graphs to model logistic corridor. *Procedia Computer Science*, 52 (0) :968 – 973, 2015. ISSN 1877-0509. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.174>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915009746>. The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2015), the 5th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2015).
- Thibaut Démare, Cyrille Bertelle, Antoine Dutot, and Laurent Lévêque. A systemic approach with agent-based model and dynamic graphs to understand the organization of a logistic system. In Arnaud Serry and Laurent Lévêque, editors, *Short Sea shipping : Myth or future of regional transport*, chapter 12, pages 211–223. Editions EMS, May 2016.

Une approche systémique à base d'agents et de graphes dynamiques pour modéliser l'interface logistique port-métropole

Résumé

Un système logistique est une composante essentielle d'un système spatial dans lequel les acteurs s'organisent autour d'infrastructures pour faire circuler des flux (de marchandises, d'information et financier) sur un territoire. L'organisation logistique globale résulte d'un processus auto-organisé et distribué de la part des acteurs.

Ce travail vise à comprendre, à de multiples échelles, comment des acteurs autonomes et très hétérogènes (dans leurs modes de fonctionnements et dans leurs objectifs), s'organisent collectivement autour des infrastructures à leurs dispositions pour gérer des flux soumis à un ensemble de contraintes (temporelles, spatiales,...).

On propose ici un modèle orienté agent permettant de simuler les processus de création et d'organisation des flux liés à la logistique sur un territoire. Le modèle prévoit de décrire l'interface entre les flux internationaux et les flux urbains afin de comprendre comment les dynamiques portuaires et urbaines cohabitent au sein du système. Le modèle intègre une dynamique structurelle et organisationnelle grâce aux graphes dynamiques afin de représenter l'évolution du système. Le modèle permet ainsi aux agents de s'adapter, comme dans la réalité, à des perturbations du système.

Mots-clés : Système complexe ; Modèle orienté agent ; Graphe dynamique ; Système logistique

A Systemic Approach with an Agent-Based Model and Dynamic Graphs to Model the Urban-Port Interface

Abstract

A logistic system is an essential component of a spatial system. Actors are organised around infrastructures in order to move different kinds of flow (of goods, of information, or financial) over a territory. The logistic organisation comes from an auto-organised and distributed process from the actors.

This work aims to understand, at different scales, how autonomous and heterogeneous actors (according to their goals and methods to take decisions) are collectively organised around infrastructures to manage different kinds of flow, and despite numerous constraints (temporal, spatial,...).

We propose an agent-based model which allows to simulate the processes to create and organise logistic flow over a territory. The model describes an interface between international and urban flow in order to understand how the port and urban dynamics work together. The model integrates a structural and organisational dynamics thanks to dynamic graphs in order to represent the evolution of this kind of system. Thus, the agents can adapt themselves to system's perturbations as in the reality.

Keywords : Complex System ; Agent Based Model ; Dynamic Graph ; Logistic System
