



HAL
open science

Evaluation de la performance économique des Centres de Distribution Urbaine

Lucile Faure

► **To cite this version:**

Lucile Faure. Evaluation de la performance économique des Centres de Distribution Urbaine. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2015. Français. NNT : 2015EMSE0803 . tel-01299541

HAL Id: tel-01299541

<https://theses.hal.science/tel-01299541>

Submitted on 7 Apr 2016

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.



NNT : 2015 EMSE 0803

THÈSE

présentée par

Lucile FAURE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie Industriel

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE DES CENTRES DE DISTRIBUTION URBAINE

soutenue à Saint-Etienne, le 24 novembre 2015

Membres du jury

Président/Rapporteur :	Eric BALLOT	Professeur, Mines ParisTech, Paris
Rapporteur :	Gilles PACHÉ	Professeur, Université Aix-Marseille, Aix-en-Provence
Examineur(s) :	Nicolas MALHÉNE Guillaume MARQUÈS	Maître de Conférences, EIGSI, La Rochelle Docteur, CHU Toulouse, Toulouse
Directeur(s) de thèse :	Patrick BURLAT Benoit MONTREUIL	Professeur, École des Mines de Saint-Étienne, Saint-Étienne Professeur, ISYE School – Georgia Tech, Atlanta

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX MECANIQUE ET INGENIERIE GENIE DES PROCEDÉS SCIENCES DE LA TERRE SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	K. Wolski Directeur de recherche S. Drapier, professeur F. Gruy, Maître de recherche B. Guy, Directeur de recherche D. Graillet, Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES INFORMATIQUE IMAGE, VISION, SIGNAL GENIE INDUSTRIEL MICROELECTRONIQUE	O. Roustant, Maître-assistant O. Boissier, Professeur JC. Pinoli, Professeur A. Dolgui, Professeur S. Dautzere Peres, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTAIA-GUSCHINSKAYA	Olga	CR	Génie industriel	FAYOL
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSSE	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURJOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GONDRAN	Natacha	MA(MDC)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFORREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MAURINE	Philippe	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles	PR	Génie industriel	FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche		CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Rosin	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
PICARD	Gauthier	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
ROUX	Christian	PR	Image Vision Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE



THÈSE

présentée par

Lucile FAURE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie Industriel

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE DES CENTRES DE DISTRIBUTION URBAINE

soutenue à Saint-Étienne, le 24 novembre 2015

Membres du jury

Président/Rapporteur :	Éric BALLOT	Professeur, Mines ParisTech
Rapporteur :	Gilles PACHÉ	Professeur, Université Aix-Marseille
Examineur :	Nicolas MALHÉNÉ	Maitre de Conférences, EIGSI
Examineur :	Guillaume MARQUÈS	Docteur, CHU Toulouse
Directeur de thèse :	Patrick BURLAT	Professeur, École des Mines de Saint-Étienne
Co-Directeur de thèse :	Benoit MONTREUIL	Professeur, ISYE School-Georgia Tech

Remerciements

Quand le moment tant attendu de la rédaction des remerciements arrive, voilà que je ne sais pas par où commencer... Comment exprimer ma gratitude à autant de personnes et comment ne pas en oublier ? Il faut pourtant se lancer, alors j'y vais.

Je voudrais tout d'abord remercier Eric Ballot et Gilles Paché, de me faire l'honneur de rapporter cette thèse. Je les remercie aussi, par avance, pour les commentaires et les remarques qu'ils feront sur ce travail et qui amélioreront, sans nul doute, sa qualité. J'espère qu'ils découvriront, à travers ce manuscrit, le plaisir que j'ai eu à mener ces recherches.

J'adresse de sincères remerciements à Nicolas Malhéné pour avoir accepté, en tant qu'examineur, de participer au jury de soutenance.

J'ai un merci tout particulier pour Guillaume. D'abord, car cette thèse n'aurait pas eu lieu sans lui, ensuite de m'avoir apportée tout son soutien, son aide et son expérience durant la première moitié de ces trois ans et d'avoir joué un rôle plus important que celui d'un encadrant. Et puis, d'avoir toujours gardé un œil sur mes travaux, même après avoir choisi de nouveaux horizons, et de s'être autant impliqué dans ma rédaction. Enfin, pour être présent le jour de la soutenance et me permettre d'apprécier, encore une fois, ses qualités d'orateur. J'espère que nos longues conversations téléphoniques continueront bien après cette échéance.

Je tiens également à remercier sincèrement mes directeurs de thèse. Je remercie Benoit d'avoir accepté de codiriger mon travail et aussi pour ses conseils précieux et son sens de l'argumentation. Merci de m'avoir repoussée sans cesse dans mes retranchements, pour tirer, je l'espère, le meilleur de moi-même. Je n'oublie pas non plus de le remercier pour son accueil lors de mon séjour à l'Université Laval qui était une source d'inquiétude. La vie n'a pas été un long fleuve tranquille entre Saint-Etienne et Québec pour moi... ;) Je prendrai toujours autant de plaisir à discuter avec toi.

Ensuite, je remercie Patrick, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, son écoute et ses analyses toujours précises, riches et pertinentes. Merci de m'avoir laissée m'exprimer, professionnellement et personnellement et d'avoir toujours pris le temps pour répondre à mes besoins. Je le remercie aussi particulièrement de m'avoir toujours soutenue et fait confiance, et d'avoir fait en sorte que je puisse travailler dans les meilleures conditions possibles quel que

REMERCIEMENTS

soit le contexte. Je suis sûre que ce n'est qu'une première collaboration.

Je souhaite également remercier tous mes collègues de PIESO et d'EPICE pour leur bonne humeur et leur esprit d'équipe. J'ai été heureuse de faire partie de cette famille dans laquelle on peut exposer son point de vue et en débattre. Merci pour la bienveillance de chacun. J'ai une pensée particulière pour les collègues du coin café (Hervé, Bernadette, Nadine, Damien, Sophie...). Je remercie aussi les collègues de PIESO et de l'Institut Fayol avec qui j'ai pris beaucoup de plaisir à collaborer ou à discuter autour d'un thé (Antoine, Jean-François, Dina, Jesus, Sarra...). J'adresse un remerciement particulier à Zahia pour...tout ! Que serait PIESO sans toi ? Merci pour ta disponibilité, tes conseils, nos discussions, ton efficacité.

Je n'oublie évidemment pas mes collègues de bureau : Carine, pour sa gentillesse et sa bienveillance, Jonathan pour avoir supporté mes états d'âmes et pour toujours prendre les choses avec relative bonne humeur, et enfin Herry, pour sa convivialité et ses conseils avisés. Votre soutien a été important, surtout pendant ma période de rédaction. Je leur souhaite le meilleur pour la suite.

Merci à ma famille (Marion, Julie, Tiphonie, Guillaume, Vincent, Claudine, Sylvie, Bruno...) pour leur soutien permanent, leurs encouragements et les moments de bonheur qu'ils m'apportent à chaque fois que l'on se voit. Je remercie particulièrement mes parents, pour les mêmes raisons mais aussi pour avoir pris le temps de relire ce manuscrit, des fois un peu rébarbatif.

Enfin, mes plus profonds remerciements vont à Bastien. Merci de me supporter, de m'encourager, de me rassurer, de me canaliser et surtout de toujours faire preuve de patience et de calme. Merci de m'avoir accompagnée et soutenue dans cette difficile épreuve de la thèse.

Et à tous ceux que j'ai pu oublier, et qui ne m'en tiendront pas rigueur, je l'espère...

Table des matières

Remerciements	iii
Table des figures	xii
Liste des tableaux	xiii
Introduction	1
1 La logistique urbaine : système névralgique de la ville	5
I L'organisation de la logistique dans et pour la ville	5
I.1 La livraison de marchandises au coeur des villes	5
I.2 Des solutions pour améliorer la ville	6
I.2.a L'aménagement du territoire	8
I.2.b Les modes de transport alternatifs au routier	11
I.2.c Contrôle de l'espace et des déplacements	15
II Les recherches sur la logistique urbaine	16
II.1 Contexte général	16
II.2 Les démarches d'évaluation <i>a posteriori</i>	18
II.2.a Les approches qualitatives	18
II.2.b Les approches quantitatives	21
II.3 Se placer dans une démarche <i>a priori</i>	22
II.3.a Les approches qualitatives	22
II.3.b Les approches quantitatives	24
II.4 Synthèse des différentes approches	28
III Le Centre de Distribution Urbaine : une solution très envisagée avec des résultats mitigés	30
III.1 Précisions sur le cadre d'étude	30

TABLE DES MATIÈRES

III.2	Evaluer la rentabilité d'un CDU	32
2	Un modèle économique pour évaluer la rentabilité d'un CDU	35
I	Description économique du système	35
I.1	Notre positionnement : notion de marge sur coûts variables	35
I.2	Les choix de modélisation	36
I.3	Modèle économique proposé	38
II	Analyse graphique	41
II.1	Des hypothèses pour obtenir les courbes	41
II.1.a	Calcul du nombre de véhicules nécessaires	42
II.1.b	Estimation de la distance	43
II.2	Etude des différentes courbes	46
II.2.a	Evolution de la marge sur coûts variables	46
II.2.b	Evolution des coûts fixes	47
III	Prise en compte des distances entre le CDU et les remettants	51
III.1	Limite du modèle proposé	51
III.2	Proposition	53
III.2.a	La loi des rendements décroissants	53
III.2.b	Intégration dans le modèle	55
3	Un indicateur pour quantifier la performance : le TRG	59
I	Description physique du système	59
I.1	La notion de Taux de Rendement Global	59
I.2	Le TRG appliqué à un système de livraison	61
I.2.a	Parallèle TRG - CDU	61
I.2.b	Particularité du système de livraison	63
I.2.c	Quelques reformulations dans le modèle	65
I.3	Détails des indicateurs de performance	66
I.3.a	Le Taux de Qualité (TQ)	66
I.3.b	Le Taux de Performance (TP)	67
I.3.c	La Disponibilité Opérationnelle (DO)	69
I.4	Lien avec le modèle économique	70
II	Les leviers d'actions identifiés	72
II.1	Les leviers endogènes du système	73

II.2	Les leviers exogènes du système	74
II.3	Des leviers comme conditions de viabilité pour un CDU	76
4	L’Internet Physique comme catalyseur de la performance	79
I	Le concept d’Internet Physique	79
I.1	En général	79
I.1.a	L’insoutenabilité du système logistique mondial actuel	79
I.1.b	La métaphore de l’Internet numérique	80
I.1.c	Elements structurants de l’Internet Physique	81
I.1.d	Les effets envisagés	82
I.2	La logistique urbaine hyperconnectée	82
II	Un CDU dans Internet Physique	84
II.1	La notion de PI-hub	84
II.2	Les PI-hubs de la logistique urbaine hyperconnectée	85
II.3	Le CDU : un PI-hub	86
III	Impacts potentiels sur la performance	90
III.1	Retour sur les leviers du modèle et leurs interactions avec PI	90
III.2	La performance du CDU dans ce contexte	91
5	Etude de cas	95
I	Etude de l’influence de trois paramètres exogènes	95
I.1	Les paramètres choisis	95
I.2	Analyses de sensibilité	96
I.2.a	Analyse de robustesse du modèle économique par rapport au colis moyen	96
I.2.b	Analyse de sensibilité du modèle à une variation du prix de l’énergie	98
I.3	Réflexion à partir de cas génériques pour évaluer l’impact de la morphologie sur la rentabilité d’un CDU	99
I.3.a	La génération des morphologies	100
I.3.b	Modélisation de la distance d’approche	104
I.3.c	Résultats	106
II	Application à un cas réel pour tester les leviers endogènes	111
II.1	Contexte	111

TABLE DES MATIÈRES

II.1.a	Le contexte géographique	111
II.1.b	Le contexte économique et organisationnel	112
II.2	Les paramètres identifiés	113
II.3	Résultats	115
II.3.a	Application numérique relative à l'erreur sur le colis moyen . .	115
II.3.b	Impact d'une variation du taux de souffrance sur la perfor- mance économique du CDU	118
II.3.c	Impact de la capacité et de la motorisation des véhicules sur la rentabilité du CDU	121
II.3.d	Influence de la politique tarifaire	127
II.3.e	Vers un PI-CDU	131
Conclusion		135
Bibliographie		139
A Définition du colis moyen		149
B Générateur d'instances		151
C Web-SIG		155
D Courbes de temps selon la morphologie		161
E Outil d'aide à la décision par la simulation		165
F L'ISO 26000		171

Table des figures

1	Schéma synthétique de l'approche mobilisée	4
1.1	Représentation schématique de la multimodalité	7
1.2	Représentation schématique de la mutualisation	7
1.3	La ville avec sa demande et ses transporteurs	8
1.4	Les flux générés par une livraison en propre par chaque transporteur	8
1.5	Représentation schématique de la consolidation ouverte des tournées	9
1.6	Représentation schématique du changement de point de livraison	10
1.7	Représentation schématique de l'aménagement du stationnement	11
1.8	Représentation schématique de l'accessibilité du réseau par voie fluviale	12
1.9	Représentation schématique de l'accessibilité du réseau par voie ferroviaire	13
1.10	Exemple de l'accessibilité du réseau par un tramway	14
1.11	Processus d'évaluation d'un projet	18
2.1	Exemple d'évolution de la marge sur coûts variables/mois par rapport aux coûts fixes	36
2.2	Exemple d'évolution de la marge sur coûts variables/mois en fonction du nombre de colis livrés par jour	41
2.3	Estimation de la distance interstops en fonction de la surface S de la ville et du nombre de stops N	43
2.4	Evolution de la distance interstops en fonction de la densité en stops et comparativement avec une erreur de $\pm 5\%$ sur la distance	44
2.5	Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec subventions et activités complémentaires	47
2.6	Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec deux types de véhicules	48
2.7	Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec deux types de véhicules, subventions et activités complémentaires	50

TABLE DES FIGURES

2.8 Exemple d’une ville avec un CDU et des transporteurs locaux 51

2.9 Exemple d’une ville avec un CDU et des transporteurs locaux remettant leurs
marchandises 52

2.10 Illustration du phénomène de rendements, finalement, décroissants 53

2.11 Evolution du prix de facturation d’un colis en fonction de son rang 56

2.12 Evolution du chiffre d’affaires journalier en fonction du nombre de colis livrés
par jour 57

2.13 Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle et des coûts fixes 58

3.1 Description de la décomposition des temps 60

3.2 Application de la décomposition à un cycle de livraison 62

4.1 Les villes comme nœuds du Web logistique mondial (source :MONTREUIL (2015)) 83

4.2 Vision de la logistique urbaine hyperconnectée (source :CRAINIC et MONTREUIL
(2015)) 83

4.3 Un exemple de PI-hub routier (source :MONTREUIL et al. (2014)) 85

4.4 Détail de la zone d’étude (adapté de CRAINIC et MONTREUIL (2015)) 86

4.5 Exemple d’une évolution de marge sur coûts variables 89

5.1 Méthode d’obtention des configurations de ville 100

5.2 Identification de la forme générale des villes de Modène et Oxford 101

5.3 Les deux configurations obtenues 102

5.4 Répartition moyenne des distances au sein de la distance parcourue pour une
surface de 1km^2 contenant 50 stops 103

5.5 Illustration de l’éloignement entre les centres de gravité d’un cercle et d’un
rectangle ayant la même surface 104

5.6 Définitions pour calculer la distance au centre de gravité du cercle et du rectangle105

5.7 Evolution de l’écart entre les centres de gravité en fonction de la surface 105

5.8 Evolution du temps d’une tournée en fonction de la surface pour une densité de
 $10\text{ stops}/\text{km}^2$ 108

5.9 Exemple d’un abaque obtenu 109

5.10 Zoom sur les iso-temps de 2,5h 110

5.11 Le contexte géographique du CDU ”Simplicité” de Saint-Etienne 111

5.12 Effet d’une erreur de $\pm 7\%$ sur l’estimation du colis moyen 116

5.13 Zoom sur le point de fonctionnement 30% du flux 117

5.14	Simulation d'une amélioration du taux de souffrance	120
5.15	Simulation de l'utilisation de différents véhicules	123
5.16	Simulation de l'utilisation de différents véhicules de 0 à 30% du flux	124
5.17	Simulation de différentes politiques tarifaires	129
5.18	Simulation de différentes politiques tarifaires de 0 à 30% du flux	130
5.19	Simulation d'un PI-CDU	131
A.1	Définition du colis moyen à partir de données transporteur	149
B.1	Définition de la grille initiale dans laquelle la ville va être dessinée	151
B.2	Définition de l'ellipse qui déterminera les contours de la ville	152
B.3	Définition d'un zone contenant des sens unique et équivalente à un centre-ville	152
B.4	Définition de la flotte qui sera utilisée	153
B.5	On indique à l'utilisateur que le programme a terminé	153
B.6	Affichage sur un SIG de la configuration obtenue	154
C.1	Exemple d'affichage d'une configuration générée par notre programme sur le Web-SIG	155
C.2	Affichage de la carte de Saint-Etienne par chargement de la base de données OpenStreetMap	156
C.3	Ajout de points de livraison et d'un CDU dans la ville de Saint-Etienne	157
C.4	Zoom sur le CDU et quelques points de livraison	158
C.5	Affichage des tournées réalisées pour livrer les points affichés	159
D.1	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 5 stops/km ²	161
D.2	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 10 stops/km ²	162
D.3	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 15 stops/km ²	162
D.4	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 20 stops/km ²	163
D.5	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 25 stops/km ²	163
D.6	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 30 stops/km ²	164

TABLE DES FIGURES

D.7	Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 35 stops/km ²	164
E.1	Les différentes sources d'informations de l'outil décrivant le modèle	165
E.2	Les entrées économiques	166
E.3	Les entrées organisationnelles	166
E.4	Les entrées concernant les véhicules	167
E.5	Les données sur les temps du processus	167
E.6	Les sorties logistiques de l'outil	168
E.7	Les indicateurs liés au TRG	168
E.8	Le pilotage opérationnel du système	169
E.9	Les sorties économiques de l'outil	170
F.1	Les questions centrales et les domaines d'actions de l'ISO 26000	171
F.2	Ebauche de proposition d'un cadre d'évaluation d'un CDU basé sur l'ISO 26000	172

Liste des tableaux

1.1	Positionnement de l'état de l'art sur l'évaluation des solutions de logistique urbaine	29
3.1	Analogie entre le cycle de production et le cycle de livraison	63
3.2	Détails du Temps Utile	65
3.3	Exemples d'objectifs, leviers et paramètres liés	76
4.1	Modifications entraînées sur le CDU par PI	89
4.2	Champ d'action de PI	90
5.1	Valeurs utilisées pour effectuer les simulations	107
5.2	Principales valeurs économiques utilisées pour effectuer les simulations	112
5.3	Valeurs des paramètres organisationnels principaux utilisées dans les simulations	113
5.4	Valeurs obtenues pour les ratios du système au point de fonctionnement 30% .	114
5.5	Scénarios étudiés	119
5.6	Comparaison des performances physiques des scénarios S0, S1b et S2b pour 30% du flux	121
5.7	Caractéristiques des véhicules étudiés	123
5.8	Comparaison des performances physiques du CDU selon le type de véhicules utilisé pour 30% du flux	126
5.9	Scénarios de facturation simulés	128
5.10	Scénarios de facturation simulés	131
5.11	Comparaison des performances physiques du CDU en fonctionnement actuel et dans un réseau Internet Physique pour 30% du flux	132

LISTE DES TABLEAUX

Introduction

Chaque jour les systèmes logistiques sont à l'œuvre, pour l'essentiel, à l'insu des consommateurs finaux à qui ils se destinent. Ces derniers se concentrent dans des villes dont la vie économique repose, en partie, sur la bonne circulation des marchandises. En tant qu'habitant d'une ville, nous vivons au quotidien au rythme de cette logistique. En tant qu'ingénieur ou chercheur nous pouvons nous interroger sur son organisation.

Les villes sont d'ailleurs de plus en plus au cœur d'enjeux contradictoires. D'un côté, la révolution du e-commerce a considérablement augmenté les flux entrants dans la ville. D'un autre côté, on aspire à créer des espaces de vie agréable souvent piétons et dans lesquels les véhicules, notamment les camions, ne sont pas les bienvenus. Pourtant, l'approvisionnement est indispensable pour conserver l'attractivité de la ville. Il est donc nécessaire de penser à des solutions permettant d'accorder ces différents besoins.

Mais les problématiques liées à l'approvisionnement des centres-villes sont loin d'être nouvelles. Au temps de la Rome antique, le *praefectus annonae* était le magistrat en charge d'assurer le bon approvisionnement en blé¹. Son champ de responsabilité avait même été étendu à l'organisation de la distribution aux habitants et entreprises de la ville. A cette époque déjà, cette mission complexe (plus de 200000 particuliers à approvisionner ainsi que toutes les boulangeries de la ville) était confiée aux plus hautes instances du gouvernement.

Aujourd'hui, de nouvelles problématiques se sont ajoutées à la complexité initiale du problème avec notamment la diversification et la multiplication des flux. En outre, les préoccupations ont, elles aussi, évolué plaçant l'environnement et la société comme piliers de la durabilité. A quelques mois de la COP21 à Paris, ces enjeux devraient être au cœur des discussions mondiales et les nuisances liées à l'approvisionnement des villes réglées depuis longtemps. La réalité est plutôt que nous sommes dans une société où l'économie dicte les règles et constitue la clé de tri des décisions stratégiques.

Ce positionnement est cependant assez compréhensible. La plupart des Etats sont à bout de souffle, noyés sous le poids de dettes énormes. Ils ne peuvent plus suivre le coût des technologies et concepts développés pour améliorer le quotidien et la qualité de l'air des citoyens alors que

1. Site web du projet ANR ANNONA : annona.emse.fr, accédé le 30/09/2015

INTRODUCTION

ces mêmes citoyens sont plutôt soucieux de leur propre avenir. Aux premiers abords, comment comprendre que des moyens soient mis pour améliorer la qualité de vie à long terme alors que la majorité des gens ne peuvent prévoir à court ou moyen terme ? Il est donc indispensable de trouver des solutions durables, au sens propre et figuré. Car finalement, est-on vraiment incapable de concilier des solutions économiques avec des solutions améliorant l'environnement dans lequel nous évoluons ?

En effet, existe-t-il forcément une contradiction entre adopter un comportement écoresponsable et obtenir une prospérité ou un équilibre économique ? Même s'ils ne sont probablement pas encore assez nombreux, certains ont pourtant bien réussi à adapter leur mode de vie et de consommation à l'écosystème dans lequel ils évoluent. Par exemple, en diminuant d'un degré ou deux le chauffage de leur maison, en se déplaçant à vélo, en consommant moins de viande ou encore en privilégiant les produits locaux. Bien sûr, il s'agit là de comportements individuels et délibérés, néanmoins il en ressort que cela est économiquement viable à l'échelle d'un foyer. Le modèle devrait pouvoir se transposer à une organisation. Le mode de vie deviendrait alors la raison d'être de la structure. A l'échelle de la ville, et plus particulièrement dans le cas de son approvisionnement, cela revient à redéfinir le fonctionnement du système logistique urbain et des différents jeux d'acteurs qui y prennent part.

C'est dans ce but qu'un domaine de recherche et de développement propre a été défini, il s'agit de la logistique urbaine. L'objectif de ce domaine de recherche spécifique était d'apporter des réponses adaptées à la complexité et à l'importance de la chaîne d'approvisionnement en ville. Parmi les solutions qui ont été développées pour améliorer la distribution et l'approvisionnement urbain, le Centre de Distribution Urbaine (CDU), semble répondre aux enjeux environnementaux et sociétaux qui nous préoccupent. Cette plateforme de mutualisation à l'entrée de la ville agit un peu comme un filtre. Elle réorganise les flux et utilise des moyens de transport plus doux pour effectuer la distribution urbaine. Néanmoins, les expériences de CDU mettent en avant une difficulté à trouver un équilibre économique, indispensable à sa pérennité et qui entraîne une défaillance par rapport à ses prérequis en tant qu'organisation. La question de recherche que nous formulons est la suivante : un CDU peut-il être viable dans une ville de taille moyenne ? En complément, nous chercherons à identifier des leviers d'actions favorisant l'atteinte de cette rentabilité.

Pour commencer, nous décrirons plus en détails les raisons qui ont poussé les chercheurs à développer la notion de logistique urbaine. Nous présenterons, les grandes catégories de solutions existantes à l'heure actuelle. Puis nous proposerons un état de l'art à travers lequel nous montrerons l'intérêt de la communauté scientifique pour les démarches d'évaluation. Nous verrons qu'elles mobilisent deux types d'approches (quantitative ou qualitative) et deux types de points de vue (*a posteriori* et *a priori*). Cette étape nous permettra de faire le point sur les

méthodes existantes et leurs apports respectifs. Enfin, après avoir relevé un intérêt particulier pour l'évaluation des CDU, nous ferons un focus sur la façon dont celle-là est traitée dans la littérature. Cela sera l'occasion de s'interroger sur la viabilité d'un CDU (**Chapitre 1**).

Nous définirons, ensuite, notre interprétation de la notion de rentabilité (**Chapitre 2**). Nous montrerons en quoi le concept de marge sur coûts variables répond au besoin d'indicateurs opérationnels pour évaluer la viabilité d'un CDU. Nous pourrions à partir de là proposer un modèle économique détaillé associé à un CDU. A partir des différents coûts et revenus identifiés, nous exposerons des leviers d'actions physiques mobilisables pour améliorer la performance de ce CDU. Ce dernier point relèvera la nécessité de compléter la démarche d'évaluation de la performance économique d'un CDU par une évaluation de sa performance physique.

C'est pourquoi, nous introduirons le concept de Taux de Rendement Global (TRG) sur lequel nous nous appuierons pour construire un modèle physique du CDU (**Chapitre 3**). Le TRG est une notion définie dans le cadre de la gestion de production. C'est un indicateur de performance qui évalue l'efficacité du processus de production au regard de ses ressources. Un panel d'indicateurs qui découle de ce concept, permettra de quantifier la performance à chacune des étapes du processus. L'évaluation par le TRG et le panel d'indicateurs associé est basée sur l'étude des temps de chaque étape. Après avoir proposé une description temporelle du processus de livraison du CDU, nous montrerons comment ces définitions sont applicables au CDU. Nous pourrions alors associer un indicateur de performance à chaque étape du processus. Nous établirons ensuite un lien entre le modèle physique, basé sur le TRG, et le modèle économique du CDU. Nous montrerons alors en quoi elles permettent l'identification de leviers d'actions, exogènes et endogènes, susceptibles d'améliorer les performances physiques et économiques du CDU.

Nous mobiliserons ensuite le concept d'Internet Physique dans le but de compléter la démarche d'identification de leviers initiée dans le chapitre 3 en proposant une solution susceptible d'améliorer encore plus la performance d'un CDU (**Chapitre 4**). L'Internet Physique (PI) suggère un changement de paradigme de la logistique mondiale. Il vise à modifier la façon dont les marchandises sont gérées, transportées, stockées etc. dans le but de construire un réseau logistique plus cohérent et plus performant. Nous présenterons d'abord, les principes fondamentaux de l'Internet Physique au niveau global et local. Puis nous montrerons les avantages d'une logistique urbaine organisée selon ces principes. Notamment, nous exposerons les raisons qui nous poussent à envisager le CDU comme un élément structurant de PI appelé PI-hub. Nous décrirons alors les conséquences de cette nouvelle organisation sur le fonctionnement d'un CDU et les gains sur la performance auxquels on peut s'attendre. Cela sera l'occasion de valider l'apport de PI à l'échelle de la ville.

Enfin, nous conclurons ces travaux par une étude de cas (**Chapitre 5**). Dans un premier

INTRODUCTION

temps, nous testerons l'impact de trois leviers d'actions exogènes au CDU : le colis moyen manipulé, le prix de l'énergie et la morphologie de la ville. Les deux premiers leviers feront l'objet d'une analyse de robustesse. L'influence de la morphologie de la ville sera, quant à elle, évaluée à partir de cas génériques que nous créerons. Nous mettrons en avant la part plus ou moins importante de chaque levier dans la performance économique du CDU. Puis, dans un second temps, nous utiliserons un cas réel pour étudier l'impact de trois actions endogènes : l'amélioration de la planification, le choix de la flotte de véhicules et la politique tarifaire adoptée. Nous montrerons en quoi les performances physiques et économiques actuelles peuvent être améliorées en activant ces différents leviers. Et notamment, les apports de l'Internet Physique pour l'ensemble de ces actions seront évalués. Ce dernier point contribuera à proposer des solutions innovantes, conséquence d'une mise à jour des solutions actuelles, pour construire la ville de demain.

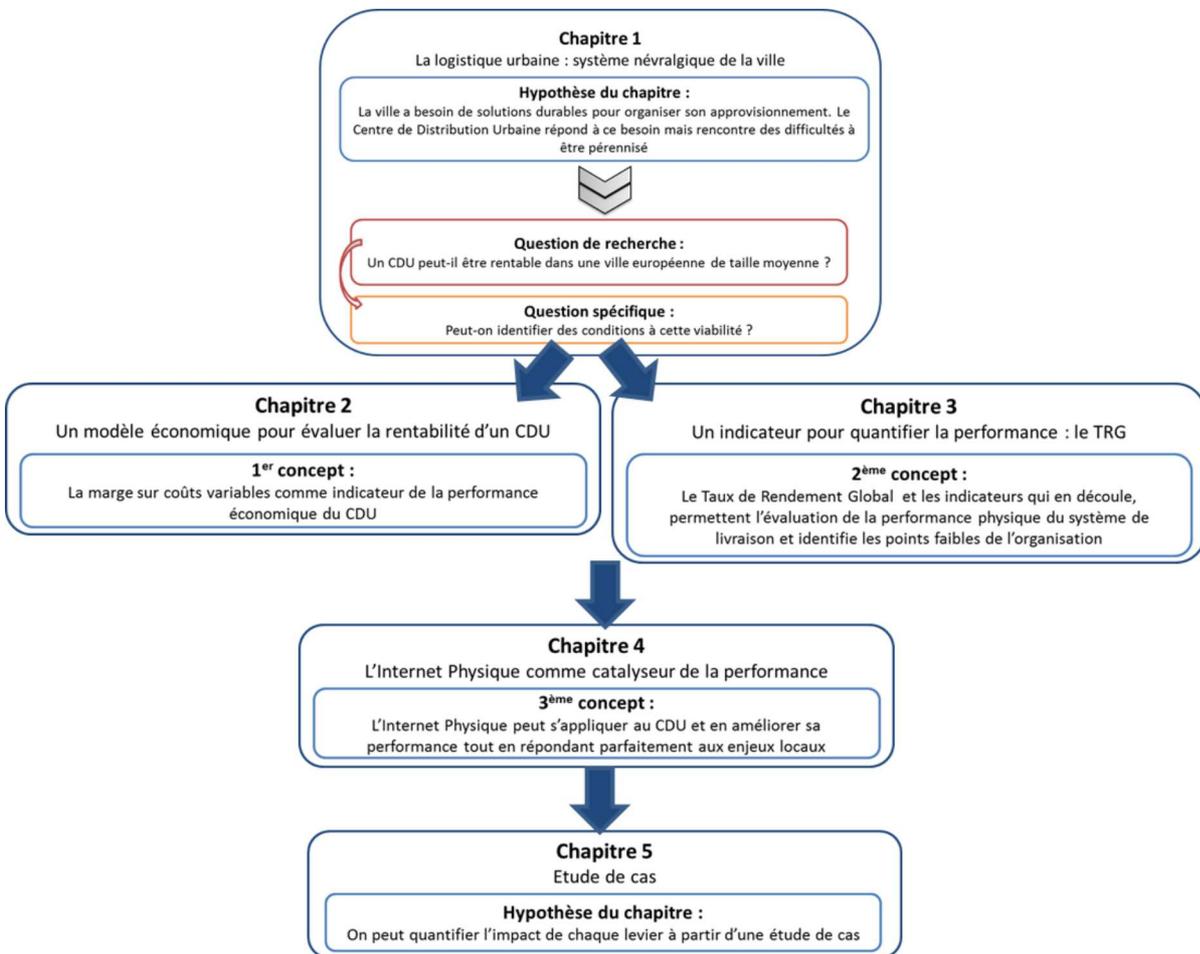


FIGURE 1 – Schéma synthétique de l'approche mobilisée

Chapitre 1

La logistique urbaine : système névralgique de la ville

I L'organisation de la logistique dans et pour la ville

I.1 La livraison de marchandises au coeur des villes

Bien qu'indispensable à la pérennité des villes, le transport de marchandises (ou TMV pour transport de marchandises en ville) est source de nombreuses nuisances pour les habitants et utilisateurs de l'aire urbaine : encombrement des voies, bruit, pollution (ALBERGEL et al. 2006)... Il est ainsi souvent considéré comme un "fléau" que l'on cherche à éliminer ou à modérer. Cette problématique n'est d'ailleurs pas nouvelle puisqu'elle était déjà pointée du doigt par WATSON (1975) il y a plus de 40 ans puis, un peu plus tard par OGDEN (1992). Or le "toujours plus vite mais toujours moins cher" a trouvé avec le e-commerce une caisse de résonance qui pose la question de la "valeur" du transport de marchandises. Souvent offert, ou réduit à un prix symbolique, le transport entre peu en compte dans le champ de valeur du produit pour le client final. Pourtant, la livraison vers celui-ci représente en moyenne 28% du coût total de transport (ROCA-RIU et ESTRADA 2012). Proportionnellement à la distance parcourue, ce dernier maillon est le plus cher de toute la chaîne d'approvisionnement. Dès lors, l'enjeu économique est central pour la logistique en ville.

Le deuxième enjeu est sociétal. L'accumulation des contraintes et nuisances citées plus haut, ajoutée aux coûts du foncier, finit par étouffer les centre-villes qui, devenant impraticables, se voient délaissés par les habitants qui préfèrent les périphéries bien plus accessibles en voiture. Afin d'éviter ce phénomène, les pouvoirs publics tentent d'insuffler une nouvelle dynamique en créant des espaces de vie urbains agréables, souvent piétons, et dans lesquels les véhicules, dont les camions, ne sont pas les bienvenus. La livraison en ville devient alors une source de stress

importante pour les chauffeurs-livreurs qui doivent faire face au mécontentement régulier des usagers des rues mais aussi à l'insécurité pour leurs marchandises et eux-mêmes. Néanmoins, l'attractivité d'un centre-ville tient aussi aux activités économiques qu'il propose (commerces, restaurants...) et qui nécessitent indéniablement des livraisons (CHANUT et PACHÉ 2013). Ainsi, et en conformité avec les conclusions du rapport du PIPAME en 2009 (INTERFACE TRANSPORT et al. 2009), « si les commandes peuvent être dématérialisées, les biens commandés eux, doivent et devront toujours être livrés physiquement : le système logistique urbain est donc contraint ».

Le dernier enjeu lié à la livraison en ville est environnemental. Si le transport de marchandises ne représente qu'environ un quart du trafic total en ville, il génère à lui seul entre 16% et 50% des émissions polluantes dûes aux activités de transport en ville (ALBERGEL et al. 2006 ; DABLANC 2007). A l'heure où les villes et les états s'engagent sur des plans d'actions environnementaux, améliorer cette étape du processus d'acheminement de la marchandise apparaît comme un levier incontournable.

L'approvisionnement se trouve donc bien au cœur des activités économiques de la ville mais aussi des besoins et intérêts contradictoires des différents acteurs de cette *logistique du dernier kilomètre*. La complexité de ce dernier maillon de la chaîne logistique a été mise en évidence à la fin des années 90 avec l'émergence de la notion de "logistique urbaine" (TANIGUCHI et THOMPSON 1999). Cela traduisait la nécessité de traiter le transport de marchandises en ville dans son ensemble (acteurs inclus) et plus uniquement de gérer les flux de marchandises comme des flux de personnes. ROUTHIER (2001) définit alors la logistique urbaine comme « l'ensemble des interactions entre les différents acteurs de l'approvisionnement de la ville ». Nous proposons de compléter cette définition en intégrant les flux de marchandises qui peuvent être produits dans la ville. Ainsi, on pourrait dire que la logistique urbaine est *l'ensemble des interactions entre les différentes parties prenantes et les flux de marchandises entrant, sortant et transitant à travers la ville*. Ce domaine de recherche a permis la définition et l'étude de plusieurs solutions visant à résoudre ou améliorer les problématiques présentées ci-dessus afin de construire des schémas logistiques urbains durables (TANIGUCHI et al. 2014). Toutes ces solutions sont détaillées dans la section suivante.

I.2 Des solutions pour améliorer la ville

Pour faire face aux diverses problématiques présentées précédemment, les acteurs publics et privés ainsi que les chercheurs se sont attelés à définir et à concevoir des solutions. L'analyse de la littérature montre que l'ensemble de ces solutions s'appuie sur l'utilisation de deux principes : la multimodalité et la mutualisation.

La multimodalité se traduit par le fait d'avoir le choix dans les modes de transport pour effectuer un même trajet (L'HOSTIS et CONESA 2010) (voir Figure 1.1). Les modes de trans-

port peuvent aller du semi-remorque à la livraison piétonne en passant par l'utilisation d'un triporteur. Le terme de "transport multimodal" est à différencier de celui de "transport intermodal", qui définit l'utilisation d'au moins deux modes de transport au cours d'un trajet sans changement d'unité de manutention. Dans le cas du transport de personnes, on utilise le terme d'intermodalité (MACHARIS et BONTEKONING 2004), qui traduit la possibilité pour un voyageur de choisir le mode de transport qu'il utilise. Les marchandises n'ayant pas cette capacité, on parle de multimodalité pour exprimer la multiplicité des modes utilisés au cours d'un trajet.

Le principe de mutualisation définit, quant à lui, toute action ayant une fonction de consolidation et permettant la mutualisation des moyens vers le lieu de livraison finale (voir Figure 1.2).

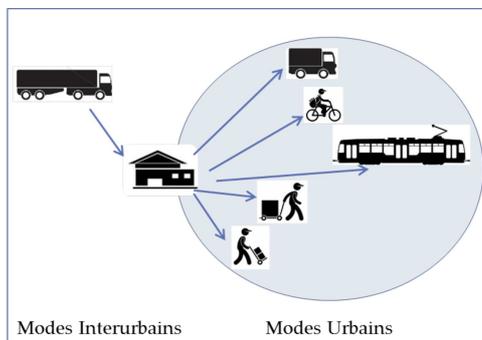


FIGURE 1.1 – Représentation schématique de la multimodalité

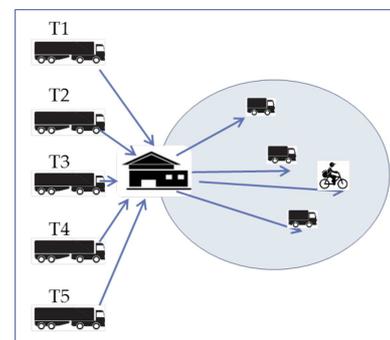


FIGURE 1.2 – Représentation schématique de la mutualisation

Nous avons constaté un usage imbriqué de ces deux principes. Cela n'en fait donc pas des catégories mais bien des principes de base des solutions. C'est pourquoi nous proposons, plutôt, de détailler les différentes actions pour la logistique urbaine selon trois catégories liées à leur champ applicatif :

- les solutions concernant l'aménagement du territoire,
- les solutions concernant les modes de transport à motorisation alternative,
- les solutions concernant le contrôle de l'espace et des déplacements.

Afin d'illustrer nos propos, nous nous appuyerons, lorsque cela est pertinent, sur des schémas pour représenter le fonctionnement de la solution détaillée. Nous utiliserons un formalisme commun à chaque illustration. La ville sera de forme elliptique dans laquelle seront définis des points de livraison (voir Figure 1.3). Ceux-ci seront représentés par des camemberts composés d'une à quatre couleurs. Ces couleurs correspondent à la provenance de la marchandise, c'est-à-dire à l'entreprise en charge de l'acheminement de celle-ci. Cela peut être un transporteur, un fournisseur ou encore un prestataire logistique. Afin de fluidifier le discours, nous parlerons de transporteur. On retrouvera donc les mêmes couleurs sur les flèches qui bordent la ville et

qui représenteront les différents transporteurs qui pénètrent dans celle-ci. Ainsi, un point de livraison bleu, vert et rouge doit être livré par les transporteurs bleu, vert et rouge. Certains points ne seront composés que d'une couleur ce qui signifie qu'un unique transporteur effectue leur livraison. L'ensemble des flux engendrés par cette répartition est illustré sur la figure 1.4. Enfin, dans un souci de clarté et de mise en évidence des phénomènes, nous avons considéré sur les figures un usage à 100%, sauf exception, de la solution présentée. Cela signifie que l'ensemble des transporteurs n'utilise que la solution dont il est question et ce, pour livrer l'intégralité de leur cargaison.

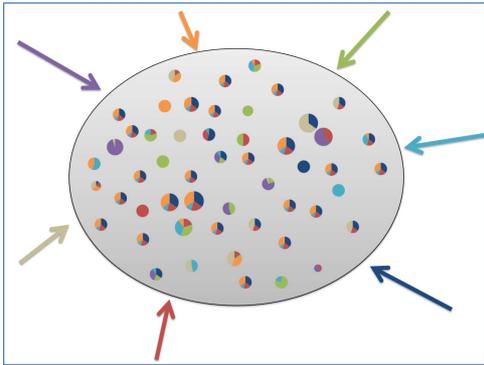


FIGURE 1.3 – La ville avec sa demande et ses transporteurs

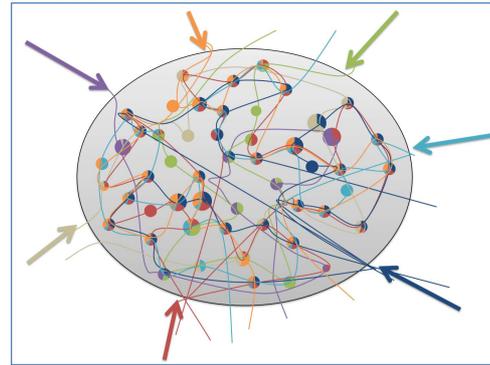


FIGURE 1.4 – Les flux générés par une livraison en propre par chaque transporteur

I.2.a L'aménagement du territoire

La première catégorie de solutions concerne l'aménagement du territoire. Elle regroupe les solutions reposant sur la mise en place d'une infrastructure réservée à la logistique dans la ville (RUSSO et COMI 2010) et englobe les "Espaces Logistiques Urbains" (ELU) définis par BOUDOUIN (2006). A l'intérieur de cette classe, nous distinguons encore trois manières d'organiser la livraison.

- La consolidation ouverte des tournées

Cela consiste à créer des points de mutualisation plus ou moins proches des centre-villes afin de réduire le nombre de véhicules "lourds" (type semi-remorque) dans la zone urbaine (voir Figure 1.5). On parle de consolidation "*ouverte*" car ce type de solution n'est pas uniquement mono-transporteur, bien au contraire. Il est propice à la collaboration. On trouve dans cette catégorie les Zones Logistiques Urbaines (ZLU) (péri-mètre péri-urbains) et les Centres de Distribution Urbaine (CDU) (péri-mètre urbain et "hyper-urbain") tels que définis par BOUDOUIN (2006).

Comme on peut le remarquer sur la figure 1.5, si les flux intra-urbains se trouvent mieux répartis et moins saturés que dans la situation avec des livraisons multi-transporteurs (Figure

1.4), les détours qui sont imposés à ces derniers entraînent parfois un coût supplémentaire qui peut être rédibitoire à l'utilisation de telles solutions.

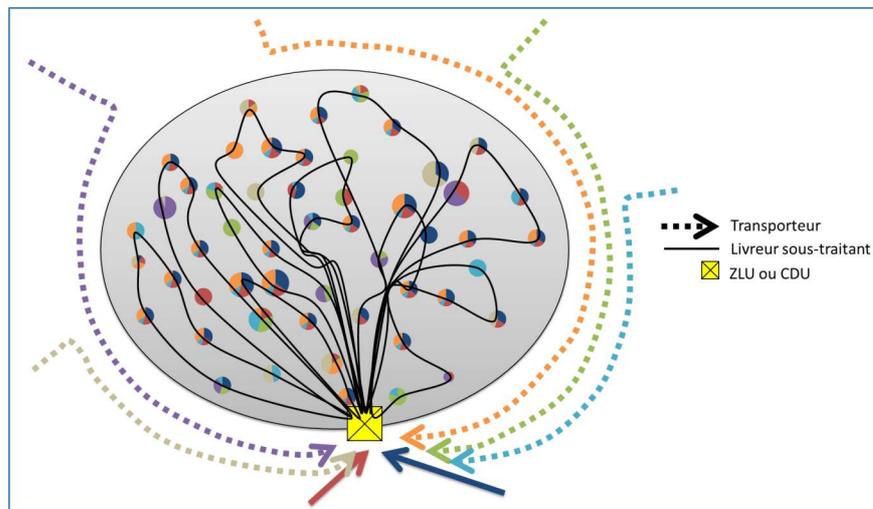


FIGURE 1.5 – Représentation schématique de la consolidation ouverte des tournées

- Le changement du point de livraison

Une autre manière d'aménager le territoire pour faciliter la livraison en ville est de mettre en place un changement du point de livraison. Cela consiste à ne plus livrer chaque destinataire directement à leur adresse (domicile ou travail par exemple) mais de laisser plusieurs colis dans une zone commune sécurisée. Les colis sont alors récupérés par les destinataires eux-mêmes plus tard dans la journée. Il y a alors une désynchronisation des flux de livreurs et de destinataires. L'exemple le plus typique est le système des points-relais qui permet d'aller chercher son colis dans un commerce (souvent bureau de tabac) à proximité de son domicile ou de son lieu de travail plutôt que dans un bureau de poste aux horaires plus contraignants.

BOUDOUIN (2006) définit deux notions relatives à ce changement du point de livraison : le Point d'Accueil des Marchandises (PAM) et la Boîte Logistique Urbaine (BLU). La nuance entre les deux est la présence ou non d'une personne physique à la réception des marchandises. Le PAM correspond au système des points-relais alors que la BLU consiste plutôt en un système de casiers à code unique et personnel dans lequel le livreur dépose le colis.

Dans tous les cas, les intérêts sont la minimisation des déplacements des chauffeurs-livreurs qui, en un seul arrêt, peuvent livrer plusieurs destinataires, mais aussi la limitation des flux et la désynchronisation des acteurs. En effet, l'objectif est d'avoir suffisamment de relais de livraison dans la ville pour permettre aux habitants de coupler la récupération de leur colis avec un autre déplacement prévu (aller faire les courses, retour du travail...) (voir Figure 1.6).

Finalement, on crée des zones de proximité dont le centre est le point relais. Les flux initialement effectués par les transporteurs sont alors répartis sur les destinataires finaux représentés

par les petites flèches noires sur la figure 1.6. Si l'origine du mouvement est assez imprécise, la destination est bien le point de livraison coloré.

Cette solution semble très prometteuse et intéresse les spécialistes de la livraison finale comme en atteste, par exemple, le rachat du réseau Kiala par UPS en 2012 (*Kiala et UPS débutent leur co-branding cet été | Kiala France 2014*) ou même le développement de commerçants relais et de consigne pour recevoir les colis livrés par La Poste (*So Colissimo 2015*).

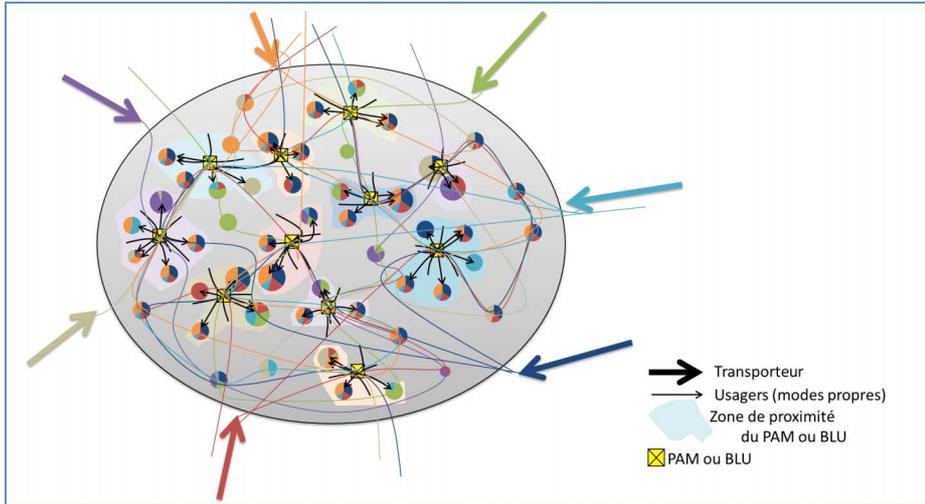


FIGURE 1.6 – Représentation schématique du changement de point de livraison

- L'aménagement du stationnement

Le dernier type de solutions lié à l'aménagement du territoire s'appuie sur la mise en place de stationnements dédiés à la livraison et permettant au conducteur de garer son véhicule puis d'aller à pied livrer plusieurs positions dans un rayon proche (cf Figure 1.7).

Il s'agit des aires de livraison, emplacements réservés aux véhicules de livraison, mais aussi des Points d'Accueil des Véhicules (PAV) (BOUDOUIN 2006). Un PAV est un parking sécurisé, outillé et dédié à la livraison. Le premier avantage d'un PAV, par rapport à une aire de livraison classique, est essentiellement le gain de temps relatif à l'ouverture/fermeture du hayon. En effet, les livreurs perdent énormément de temps à descendre et monter le hayon lorsqu'il y a trop de marchandises à livrer dans un même périmètre pour pouvoir effectuer l'opération en une fois. Dans un PAV, ils ont la possibilité de laisser le camion ouvert. Ce dernier est surveillé et ils peuvent ainsi faire des allers-retours (traits foncés de la figure 1.7) pour réaliser les livraisons dans une zone relativement proche (zone pastel sur la figure 1.7). L'autre avantage d'un PAV est sa disponibilité. Si le transport de marchandises en ville est un fléau pour les autres usagers, ceux-ci peuvent parfois se transformer en fléau pour les livreurs. En effet, de nombreuses aires de livraison sont occupées par des véhicules de particuliers et sont ainsi non disponibles pour un livreur qui est alors contraint de se garer en double-file... Ce problème ne se pose pas dans un PAV puisque seuls les véhicules de livraison ont l'autorisation d'y entrer. Les problèmes

de disponibilité et de réservation des aires de livraison font, cependant, l'objet d'études très spécifiques comme le projet PREDIT "Aires de Livraison du Futur" qui vise, notamment, à trouver des solutions technologiques pour améliorer la gestion de ces emplacements (DAVID et al. 2011). Ces questions s'étendent naturellement aux PAV qui doivent, ou devront, faire face, eux aussi, à la pression foncière. Cela a pour conséquence de limiter et réduire leur taille.

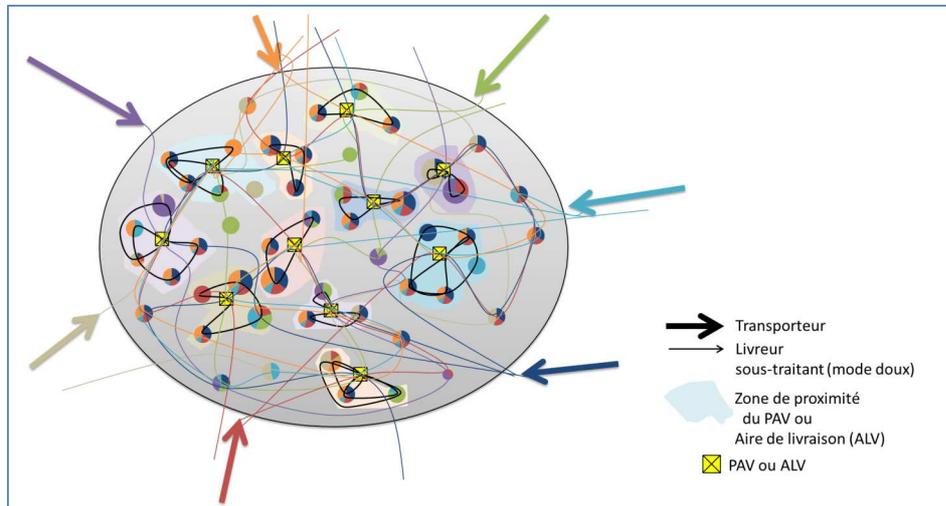


FIGURE 1.7 – Représentation schématique de l'aménagement du stationnement

Comme BOUDOUIN (2006) le précise, on s'aperçoit que les différentes solutions présentées dans cette sous-section, n'interviennent pas à la même échelle de l'aire urbaine. Elles peuvent ainsi tout à fait être utilisées simultanément.

I.2.b Les modes de transport alternatifs au routier

Cette catégorie regroupe l'ensemble des dispositions relatives à l'utilisation d'un mode de transport alternatif au camion thermique traditionnel pour effectuer la livraison finale (on utilisera la terminologie "mode à motorisations alternatives"). Il s'agit d'adapter le mode de transport aux contraintes ou opportunités spécifiques de la ville qui peuvent être l'existence d'infrastructures de transport de personnes, une réglementation liée à la motorisation, etc. L'intermodalité est au cœur de l'utilisation d'un mode à motorisations alternatives puisqu'elle signifie le changement du mode de transport avant l'entrée dans la ville. Selon la configuration ainsi que la géographie de la ville, plusieurs solutions sont envisageables et sont présentées ci-dessous.

- **Accessibilité de la ville par voie fluviale**

De nombreuses villes sont traversées par un cours d'eau. On peut alors envisager d'accéder au centre-ville par celui-ci comme c'est le cas dans plusieurs villes européennes comme Copenhague (Danemark), Lyon, ou bien sûr Venise (Italie). Cette solution permet le transfert d'une part des flux routiers sur la voie d'eau et ainsi la réduction du nombre de camions sur le réseau routier urbain. Pour ce faire, les transporteurs livrent la marchandise à destination des zones proches du cours dans des gros ports extérieurs de la ville ; puis des ports de proximité servent d'arrêts à partir desquels des petites tournées sont organisées (Figure 1.8).

Cependant, comme cela est détaillé dans la figure 1.8, le périmètre d'action de la livraison par ce mode est limité à une zone restreinte autour de ce cours d'eau. Cela ne lui permet alors pas d'être une solution pour l'ensemble de la ville. L'entreprise Franprix (filiale de Casino) a tout de même mis en place en 2012 une livraison via la Seine de 80 de ses 350 magasins parisiens permettant l'acheminement de 26 conteneurs chargés de 450 palettes dans un rayon de 4km et réduisant ainsi sa part de transport routier (BEYER 2013).

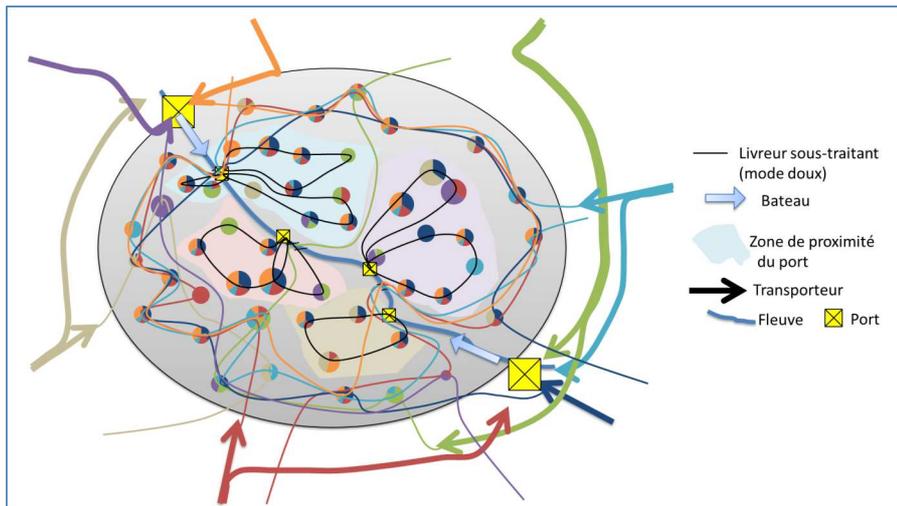


FIGURE 1.8 – Représentation schématique de l'accessibilité du réseau par voie fluviale

Les villes portuaires, telles que Marseille ou Rotterdam par exemple, sont intrinsèquement organisées autour du port. Bien que le schéma d'approvisionnement par la voie d'eau soit différent de celui présenté ici, on peut imaginer de ne considérer qu'une moitié de la ville circulaire et d'utiliser plus souvent le port comme point de diffusion de la marchandise à travers la ville. Néanmoins, le cas de ces villes est assez particulier et n'est pas complètement intégré dans la réflexion présentée ici.

- **Accessibilité de la ville par voie ferroviaire**

Bien que sous-exploité en France (BONNAFOUS et CROZET 2014), le transport ferroviaire est très utile à l'échelle nationale ou internationale pour acheminer des matières premières

ou produits finis vers les fabricants ou les revendeurs. A l'échelle urbaine, cette solution est quasi-inexistante alors même qu'elle possède un gros potentiel. En effet, les gares sont stratégiquement placées à proximité des centre-villes, voire en plein cœur, afin d'être facilement accessibles pour les personnes.

Dans les grandes et moyennes agglomérations, on trouve même plusieurs gares permettant un quadrillage régulier de la ville. On pourrait utiliser ces gares et ce réseau ferré pour accéder plus facilement au centre-ville mais surtout pour réduire les flux les plus importants générant des camions de grosses capacités comme ceux effectuant la livraison des supermarchés. Un tel fonctionnement a été mis en place par Monoprix pour desservir ses magasins parisiens depuis les sous-sols de la gare de Bercy (DELAÎTRE et DE BARBEYRAC 2012) et avec des véhicules légers.

Dans un système global (flux de plusieurs sociétés), les transporteurs pourraient ainsi déposer la marchandise dans des grands centres de transit en périphérie ou légèrement éloignés de la ville, cette marchandise serait ensuite acheminée jusqu'à l'intérieur de la ville via le réseau ferré et enfin un système de desserte par quartier ou arrondissement serait assuré afin de grouper les flux, comme représenté sur la figure 1.9. Une revue de littérature assez complète sur le transport ferroviaire urbain de marchandises a été réalisée par ARVIDSSON et BROWNE (2013).

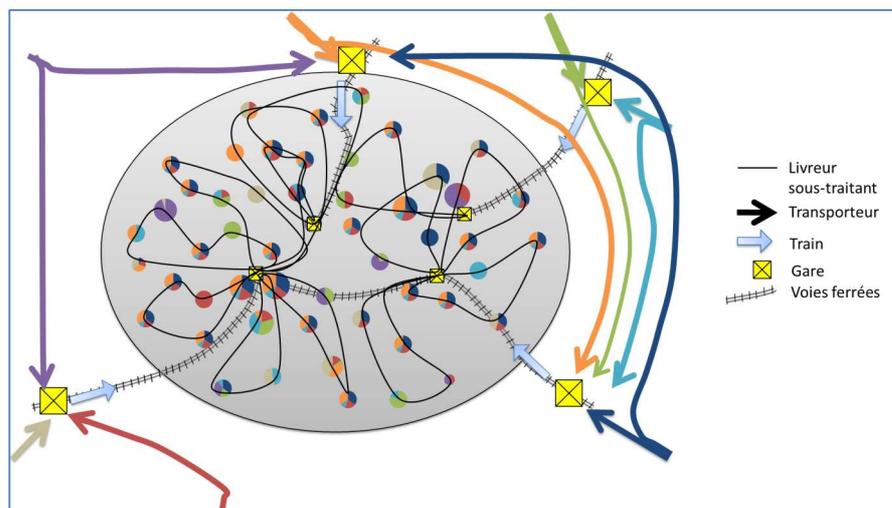


FIGURE 1.9 – Représentation schématique de l'accessibilité du réseau par voie ferroviaire

- Utilisation d'un réseau de transport en commun de personnes

L'acheminement des marchandises par un réseau de transport en commun pour le déplacement des personnes (tram, bus ou métro) consiste à exploiter une infrastructure déjà en place et pénétrant dans la ville afin de s'approcher le plus possible du point de livraison. Depuis chaque station existante, on est capable de livrer les commerces ou particuliers dans un rayon accessible avec un mode léger (à pieds, triporteurs...). Les zones de la ville trop éloignées du réseau conservent un mode de livraison traditionnel pour éviter d'allonger les déplacements comme

représenté dans la figure 1.10. Il se dessine dans ce cas-là également une zone de proximité à partir de chaque station et qui permet de livrer les points les plus proches.

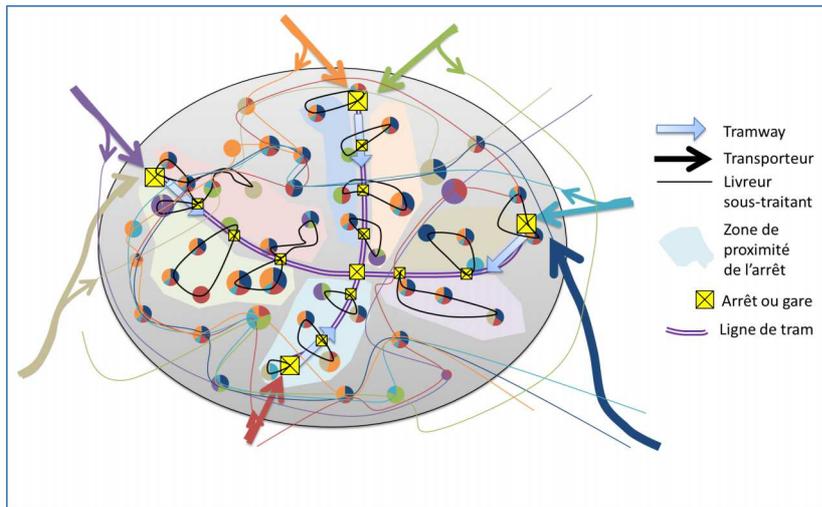


FIGURE 1.10 – Exemple de l'accessibilité du réseau par un tramway

La mise en place d'un tel système est régulièrement envisagée dans les métropoles équipées, plus particulièrement, de réseau de tram pour le transport de personnes (Grenoble, La Rochelle, etc...). Ce système présente plusieurs avantages mais soulève aussi beaucoup d'interrogations quant à son organisation (DE LANGHE 2014). En effet, la principale difficulté de la livraison de la marchandise par ces modes porte sur son organisation : créer une ligne dédiée comme c'est le cas à Dresde (MÜLLER-EBERSTEIN et FRANKE 2000), exploiter l'infrastructure existante avec du transport mixte marchandises/personnes (TRENTINI 2012) ou un système en alternance (LEVIFVE et BERGER 2014), mettre en place une ligne mono ou multi-arrêts... De nombreux verrous restent à lever à propos de cette solution notamment d'un point de vue législatif puisque des questions liées à la sécurité des marchandises se posent. Dans tous les cas, la contrainte principale à satisfaire lors du choix d'organisation d'un tram-fret (par exemple) est de ne pas déranger le transport de personnes.

Pourtant, ce dernier présente de nombreux avantages environnementaux et sociétaux qui pourraient rendre acceptable aux citoyens de perdre quelques minutes lors de leurs déplacements. Pour commencer, il n'est quasiment pas polluant dans sa phase d'utilisation. Ensuite, sa zone de desserte est centrée sur les centre-villes et donc sur les zones les plus contraintes de l'espace urbain. Enfin, la plupart des villes sont équipées de tramway pour le transport de personnes ce qui laisse penser que l'infrastructure est déjà existante et ne nécessite pas de gros aménagements terrestres. Le tram peut ainsi être un mode à motorisation alternative permettant la mutualisation des marchandises entre elles mais aussi avec les personnes. Cela semble être, aux premiers abords, une solution "éco-responsable".

- Utilisation de véhicules roulants à faibles émissions directes

Le dernier type de solutions relatif à l'utilisation d'un mode à motorisation alternative est composé de tous les véhicules roulants à faibles émissions directes pour effectuer la livraison en ville. On inclut dans cette classe les camions roulant au Gaz Naturel de Ville (GNV), au Gaz de Pétrole liquéfié (GPL) ou à l'électricité ; mais aussi les vélos ou triporteurs avec ou sans assistance électrique ; et pour finir le déplacement à pieds, par exemple avec l'aide d'un chariot, d'un diable ou d'une transpalette pour transporter la marchandise d'un endroit central (aire de livraison, PAV) vers le destinataire final.

Souvent, l'un de ces modes est employé conjointement à une ou plusieurs autres solutions de logistique urbaine (ex : CDU et véhicules électriques (GONZALEZ-FELIU et al. 2013), tram ou bus puis déplacement à pieds ou en triporteur (TRENTINI 2012)). Ils ont la spécificité de n'être utilisables que pour des déplacements à l'échelle urbaine voire "hyper-urbaine", essentiellement en raison de leur autonomie. On entend par hyper-urbain la zone définie à l'intérieur d'un centre-ville et qui est caractérisée par un taux important d'activité économique de type commerce. En effet, un livreur ne peut pas faire 100km à pieds, comme il n'est, actuellement, pas possible de traverser toute la France avec un véhicule de transport de marchandises roulant à 100% à l'électrique. Ainsi, c'est vraiment l'échelle de proximité de la livraison du dernier kilomètre qui permet d'envisager ces solutions.

Si la contrainte d'autonomie n'est pas limitante en ville (dans une certaine limite de taille et de conditions climatiques), la contrainte de capacité l'est beaucoup plus. En effet, on ne transporte pas autant de colis avec un triporteur qu'avec un camion de trois tonnes. C'est pourquoi il est nécessaire de coupler l'utilisation d'un de ces types de mode à motorisation alternative avec d'autres modes ou même d'autres solutions de logistiques urbaines permettant une couverture spatiale adaptée à la capacité et à l'autonomie.

I.2.c Contrôle de l'espace et des déplacements

La dernière catégorie d'actions concerne le contrôle de l'espace et des déplacements urbains. En effet, les décideurs publics possèdent des leviers d'action pour réguler la circulation en ville.

- Le plan de circulation

Il consiste, notamment, à définir les sens de circulation des voies pour les transports routiers. Il permet ainsi de canaliser les flux dans la ville mais aussi de rendre son accès par voie routière plus ou moins contraignant. Il est maintenant inclus dans le Plan de Déplacements Urbains (PDU) des villes (CERTU 1998). L'intérêt est d'inciter les utilisateurs, essentiellement les particuliers, à emprunter d'autres modes de transport pour effectuer leurs déplacements. Le transport de marchandises peut ainsi être plus efficace grâce à la diminution du nombre de véhicules privés, bien qu'ils subissent tout de même les désagréments de cette circulation

contraignante.

- Limitation de l'accessibilité à certaines zones

Il s'agit de mettre en place une réglementation limitant l'accessibilité à certaines zones de la ville (essentiellement les hyper-centres) afin de réduire le nombre de véhicules y pénétrant. Cela peut être une restriction sur le type de motorisation, sur le poids (PTAC) ou encore une restriction totale aux véhicules motorisés. Dans le cas du transport de marchandises, cela oblige les transporteurs à utiliser des véhicules en adéquation avec cette réglementation (INTERFACE TRANSPORT 2009). Les coûts engendrés pour s'adapter à la législation sont souvent élevés et peu de sociétés peuvent se le permettre. Cela réduit donc le nombre total de véhicules aptes à rouler dans ces zones, ce qui est l'objectif des autorités.

Néanmoins, les transporteurs doivent tout de même accéder à ces zones afin de livrer les destinataires. Ces restrictions, ajoutées aux différentes contraintes déjà présentées plus haut, favorisent la mise en place de systèmes de sous-traitance qui entraînent un inévitable coût supplémentaire du transport. Les sous-traitants sont spécialisés et, par conséquent, équipés pour la livraison en ville. De plus, ils reçoivent de la marchandise de différents transporteurs mais à destination des mêmes lieux ou zones, ce qui leur permet de mutualiser leurs livraisons et ainsi améliorer leurs taux de charge.

L'ensemble des solutions présentées dans cette partie participent à l'amélioration complète du TMV par son organisation, ses émissions et son coût. La section suivante présente la façon dont les chercheurs ont exploré et décortiqué ces différentes solutions afin d'en comprendre parfaitement les tenants et les aboutissants. En effet, nous avons effectué dans cette section une présentation conceptuelle de ces solutions innovantes et il est nécessaire de leur apporter un approfondissement théorique en les confrontant, notamment, à leur comportement réel.

II Les recherches sur la logistique urbaine

II.1 Contexte général

La fin des années 90 et le début des années 2000 ont été propices à l'élaboration d'un panel de solutions pour améliorer voire organiser la logistique urbaine comme nous l'avons présenté dans la section précédente. Après cette période, les décideurs publics et privés sont passés à une phase de mise en place de ces solutions. Ils se sont alors vite heurtés à différentes difficultés. La première est liée à leur méconnaissance de l'ensemble des solutions existantes ainsi que de leurs réels effets et interactions dans un contexte donné (DABLANC 2007 ; OCDE 2003). La deuxième difficulté rencontrée est relative à l'écart entre la description conceptuelle d'une solution et sa réalisation réelle. Il s'agit en fait de passer du concept à la réalité, ce qui nécessite à la fois un recul et une bonne compréhension de l'élément dans son contexte. Aussi, entre

dire "nous allons approvisionner le centre-ville avec un tram-fret" et concrètement implanter une ligne ou une rame de tram, il y a de nombreux verrous à lever : fait-on un transport mixte personnes/marchandises, à quelle fréquence, sur quelle couverture spatiale, quel sont les coûts engendrés en fonctionnement et en investissement, etc... Enfin, les décideurs peuvent se heurter au décalage entre leurs horizons de décisions et ceux liés aux enjeux pour la ville et la société. Alors qu'ils recherchent principalement des effets à courts ou moyens termes (parfois pour répondre à temps à des engagements électoraux (CHANUT et PACHÉ 2013)), les solutions portent plutôt sur le moyen et long terme et peinent donc à se pérenniser (GONZALEZ-FELIU 2008). Les effets ne se font souvent pas ressentir immédiatement et un temps de mise en route est souvent nécessaire. L'ensemble de ces éléments creuse un écart entre la théorie et la réalité.

On relève donc une nécessité de mieux comprendre le comportement, les impacts et les enjeux de chaque solution de logistique urbaine dans un contexte réel pour, par la suite, les intégrer et les utiliser correctement dans le paysage urbain. Pour cela, une période de "try-and-see" a été incontournable. De nombreuses expérimentations ont donc été lancées à travers le monde (mais essentiellement Europe et Japon) (COST 321 1998), incitant les chercheurs à se positionner, à partir du milieu des années 2000, sur des démarches d'évaluation des solutions plutôt que de leur conception. On cherche alors à quantifier et à qualifier les solutions dans le but de mieux les appréhender dans leur contexte (QUAK et al. 2008).

D'après GIORGI et TANDON (2002), l'évaluation d'un projet de transport (marchandises ou personnes) s'effectue au cours de plusieurs phases. D'abord, des évaluations *ex ante* (ou *a priori*) peuvent être réalisées lors des phases de définition du problème. Ensuite, des évaluations intermédiaires peuvent avoir lieu pendant la phase d'initialisation dans le but de récolter des données de fonctionnement. Enfin, des évaluations *ex post* (ou *a posteriori*) sont effectuées une fois que la mise en place du projet est terminée afin d'en évaluer les impacts. La relative jeunesse des projets de logistique urbaine mais aussi les difficultés de pérennisation rencontrées dues au manque de connaissances font se confondre les deux dernières étapes décrites. Elles constituent alors plutôt une "photo" à un instant t du système plutôt qu'une réelle évaluation de fin de projet. De plus, nous souhaitons compléter cette proposition par l'apport de chacune des étapes d'évaluation dans les autres. En effet, la plupart des évaluations *a priori* découlent d'observations *a posteriori* tandis que les évaluations *a posteriori* fournissent souvent une comparaison avec les prévisions. Chaque étape n'apporte pas le même type d'informations et n'alimente ainsi pas le même type de décisions. Finalement, et d'après les considérations ci-dessus, le processus d'évaluation peut être représenté par la figure 1.11.

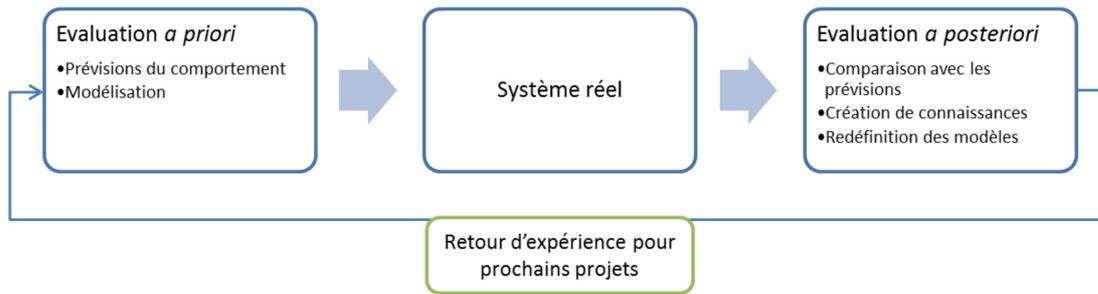


FIGURE 1.11 – Processus d'évaluation d'un projet

Nous présentons dans les deux sections suivantes les travaux relatifs à ces démarches d'évaluation *a posteriori* et *a priori*. Nous verrons comment les chercheurs traitent ce sujet ainsi que les informations et connaissances qui s'en dégagent.

II.2 Les démarches d'évaluation *a posteriori*

Plusieurs chercheurs ont positionné leurs travaux sur des démarches d'évaluation *a posteriori* des solutions de logistique urbaine. Cette première catégorie se définit par un souci de synthétiser et de capitaliser en se basant sur l'analyse d'expériences déjà en place. On distingue deux types d'approche : les évaluations qualitatives de la performance et les évaluations quantitatives.

II.2.a Les approches qualitatives

RUSSO et COMI (2010), dans la continuité des travaux de MUNUZURI et al. (2005), ont proposé une nouvelle classification des mesures de logistique urbaine et un inventaire des solutions existantes attachées à chaque catégorie. Cette nouvelle classification leur permet d'effectuer ensuite une analyse qualitative de l'impact sur l'occupation des routes mais aussi sur les émissions de gaz à effet de serre engendrées par ces différentes mesures. Pour cela, ils utilisent des données de différentes expériences mais aussi leurs propres observations.

De leur côté, les participants du projet SUGAR (DABLANC et al. 2011), ont analysé qualitativement et quantitativement 44 expériences menées dans le monde. Le rapport présente en détail le contexte de chaque projet (processus de décision, nombre d'employés, subventions perçues, etc.) ainsi que les résultats obtenus quant au dimensionnement de l'activité. De plus, une description qualitative de la situation du point de vue des différents acteurs est faite. Enfin, pour chaque expérience, une synthèse des succès et difficultés est proposée. Cette étude permet à la fois de fournir un guide des bonnes pratiques, au travers du recensement des projets, mais aussi de produire une évaluation détaillée de chaque projet présenté.

PAPOUTSIS et al. (2012) adoptent une stratégie différente en proposant une analyse SWOT

de quatre catégories de solutions : CDU, véhicules propres, utilisation des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) et planification des livraisons. Pour réaliser cette étude, ils évaluent chaque catégorie à partir des données de projet trouvées dans la littérature. L'utilisation d'une analyse SWOT comme base pour l'évaluation qualitative de la performance des projets leur permet de dégager des perspectives pour la suite des projets mais aussi de proposer des actions correctives sur les points faibles.

On trouve également dans la littérature des évaluations qualitatives qui analysent l'atteinte ou non d'objectifs non chiffrés. C'est le cas de COURIVAULT (2004). Il définit dans son étude des objectifs du type "avoir une réglementation adaptée aux besoins réels" ou "mieux organiser l'offre de voirie offerte aux livraisons" et pour lesquels il évalue l'atteinte ou non dans le cas de différents projets de logistique urbaine. De plus, il propose une évaluation inspirée de l'analyse SWOT qui présente les sources de succès et d'échecs des CDU rochelais et monégasque.

Dans le même temps, l'université de Westminster a présenté une rétrospective de l'ensemble des expériences de CDU au Japon et en Europe depuis le début des années 2000 (BROWNE et al. 2005). L'évaluation *a posteriori* et qualitative du fonctionnement de ces quelques 67 projets en cours ou avortés met en avant des conditions de viabilité de ce type de solutions d'un point de vue organisationnel et fonctionnel. Dans ce rapport, des comparaisons entre les projets sont faites afin d'évaluer la performance de chacun. On trouve notamment des précisions sur les effets induits par l'ajout de services (stockage, ramasse, etc.), les types de financement ou encore la zone de chalandise. En 2012, ces mêmes auteurs présentent un article dans lequel ils ré-appliquent cette méthode d'analyse qualitative à tous les nouveaux projets de CDU créés depuis 2005 (ALLEN et al. 2012). Dans cette étude, l'évaluation est cependant un peu plus orientée vers l'apport des CDU dans la durabilité du transport urbain.

Le sujet de l'évaluation des CDU est assez répandu. En effet, l'étude *a posteriori* des expérimentations apporte de nombreuses informations sur le comportement de cette solution dans un contexte donné. De plus, la diversité des montages financiers mais aussi fonctionnels en fait un champ de recherche très vaste. Ainsi, on trouve des travaux évaluant qualitativement la situation du CDU de Padoue en Italie (MORANA et GONZALEZ-FELIU 2011). Les auteurs s'appuient pour cela sur une étude qui propose de considérer six éléments importants lors de l'évaluation de la performance d'un projet de logistique urbaine : les finances, les infrastructures, l'organisation, la technologie des véhicules, les technologies de l'information et de la communication et enfin les outils de planification du transport (GONZALEZ-FELIU 2008). Pour chacun de ces items, ils décrivent le comportement et les choix effectués pour le CDU de Padoue. Cela leur permet de repérer et de proposer des pistes d'amélioration pour celui-ci. Dans le même état d'esprit, on trouve également les travaux de GONZALEZ-FELIU et al. (2013). Les auteurs proposent une évaluation proche de celle précédemment citée mais en analysant

les différences de fonctionnement entre les CDU français, italiens et espagnols existants.

A la fois CDU et PAM, le principe de la BentoBox a été étudié dans le cadre du projet européen CITYLOG (QUAK et al. 2014). Il s'agit d'un groupement de petits casiers facilement déplaçables qui a été testé sous différentes stratégies d'utilisation. A Berlin, ces boîtes ont été utilisées comme des petits CDU, lieu de transbordement entre des vans et des vélos pour la livraison finale. A Lyon et Turin, les BentoBox ont servi de Points d'Accueil des Marchandises (PAM). En se basant sur les canevas de business model proposés par OSTERWALDER et PIGNEUR (2010) et TURBLOG (2011), les auteurs de l'étude évaluent qualitativement la création de valeur et les interactions produites par chacune des stratégies. Les données issues de ces trois expériences leur permettent de comparer des points de fonctionnement (dimensionnement de l'activité) et de mettre en évidence les différences d'objectifs de ces deux systèmes de gestion de la livraison. Ils concluent par des préconisations sur l'utilisation de cette solution et ses intérêts.

HENRIOT et al. (2008) abordent l'évaluation des solutions de logistique urbaine un peu différemment. Ils développent dans le cadre du Groupe Opérationnel 5 de l'axe 3 du PREDIT une méthodologie d'évaluation des innovations en matière de logistique urbaine. Dans ce rapport final, ils expliquent la démarche entreprise pour construire la méthodologie d'évaluation. Tout d'abord la méthode de construction de la méthodologie est elle-même une démarche d'évaluation qualitative des projets de logistique urbaine. Pour cela ils ont d'abord recensé un panel de variables et d'indicateurs communément utilisés pour évaluer la performance d'un projet. Ensuite, une évaluation qualitative de chacun de ces paramètres a été effectuée afin de déterminer s'ils étaient essentiels, importants, optionnels ou hors sujet selon la nature du projet. Cette étape leur a, par la suite, permis d'affecter un classement basé sur les trois piliers du développement durable (environnement, société et économie) et une pondération pour chaque variable et indicateur (une note finale). Le principe d'évaluation d'un projet est le suivant : recenser les données disponibles puis calculer le score total obtenu en ajoutant les scores de chaque donnée disponible. Ce score, comparé à une échelle donnée, permet de qualifier la performance du projet. PATIER et BROWNE (2010) appliquent cette méthodologie d'évaluation à deux expériences européennes : l'Espace Logistique Urbain de la Concorde à Paris mis en place par Chronopost et le CDU de Bristol en Angleterre. L'article permet de mettre en avant la nécessité de récolter des données avant et après le projet afin de comparer les deux, étape souvent délaissée par les acteurs des projets en amont. De plus, il met en lumière l'intérêt du couplage entre une approche qualitative (évaluation sur une échelle de jugement) et une approche quantitative (relevé de données) de la méthodologie. La méthodologie proposée est également innovante puisqu'elle permet de comparer la performance de deux projets n'utilisant pas le même type de solutions. Cette approche n'est pas évidente en évaluation *a posteriori* puisqu'elle nécessite

la mise en place d'une échelle de mesure commune. De plus, comme l'expliquent les auteurs, la méthode du score unique nécessite qu'un maximum de données d'entrée soient fournies pour qu'il ait du sens. Ainsi, il n'est pas toujours possible de balayer l'ensemble des critères.

II.2.b Les approches quantitatives

C'est pourquoi, on trouve dans la littérature plusieurs initiatives ciblées sur des critères spécifiques d'évaluation d'expériences. Ces études ont pour but soit d'apporter une évaluation sur un indicateur particulier (environnemental, économique...) soit de faire un bilan sur un projet dans le but de comparer avec les objectifs initiaux. C'est le cas du rapport publié par l'ADEME (2005) qui propose une évaluation environnementale des CDU de La Rochelle et de Monaco. Il s'agit, pour les auteurs, de faire un bilan sur les objectifs affichés par les porteurs de projet et les résultats issus du terrain après plusieurs mois d'activité.

Dans le même état d'esprit, QUAK et TAVASSZY (2011), dans la continuité des travaux de VAN ROOIJEN et QUAK (2010), présentent d'abord une évaluation environnementale puis économique de l'initiative innovante Binnenstadservice.nl (BSS). Ce CDU implanté dans la ville de Nijmegen (Pays-Bas) se distingue des initiatives de CDU par plusieurs points. D'abord, les clients sont les destinataires de la marchandise plutôt que les transporteurs, ensuite plusieurs autres services associés (stockage, livraison à domicile de gros électro-ménager ou encore suivi sur Internet des colis) sont proposés au client. Dans les deux articles, ils présentent les impacts locaux (bruit et pollution) de la solution et montrent les gains par rapport à la situation précédente. Ensuite, une évaluation économique, estimant le profit quotidien réalisé par le CDU, est conduite. Ces deux approches leur permettent d'envisager des situations futures pour BSS d'une part (quels services en plus ? avec quel financement ?) et pour d'autres villes des Pays-Bas d'autre part. Ils s'interrogent pour cela sur la répliquabilité du projet et sur les conditions locales particulières qui pourraient être à l'origine du bon fonctionnement de l'initiative.

Enfin, BROWNE et al. (2011) proposent une analyse comparative de la situation londonienne avant et après la mise en place d'un CDU qui utilise des véhicules électriques pour la livraison du centre-ville de Londres. Dans cette étude, ils abordent différents indicateurs environnementaux comme les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de carburants et aussi plusieurs indicateurs sociétaux comme l'occupation des trottoirs par les véhicules de livraison ou le temps de conduite des chauffeurs. Une courte évaluation, plutôt qualitative, des coûts opérationnels est présentée mais aucun chiffre n'est donné pour des raisons de confidentialité des informations. Cette étude permet de valider la démarche de mutualisation entreprise par la ville de Londres malgré une consolidation déjà relativement bonne en amont des flux logistiques. Cela montre le potentiel d'amélioration offert par les solutions de logistique urbaine

même dans des situations qui y semblent peu enclines.

L'ensemble de ces démarches, souvent sous l'angle du retour d'expérience, a contribué et contribue toujours, à l'élaboration de bonnes pratiques et à la capitalisation de connaissances sur ces sujets.

II.3 Se placer dans une démarche *a priori*

II.3.a Les approches qualitatives

En 2006, THOMPSON et HASSALL (2006) développent une méthodologie d'évaluation de la performance des projets de logistique urbaine. La démarche qu'ils développent, s'appuie sur une grille d'évaluation qui met en regard les objectifs, les moyens et la mesure de la performance envisagée. Leur idée est de sélectionner en amont le type de solution le plus adapté au projet. Ainsi, ils définissent une échelle qualitative d'évaluation qui est ensuite convertie en une note (contribue à l'objectif vaut 1 ou ne contribue pas vaut 0 par exemple). Ensuite la pondération de chaque critère, puis la somme de celles-ci permettent d'attribuer un score final à chaque solution évaluée. Pour cela, ils se basent sur les différents retours d'expériences existants ainsi que sur leur propre expertise. Avec cette méthode, la solution la plus en adéquation avec les objectifs fixés par les porteurs de projet est mise en avant.

Les auteurs du rapport BESTUFS (BEST Urban Freight Solutions) proposent une action de coordination des projets liés au TMV (ALLEN et al. 2007). Leur objectif est de rendre ce dernier plus durable. Pour ce faire, ils ont réalisé un guide regroupant l'ensemble des actions connues pour organiser la logistique dans la ville. Ce guide des bonnes pratiques, à destination des entreprises de transport mais aussi des décideurs publics, est composé de quatre volets. Il contient d'abord les solutions liées au chargement/déchargement des marchandises et fournit une sorte de cartographie objectifs/démarches envisageables. Selon les pratiques recensées, un décideur doit pouvoir choisir la solution la plus adaptée pour répondre à son besoin. Ce dernier doit parfaitement correspondre à ceux envisagés par les auteurs. Il s'agit, ici, d'une évaluation qualitative de la performance souhaitée. Dans un second temps, les avantages et les inconvénients relatifs aux différentes solutions sont plus précisément détaillés. La troisième partie est consacrée au cas des CDU. Les auteurs énoncent, pour ce type d'aménagement, les conditions observées d'échec et de réussite. Enfin, ils formulent une "check list" des éléments à prendre en compte dans l'élaboration de projet de logistique urbaine. On peut donc tout à fait envisager d'utiliser ce guide de façon itérative en suivant pas à pas les différents volets afin de sélectionner la solution la plus adaptée à son propre contexte.

Dans le même temps, GÉRARDIN (2007) rédige pour le compte du CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) et du programme

national "Marchandises en Ville" un rapport qui capitalise, au travers de 10 projets ou expérimentations de transport de marchandises, sur les solutions de type CDU, PAV et véhicules à motorisation alternative. Ce rapport fournit des enseignements sur les types de modèles économiques possibles et les conditions de réussite associées. Au delà des préconisations de montage financier des projets de logistique urbaine, les auteurs détaillent dix propositions pour les programmes d'études à venir telles que l'amélioration du suivi des projets ou encore de l'accessibilité aux données. Cette publication se classe donc dans la veine des évaluations qualitatives *a priori*.

Plus récemment, WITKOWSKI et KIBA-JANIAK (2012) proposent un nouveau cadre d'évaluation. A partir d'une enquête qualitative auprès des habitants d'une ville polonaise, ils développent un modèle de référence pour évaluer la prise en compte du facteur de qualité de vie dans l'élaboration des projets de logistique urbaine. Cette étude se démarque des autres par sa méthodologie basée sur une enquête auprès des habitants, et aussi par son objectif qui est la qualité de vie.

Dans son mémoire de thèse, GRAINDORGE (2012) aborde le problème différemment en s'appuyant sur un modèle mathématique détaillé pour formaliser une fonction objectif. Néanmoins, l'auteur développe une méthode d'évaluation qualitative de projet de transport urbain qui, contrairement aux autres études présentées dans cette section, ne se réduit pas au champ du transport de marchandises mais peut aussi s'appliquer au transport de personnes. Le point central et commun de l'approche est la prise en compte des besoins et objectifs de chaque acteur du projet. En effet, l'analyse multi-critères multi-acteurs présentée se base sur la définition de plusieurs critères (niveau de congestion, consommation de carburant, stationnement, etc...) considérés comme des objectifs. Ces critères sont évalués par chacun des acteurs qui leur affectent une note qualitative décrivant l'état de la situation initiale (bonne, mauvaise ou je ne sais pas) et sur l'évolution souhaitée pour ce critère (maximiser, minimiser, stabiliser). Ensuite, un calcul complexe est réalisé pour chiffrer ces notes et enfin proposer des classes d'acteurs ayant des enjeux communs. Enfin, des solutions répondant à chaque enjeu sont proposées.

De leur côté, MUNUZURI et al. (2012) évaluent le contexte particulier de l'Espagne. Dans cette étude, ils décrivent point par point l'impact qu'aurait telle ou telle solution de logistique urbaine et surtout en quoi ces impacts représentent une contradiction avec le contexte espagnol. Les auteurs se distinguent par le positionnement de leur évaluation qualitative *a priori* qui a pour objectif de prouver la non-faisabilité d'actions logistiques contrairement aux démarches d'évaluation dont le but est de trouver la meilleure solution.

L'ensemble des études présentées précédemment sont multi-solutions, c'est-à-dire qu'elles évaluent des projets de logistique urbaine sans distinction du type. On trouve aussi dans la littérature plusieurs analyses d'impacts portant sur un seul type de solutions. C'est le cas de

l'étude menée par CHWESIUK et al. (2010) qui s'interrogent sur la possibilité de mettre en place des CDU sur le territoire de la région Westpomeranian en Pologne. Ils réalisent pour cela une analyse SWOT sur le transport de marchandises dans la région puis sur le CDU. Ils intègrent dans leur étude des dimensions environnementales, sociétales, opérationnelles ou encore économiques. Selon les auteurs, cette approche valide l'adéquation du concept de CDU avec les caractéristiques polonaises.

BROWNE et al. (2008) s'intéressent eux aussi à la mise en place d'un CDU dans le cadre de l'approvisionnement des hôtels dans le centre de Londres. Ils évaluent l'intérêt de cette solution en décrivant l'impact sur les flux en ville. Pour cela, les auteurs décrivent dans un premier temps la situation telle qu'elle serait puis consolident leur démarche avec une quantification à grosse maille des flux suite à des entretiens avec les hôteliers. Enfin, lors de ces mêmes entretiens, ils recueillent une évaluation qualitative de la part des gérants d'hôtel à propos de leur avis sur l'utilisation d'un CDU. Ces dernières informations permettent de mettre en parallèle les gains en terme de flux avec l'adhésion possible, en d'autres termes le marché et la demande.

Pour finir avec les démarches d'évaluation qualitative *a priori*, on peut citer l'article écrit par PANERO et al. (2011) qui cherchent à sélectionner la meilleure configuration de CDU pour la ville de New-York. Les auteurs utilisent pour cela une méthode basée sur les bonnes pratiques. Ils cherchent à identifier les cas de CDU ayant un contexte proche de celui de New-York, puis ils détaillent les points à prendre ou pas dans chacun des cas. De cette manière, ils proposent un CDU sur-mesure et fournissent donc une préconisation sur le type de configuration à utiliser dans cette ville.

II.3.b Les approches quantitatives

Finalement, l'ensemble de ces études s'appuie sur des évaluations basées sur les bonnes pratiques recensées. Une autre façon d'aborder l'évaluation *a priori* est d'utiliser des modèles pour anticiper les impacts sur la ville (TANIGUCHI et al. 2003). C'est le positionnement adopté par AUBERT et ROUTHIER (1999) avec le modèle Freturb. L'outil utilise des méthodes statistiques de génération de la demande et des flux par quartier. Cela permet d'obtenir une estimation de l'activité potentielle à l'échelle du quartier ou de l'arrondissement.

La génération de la demande et des flux de marchandises (ou mouvements) est un sujet assez traité dans la littérature notamment car il est le point central de l'impact des solutions de logistique urbaine. En effet, une action de logistique urbaine n'a de sens que dans un contexte où il y a un minimum de demande : un camion en double file n'est pas ou peu gênant sur une route de campagne empruntée par trois véhicules par jour, en revanche il l'est beaucoup plus dans une rue avec 300 mouvements par jour. Ainsi, BOERKAMPS et VAN BINSBERGEN (1999) présentent eux-aussi un modèle d'estimation des flux qu'ils utilisent pour la ville de Gröningen.

Ils comparent dans cette étude les flux générés par 3 types de distribution dans cette ville : la livraison traditionnelle en propre, le cas d'un CDU en périphérie et une logistique urbaine souterraine. Ensuite, ils utilisent différents indicateurs de performance basés sur ces données (nombre de tournées, distance parcourue, émissions de gaz à effet de serre, etc...).

On trouve plusieurs études traitant de l'estimation des mouvements de marchandises en ville (GONZALEZ-FELIU et al. 2012 ; MELO et COSTA 2011) dont le but est d'observer l'occupation des sols engendrée ou encore d'évaluer les temps de trajet. De même, plusieurs modèles d'évaluation de la demande ont été développés et qui se différencient entre eux essentiellement par l'objet d'étude. En effet, MARCUCCI et DANIELIS (2008) s'intéressent à la demande générée par un CDU alors que GONZALEZ-FELIU et al. (2012) sont plus orientés sur la répartition géographique de cette demande.

Un autre type d'étude privilégié par les chercheurs concerne l'évaluation de l'impact des solutions. En fin de compte, les sorties des modèles précédents vont souvent alimenter en entrée les modèles de cette catégorie comme c'est le cas du modèle développé par RUSSO et COMI (2011). Dans ces travaux, les auteurs s'appuient sur un autre modèle de génération de la demande pour évaluer le temps de trajet des camions ou encore les chemins parcourus.

Une autre méthode consiste à utiliser des données terrain ou une situation théorique pour constituer la demande initiale. TANIGUCHI et VAN DER HEIJDEN (2000) proposent ainsi d'évaluer l'impact sur le coût total par colis et sur les émissions de CO₂ de trois systèmes de livraison sur un réseau théorique. Ils testent de cette manière un système de réservation des voies, un système de livraison coopérative et un système de contrôle de charge.

Dans le même esprit, BOYER et al. (2009) créent eux-aussi des scénarios hypothétiques pour évaluer l'efficacité économique de la livraison du dernier kilomètre. Dans leur étude, ils abordent un nouveau point de vue puisqu'ils ne comparent pas vraiment des systèmes de livraison différents mais plutôt des conditions de livraison différentes à savoir la densité urbaine et une livraison avec fenêtre de temps.

FILIPPI et al. (2010) s'affichent, quant à eux, comme orientés vers l'idée de durabilité. Bien qu'ils expliquent que cette dernière soit définie par plusieurs composantes (sociétale, économique et environnementale), ils n'exposent dans cet article que l'évaluation liée aux impacts environnementaux. Le modèle développé leur permet d'estimer des indicateurs tels que la pollution de l'air, la consommation d'énergie ou encore le bruit. Néanmoins, ils arrivent à dégager de leur modèle certains indicateurs économiques comme les coûts externes par an.

L'approche proposée par SUKSRI et RAICU (2012) utilise un modèle multi-agents pour fournir une aide au choix de la solution à mettre en place. Chaque agent représente alors un acteur ayant ses propres objectifs et attentes. Dans cet ouvrage, les auteurs proposent un cadre conceptuel d'évaluation de la performance de la solution pour définir la solution la plus adaptée

aux acteurs. Cependant, ils ne donnent pas de précisions sur le type d'indicateurs retenu.

COMI et ROSATI (2013) se positionnent clairement dans une démarche d'évaluation *a priori* des actions de logistique urbaine. Après un état de l'art étayé sur les méthodes de modélisation existantes pour ce domaine, ils présentent leur outil de prévision de la performance du réseau selon le schéma logistique envisagé. Les auteurs qualifient la performance selon quatre indicateurs principaux : les flux de véhicules, le niveau de congestion, la pollution et le taux d'accident. Ces critères d'évaluation sont mis en lumière par la suite dans une situation projetée dans laquelle la ville de Rome serait équipée d'une solution de réapprovisionnement de proximité.

De leur côté, NUZZOLO et COMI (2014) ont une posture plus orientée recherche opérationnelle. Ils utilisent, entre autre, des matrices origine/destination pour évaluer la performance du système de livraison. Les indicateurs qu'ils choisissent sont multiples (émissions CO₂, temps de trajet, etc...) et sélectionnés selon les objectifs affichés par les différents acteurs du projet. De même, la solution évaluée est constituée à partir de ces mêmes objectifs. Ils mélangent donc une approche basée sur les bonnes pratiques pour sélectionner la solution à évaluer et une approche quantitative *a priori* pour estimer la performance physique après prévision de la demande.

Les différentes méthodes présentées ci-dessus sont essentiellement globales et permettent l'évaluation en amont d'un panel de solutions voire d'un mix de ces solutions. Certains chercheurs ont développé des méthodes plus particulières qui concernent l'évaluation d'un type précis de solution ou du moins qui ne l'appliquent qu'à ce seul type de solution. C'est le cas du mémoire de thèse de TRENTINI (2012) qui propose un nouveau système de distribution par le bus et qui évalue ensuite cette solution. L'étude fournit des indicateurs sur le nombre de véhicules impliqués, le taux d'utilisation des arrêts de bus ou encore les émissions de CO₂ engendrées. De plus, l'auteur développe une analyse comptable de la situation proposée en évaluant les coûts logistiques de façon globale. Enfin, une analyse qualitative des effets sociétaux est proposée avant de valider les estimations par une mise en pratique sur le terrain.

DELAÎTRE et DE BARBEYRAC (2012) proposent d'évaluer le surcoût et les impacts environnementaux d'une évolution et d'une optimisation de l'organisation du CDU de Samada (filiale logistique de Monoprix). Ce CDU a été implanté dans la gare de Bercy, à Paris, et a la particularité d'être approvisionné par le train puis d'utiliser des véhicules roulant au GNV (Gaz Naturel de Ville) pour réaliser la livraison finale. Différents scénarios sont envisagés comme la saturation du service de livraison le vendredi (contexte propre à la logistique amont de Samada), la réduction du nombre de wagons de train ou encore la sous-location d'une partie du CDU pour le stockage. Pour chaque scénario un modèle d'évaluation économique et environnementale est appliqué permettant la comparaison de performance entre chacune de ces

solutions et la situation existante.

L'idée d'amélioration des émissions de gaz à effet de serre dues au transport en ville fait directement penser, à tort ou à raison, à l'utilisation de véhicules électriques. C'est pourquoi DAVIS et FIGLIOZZI (2013) se posent la question du coût réel de cette solution au vue des performances environnementales. Les auteurs développent pour cela un modèle d'évaluation économique basé sur des modèles de recherche opérationnelle. Après une résolution du problème de tournées de véhicule (Vehicle Routing Problem, VRP), ils utilisent une fonction objectif permettant de trouver le point mort économique en fonction de différents paramètres comme la distance, le volume etc...

VAN DUIN et al. (2012) dans la continuité des travaux de VAN DUIN et al. (2008) et de VAN DUIN et al. (2010) s'intéressent également à la recherche d'un point d'équilibre à partir duquel un CDU est plus intéressant qu'une livraison en propre. Dans un premier temps, ils effectuent une analyse coûts/bénéfices pour déterminer la faisabilité technique et l'intérêt commercial de cette infrastructure. Puis grâce à un modèle multi-agents prenant en compte les interactions entre les acteurs ainsi que leurs objectifs, une estimation des performances économiques (coût journalier) et environnementales (NOx) du CDU est réalisée et comparée à un système de livraison classique.

La performance économique du CDU a également été étudiée par ROCA-RIU et ESTRADA (2012) qui évaluent les coûts opérationnels engendrés avec et sans CDU. Ils décomposent ces coûts en trois catégories : les coûts liés à l'approche, ceux liés à la tournée et enfin ceux liés au temps d'exécution. Dans cet article, ils présentent une application de cette méthode dans laquelle ils comparent l'impact du niveau de demande sur ces coûts.

DE ASSIS CORREIA et al. (2012) effectuent eux aussi une évaluation d'un potentiel CDU pour desservir la ville de Belo Horizonte au Brésil. Ils s'interrogent sur les gains environnementaux et économiques qu'engendreraient cette solution. Pour cela, ils adoptent une démarche déductive logique. En s'appuyant sur des données opérationnelles (nombre de véhicules, distance parcourue, consommation de carburant, etc.), ils estiment quantitativement si le CDU apporte un gain ou une perte dans les émissions de gaz à effet de serre.

En proposant un système urbain collaboratif comme alternative à un CDU, GONZALEZ-FELIU et SALANOVA (2012) s'intéressent également à l'apport environnemental que cette solution pourrait avoir. De plus, les auteurs évaluent le coût de cette solution au regard du coût de livraison pour le client final (ou en tout cas celui qui paye le service de livraison). Leur objectif est donc d'évaluer la performance de ce système par rapport à une livraison traditionnelle.

MELO et al. (2014) proposent également d'évaluer quatre scénarios alternatifs à un CDU dans le cas de la ville de Porto. Ils construisent des scénarios de livraisons par véhicules électriques ou par véhicules diesels par exemple et comparent les impacts environnementaux

et économiques associés.

Enfin, dans le même esprit de comparaison, LIN et al. (2014) s'interrogent sur la performance d'un système de livraison traditionnelle par rapport à un système utilisant la consolidation. Pour cela, les auteurs évaluent le coût de revient par item (ou par colis selon l'échelle de mesure) pour une situation donnée puis effectuent une recherche du coût optimal dans le cas de chaque scénario en s'appuyant sur les travaux préliminaires de CHEN et al. (2012) et KAWAMURA et LU (2007). Enfin, ils mettent en avant le point critique à partir duquel le système de livraison avec consolidation est plus intéressant pour les utilisateurs que la livraison traditionnelle.

L'ensemble de ces travaux montrent la complexité et surtout la diversité des études portant sur l'évaluation des solutions de logistique urbaine. Les enjeux et les acteurs sont multiples et le champ d'exploration est vaste pour apporter des réponses à chacun. Nous proposons dans la partie suivante d'établir une synthèse des différentes approches présentées dans cette section.

II.4 Synthèse des différentes approches

Nous avons reporté dans le tableau 1.1 ci-dessous l'ensemble des travaux cités dans les sections précédentes. Dans cette matrice à double entrée, nous présentons une synthèse des approches en les classant en fonction de leur point de vue (*a posteriori* et *a priori*) et de la façon dont la performance est évaluée (qualificatif et quantitatif). Ces différents positionnements de recherche n'apportent pas les mêmes informations ni les mêmes connaissances et sont complémentaires (THOMPSON 2015).

Les études qualitatives reposent en majorité sur la reconnaissance des bonnes pratiques, évaluation *a posteriori*, puis sur une aide à la décision à partir de celles-ci, évaluation *a priori*. Dans la première catégorie, l'objectif est de recenser les expérimentations pour en analyser les comportements et en faire des références pour l'évaluation des prochains projets soit en tant qu'objectifs soit en tant que standards minimums (GRAINDORGE et BREUIL 2014). Dans la dernière catégorie, il s'agit d'utiliser ces bonnes pratiques comme guide : quelle solution choisir au vue de mes objectifs ? Plusieurs travaux ont été menés afin de fournir ces guides qui doivent maintenant être maintenus à jour et enrichis à partir des nouvelles expériences qui pourraient avoir lieu.

Les évaluations quantitatives reposent sur des approches de modélisation mathématique ou des mesures. Elles sont, pour leur part, beaucoup plus disparates autant dans leur objet que dans leur forme. Les études *a posteriori* sont peu nombreuses et sont caractérisées par l'évaluation d'un projet particulier. Il n'y a pas toujours de méthodologie développée mais une évaluation ponctuelle d'une solution. Les indicateurs de performance favoris sont les émissions de gaz à effets de serre.

Les travaux se positionnant dans une démarche d'évaluation quantitative *a priori* sont les

plus nombreux dans la littérature (cf table 1.1). Cela s'explique par la diversité des objets d'étude à savoir les différentes solutions de logistique urbaine existantes. Parmi ces solutions, le CDU semble être un centre d'intérêt privilégié pour les décideurs mais aussi pour les chercheurs. Pourtant de nombreuses zones d'ombre restent en suspens quant à sa viabilité et à ses conditions de réussite. En effet, l'ensemble des bonnes pratiques a mis en avant les spécificités de cette solution logistique, la diversité des organisations possibles et également les impacts différents qu'elle peut produire conduisant à un décalage entre la théorie (via les bonnes pratiques) et la réalité (via les évaluations quantitatives *a posteriori*). Ainsi, nous proposons dans ces travaux de recherche de définir plus en détail le contexte associé et de nous intéresser plus particulièrement à son évaluation économique.

	Etudes qualitatives	Etudes quantitatives
Etudes a posteriori	(HENRIOT et al. 2008); (PATIER et BROWNE 2010); (RUSSO et COMI 2010); (DABLANC et al. 2011); (PAPOUTSIS et al. 2012); (COURIVAUULT 2004); (BROWNE et al. 2005); (ALLEN, BROWNE et al. 2012); (MORANA et GONZALEZ-FELIU 2011); (GONZALEZ-FELIU et al. 2013); (QUAK et al. 2014)	(ADEME 2005); (VAN ROOIJEN et QUAK 2010); (QUAK et TAVASSZY 2011); (BROWNE et al. 2011); (HENRIOT et al. 2008)
Etudes a priori	(THOMPSON et HASSALL 2006); (ALLEN et al. 2007); (GÉRARDIN 2007); (WITKOWSKI et KIBA-JANIAK 2012); (GRAINDORGE 2012); (MUNUZURI et al. 2012); (CHWESIUK et al. 2010); (BROWNE et al. 2008); (PANERO et al. 2011)	(TANIGUCHI et al. 2003); (BOERKAMPS et VAN BINSBERGEN 1999); (AUBERT et ROUTHIER 1999); (MELO et COSTA 2011); (GONZALEZ-FELIU et al. 2012); (MARCUCCI et DANIELIS 2008); (MUNUZURI et al. 2005); (RUSSO et COMI 2011); (TANIGUCHI et VAN DER HELDEN 2000); (BOYER et al. 2009); (FILIPPI et al. 2010); (SUKSRI et RAICU 2012); (COMI et ROSATI 2013); (NUZZOLO et COMI 2014); (TRENTINI 2012); (DELAÏTRE et DE BARBEYRAC 2012); (DAVIS et FIGLIOZZI 2013); (VAN DUIN et al. 2012); (VAN DUIN et al. 2008); (VAN DUIN et al. 2010); (ROCA-RIU et ESTRADA 2012); (DE ASSIS CORREIA et al. 2012); (GONZALEZ-FELIU et SALANOVA 2012); (MELO et al. 2014); (LIN et al. 2014); (CHEN et al. 2012); (KAWAMURA et LU 2007)

TABLE 1.1 – Positionnement de l'état de l'art sur l'évaluation des solutions de logistique urbaine

III Le Centre de Distribution Urbaine : une solution très envisagée avec des résultats mitigés

III.1 Précisions sur le cadre d'étude

Comme nous l'avons présenté précédemment, pour faire face aux problèmes liés à la logistique urbaine, de nombreuses solutions ont été développées et étudiées (ALLEN et al. 2007 ; BOUDOUIN 2006). Parmi elles, nos travaux de recherche portent sur une solution particulière de consolidation des flux : le Centre de Distribution Urbaine (CDU). Ce concept représente l'une des solutions les plus populaires dans les villes européennes pour résoudre les problèmes d'encombrement des voies, de pollution ou encore de saturation des centres-villes (CHWESIUK et al. 2010 ; VAN DUIN et MUNUZURI 2015). Pour mémoire, il consiste en une plateforme de consolidation des flux à destination du centre-ville. Le principe est de grouper les marchandises en provenance de différents chargeurs ou transporteurs et à destination d'une même zone en centre-ville afin de limiter l'utilisation de véhicules lourds dans l'aire urbaine. En particulier, ce type d'infrastructures est utile pour éviter la pénétration du centre-ville par les semis-remorques ou gros porteurs.

Bien que le CDU soit une solution générale pour la ville, son action est réduite aux flux de marchandises qu'il est capable de capter. En effet, la chaîne logistique au sens large est composée de différentes chaînes logistiques en fonction de la nature des produits à transporter. Ainsi, les chaînes d'approvisionnement des produits périssables ou froids sont très spécifiques (températures et délais maîtrisés par exemple) et nécessitent des conditions contraignantes impliquant des investissements lourds. La majorité des projets de CDU traditionnels ne se positionnent pas sur ces marchés et ne sont donc pas en mesure de capter ces flux là. On trouve cependant des expérimentations comme dans la ville de Parme en Italie (GONZALEZ-FELIU et MORANA 2010 ; VAGHI et PERCOCO 2011). De plus, l'ensemble des circuits d'approvisionnement en trace directe ou en propre (comme les artisans ou les chaînes de marques) peuvent difficilement être déviés par un CDU. Enfin, un nouveau CDU, tout comme une entreprise, ne peut pas obtenir la totalité du marché dès son lancement (relation de confiance avec les clients à instaurer, liquidités à avoir, etc...). Finalement, parmi l'ensemble des marchandises circulant dans la ville, une part réduite est captable par un CDU au lancement du projet (BROWNE et al. 2005).

En revanche, les effets attendus d'un CDU sont multiples et répondent aux enjeux actuels liés à la durabilité de la ville. Effectivement, grâce à la mutualisation, un CDU devrait faire diminuer la congestion en nécessitant moins de camions. L'utilisation de véhicules plus petits et dégageant moins de polluants comme des véhicules électriques ou des triporteurs doivent entraîner une baisse des nuisances sonores ainsi que des émissions de gaz à effet de serre (ALLEN

et al. 2012 ; BROWNE et al. 2011 ; QUAK et TAVASSZY 2011) et par conséquent une amélioration de la qualité de vie.

Le sujet de l'évaluation environnementale d'un CDU a été traité à plusieurs reprises dans la littérature (ADEME 2005 ; DE ASSIS CORREIA et al. 2012 ; QUAK et TAVASSZY 2011 ; TANIGUCHI et VAN DER HEIJDEN 2000 ; VAGHI et PERCOCO 2011 ; VAN ROOIJEN et QUAK 2010). Ces études ont mis en avant la diminution de la distance parcourue qui entraîne donc une diminution des émissions polluantes. De plus, les expériences analysées reposent souvent sur l'utilisation de véhicules ne produisant pas d'émissions directes ce qui rend meilleur aussi le bilan environnemental de cette solution.

L'impact sociétal d'un CDU repose sur des indicateurs tels que le nombre d'embauches, l'amélioration du quotidien des chauffeurs et des habitants ou encore l'accès au service. Cet aspect de l'évaluation est peu traité par les chercheurs. Cela s'explique par plusieurs raisons. La première est le recul requis pour aboutir à ces indicateurs. En effet, l'observation du nombre d'emplois créés par un CDU n'est crédible que si elle s'appuie sur des données à long terme. La deuxième raison est, selon nous, liée aux spécialités des chercheurs s'intéressant à la logistique urbaine et en particulier au CDU. Ceux-ci ne sont pas forcément outillés pour évaluer efficacement ces enjeux là.

Enfin, d'un point de vue économique, le CDU est l'objet de nombreux questionnements sur le modèle d'affaires à mettre en place. On entend par cela la façon dont une entreprise va sélectionner un mode de création de valeur lui permettant d'attendre une rentabilité. Dans le cas du CDU, il s'agit de définir les types de services qui seront fournis (QUAK et TAVASSZY 2011), ou encore l'utilisation de modes de transport alternatifs au véhicule thermique (GONZALEZ-FELIU et al. 2013). Le modèle d'affaires concerne également la définition des parties prenantes du projet, qui peuvent être nombreuses : acteurs privés, acteurs publics, transporteurs, chargeurs, destinataires, etc. (BROWNE et al. 2005) et qui peuvent avoir des rôles "moteurs" ou pas dans le projet. Comme le soulignent CHANUT et PACHÉ (2012) on peut s'intéresser à l'exemple des entreprises dites "3PL" (chainon de la chaîne logistique en charge de l'organisation et du transport dans la partie finale du processus de distribution) qui, bien qu'expérimentées dans la gestion de la mutualisation multi-partenaires, ne sont que très peu impliquées comme acteurs majeurs des initiatives de CDU. Il y a donc de réelles interrogations sur le modèle d'affaires à utiliser.

La question de la rentabilité concerne également la réalité opérationnelle du CDU. Si l'on se base sur les évaluations environnementales effectuées des CDU, une diminution de la distance parcourue est observée. Cela devrait donc entraîner une réduction des coûts variables liés à cette distance et donc un meilleur équilibre économique de la structure. Pourtant, l'OCDE (2003) rapportait il y a quelques années la difficulté à rendre pérenne les expérimentations de

CDU à travers l'Europe. En effet, sur 200 projets seulement 15 étaient toujours en exercice cinq ans après leur lancement. Les études sur les modèles d'affaire, présentés ci-dessus, ont mis en avant l'importance de la prise en compte du contexte dans ce choix (ARMAND et al. 2013; GONZALEZ-FELIU et al. 2014), néanmoins il ne semble pas suffire à lui seul à expliquer cette discordance. C'est pourquoi, une évaluation plus opérationnelle des coûts engendrés par la gestion d'un CDU semble nécessaire pour conforter les apports environnementaux avec une activité économique viable.

III.2 Evaluer la rentabilité d'un CDU

On dit d'un projet qu'il est viable s'il est susceptible d'être mené à bien et de durer¹. D'autre part, une entreprise est rentable lorsqu'elle génère des profits. Si l'on considère qu'un projet de CDU, qu'il soit public ou privé, est pérenne à partir du moment où il exerce une activité auto-suffisante, alors on peut dire qu'un CDU sera viable s'il est rentable. Dès lors, la rentabilité de cette structure semble être une condition nécessaire (et suffisante?) à sa viabilité. C'est pourquoi, nous faisons le choix dans cet écrit d'utiliser indifféremment l'une ou l'autre de ces notions.

Comme nous le disions plus haut, la rentabilité au sens comptable (ou opérationnel) d'un CDU doit être considérée. On trouve dans la littérature plusieurs études portant sur ce sujet avec plusieurs angles de vue de l'évaluation. Une partie des travaux traitent de l'anticipation de la demande au niveau de la ville ou du CDU (BATTALIA et al. 2014; MARCUCCI et DANIELIS 2008). Une autre part importante des évaluations portant sur la rentabilité d'un CDU s'intéresse au coût de revient par colis. Les méthodes employées pour estimer ce coût sont différentes.

VAN DUIN et al. (2008) puis plus tard VAN DUIN et al. (2012) s'appuient sur une analyse coûts/bénéfices pour estimer le coût d'un colis en fonction du volume total transporté. ROCA-RIU et ESTRADA (2012) utilisent, quant à eux, une démarche d'évaluation par "paquets" de coûts liés au temps et composant le coût total unitaire. Ainsi, ils décomposent les charges sur le temps d'approche, le temps de tournée et le temps d'exécution. Ils comparent ensuite sur chaque étape l'évolution du coût par rapport à la situation actuelle.

Enfin, LIN et al. (2014) dans la continuité des travaux de CHEN et al. (2012) proposent une méthode d'évaluation du coût par item reposant sur une description sommaire des coûts les plus importants (salaires, véhicules, etc...) dans le contexte américain. A partir des équations obtenues, ils calculent le coût optimal par item pour le système de livraison par le CDU et en propre puis les comparent.

L'ensemble de ces travaux convergent vers le même objectif : trouver le point critique à partir

1. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/viable/81784>

duquel le système de livraison actuel est moins intéressant financièrement pour le "payeur". Leur point commun est donc le point de vue adopté qui est celui du chargeur ou du destinataire de la marchandise. A travers ce choix, ils participent à répondre aux questions concernant l'existence d'un marché potentiel pour un CDU. En effet, il apparait en conclusion de ces études qu'il existe des situations dans lesquelles les utilisateurs du CDU auront un intérêt financier à payer ce service qui sera rentable pour eux et validant que le CDU a une raison d'exister.

Néanmoins, le CDU en tant qu'organisation ne fait pas, en l'état actuel de nos connaissances, l'objet d'étude détaillée sur son aptitude à générer du profit à partir de son activité de livraison. Les conditions précises de sa viabilité apparaissent encore comme un verrou scientifique à étudier. L'objectif de ces travaux de thèse est donc de répondre à deux questions : un CDU peut-il être opérationnellement rentable ? Quels leviers peut-on mobiliser pour attendre cette rentabilité ? Pour cela, nous adopterons une démarche d'évaluation monétaire quantitative *a priori* (GRAINDORGE et BREUIL 2014) de la performance d'un CDU en utilisant de façon combinée un modèle économique et un modèle physique basé sur l'analyse du processus de livraison.

Chapitre 2

Un modèle économique pour évaluer la rentabilité d'un CDU

I Description économique du système

I.1 Notre positionnement : notion de marge sur coûts variables

La rentabilité d'une entreprise se définit par sa capacité à générer des profits. Ainsi, étudier sa rentabilité revient à évaluer les profits réalisés ou réalisables. Pour ce faire, nous choisissons l'étude de la marge sur coûts variables. Elle est définie comme la différence entre le chiffre d'affaires et les coûts variables, comme introduit par l'équation 2.1.

$$M^c = R - C^v \quad (2.1)$$

où

M^c : Marge sur coûts variables

R : Chiffre d'affaires

C^v : Coûts variables

En effet, les coûts engendrés par l'activité sont de deux sortes : les coûts fixes, indépendants de l'activité au mois m , et les coûts variables, dépendants du niveau d'activité au mois m . On peut représenter la marge sur coûts variables et les coûts fixes sur un même graphique (voir figure 2.1). Sur cette représentation, le point de croisement des deux droites correspond au point d'équilibre économique alors que l'écart entre ces deux droites quantifie la marge. L'avantage de ce visuel est qu'il met en évidence les pertes et les gains (courbe de marge sur coûts variables en dessous ou au-dessus de la courbe de coûts fixes), mais aussi le niveau d'activité à atteindre pour obtenir une rentabilité.

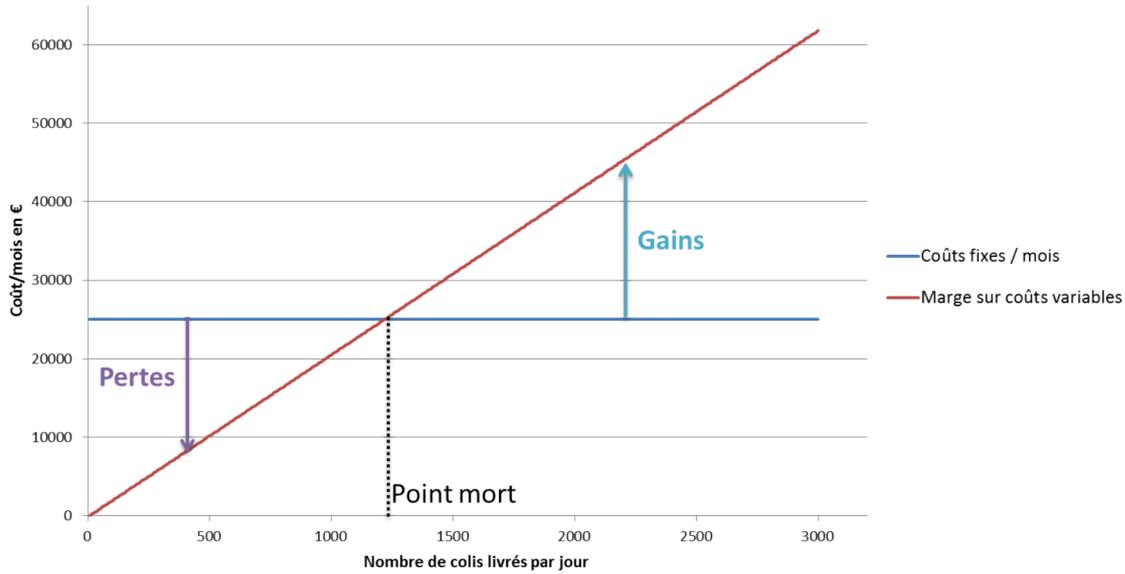


FIGURE 2.1 – Exemple d'évolution de la marge sur coûts variables/mois par rapport aux coûts fixes

Dans le cas d'un CDU, on remarque que deux objectifs sont possibles. Le premier concerne l'obtention de la rentabilité, c'est-à-dire livrer suffisamment de colis pour dépasser le point d'équilibre et même générer le plus grand profit possible. Ce nombre de colis livrés quotidiennement est donc un levier tactique. Étant donné que le marché n'est pas infini, ce levier est borné. Ainsi, lorsque le marché est saturé, alors le second objectif apparaît, qui est de déplacer le point d'équilibre au plus près du point zéro des abscisses et ordonnées en utilisant d'autres leviers d'actions.

Cette démarche nous a été inspirée par l'approche proposée par DAGANZO (2005). Dans cet ouvrage, il décompose les coûts de transport engendrés tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Il calcule, ensuite, le coût de transport par expédition et représente son évolution en fonction de la taille de cette expédition. Nous avons donc adapté son approche en utilisant la notion de marge sur coûts variables pour caractériser le fonctionnement d'un CDU et évaluer le coût de livraison d'une unité supplémentaire (ici le colis).

I.2 Les choix de modélisation

Afin de mettre en place notre modèle économique, nous avons fait des choix concernant la modélisation. Le premier est l'étude de la marge sur coûts variables, comme expliqué dans le paragraphe précédent. La façon d'exprimer cette marge sur coûts variables nécessite également des choix notamment concernant les coûts à prendre en compte. Pour cela, il est d'abord important de bien définir le point de vue que nous avons adopté pour établir ce modèle économique.

Alors que KAWAMURA et LU (2007) ont un positionnement centré sur les transporteurs ou les commerçants (en fait sur celui qui paie le service de livraison) et donc sur le coût de revient d'une livraison, nous proposons d'étudier les coûts de fonctionnement du CDU du point de vue de son gérant. Cela permet, selon nous, d'apporter un regard plus précis sur l'évaluation économique de cette structure. En effet, notre approche est plutôt comptable avec un état des lieux des entrants et des extrants de l'organisation. C'est pourquoi nous utilisons la terminologie d'"évaluation économique du CDU", le but étant de mettre en avant les conditions de rentabilité de cette solution.

Puis, nous avons également considéré dans notre étude les coûts quotidiens générés par le processus de livraison : du chargement du camion jusqu'au retour de la tournée. Ce processus est répété plusieurs fois par jour. Nous avons choisi de prendre une échelle de mesure mensuelle. Pour cela, nous considérons qu'aucune variation importante de flux n'est observée d'un jour ouvré à l'autre dans la semaine de travail et qu'il est donc possible de définir un "jour moyen typique" qui est ensuite généralisé sur le mois. Ce choix peut être justifié par la non-saisonnalité des produits distribués via le CDU. Bien que certaines périodes soient plus chargées que d'autres (Noël par exemple représente une forte demande), nous avons considéré qu'elles peuvent être à la fois compensées par des périodes plus creuses (juillet/août) mais aussi qu'elles ne sont pas suffisamment longues pour créer un déséquilibre. Si toutefois, le CDU étudié ne satisfait pas ces conditions, alors une évaluation plus affinée de la variation de ce flux sera nécessaire.

Ensuite, les politiques tarifaires sont très nombreuses dans le transport. On trouve des facturations à la position, au poids, au colis, à la palette etc... Dans un souci d'harmonie et de clarté, nous considérons dans notre modèle un colis moyen défini par un poids et un volume. Il s'agit d'une échelle de mesure que l'on peut convertir facilement grâce à des ratios du type colis/position ou encore colis/palette. C'est pourquoi, le modèle contient, notamment, un prix facturé par colis.

Enfin, nous ne prenons pas position sur la possession ou non du matériel. Ainsi, les coûts mensuels relatifs aux véhicules, au bâtiment ou encore au petit matériel peuvent correspondre à des frais de location ou à de l'amortissement. De plus, certaines charges ou revenus, comme ceux liés à l'usure des pneus ou les subventions par exemple, sont inclus dans le modèle afin de laisser la possibilité d'évaluer leur impact mais peuvent être nuls dans certains cas. En effet, lorsque les véhicules sont loués, les contrats de maintenance et d'entretien incluent l'usure des pneus qui n'est alors pas à la charge du locataire en tant que charge supplémentaire.

I.3 Modèle économique proposé

L'ensemble des choix de modélisation présentés précédemment est traduit dans les équations qui composent le modèle économique que nous proposons et détaillons dans cette section. Comme nous le définissons dans le paragraphe I.1, il repose sur trois équations donnant respectivement les coûts variables mensuels, le chiffre d'affaires mensuel et les coûts fixes mensuels.

La part variable des coûts est relative à l'ensemble des consommables utilisés, à savoir l'énergie et les pneumatiques. Ainsi, l'expression des coûts variables ne dépend que de la distance totale parcourue (voir équation 2.2 ci-dessous). Plus cette distance sera importante plus les coûts variables seront élevés.

$$C^{vm} = (c^e + c^u) \times D^m \quad (2.2)$$

où

C^{vm} : Coûts variables mensuels

c^e : Coût de l'énergie par km

c^u : Coût d'usure des pneus par km

D^m : Distance parcourue par mois

L'équation exprimant le chiffre d'affaires est composée de trois postes de gains (équation 2.3 ci-dessous).

$$R^m = p \times n^{cp} \times n^{ps} \times n^{sm} + s^m + a^m \quad (2.3)$$

où

R^m : Chiffre d'affaires mensuel

p : Prix facturé par colis

n^{cp} : Nombre de colis par position

n^{ps} : Nombre de positions par stop

n^{sm} : Nombre de stops par mois

s^m : Subventions par mois

a^m : Revenus des activités complémentaires par mois

Le premier poste de gain concerne les revenus engendrés par la livraison des colis. Il se définit par un prix facturé par colis multiplié par le nombre de colis livrés par mois. Afin d'apporter un niveau de pilotage plus précis, le nombre de colis par mois est lui-même décomposé en trois

ratios que l'on appellera par la suite les "paramètres de mutualisation". Il s'agit du nombre de colis par position, le nombre de positions par stop et enfin le nombre de stops par mois. Nous distinguons ici les concepts de position et de stop. Une position correspond à une adresse de client alors qu'un stop est l'endroit où le véhicule est garé pour livrer ensuite plusieurs clients. Un client, par conséquent une position, peut ensuite recevoir un ou plusieurs colis. De la même manière, le CDU sera d'autant plus performant si deux remettants (les transporteurs déposant la marchandise au CDU) devaient livrer la même position. En effet, dans ce cas-là, le CDU ne livrera qu'une position avec un nombre de colis plus important que si chacun avait fait sa propre livraison.

Le deuxième type de revenus est relatif aux subventions qui peuvent être accordées au CDU. Elles sont considérées dans le chiffre d'affaires puisqu'elles s'ajoutent aux profits réalisés par la livraison.

Le dernier poste de profit se rapporte aux activités complémentaires que le CDU pourrait effectuer en sus de la livraison (stockage, station de recharge électrique, etc...). Nous choisissons de traiter à part ces revenus afin de bien différencier l'activité initiale des services supplémentaires proposés.

Enfin, les coûts fixes présentent la particularité d'avoir deux composantes (voir équation 2.4).

$$C^{fm} = \sum_{i=1}^n (N_i^v c_i^v) + N^l S^{lm} + N^g S^{gm} + c^{lm} + c^{bm} + c^{fm} + t^m \quad (2.4)$$

où

C^{fm} : Coûts fixes mensuels

N_i^v : Nombre de véhicules de type i

c_i^v : Coût véhicule de type i par mois

N^l : Nombre de livreurs

S^{lm} : Salaire mensuel d'un livreur

N^g : Nombre de gérants

S^{gm} : Salaire mensuel d'un gérant

c^{lm} : Coût du logiciel informatique par mois

c^{bm} : Coût du foncier par mois

c^{fm} : Charges fixes mensuelles

t^m : Taxes mensuelles

Une partie de ces coûts concerne l'ensemble des frais fixes tels que les coûts relatifs au foncier, le logiciel de traitement informatique ainsi qu'un poste de coûts de type charge fixes diverses.

Il s'agit des frais liés à la gestion courante administrative (papeterie, frais postaux, expert-comptable, assurance, etc...), aux déplacements du personnel (pour formation, démarchage commercial, etc.) et à l'achat de petits matériels (transpalettes par exemple) ou encore le paiement mensuel des taxes (impôts et intéressement). L'ensemble de ces coûts sont relativement indépendants du niveau d'activité du CDU.

En revanche, les charges des véhicules et des salaires peuvent être considérées comme constantes par palier et sont la deuxième composante des coûts fixes. Cela s'explique par le choix que nous faisons, d'observer une situation dans laquelle les conducteurs sont embauchés uniquement à temps plein et pour effectuer des missions identiques qui vont de la manutention à la livraison. Cela signifie que lorsqu'un couple conducteur/véhicule supplémentaire est nécessaire, alors nous considérons les coûts d'un temps plein quel que soit le niveau d'activité lié à ce conducteur. Ainsi, bien que dépendants de l'activité du CDU (plus on a de livraisons à réaliser plus on a besoin de conducteurs et de véhicules), ces charges sont fixes dans une échelle de capacité égale à celle d'un véhicule. De plus, ils ne sont pas directement impactés par la décision du gérant puisqu'ils sont à la fois une conséquence et une nécessité de l'activité. Si le niveau d'activité visé par le gérant nécessite 4 conducteurs, il ne peut pas le réaliser avec 2 sans modifier d'autres paramètres (sous-traitance par exemple). De même, il ne peut pas décider du montant de ces frais. Il s'agit donc de coûts fixes qu'il subit au même titre que le coût du bâtiment.

Afin de traduire la part décisionnaire du gérant dans l'attribution des ressources, nous distinguons dans notre étude deux types de salaires, à savoir ceux des conducteurs-livreurs et ceux des gérants. Nous considérons les frais afférents aux salaires chargés des employés. De la même façon, différents types de véhicules peuvent être définis ayant ainsi un coût différent (voir équation 2.4).

Un exemple d'évolution de la marge sur coûts variables et des coûts fixes en fonction du nombre de colis livrés par jour est représentée sur la figure 2.2. Au-delà de la mise en évidence d'éventuels points morts économiques (à l'intersection des courbes), ces courbes nous apprennent beaucoup de choses sur le comportement de la structure CDU. Nous détaillons dans la partie suivante comment nous les obtenons et les leviers d'actions qu'elles mettent en avant.

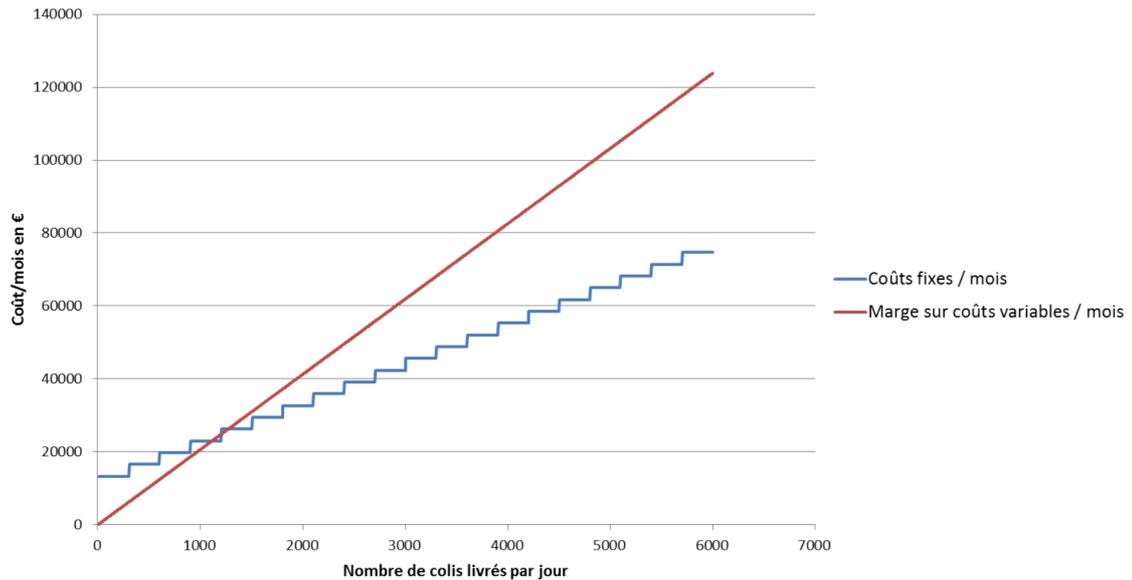


FIGURE 2.2 – Exemple d'évolution de la marge sur coûts variables/mois en fonction du nombre de colis livrés par jour

II Analyse graphique

II.1 Des hypothèses pour obtenir les courbes

On dit souvent qu'un bon schéma vaut mieux que des mots. Le cerveau a besoin de se représenter les choses, de mettre une image sur les mots (LARKIN et SIMON 1987). C'est pourquoi, tracer l'évolution de la marge sur coûts variables en fonction du nombre de colis livrés par jour par rapport à celle des coûts fixes nous permet de mieux appréhender le comportement du CDU. Alors que l'évaluation ponctuelle du modèle économique donne une photographie d'une situation pour un jeu de données et un niveau de demande donné, les courbes sont obtenues en augmentant pas à pas la demande pour le même jeu de données.

Néanmoins, les paramètres sont nombreux et n'ont pas tous le même lien avec le niveau de demande. En effet, une partie d'entre eux sont indépendants du niveau de demande et peuvent être estimés à partir des données du marché comme par exemple le coût du logiciel informatique, de l'énergie ou encore du bâtiment. Ils sont donc fixés au début de l'évaluation et n'évoluent pas. En revanche, d'autres sont liés, et donc dépendants de la demande, et vont varier en fonction de celle-ci. C'est le cas de la distance et du nombre de couples véhicule/conducteur par exemple. Ce lien avec le niveau de demande différencie les paramètres d'entrée de notre modèle et les variables. Les premiers seront fixés au début de l'évaluation, alors que les seconds varieront au cours de l'évaluation.

Nous présentons dans les deux sous-parties suivantes la façon dont nous avons modélisé le

comportement des variables en fonction du niveau d'activité.

II.1.a Calcul du nombre de véhicules nécessaires

La première variable du modèle est le nombre de véhicules et par conséquent de conducteurs. On comprend aisément que transporter 20 ou 200 colis ne nécessite pas les mêmes ressources. Ainsi, il a fallu modéliser ce lien entre le nombre de colis et la capacité des véhicules. La capacité d'un véhicule pour effectuer une tournée peut être restreinte par trois critères : le poids, le volume et l'autonomie en énergie.

A partir d'une interview auprès d'un transporteur stéphanois spécialisé dans la livraison en ville, nous avons pu définir le poids et le volume d'un colis moyen type (voir Annexe A). En effet, on observe une dispersion faible de la moyenne (écart-type petit), ce qui nous permet de faire l'hypothèse que traiter un colis moyen est une approximation acceptable. Ensuite, à partir du poids et du volume moyen de ce colis type, nous avons pu convertir la capacité d'un véhicule en un nombre de colis maximum que l'on peut y charger. Effectivement, les capacités en volume, poids et nombre d'euro-palettes des véhicules représentent des données des constructeurs connues. Enfin, l'autonomie en distance a été déterminée, pour différentes motorisations, par analyse, là encore, des données constructeurs.

L'utilisation journalière des véhicules est également limitée par le temps de travail des conducteurs. Nous considérons dans cette étude systématiquement un couple conducteur/ véhicule unique. Cela signifie qu'un véhicule est attribué à un conducteur et ne peut pas être utilisé par un autre. On a donc autant de conducteurs que de véhicules. Ce choix repose sur l'hypothèse qu'un véhicule ne peut pas (encore...) avancer sans conducteur et qu'un conducteur ne peut pas effectuer la livraison sans véhicule. Cette hypothèse de couple unique est également cohérente avec la réalité d'un CDU qui n'est pas conçu pour capter à lui seul l'ensemble des flux entrants dans la ville, qui nécessite alors l'organisation de tournées du matin (par exemple 6h-14h) et de l'après-midi (par exemple 14h-22h), permettant que deux livreurs utilisent le même véhicule. De ce fait, le modèle prend en compte un nombre de tournées maximum qui peut être réalisé quotidiennement par un véhicule.

Ensuite, nous avons calculé le nombre de véhicules ainsi que le nombre de tournées nécessaires par jour par une approche itérative. Comme nous le mentionnions plus haut, nous faisons l'hypothèse d'une répartition uniforme de la demande. Cela implique que les véhicules ont des chargements équivalents. Ainsi, le nombre de véhicules nécessaires peut être calculé comme l'arrondi supérieur du rapport entre le nombre de colis à livrer par jour et la capacité du véhicule. Néanmoins, nous permettons dans le modèle de paramétrer l'utilisation de plusieurs types de véhicules simultanément. Ainsi, nous ne pouvons pas effectuer ce calcul pour estimer ce besoin en véhicule.

C'est pourquoi, un algorithme simple de remplissage a été utilisé pour prendre en compte les différentes caractéristiques des véhicules. La méthode est la suivante : on définit les types de véhicules à utiliser et leur ordre. On choisit le premier véhicule, on le remplit autant que possible, en respectant les contraintes de volume, poids et distance, et autant de fois que son nombre de tournées maximum le permet. On déduit le nombre de colis qui en résulte du nombre de colis total à livrer puis on prend le véhicule suivant et ainsi de suite. Finalement, on obtient le nombre de véhicules pour répondre à la demande ainsi que le nombre de tournées nécessaires. Cette étape est faite à chaque fois que la demande est incrémentée et permet d'obtenir la courbe des coûts fixes en fonction du nombre de colis livrés par jour.

II.1.b Estimation de la distance

La deuxième variable sous-jacente de notre modèle économique est la distance totale parcourue. Elle est liée au nombre de colis par l'intermédiaire du nombre de stops. Il y a deux effets à prendre en compte pour comprendre l'évolution de la distance. D'abord, elle dépend de l'étalement urbain : plus la zone de chalandise est étendue plus la distance à parcourir est importante. Ensuite, elle dépend également de la densité : plus les points de livraison sont éloignés les uns des autres plus la distance à parcourir est importante. En revanche, on ne peut pas dire que plus les points sont proches plus la distance diminue. Elle va en fait continuer d'augmenter : on parcourt de la distance supplémentaire, mais plus doucement car la distance entre les points va diminuer. Il s'agit donc d'identifier l'évolution de la distance interstops en fonction du nombre de stops dans la zone de chalandise.

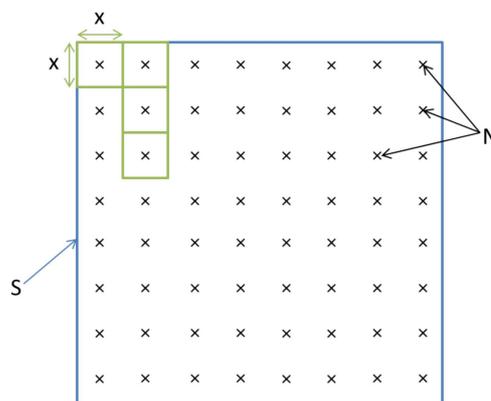


FIGURE 2.3 – Estimation de la distance interstops en fonction de la surface S de la ville et du nombre de stops N

Nous proposons la modélisation suivante, représentée sur la figure 2.3 : soit S la surface de la zone de chalandise. Nous faisons l'hypothèse que les N points de livraison sont uniformément répartis dans cette surface. Chaque point est à une distance interstops x des points autour de

lui. Ainsi, la surface autour d'un point est x^2 . La surface S est donc égale à Nx^2 . Finalement, la distance interstops peut s'écrire en fonction de la surface S et du nombre de points de livraison N dans la zone comme suit :

$$x = \sqrt{\frac{S}{N}} \tag{2.5}$$

Nous avons représenté, sur la figure 2.4, l'évolution de la distance interstops en fonction du nombre de stops par km^2 . L'allure de la courbe correspond à la réalité que l'on cherche à modéliser : plus le nombre de stops est important, plus la distance interstops est faible. Les points sont donc bien plus proches les uns des autres au fur et à mesure que la densité augmente.

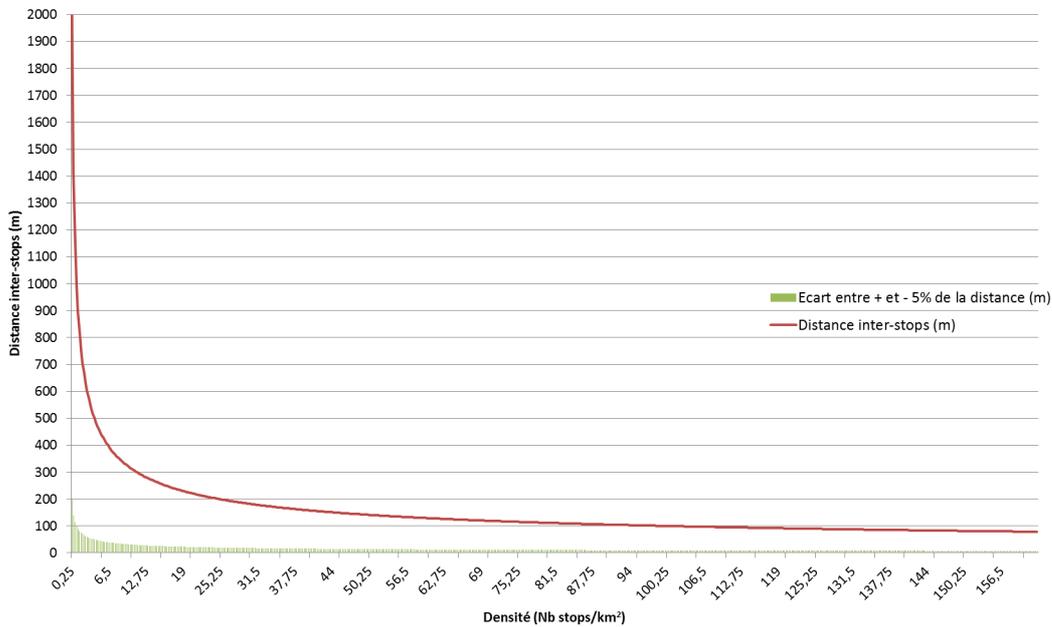


FIGURE 2.4 – Evolution de la distance interstops en fonction de la densité en stops et comparativement avec une erreur de $\pm 5\%$ sur la distance

Néanmoins, il est nécessaire de valider notre démarche en testant la robustesse de notre modélisation de la distance par rapport à notre modèle économique. Nous voulons donc vérifier qu'une erreur sur la densité n'entraîne pas une grosse erreur sur l'évaluation économique. Pour cela, nous nous intéressons tout d'abord à l'erreur acceptable sur la distance interstops. En effet, c'est ce paramètre d'entrée qui alimente le modèle économique.

Il est d'usage dans une étude statistique d'accepter une erreur de $\pm 5\%$ sur une valeur estimée, c'est donc la valeur que nous choisissons. A partir de cela, il est possible d'encadrer l'écart induit (et autorisé) sur la densité. Autrement dit, quelle fourchette de densité permet d'obtenir une erreur maximum et minimum de 5% de la distance interstops. On trouve que

la densité ne doit pas varier de plus de 11% et de moins de 9%, comme cela est montré par l'inégalité 2.6. La distance interstops est notée d et la densité D .

$$\begin{aligned}
 d - 5\%d < d < d + 5\%d &\iff (d - 0,05d)^2 < d^2 < (d + 0,05d)^2 \\
 &\iff \frac{1}{(0,95d)^2} > D > \frac{1}{(1,05d)^2} \\
 &\iff 1,11 \times \frac{1}{d^2} > D > 0,91 \times \frac{1}{d^2} \\
 &\iff D + 11\%D > D > D - 9\%D
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Ensuite, nous observons la valeur absolue qui correspond à une variation de $\pm 5\%$ de la distance (représentée par l'histogramme sur la figure 2.4). Il apparait alors que les écarts semblent minimales par rapport aux distances. De plus, la plus grande erreur absolue sur la distance est atteinte pour la densité la plus faible (ce qui est logique). Inversement, plus la densité est importante moins l'erreur, en écart absolu, est grande. On peut distinguer, ici, deux cas : ceux pour lesquels la distance est la plus pénalisante (densité faible) et ceux pour lesquels la densité est la plus pénalisante (densité élevée).

Ainsi, dans le cas le moins favorable pour la distance, l'écart possible est au maximum de 200m pour une densité pouvant varier entre 0,2275 et 0,2775. Le modèle de distance est donc très sensible à la variation de la densité. En revanche, l'erreur qui serait engendrée sur le modèle économique est très faible puisque cela reviendrait à rouler 200m supplémentaires. Si l'on rapporte cela au prix de l'énergie au km, dans le pire des cas cela engendre une variation de 3 centimes d'euro (en facturant 0,15€ du kilomètre). La robustesse est donc validée pour les densités très faibles.

Dans le cas le moins favorable pour la densité, l'écart possible sur la distance est d'environ 8m pour une densité variant entre (par exemple) 180 et 147. En reprenant le même coût de l'énergie, on engendre une erreur de moins d'un centime par colis. Si l'on rapporte cela au nombre de colis livrés pour une telle densité, alors on effectue une erreur inférieure à 10€. Le modèle est donc peu variant pour les densités fortes. Nous pouvons donc dire que notre modèle est robuste face aux paramètres de densité et de distance interstops. Cette estimation de la distance ne remet, par conséquent, pas en question les conclusions que nous pourrions tirer grâce au modèle économique.

Grâce à l'ensemble des éléments présentés ci-dessus, nous sommes en mesure de tracer l'évolution de la marge sur coûts variables ainsi que des coûts fixes en fonction du nombre de colis livrés par jour. Cette démarche permettra de mieux comprendre le comportement du CDU. C'est l'objet des sous-sections suivantes.

II.2 Etude des différentes courbes

II.2.a Evolution de la marge sur coûts variables

En étudiant la marge sur coûts variables, nous faisons le choix de nous intéresser au coût marginal. Il est donc relativement logique de tracer l'évolution de cette marge sur coûts variables en fonction du nombre de colis livrés quotidiennement ou mensuellement. Ainsi, il nous faut exprimer le chiffre d'affaires et les coûts variables en fonction de ce fameux nombre de colis livrés. Nous utiliserons, dans les équations suivantes, le nombre de colis livrés mensuellement comme référence.

Le chiffre d'affaires, dans sa forme initiale représentée dans l'équation 2.3, est déjà exprimé comme une fonction du nombre de colis livrés par mois au travers des différents paramètres de mutualisation. Les coûts variables nécessitent, en revanche, une reformulation pour que ce nombre de colis apparaisse clairement. Pour ce faire, nous convertissons la distance parcourue par mois en une distance parcourue par colis qui est multipliée par le nombre de colis livrés par mois (cf équation 2.7).

$$C^{vm} = (c^e + c^u) \times d^c \times N^{cm} \quad (2.7)$$

où

d^c : Distance par colis

N^{cm} : Nombre de colis livrés par mois

La marge sur coûts variables est alors une fonction affine du nombre de colis livrés mensuellement et dont l'expression est décrite par l'équation 2.8.

$$y = ax + b \quad (2.8)$$

avec

$$y = M^{cm} \text{ et } x = N^{cm}$$

$$a = p - (c^e + c^u) \times d^c$$

$$b = s^m + a^m$$

Les subventions et les activités complémentaires que pourraient avoir un CDU (en tant qu'entreprise) sont à l'origine du décalage de l'origine de la courbe de marge sur coûts variables. Concrètement, elles ont pour effet de faire remonter la courbe par rapport à la courbe de coûts fixes comme cela est mis en évidence sur la figure 2.5. Finalement, les points d'équilibre sont atteignables avec un nombre de colis livrés mensuellement moins important.

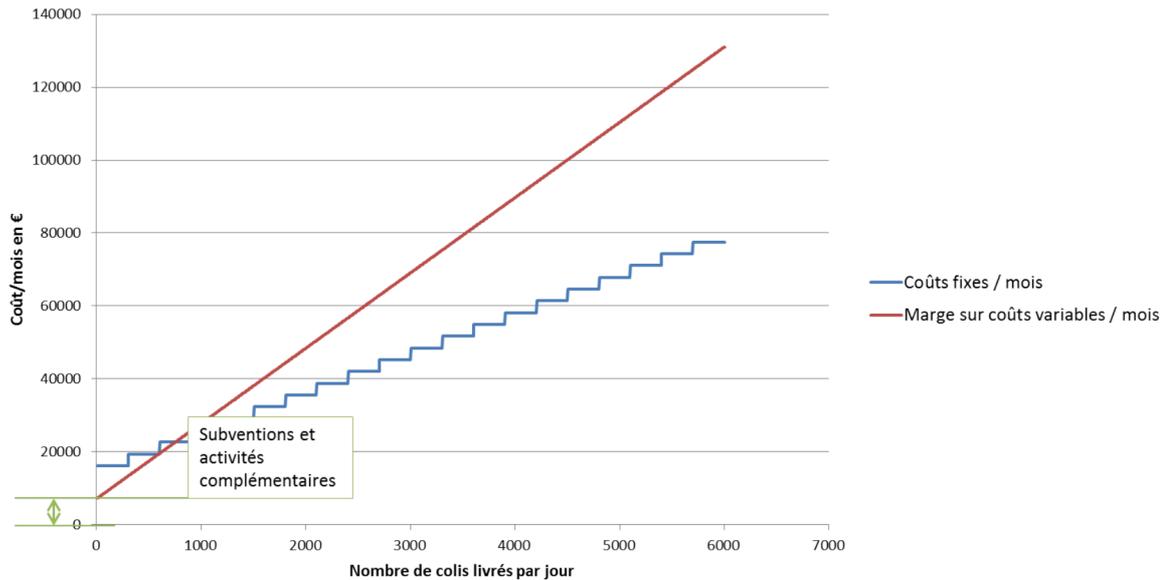


FIGURE 2.5 – Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec subventions et activités complémentaires

D'autre part, la pente de la droite représente également un levier permettant de rapprocher les points morts économiques. L'équation 2.8 montre que plusieurs paramètres sont à l'origine de ce coefficient de pente. De façon logique, plus le prix facturé par colis va être important plus la pente sera importante et la rentabilité atteinte rapidement (c'est-à-dire en livrant peu de colis). Inversement, lorsqu'il s'agit de paramètres représentant des postes de coûts alors plus ils seront élevés plus le point d'équilibre sera éloigné du point d'abscisse 0. Parmi ces paramètres on trouve, par exemple, le coût de l'énergie, qui montre l'impact de ce choix, et la distance parcourue, qui traduit le nécessaire compromis entre proximité avec le centre-ville (pour réduire ces coûts variables justement) et accessibilité (pour capter les clients ou représenter l'intérêt d'éviter de pénétrer dans la ville).

II.2.b Evolution des coûts fixes

Les coûts fixes sont essentiellement liés aux charges en personnel, véhicules, bâtiments et autres impôts et taxes. Le nombre de colis livrés quotidiennement va avoir un impact sur les ressources nécessaires pour répondre à cette demande. C'est la raison pour laquelle bien que qualifiés de coûts fixes, une partie de ces coûts est variable par palier (voir la figure 2.2).

En effet, il n'est pas possible de posséder ou louer des pourcentages de véhicules, de même nous faisons l'hypothèse que les conducteurs sont employés à temps plein. Ainsi, la capacité et l'autonomie de ce couple de ressources sont restreintes. A chaque fois que ces limites sont atteintes, un nouveau couple est nécessaire. Cela ajoute ainsi un coût aux coûts fixes qui sont

les mêmes jusqu'à l'ajout d'un nouveau couple. On voit ainsi se dessiner une courbe évolutive en escalier où chaque marche représente un couple supplémentaire pour livrer plus de colis.

Une autre part de ces coûts fixes est réellement fixe, dans le sens où elle ne dépend pas du niveau d'activité. C'est le cas par exemple des taxes, des charges pour le petit matériel ou encore des frais liés au bâtiment. Sur la représentation graphique, cela se caractérise par la hauteur plus importante de la toute première marche. En effet, celle-ci compte les coûts liés à un couple conducteur/véhicule ainsi que tous les frais fixes non évolutifs.

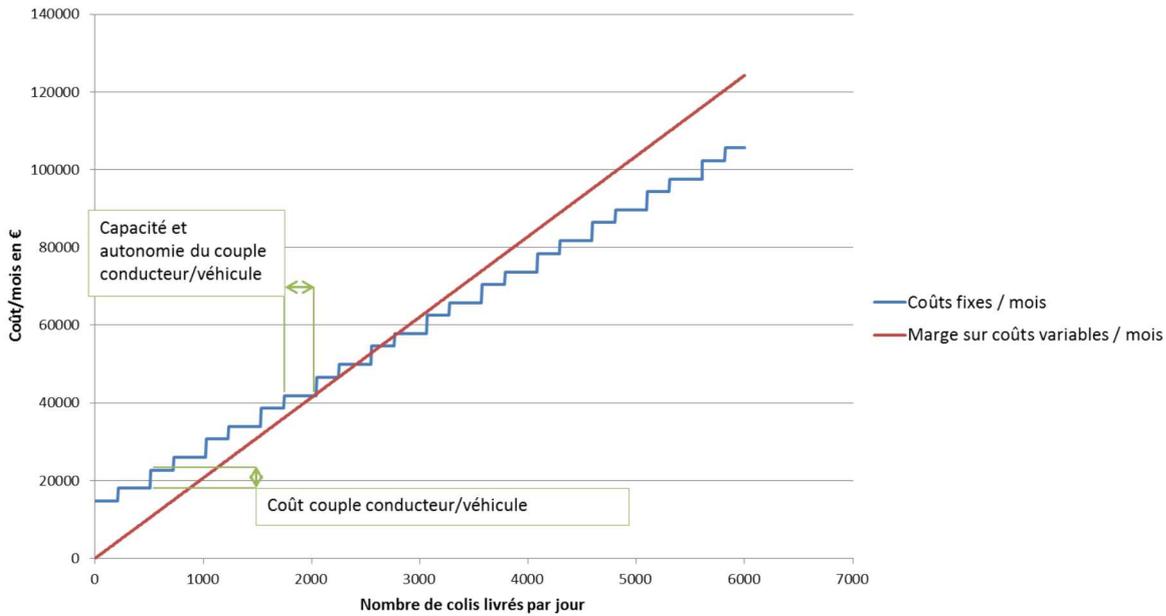


FIGURE 2.6 – Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec deux types de véhicules

On relève donc deux moyens pour faire varier la "pseudo-pente" de cette courbe : allonger la longueur des marches, c'est-à-dire livrer plus de colis à moyens constants ; ou réduire la hauteur des marches, c'est-à-dire, à nombre de colis fixé, utiliser des ressources moins coûteuses. Cela est mis en avant par la figure 2.6. Nous énonçons, dans les paragraphes suivants, les leviers opérationnels ayant ces effets.

- **Faire varier la hauteur des marches.**

La hauteur des marches dépend des coûts concernant les ressources à savoir les salaires et les coûts des véhicules. Ainsi, le premier levier d'action serait, bien sûr, de diminuer les salaires. Or, il ne s'agit pas de s'affranchir des législations en vigueur à des fins de rentabilité. Ce levier est donc très peu mobilisable et nous le considérerons même comme inexistant dans le reste de notre étude. Cela est, notamment, justifié par l'impossibilité de délocaliser ce service. Les activités du CDU, quelles qu'elles soient, restent des services de proximité (livraison, stockage, etc.) qui doivent être réalisées sur place. Néanmoins, on peut tout de même remarquer qu'à

périmètre d'étude semblable, la viabilité d'un CDU peut donc être très différente d'un pays à un autre.

Nous nous intéresserons plus au deuxième objectif qui concerne la diminution du prix (d'achat ou de location) des véhicules. Pour cela, plusieurs leviers sont possibles. Tout d'abord, on peut très naturellement passer des contrats avec des constructeurs pour réduire ce prix. Un autre moyen est de choisir une motorisation "économique", c'est-à-dire qui coûte moins chère à l'achat. En effet, que ce soit en fonction de la puissance du moteur ou du type d'énergie, le prix n'est pas le même et apparaît comme un levier de réduction des coûts. Ainsi, comme nous l'illustrons sur la figure 2.6, un véhicule avec moteur thermique coûtera moins cher qu'un véhicule équipé d'un moteur électrique (coût du couple conducteur/véhicule moins important) et permettra d'atteindre plus facilement la rentabilité. Etant donnée la part de plus en plus importante faite aux décisions environnementales, il semble important de mettre en évidence le réel choix tactique qu'elles représentent. Ce choix est d'autant plus déterminant qu'il correspond à un équilibre entre le gain sur la hauteur des marches et la perte, parfois, sur la longueur des marches comme nous allons le montrer dans le paragraphe suivant.

- Faire varier la longueur des marches.

La longueur des marches traduit les contraintes de capacité et d'autonomie du couple conducteur/véhicule. Par capacité, on entend le nombre de colis que l'on peut charger dans un véhicule. Par autonomie, on entend le nombre de colis qu'un couple conducteur/véhicule est capable de transporter au cours de la journée (capacité et autonomie du couple conducteur/véhicule sur la figure 2.6). Si l'une ou l'autre de ces limites est atteinte alors un couple de ressources supplémentaire est nécessaire.

La capacité du véhicule (en poids et en volume) varie selon le type de véhicules choisi. Il s'agit donc du fameux équilibre dont nous parlions plus haut : plus la capacité va être grande, plus on va pouvoir livrer de colis avec un même couple de ressources. En revanche, généralement plus la capacité d'un véhicule est importante plus il coûte cher et plus il devient contraignant en milieu urbain au regard de son encombrement et de sa maniabilité notamment. Il faut donc trouver le bon compromis.

De plus, cette capacité peut être limitée par l'autonomie (et vice versa). Cette autonomie est limitée par deux facteurs : l'autonomie en énergie du véhicule et l'autonomie en temps de travail du conducteur. En effet, chaque colis livré représente du temps et de l'énergie qui ne sont pas toujours suffisants pour exécuter la livraison. Ainsi, ces deux paramètres représentent les leviers d'actions relatifs à l'augmentation de l'autonomie. Là encore, le type de motorisation est un paramètre permettant de mobiliser ce levier.

Il est également possible de "jouer" sur ces paramètres pour ajuster le niveau d'activité. Dans le cas où le CDU se trouverait dans une zone d'instabilité, c'est-à-dire qu'il ne peut ni

prendre plus de colis ni en prendre moins sans entrainer un déficit, alors le temps de travail des conducteurs peut être un levier intéressant à mobiliser pour éviter d'être dans cette zone. Ce raisonnement est également valable pour la capacité. On peut choisir de charger un peu moins les véhicules pour stabiliser le niveau d'activité dans une zone bénéficiaire.

Nous avons représenté l'impact de ces différents leviers sur la figure 2.6. Sur cette illustration, nous avons simulé l'utilisation de deux types de véhicules ayant des capacités, autonomies et coûts différents. On peut voir cela par l'irrégularité des marches (ici utilisation alternative des deux types de véhicules). Ce choix reflète la réalité de nombreuses villes dans lesquelles, par exemple, certaines zones ont des restrictions sur la motorisation ou encore le poids qui nécessitent l'utilisation de véhicules adaptés. Ainsi, les transporteurs utilisent deux types de véhicules selon la zone à livrer.

Afin de mettre en évidence l'intégralité des leviers présentés dans cette section, nous les avons regroupés sur la figure 2.7. Il est à noter que ces leviers tactiques sont traduits en valeur de paramètres. Ainsi, les variables du modèle (le nombre de colis livrés par jour, le nombre de véhicules et de conducteurs) sont la conséquence du choix de ces paramètres et non l'inverse. Par exemple, on ne peut pas choisir d'avoir besoin de trois véhicules pour livrer 300 colis, en revanche on peut choisir d'utiliser des camions plus grands pour n'en utiliser que deux pour livrer ce même nombre.

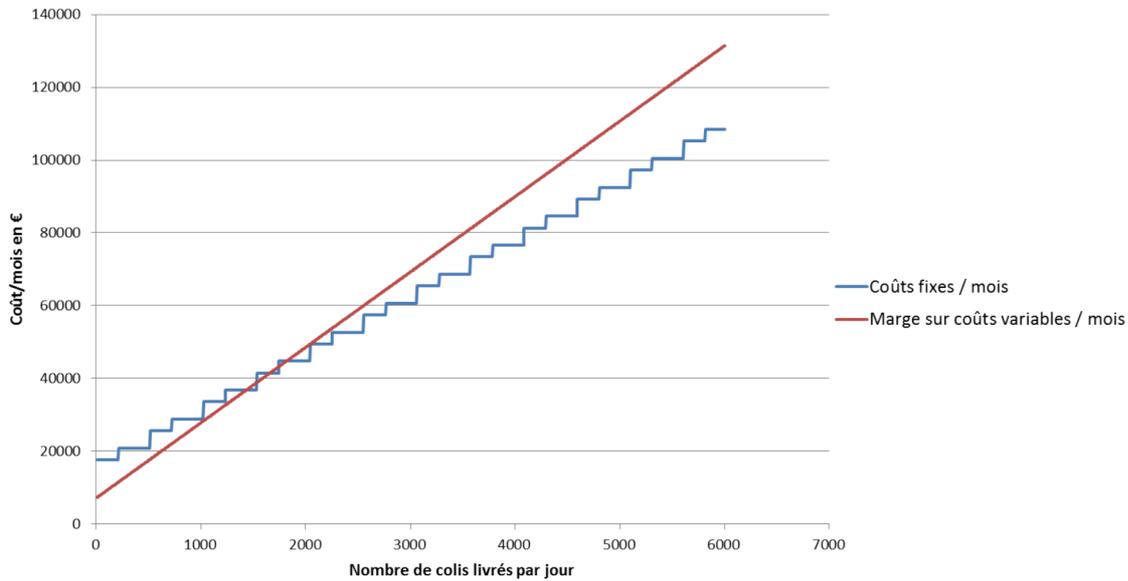


FIGURE 2.7 – Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle avec deux types de véhicules, subventions et activités complémentaires

III Prise en compte des distances entre le CDU et les remet- tants

III.1 Limite du modèle proposé

Le modèle que nous proposons prend en compte un grand nombre de paramètres, ce qui retranscrit bien la complexité de l'objet d'étude. Néanmoins, nous relevons, à ce stade de nos travaux, une limite dans notre modélisation. En effet, nous avons considéré un prix unique de facturation de la livraison des colis. Cette hypothèse engendre une évolution du chiffre d'affaires et, par conséquent, de la marge sur coûts variables linéaire. Ce parti pris peut être remis en cause pour deux raisons.

La première raison concerne l'écart avec le fonctionnement réel du système. Pour expliquer cela, nous nous concentrons sur ce qu'il se passe en amont de la distribution urbaine, c'est-à-dire sur le processus de collecte des colis à destination du centre-ville. Nous reprenons appui sur la ville elliptique que nous avons définie dans le chapitre 1 et qui est constituée d'un CDU (au sud), de plateformes de transporteurs locaux (losanges colorés) et de points de livraison (camembert multicolores) (voir figure 2.8). Les colis à destination du centre-ville arrivent sur les plateformes des transporteurs, via leurs réseaux nationaux et/ou internationaux, et sont acheminés jusqu'au CDU. Pour ce faire, deux solutions sont envisageables, soit les transporteurs organisent la dépose des colis vers le CDU (souvent comme point de livraison d'une tournée plus importante), soit le CDU organise la collecte des marchandises auprès des plateformes.

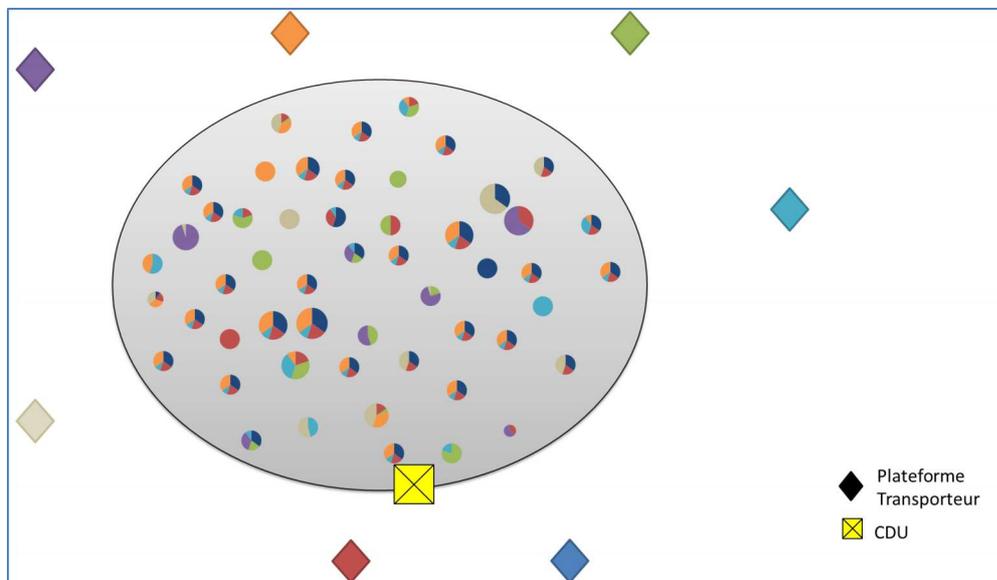


FIGURE 2.8 – Exemple d'une ville avec un CDU et des transporteurs locaux

Dans les deux cas, un coût est nécessaire pour compenser l'effort fourni. En effet, si l'on se place dans le cas où le CDU organise des tournées de collecte, alors plus une plateforme est loin

plus cela lui coûte de l'argent pour aller chercher la marchandise. Il va donc répercuter ce coût supplémentaire sur le prix facturé par colis. Inversement, si les transporteurs organisent eux-mêmes les remises des colis au CDU et que le CDU veut obtenir le marché alors il doit facturer à un prix qui compense les frais engendrés. Schématiquement et en reprenant l'exemple de la ville elliptique entourée de transporteurs, on peut dire que les transporteurs dans la zone bleue, sur la figure 2.9, sont prêts à payer le prix du marché pour laisser leur fret au CDU. En revanche, plus les transporteurs s'éloignent de cette zone, moins ils accepteront de payer cher le service de livraison urbaine. Le prix facturé sera donc dégressif selon l'éloignement géographique. Finalement, on observe bien une fluctuation du prix facturé en fonction du nombre de colis livrés et non un prix unique.

Le deuxième point qui remet en cause la modélisation économique actuelle du système est le profit croissant à partir du point d'équilibre économique (voir la figure 2.7). En effet, l'évolution croissante de la marge sur coûts variables et des coûts fixes ainsi qu'une limite infinie positive pour un nombre de colis tendant vers l'infini engendrent un profit également infini pour un nombre de colis très grand. C'est-à-dire qu'à partir du moment où l'équilibre économique est atteint (et que l'on a quitté la zone d'instabilité) alors le profit ne peut faire qu'augmenter au fur et à mesure que l'activité augmente. Cela serait, bien sûr, idéal mais n'est, en fait, pas réaliste. Pour l'expliquer, nous nous appuyons sur une théorie économique appelée "loi des rendements (finalement) décroissants"¹, que nous présentons dans la section suivante. Nous exposons ensuite la façon dont nous avons, à partir de cette théorie et de l'observation du fonctionnement réel, fait évoluer notre modèle économique.

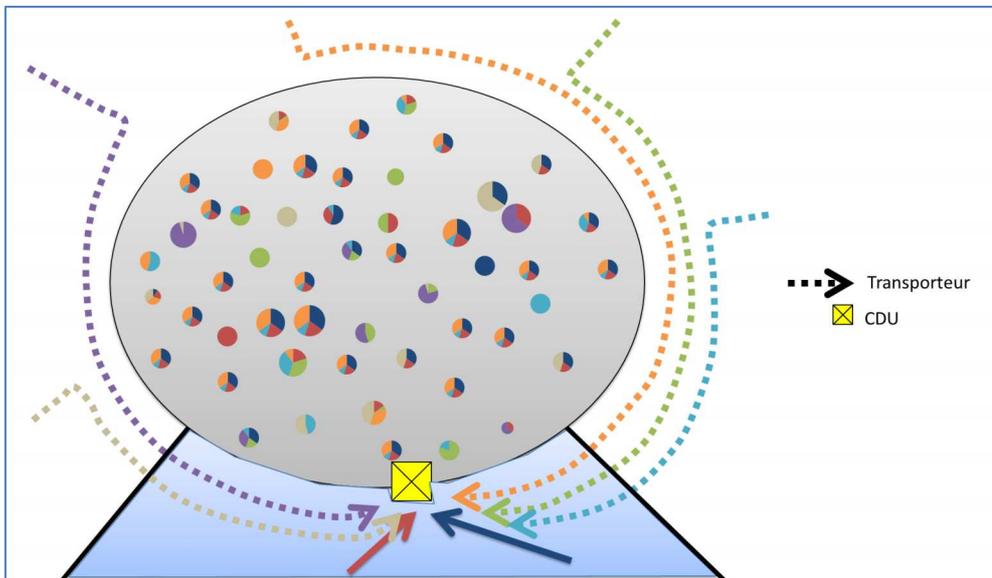


FIGURE 2.9 – Exemple d'une ville avec un CDU et des transporteurs locaux remettant leurs marchandises

1. Pour alléger le texte, nous utiliserons, par la suite, la notion de "loi des rendements décroissants".

III.2 Proposition

III.2.a La loi des rendements décroissants

La loi des rendements décroissants est une théorie économique selon laquelle, à moyens et paramètres constants, le rendement marginal d'un moyen de production finit forcément par diminuer à partir d'un certain nombre d'unités produites. Il s'agit, en fait, de s'intéresser au coût marginal c'est-à-dire à l'effort fourni pour produire une unité supplémentaire. S'il l'on a évoqué, jusqu'ici, la notion de production, la loi n'en est pas moins vraie dans un contexte de transport. C'est ce que nous allons montrer à présent. Pour illustrer notre propos, nous utiliserons les courbes représentées sur la figure 2.10. Ces courbes sont des exemples et n'ont pas pour objet de représenter une réalité donnée mais plutôt un comportement typique.

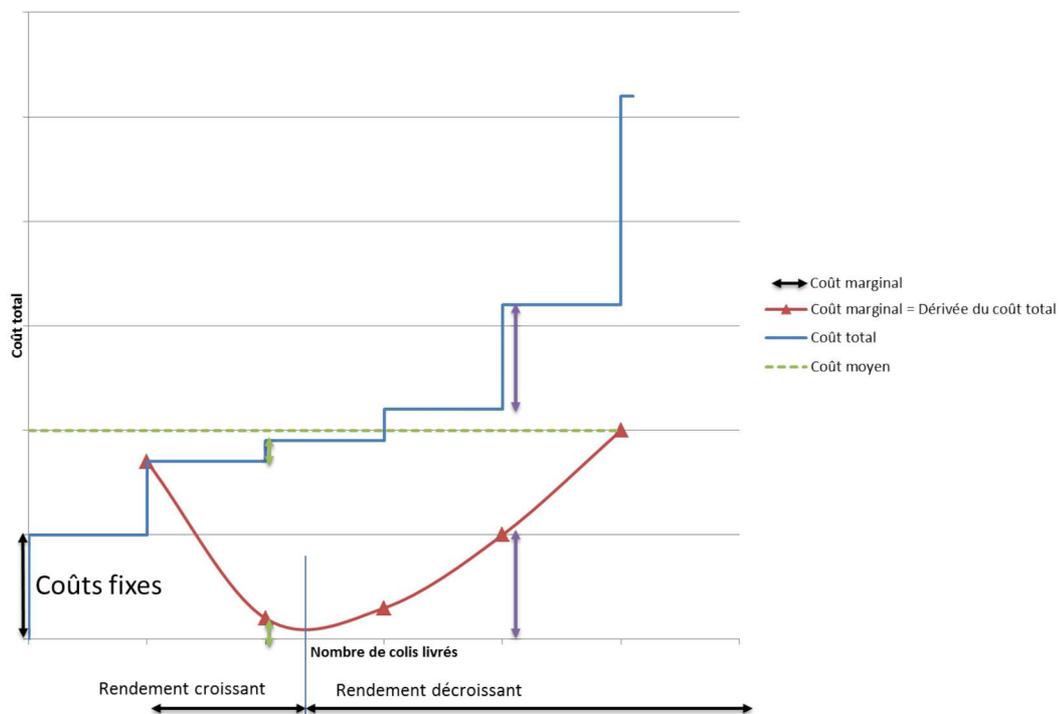


FIGURE 2.10 – Illustration du phénomène de rendements, finalement, décroissants

Sur ce graphique, nous avons représenté en ordonnée le nombre de colis livrés et en abscisse le coût total (les coûts fixes et les coûts variables) pour effectuer ces livraisons. On trouve les évolutions du coût total et du coût marginal. L'allure de la courbe du coût total ressemble à celles exposées plus haut dans ce chapitre avec une progression par palier. Pour commencer, la première marche correspond aux coûts fixes (bâtiment, matériels, etc.) dont l'entreprise dispose quelle que soit son activité. Ensuite, on observe une première marche qui modélise les coûts engendrés pour livrer les n premiers colis. Les deux marches suivantes sont moins hautes et signifient que les moyens mis en œuvre pour livrer les m colis suivants sont moins

importants. Cela pourrait, par exemple, être l'augmentation de la capacité de traitement du logiciel de gestion ou bien des heures supplémentaires pour le gérant. Enfin, on observe une marche beaucoup plus grande qui traduit la mise en place de nouveaux moyens comme l'ajout d'un véhicule. De plus, la hauteur des marches est irrégulière car les colis sont de plus en plus éloignés du CDU et cela coûte de plus en plus cher pour les récupérer.

La hauteur des marches représente le coût marginal, c'est-à-dire la différence entre les coûts engendrés pour livrer l'unité précédente et l'unité observée. Il s'agit, en fait, de la dérivée du coût total. Ainsi, en reportant cet écart sur le même graphique, on obtient la courbe du coût marginal. Nous avons lissé cette courbe pour mettre en évidence les fluctuations de pente et donc la croissance puis la décroissance du rendement. Le premier point correspond aux coûts fixes et à la hauteur de la première marche alors que le point suivant ne représente que la hauteur de la marche. Si cette courbe était utilisée pour prendre une décision liée à la montée en puissance progressive de l'activité alors l'étude du coût marginal s'appuierait sur le fait que "ce qui est passé est passé et ne doit pas avoir d'influence sur la décision de ce qui actuellement est l'opération la plus rentable à entreprendre" (LIPSEY et STEINER 1975). En d'autres termes, l'effort fourni pour atteindre la première marche (ici les coûts fixes et variables), ne doit pas être pris en compte pour quantifier l'effort à fournir pour passer la deuxième, troisième et même la nième marche si l'entreprise est actuellement sur cette première marche.

Ainsi, on observe, d'abord, une décroissance du coût marginal (le rendement est alors croissant), puis celui-là croît (le rendement est alors décroissant). La zone basse de la courbe correspond à la zone la plus profitable du système. Chaque écart avec cette zone entraîne une diminution du profit par unité produite (ou livrée dans le cas décrit). Néanmoins, cet écart peut être amorti par la quantité (on peut gagner moins par unité mais plus dans la globalité). C'est pourquoi les entreprises cherchent à se positionner au point de convergence entre le coût marginal et le coût moyen tout en jouant sur leurs coûts afin de le rapprocher au maximum du point de coût marginal minimum.

La loi des rendements, finalement, décroissants explique l'existence de multiples enseignes sur un même marché mais également la nécessité pour une entreprise de diversifier son activité. En effet, cela montre qu'à partir d'un certain point, les coûts engendrés par l'activité sont plus forts que les revenus qu'elle génère ou, en tout cas, que son profit est borné. Dans le cas du CDU, cela met en évidence que l'éloignement de certaines zones géographiques ne permettra pas au CDU de capter l'intégralité du marché d'une ville à lui seul. Dans la section suivante, nous présentons la façon dont nous avons pris en compte cette loi pour, justement, faire évoluer le modèle économique du CDU que nous proposons.

III.2.b Intégration dans le modèle

Deux approches sont possibles pour intégrer la loi des rendements décroissants dans notre modèle économique. La première consiste à se caler purement sur la théorie et à intégrer cet effet d'éloignement géographique dans les coûts fixes. Il s'agit alors d'ajouter au modèle la notion d'organisation de la ramasse du fret. On doit prévoir des ressources chargées d'aller collecter la marchandise auprès des différentes plateformes, puis de rapporter cette marchandise jusqu'au CDU pour qu'elle soit consolidée. Les marches des coûts fixes ne seront alors plus régulières suivant le type de véhicules puisque l'autonomie kilométrique diminuera à mesure que les plateformes des transporteurs s'éloigneront du CDU.

La deuxième approche envisagée est de puiser sur le fonctionnement réel pour faire évoluer le modèle. Dans ce cas, on peut prendre en compte la loi des rendements décroissants dans la marge sur coûts variables via le système de facturation, comme nous l'avons déjà abordé dans la section III.1, ci-dessus. On doit alors considérer que les transporteurs, en tant que remettants, vont apporter la marchandise jusqu'au CDU, qui en fonction de l'éloignement géographique fera varier sa politique tarifaire.

Afin d'être cohérent avec l'approche centrée sur le cycle interne de livraison, mobilisée jusqu'à présent, et avec la pratique actuelle des CDU connus, nous choisissons d'adopter le second positionnement. En effet, la première solution revient finalement à l'étude d'une entreprise de transport usuelle or les CDU diffèrent souvent de celle-ci tant par leur organisation que par leur "vocation", comme nous avons pu le montrer dans le chapitre précédent.

Pour cela, nous travaillons, dans un premier temps, sur la prise en compte d'une tarification dépendante de l'éloignement géographique. Nous faisons l'hypothèse que les premiers clients (qui sont ici les transporteurs) intéressés par la démarche du CDU vont être ceux localisés le plus proche de celui-ci. Puis, au fur et à mesure que le volume de colis augmente, les clients s'éloignent de plus en plus et par conséquent le prix facturé diminue.

Nous faisons le choix de modéliser l'évolution de ce prix par une suite de terme général p_n (n est un entier naturel). p_n correspond au prix facturé du colis de rang n (le rang traduit l'éloignement géographique de la plateforme de provenance du colis). Les considérations suivantes sont faites : plus le rang du colis est élevé, plus son prix facturé est faible. De plus, la diminution du prix est constante entre les colis de rang n et $n - 1$. Nous introduisons alors un paramètre λ inférieur à 1 pour traduire ce phénomène. L'expression du prix du colis de rang n en fonction du prix du colis de rang 1 est établie par les équations 2.9 et 2.10 suivantes.

$$p_2 = \lambda p_1, \text{ avec } \lambda < 1 \quad (2.9)$$

$$p_n = \lambda^{n-1} p_1, \text{ avec } \lambda < 1 \quad (2.10)$$

La représentation graphique de l'évolution du prix facturé en fonction du rang, pour des valeurs arbitraires de p_1 et λ , est présentée dans la figure 2.11. Le calibrage de cette courbe est important puisqu'il conditionne le comportement du système à une hausse du niveau d'activité. La courbe que nous proposons ci-dessous n'est qu'une illustration, à titre d'exemple, qui est cependant relativement proche du cas de la ville de Saint-Etienne.

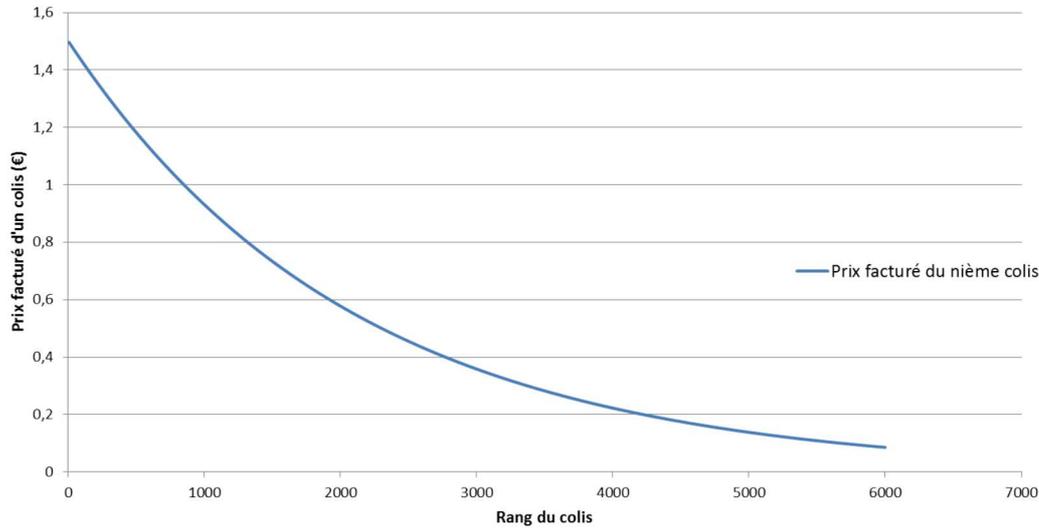


FIGURE 2.11 – Evolution du prix de facturation d'un colis en fonction de son rang

Le prix facturé peut maintenant être intégré dans le chiffre d'affaires (que nous noterons R^m dans les équations suivantes). Ce dernier correspond à la somme de tous les termes de la suite p_n (cf équation 2.11).

$$\begin{aligned}
 R^m &= \sum_{i=1}^n p_i \\
 &= \sum_{i=1}^n p_1 \lambda^{i-1}, \text{ avec } \lambda < 1
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Il s'agit, en fait, de la somme des termes consécutifs d'une suite géométrique de raison λ et de premier terme p_1 . On peut alors exprimer facilement le chiffre d'affaires en fonction de ces mêmes paramètres, comme indiqué dans l'équation 2.12.

$$R^m = p_1 \left(\frac{1 - \lambda^n}{1 - \lambda} \right), \text{ avec } \lambda < 1
 \tag{2.12}$$

Pour finir, nous exprimons le paramètre λ en fonction du premier et du $n^{\text{ième}}$ terme de la suite, c'est-à-dire du prix facturé du premier colis et du $n^{\text{ième}}$ colis. On peut alors dérouler le calcul suivant :

$$\begin{aligned}
 p_n = \lambda^{n-1} p_1 &\iff \lambda^{n-1} = \frac{p_n}{p_1}, \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* \\
 &\iff \ln \lambda^{n-1} = \ln \left(\frac{p_n}{p_1} \right), \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* \\
 &\iff (n-1) \ln \lambda = \ln \left(\frac{p_n}{p_1} \right), \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* - \{1\} \quad (2.13) \\
 &\iff \ln \lambda = \frac{1}{n-1} \ln \left(\frac{p_n}{p_1} \right), \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* - \{1\} \\
 &\iff \lambda = e^{\frac{1}{n-1} \ln \left(\frac{p_n}{p_1} \right)}, \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* - \{1\}
 \end{aligned}$$

Finalement, l'expression de λ peut encore être simplifiée si l'on choisit d'utiliser le rang du colis coûtant 1€. En effet, ce prix correspond à une zone du marché connue et est donc un bon repère pour un décideur. On peut donc exprimer l'évolution du prix en fixant deux valeurs maîtrisées par un gérant de CDU à savoir le prix de vente que l'on souhaite afficher au maximum (1^{er} colis) et le colis à 1€ ($n^{\text{ième}}$ colis). En reportant cette équation dans celle du chiffre d'affaires, on obtient, pour des valeurs arbitraires de p_1 et de n , les courbes présentées sur les figures 2.12 et 2.13. Nous avons, bien entendu, intégré dans l'expression du chiffre d'affaires la part de revenus liée aux subventions et aux activités complémentaires, comme cela était le cas dans le modèle initial.

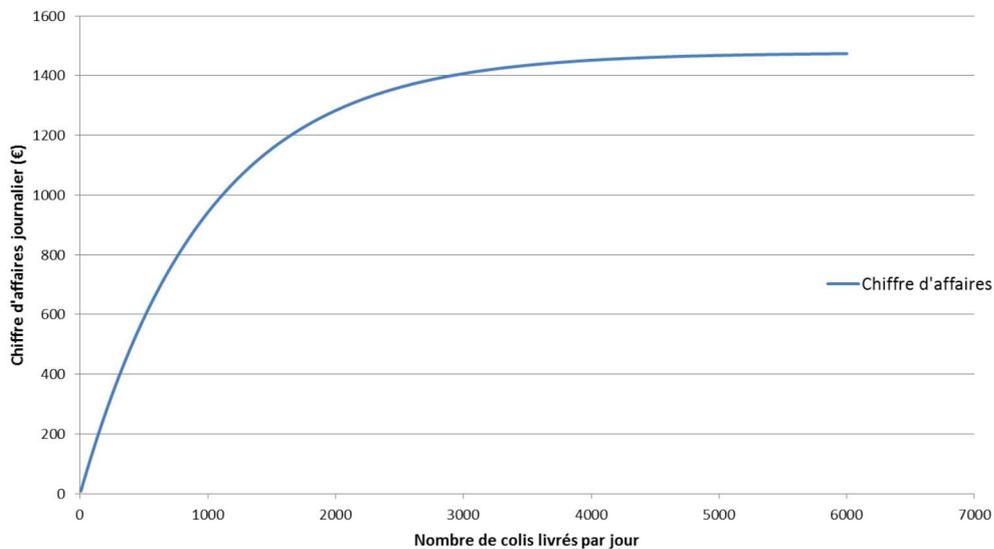


FIGURE 2.12 – Evolution du chiffre d'affaires journalier en fonction du nombre de colis livrés par jour

L'amélioration apportée à l'expression de la marge sur coûts variables permet de mieux représenter, à notre sens, le comportement économique du système décrit. Notre objectif est toujours d'étudier la rentabilité d'une organisation de type CDU. Ainsi et dans le but de

CHAPITRE 2. UN MODÈLE ÉCONOMIQUE POUR ÉVALUER LA RENTABILITÉ D'UN CDU

compléter notre démarche, nous proposons de mettre en avant des leviers d'actions permettant d'atteindre la zone de viabilité. Pour cela, nous avons choisi de nous appuyer sur un modèle descriptif opérationnel qui puise sa source sur la notion de Taux de Rendement Global et que nous présentons dans le chapitre suivant.

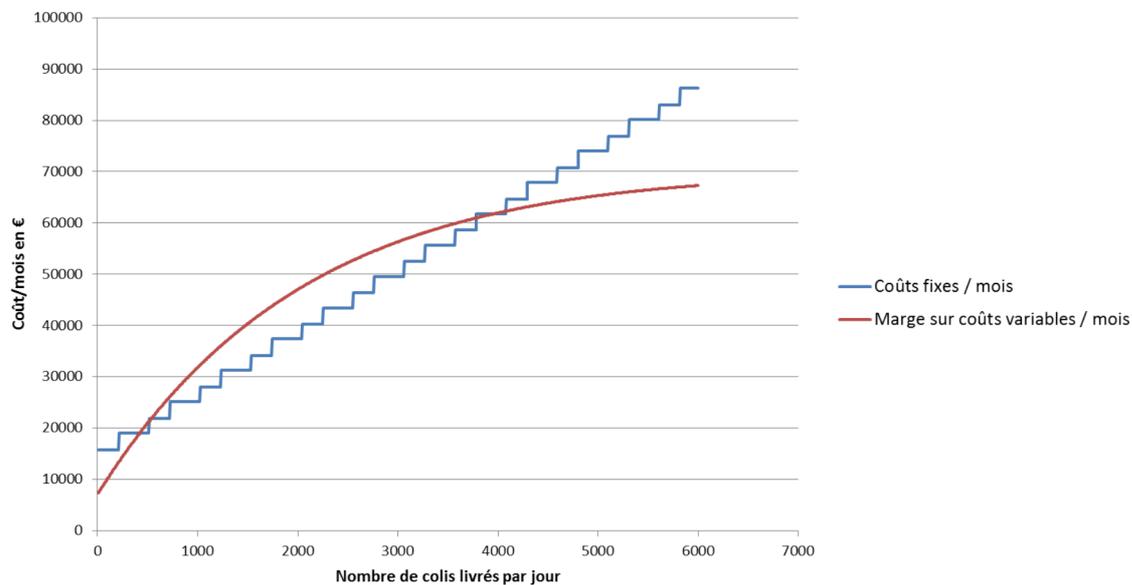


FIGURE 2.13 – Evolution de la marge sur coûts variables mensuelle et des coûts fixes

Chapitre 3

Un indicateur pour quantifier la performance : le Taux de Rendement Global

I Description physique du système

Après avoir introduit la caractérisation de la rentabilité, il est naturel de se poser la question des leviers disponibles pour l'améliorer. Nous distinguerons trois notions : l'objectif, le levier et le paramètre de réglage. L'objectif est ce que l'on cherche à obtenir (ici cela pourrait être de dépasser les points d'équilibre). Nous qualifions de leviers, les moyens mis en œuvre pour atteindre l'objectif. Ils peuvent être d'ordre technologique (motorisation, RFID, etc...) ou plutôt organisationnel (par exemple agrandir la zone de chalandise ou ajouter un quai). C'est ce type de leviers qui nous intéresse dans cette étude et que nous allons mettre en lumière en nous appuyant sur les définitions liées au Taux de Rendement Global. Enfin, les paramètres de réglage correspondent aux variables que l'on introduit dans le modèle pour caractériser l'emploi d'un levier (par exemple le prix facturé du 1^{er} colis est 1,80€).

I.1 La notion de Taux de Rendement Global

En gestion de production, le Taux de Rendement Synthétique (TRS) est un indicateur de performance connu qui est utilisé pour caractériser l'état d'une chaîne de production (NAKAJIMA 1988). En se basant sur l'étude des temps, il quantifie l'efficacité d'un moyen de production. Pour cela, le temps total disponible pour la production est découpé en différentes phases (voir la figure 3.1).

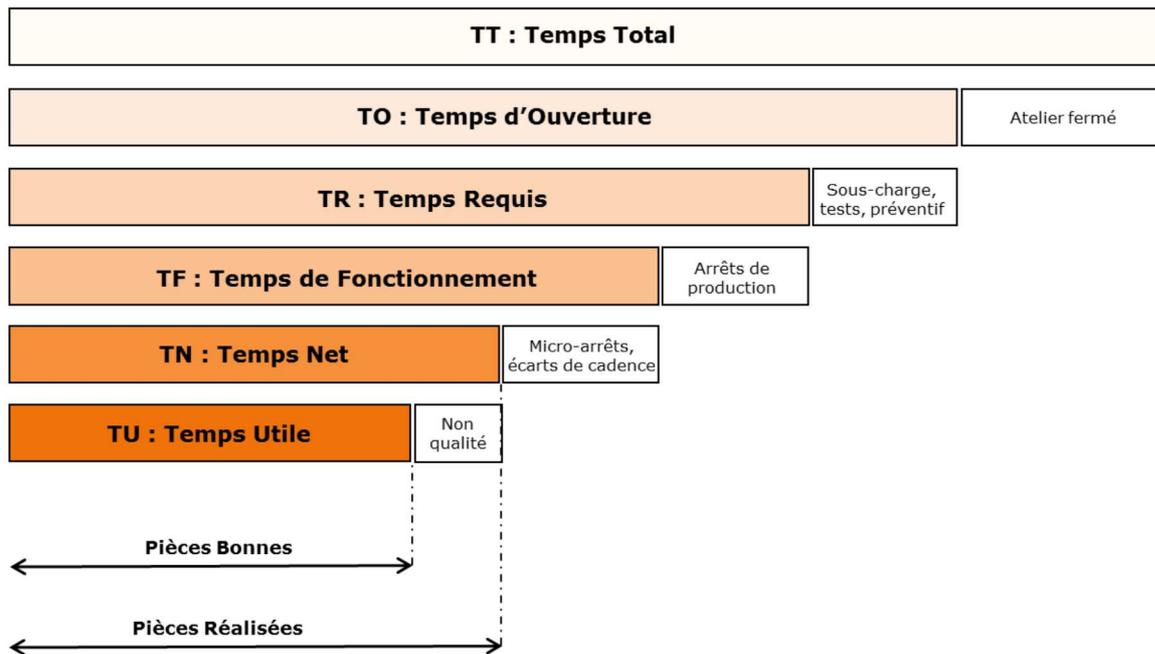


FIGURE 3.1 – Description de la décomposition des temps

Le TRS correspond au rapport entre le temps nécessaire pour produire des pièces bonnes (Temps Utile) et le Temps Requis, c'est-à-dire le temps réellement mis pour produire ces bonnes pièces (équation 3.1).

$$TRS = \frac{TU}{TR} \quad (3.1)$$

Il permet de quantifier le pourcentage de temps gaspillé au cours de la production. Cela peut être dû à de la non-qualité, des micro-arrêts ou des écarts de cadence, par exemple. La limite du TRS est qu'il ne caractérise pas la performance du moyen de production par rapport au processus global mais uniquement par rapport au moyen de production lui-même. C'est-à-dire qu'il compare la performance actuelle d'une ressource par rapport à son propre potentiel et non par rapport à celui de l'atelier dans son ensemble. Ainsi, si le moyen de production étudié n'est pas une ressource limitante du système global, alors peu importe qu'il travaille à 100% de ses capacités ou non. C'est la raison pour laquelle, au début des années 2000, on a relevé la nécessité d'ajouter un étage de description supplémentaire du processus et la notion de Taux de Rendement Global (TRG) est apparue (HUANG et al. 2002 ; LANZA et al. 2013). Il est défini par le produit du TRS avec le rapport entre le Temps Requis et le Temps d'Ouverture soit :

$$\begin{aligned} TRG &= TRS \times \frac{TR}{TO} \\ &= \frac{TU}{TO} \end{aligned} \quad (3.2)$$

L'une des forces de ces taux réside aussi sur leur "découpage" en différents ratios, via la définition du TRS. Chaque ratio caractérise l'état d'un niveau de fonctionnement du système de production et met en évidence une source de gaspillage dans la chaîne. Le rapport entre un temps et celui du niveau au-dessus définit un ratio. Le TRS peut alors s'exprimer comme le produit des trois ratios de plus bas niveau dans le diagramme 3.1 qui sont le Taux de Qualité (TQ), le Taux de Performance (TP) et la Disponibilité Opérationnelle (DO) et que nous présenterons dans les sections suivantes. La nouvelle expression du TRG est la suivante :

$$TRG = TQ \times TP \times DO \times \frac{TR}{TO} \quad (3.3)$$

Chaque ratio cible un périmètre d'action. Par exemple, un Taux de Qualité faible signifie que de nombreux rebuts sont produits et qu'il faut donc mettre en place des actions correctives. Nous proposons de transcrire ce modèle sur un processus de livraison. Cette analogie nous permettra, par la suite, d'identifier précisément les actions physiques à entreprendre pour améliorer la productivité du CDU et donc sa rentabilité. Nous présentons dans la section suivante l'application du principe du TRG au cycle de livraison du CDU et la description des indicateurs de performance qui y sont associés.

1.2 Le TRG appliqué à un système de livraison

1.2.a Parallèle TRG - CDU

La première phase nécessaire pour faire l'analogie entre un système de production et un système de livraison est de définir le processus pour lequel nous calculerons le TRG et ses déclinaisons. En effet, si l'on veut obtenir un parallèle entre les deux situations et utiliser correctement les indicateurs, il faut, au préalable, définir les équivalents des étapes de production et des ressources.

Notre cadre d'étude concerne un CDU, qui est considéré comme une entreprise. A l'intérieur de ce CDU plusieurs processus ont lieu, essentiellement les tâches administratives (réalisées par le gérant ou le logisticien) et le cycle de livraison (réalisé par les livreurs). Ce dernier représente l'activité de création de valeur de l'entreprise. C'est pourquoi nous choisissons de le définir comme processus principal de l'organisation. Ainsi, le processus de livraison sera l'équivalent de la ligne de production.

Ensuite, il faut définir les ressources liées à ce processus. Deux types de ressources sont impliqués dans le cycle de livraison : les conducteurs-livreurs et les véhicules. En effet, bien que présent sur la plateforme, le logisticien travaille en parallèle de ce cycle ou vient ponctuellement aider au chargement sans pour autant être indispensable à cette étape. En revanche, dans le modèle de tournées de livraisons étudié ici, la distribution des commandes ne peut avoir

lieu qu'avec, au moins, un véhicule et un conducteur. De même que le chargement ne peut se faire sans le véhicule, par exemple. C'est la raison pour laquelle nous nous focaliserons dans cette étude sur le processus de livraison dont les ressources sont les conducteurs-livreurs et les véhicules. Nous observerons les opérations effectuées par les conducteurs-livreurs du chargement de la marchandise dans le véhicule au retour au CDU après la tournée. Nous avons considéré que ce processus est un cycle qui est répété plusieurs fois au cours de la journée. Une première description des différentes phases du cycle de livraison est présentée dans la figure 3.2.

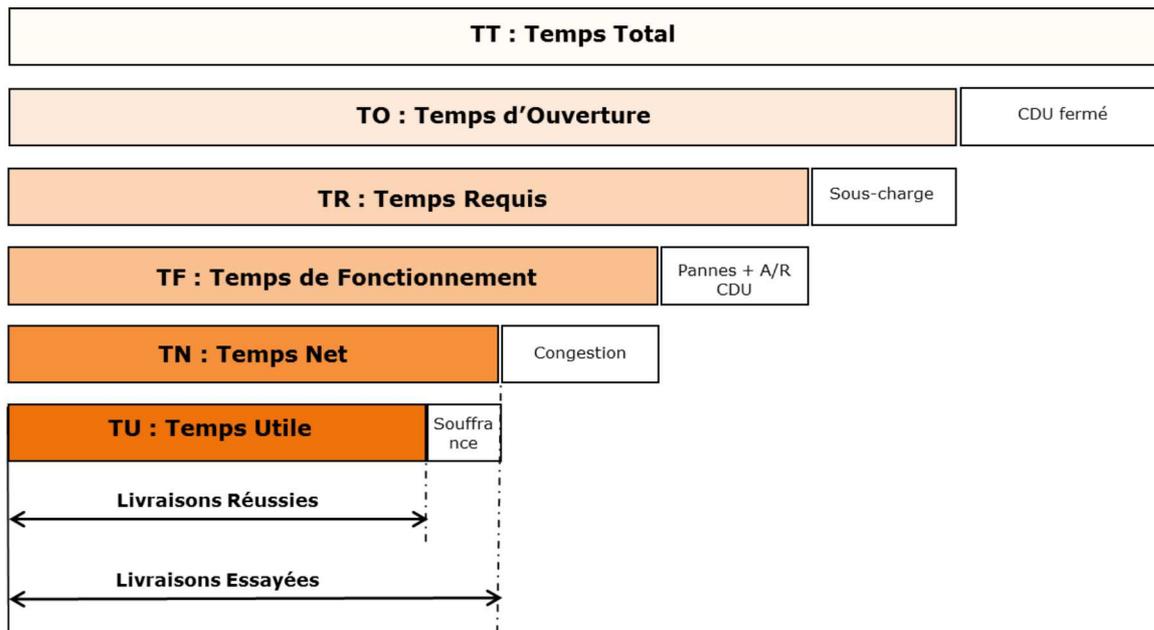


FIGURE 3.2 – Application de la décomposition à un cycle de livraison

Pour commencer, nous avons assimilé le temps correspondant à la fermeture de l'atelier au temps de fermeture du CDU. Ensuite, tout comme une chaîne de production, le CDU peut avoir des périodes d'activité plus faible qui entraînent des temps de sous-charge, c'est-à-dire que les conducteurs sont présents mais n'ont pas assez de travail. D'autre part, le temps d'aller-retour au CDU ainsi que le temps de pannes sont équivalents aux arrêts de production d'une ligne de production.

Ce choix s'explique par la décision stratégique que représente le positionnement géographique du CDU. En effet, nous avons défini le temps d'aller-retour au CDU comme la somme du temps entre le CDU et le premier point de livraison et du temps entre le dernier point et le CDU. Ce temps peut être amélioré ou dégradé, voire évité, par sa localisation. Nous pouvons illustrer cela par un exemple simple et exagéré : un CDU placé très loin de sa zone de chalandise nécessite un temps très long pour effectuer l'ensemble des livraisons (Temps Requis important) pourtant le temps de tournée en lui-même (c'est-à-dire entre les destinataires) est assez court. Dans

cet exemple, on comprend facilement que le système physique en place n'est pas efficace et pourrait être amélioré en plaçant le CDU plus proche de la ville à livrer. Ce temps d'aller-retour peut donc être considéré comme un temps évitable et contre lequel on peut mettre en place des actions (changer la localisation du CDU ou choisir des destinataires plus près...). La réduction de ce temps représente une des décisions les plus difficiles et stratégiques dans un projet de CDU. En effet, il faut trouver un compromis entre l'accessibilité du lieu par les transporteurs (que l'on appelle les remettants) et la proximité avec le destinataire final afin d'améliorer la performance physique du système. Si l'on reprend la comparaison avec un système de production, ce temps se comporte comme un temps de réglage, qui est inclus dans les temps d'arrêts de production. Il s'agit donc bien d'un temps équivalent aux arrêts de production.

Les temps de micro-arrêts et d'écarts de cadence trouvent leur équivalent dans le cycle de livraison au travers du temps perdu dans la congestion. Ce temps peut être prévenu par des actions de stabilisation du processus. Dans le cas de la livraison, les décideurs publics peuvent prendre des mesures pour décongestionner la ville (plage horaire pour les livraisons, restrictions des accès, etc.) et ainsi rendre le cycle plus stable et efficace.

Ensuite, le Temps Net est composé du temps de non-qualité et du Temps Utile. Le temps passé pour livrer des colis en souffrance (c'est-à-dire qui n'ont pas pu être remis au destinataire) équivaut au temps de non-qualité. Comme pour une ligne de production, lorsqu'un destinataire n'est pas présent sur le lieu de la livraison, du temps est perdu dans le processus sans aboutir à une livraison : il s'agit d'une action de non-qualité nécessitant une remise dans le circuit du colis. L'ensemble des analogies faites entre un système de production et un système de livraison est récapitulé dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Système de production	Système de livraison
Atelier fermé	CDU fermé
Sous-charge, tests, préventif	Sous-charge
Arrêts de production	Pannes, allers-retours au CDU
Micro-arrêts, écarts de cadence	Congestion
Non qualité	Livraisons en souffrance

TABLE 3.1 – Analogie entre le cycle de production et le cycle de livraison

1.2.b Particularité du système de livraison

Le Temps Utile peut à son tour être décomposé en différentes phases. Cela correspond en fait à la gamme de fabrication d'un produit. Dans le cas de la livraison, il s'agit des étapes du processus de livraison. La particularité de ce système est que l'on distingue deux types de

Temps Utile : le Temps Utile roulé, c'est-à-dire pendant lequel le véhicule est en mouvement, et le Temps Utile "autre" pendant lequel seul le conducteur est mobilisé tout en nécessitant la présence du véhicule (chargement du véhicule, contact destinataire, etc.). Ainsi, le Temps Utile peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} TU &= TU^r + TU^{nr} \\ &= \alpha TU + \beta TU, \text{ avec } \alpha + \beta = 1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

où

TU^r : Temps Utile roulé

TU^{nr} : Temps Utile non roulé (autre)

Cette description précise du processus de livraison permet de mettre en avant d'autres leviers opérationnels vraiment ancrés sur la réalité terrain du contexte urbain. En effet, pour éclaircir ce point, on peut utiliser l'image d'une chaîne de production. On peut considérer deux lignes de production d'un produit A ayant des gammes identiques. Selon les caractéristiques intrinsèques de chaque ressource utilisée au cours de la production, les performances de chaque ligne pourront être différentes. C'est la même chose dans un cycle de livraison sauf que les caractéristiques intrinsèques d'une ressource ne sont pas liées (ou du moins pas totalement) à la ressource mais au contexte dans lequel évolue la ressource, ici la ville. Pour une même séquence de livraison, les performances dans une ville A et dans une ville B ne seront probablement pas les mêmes : certaines villes possèdent de nombreuses places de stationnement qui sont facilement accessibles, dans d'autres ce n'est pas le cas. C'est la raison pour laquelle, nous considérons dans le Temps Utile des phases liées au stationnement et à la recherche de l'adresse. Il est évident que les technologies actuelles (GPS par exemple) et à venir (aires de livraison intelligentes) participent à la diminution de ces temps. Néanmoins, ils restent nécessaire dans le processus de livraison à savoir : en l'état actuel effectuer une manœuvre pour se garer consomme du temps (même sur une aire de livraison ou sur un parking); de plus malgré l'apport du GPS il y a toujours un temps pour repérer l'entrée exacte d'un bâtiment. Il y a donc un réel enjeu à décrire ces étapes notamment, pour mettre en évidence les caractéristiques de la ville. Nous reviendrons sur ce point plus loin dans ce chapitre. Pour l'heure, les différents temps qui composent le Temps Utile sont récapitulés dans le tableau 3.2 ci-dessous.

Temps Utile	
Temps Utile roulé	Temps stationnement
	Temps recherche adresse
	Temps inter-stops
Temps Utile autre	Aller-retour au véhicule
	Temps contact avec le destinataire (dont déchargement et procédure administrative)
	Temps de chargement du véhicule au CDU

TABLE 3.2 – Détails du Temps Utile

I.2.c Quelques reformulations dans le modèle

Avant d’aller plus loin et de détailler les indicateurs de performance que le modèle physique permet de calculer, certaines simplifications dans la modélisation sont possibles. C’est le cas des temps perdus dans la congestion et pour acheminer un colis finalement en souffrance. En effet, on peut faire l’hypothèse que ces temps, qui représentent des perturbations du Temps Utile, sont proportionnels à ce dernier.

Plus précisément, on considère que le Temps perdu en souffrance correspond à la non-livraison d’un destinataire alors même que toutes les étapes du cycle de livraison ont été réalisées. La part du temps passé pour des colis finalement non-livrés représente donc un pourcentage du temps nécessaire à réussir une livraison. C’est pourquoi on peut exprimer ce temps de la manière suivante :

$$T^s = k \times TU \quad (3.5)$$

où

T^s : Temps perdu en souffrance

k : Taux de souffrance

En revanche, le Temps perdu dans la congestion a la particularité de ne dépendre que de la partie roulée du Temps Utile. En effet, la congestion ne va impacter que les moments où le véhicule est dans une phase où il devrait avancer. De cette manière, on peut considérer qu’il est proportionnel au Temps Utile roulé et non à l’intégralité du Temps Utile. Son expression est représentée par l’équation 3.6.

$$T^c = q \times TU^r \quad (3.6)$$

où

T^c : Temps perdu dans la congestion

q : Taux de congestion

Ces simplifications permettent l'expression des indicateurs de performance définis par le TRG et que nous allons détailler dans la section suivante.

I.3 Détails des indicateurs de performance

La deuxième phase de l'analogie entre processus de production et processus de livraison est la définition et l'expression des indicateurs de performance qui découlent du TRG. Nous exprimons dans les sections suivantes chacun de ces indicateurs en fonction des paramètres du système de livraison. L'objectif, ici, est de mettre en évidence des leviers physiques permettant l'amélioration de l'efficacité du processus.

I.3.a Le Taux de Qualité (TQ)

Le premier indicateur mobilisé est le Taux de Qualité. Il est défini par le rapport entre le Temps Utile (TU) et le Temps Net (TN) (Equation 3.7).

$$TQ = \frac{TU}{TN} \quad (3.7)$$

Dans un contexte de production, un Taux de Qualité faible met en évidence un nombre important de rebuts. Il en découle la nécessité de mettre en place des actions qualité. Dans le cas de la livraison, le Taux de Qualité indique si le processus génère beaucoup de commandes en souffrance ou non. En effet, par définition ce ratio est composé du Temps Utile et du Temps Net. Or le Temps Net peut être exprimé comme la somme du Temps Utile et du Temps passé pour les colis en souffrance (cf figure 3.2). Ce dernier étant proportionnel au Temps Utile (voir équation 3.5), le Temps Net l'est également (voir équation 3.8).

$$\begin{aligned} TN &= TU + T^s \\ &= TU + kTU \\ &= (1 + k)TU \end{aligned} \quad (3.8)$$

Finalement, le Taux de Qualité est donc directement fonction du taux de souffrance (équation 3.9).

$$\begin{aligned}
 TQ &= \frac{TU}{(1+k)TU} \\
 &= \frac{1}{1+k}
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

De cette manière, un Taux de Qualité faible indique que des actions pour diminuer le Taux de souffrance sont nécessaires. La mise en souffrance d'une commande peut avoir deux origines : soit le destinataire est absent et les colis ne peuvent lui être remis, soit le destinataire refuse le colis car il est endommagé ou ne correspond pas à sa commande. Nous considérons ici les colis endommagés lors de la manipulation (chargement, déchargement, transport) par le CDU. En effet, il est de la responsabilité du CDU de ne pas accepter un colis qui lui serait remis déjà endommagé.

On relève ainsi deux types d'actions possibles pour réduire le Temps de souffrance et donc améliorer le Taux de Qualité (et in fine la performance globale du système via le TRG). La première concerne l'amélioration du processus de planification des livraisons. En effet, une meilleure gestion des rendez-vous avec les destinataires peut permettre de limiter les souffrances dues à des absences.

La deuxième action qualité possible est la mise en place de moyens de manutention adaptés, un chargement sécuritaire des véhicules (c'est-à-dire qui prend en compte la fragilité des colis) et la formation des livreurs entraînant ainsi une baisse du nombre de colis endommagés pendant la livraison. Dans le cas d'un CDU, il est difficile de mettre en place des actions pour prévenir les refus de réception pour cause d'erreur sur le contenu puisqu'il n'est pas responsable de la préparation de la commande. Il agit finalement en prestataire logistique et ne maîtrise pas le contenu des colis livrés. Ainsi, il n'y a pas vraiment d'actions correctives possibles pour améliorer ce service mais plutôt une pénalisation auprès du remettant. Cette compensation financière doit donc être calculée pour couvrir les frais engendrés par la "non-livraison" de la commande. Dans ce cas, le système de livraison n'est pas plus efficace mais ne coûte pas plus cher non plus.

I.3.b Le Taux de Performance (TP)

Nous montons maintenant un étage dans la "pyramide" des temps (cf figure 3.2) pour s'intéresser au Taux de Performance. Il est défini comme le rapport entre le Temps Net et le Temps de Fonctionnement (équation 3.10).

$$TP = \frac{TN}{TF}
 \tag{3.10}$$

Si l'on étudie un système de production, c'est un indicateur de régularité des temps de passage des ordres de fabrication. Dans le cadre du processus de livraison du CDU, il reflète

l'état de congestion du système et donc l'efficacité perdue à cause de ce trafic trop important. En effet, le Temps de Fonctionnement s'exprime comme la somme du Temps Net et du Temps perdu dans la congestion.

$$TF = TN + T^c \quad (3.11)$$

Selon l'hypothèse posée dans la partie I.2.c, le Temps de congestion est proportionnel à la partie roulée du Temps Utile. De son côté, le Temps Net est proportionnel au Temps Utile. Finalement, le Temps de Fonctionnement l'est également (équation 3.12).

$$\begin{aligned} TF &= (1 + k)TU + qTU^r \\ &= (1 + k)TU + \alpha qTU \\ &= (1 + k + \alpha q)TU \end{aligned} \quad (3.12)$$

On peut ensuite injecter cette expression dans celle du Taux de Performance. On obtient alors l'équation 3.13 qui suit.

$$\begin{aligned} TP &= \frac{TN}{TF} \\ &= \frac{(1 + k)TU}{(1 + k + \alpha q)TU} \\ &= \frac{1 + k}{1 + k + \alpha q} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Le Taux de Performance indique qu'il faut mettre en place une action de stabilisation du processus. Ici il s'agit de réduire la congestion. Cela peut se réaliser de différentes manières et à plusieurs niveaux. On peut effectivement agir sur la congestion globale de la ville grâce au plan de circulation ou à de la réglementation limitant l'accès à certaines zones. On peut également éviter cette congestion en décalant les horaires de livraison (livraison de nuit par exemple) ou en empruntant des rues différentes et en réalisant les derniers mètres à pieds. Pour mémoire, nous ne jugeons pas, dans cette section, ni des difficultés rencontrées pour réaliser ces mesures ni du champ d'influence auxquelles ces dernières appartiennent. Nous proposons ici de mettre en avant les indications fournies par chaque indicateur quant aux actions à effectuer pour améliorer la performance du système.

Il est intéressant de souligner qu'une action possible concerne la part roulée du Temps Utile. En effet, le Taux de Performance dépend également de ce paramètre. On remarque ainsi que plus la part du Temps Utile roulé est faible (α petit) plus le Taux de Performance va être bon. Cela signifie qu'il est nécessaire de réduire autant que possible la part du temps roulé dans le Temps Utile. Cela peut être fait en optimisant les temps de trajet.

De plus, on observe un effet d'équilibrage entre le taux de congestion q et la part roulée du Temps Utile α . Si l'un est très faible et l'autre très grand, l'effet de l'un sur l'autre se compense. Par exemple, si une ville est extrêmement congestionnée (q grand) mais que la part roulée est très faible (α petit) alors la congestion aura un plus petit impact sur la performance de la livraison. Néanmoins, améliorer cette congestion permettrait d'obtenir des résultats encore meilleurs. Il s'agit donc bien de faire des compromis et d'utiliser le Taux de Performance comme un indicateur des actions possibles à mettre en place.

1.3.c La Disponibilité Opérationnelle (DO)

Le dernier indicateur proposé est la Disponibilité Opérationnelle (DO). Elle s'exprime comme le rapport entre le Temps de Fonctionnement et le Temps Requis (voir équation 3.14).

$$DO = \frac{TF}{TR} \quad (3.14)$$

Il s'agit en fait de mesurer l'écart entre le temps pendant lequel la ligne de production fonctionne et le temps réellement utilisé pour produire les pièces. Par analogie, la Disponibilité Opérationnelle appliquée au processus de livraison compare le temps passé à préparer et à livrer les commandes (Temps de Fonctionnement) et le temps réel pendant lequel le conducteur et le véhicule sont occupés (et/ou indisponibles dans le cas des pannes du véhicule).

Contrairement aux autres indicateurs, la Disponibilité Opérationnelle ne peut pas vraiment s'exprimer de manière simple en fonction des paramètres opérationnels du modèle. C'est la raison pour laquelle nous nous contenterons d'utiliser les expressions du Temps de Fonctionnement et du Temps Requis pour exprimer cet indicateur comme cela est le cas dans l'équation 3.15.

$$DO = \frac{(1 + k + \alpha q)TU}{(1 + k + \alpha q)TU + T^p + T^{CDU}} \quad (3.15)$$

où

T^p : Temps pannes

T^{CDU} : Temps allers-retours au CDU

Dans un cadre de production, les leviers pour améliorer la Disponibilité Opérationnelle sont toutes les actions favorisant la réduction des temps de changement de fabrication ou d'outils, de contrôle, de réglage, d'entretien, de panne ou encore d'attente. Dans le cas qui nous intéresse, cela se traduit par un choix stratégique de localisation du CDU permettant d'accéder rapidement aux premiers points de livraison des tournées. Pour ce faire on peut jouer sur la localisation du CDU (donc en phase amont du projet) ou sur la localisation des

destinataires (choix commercial). Dans tous les cas, il faut réussir à réduire au maximum ce temps sans allonger, par ailleurs, le temps entre les points de livraison.

D'autre part, le levier concernant les actions de prévention des pannes est aussi mobilisable dans le cas d'un processus de livraison. Cela signifie qu'il faut effectuer un suivi régulier de l'entretien des véhicules mais aussi préserver les conducteurs-livreurs de tout accident du travail ou stress trop intensif qui pourraient entraîner des arrêts.

I.4 Lien avec le modèle économique

L'intérêt de l'évaluation de la performance du système de livraison par l'intermédiaire de ces indicateurs opérationnels est qu'il donne à la fois une photographie de l'état du système à différents niveaux du processus et des indications sur les actions à réaliser pour améliorer ce même système. Néanmoins, notre objectif n'est pas de trouver un réglage optimal d'un processus de livraison par le CDU mais d'étudier la rentabilité de celui-ci. En effet, nous cherchons à déterminer si un CDU peut être une entreprise viable, et si oui sous quelles conditions.

Nous proposons pour cela d'établir un lien entre la caractérisation physique du système de livraison et son modèle économique. Ce croisement dans les approches permettrait d'évaluer l'action directe d'un réglage physique sur la performance économique du CDU.

Pour ce faire, nous nous intéressons à l'équation des coûts variables. En effet, l'approche par le TRG s'appuie sur l'étude des temps du processus. Or la seule variable dépendante du temps dans le modèle économique est la distance parcourue par mois qui est intégrée aux coûts variables comme nous le rappelons dans l'équation 3.16 ci-dessous.

$$C^{vm} = (c^e + c^u) \times D^m \quad (3.16)$$

où

C^{vm} : Coûts variables mensuels

c^e : Coût de l'énergie par km

c^u : Coût d'usure des pneus par km

D^m : Distance parcourue par mois

Pour commencer, nous séparons la distance parcourue en deux parties : la distance d'allers-retours au CDU (telle que définie plus haut dans ce chapitre), et la distance parcourue pendant le reste de la tournée. Cette dernière est elle-même composée de deux morceaux l'un correspondant à la distance dite utile (c'est-à-dire qui découle des étapes composant le temps utile) et l'autre à la distance parcourue pour livrer des colis finalement en souffrance. A trajet constant,

il n'y a pas de distance générée par la congestion puisque, par définition, la congestion empêche d'avancer en un temps normal. Elle va donc pénaliser le temps mais pas la distance.

En suivant la même logique, seules les parts roulées du Temps Utile et du Temps de souffrance génèrent de la distance. Ainsi, on peut convertir ces distances en fonction de la part roulée du Temps Utile (α) et de la vitesse moyenne de déplacement. Comme le Temps de souffrance est proportionnel au Temps Utile, sa part roulée l'est dans les mêmes proportions.

Pour simplifier l'écriture, nous utiliserons les notations suivantes :

v^{moy} : Vitesse moyenne entre les points de livraison

v^{CDU} : Vitesse moyenne A/R CDU

d^{CDU} : Distance A/R CDU

c^{um} : Coût d'usure des pneus mensuel

D^{Um} : Distance utile mensuelle

D^{Sm} : Distance mensuelle parcourue pour les colis en souffrance

De plus, nous posons les définitions suivantes, en reprenant notamment les notations du chapitre 2 :

$$d^{CDU} = T^{CDU} \times v^{CDU} \quad (3.17)$$

$$c^{um} = c^u \times D^m \quad (3.18)$$

$$D^{Um} = TU^r \times v^{moy} \quad (3.19)$$

$$D^{Sm} = kTU^r \times v^{moy} \quad (3.20)$$

Finalement, l'équation des coûts variables peut s'exprimer ainsi (les temps sont exprimés mensuellement) :

$$\begin{aligned} C^{vm} &= (D^{Um} + D^{Sm} + d^{CDU}) c^e + c^{um} \\ &= ((TU^r + kTU^r) v^{moy} + T^{CDU} \times v^{CDU}) c^e + c^{um} \\ &= ((\alpha TU + k\alpha TU) v^{moy} + T^{CDU} \times v^{CDU}) c^e + c^{um} \\ &= ((1+k)\alpha TU v^{moy} + T^{CDU} \times v^{CDU}) c^e + c^{um} \\ &= \left(\frac{\alpha TU}{TQ} v^{moy} + T^{CDU} \times v^{CDU} \right) c^e + c^{um} \end{aligned} \quad (3.21)$$

De cette manière, nous arrivons à montrer que les leviers physiques sont également des leviers économiques du CDU. Les choix effectués pour piloter le système de livraison ont un

impact direct sur la viabilité de l'organisation. Dans la section suivante, nous présentons les différents leviers d'actions que nous avons identifiés grâce à l'étude du processus de livraison ainsi que leurs caractéristiques.

II Les leviers d'actions identifiés

Comme nous l'annonçons plus haut dans ce chapitre, l'analyse des valeurs des ratios liés au TRG permet de proposer des actions ciblées en fonction des performances du système. Cette démarche apporte des leviers opérationnels en plus des leviers stratégiques. L'aide à la décision que l'on apporte peut ainsi se placer à plusieurs niveaux de décisions et de temps. En effet, certains de ces leviers sont destinés à des décisions plutôt en amont d'un projet, d'autres sont directement sur le terrain.

Nous attirons l'attention du lecteur sur les précautions à prendre vis-à-vis de la démarche adoptée. Bien que nous considérons dans notre étude l'ensemble de la ressource conducteur/véhicule, il ne s'agit en aucun cas de confondre l'homme avec la machine. Notre démarche est plutôt d'être conscient des limites (minimum et maximum) que cela apporte au système et d'essayer d'agir sur l'environnement dans lequel les conducteurs évoluent. C'est pourquoi, les solutions que nous apporterons seront essentiellement de l'ordre organisationnel sans mettre en danger ni la sécurité ni la santé des conducteurs-livreurs.

Nous rappelons ici les trois notions définies dans la section I, qui sont l'objectif, le levier et le paramètre de réglage. L'objectif correspond à ce que l'on cherche à obtenir, le levier est le moyen que l'on utilise et enfin le paramètre de réglage est la variable que l'on introduit dans le modèle pour caractériser l'emploi d'un levier. Sur un exemple très simple cela revient à avoir pour objectif de réduire le temps d'attente à un feu tricolore, le levier va être la programmation du timing des feux et le paramètre va être la valeur du temps de "rouge" sur le feu.

Ainsi, nous distinguons deux types de leviers d'actions : les leviers endogènes et les leviers exogènes. Les leviers endogènes sont ceux sur lesquels les gestionnaires du CDU ont la main (en phase design ou opérationnelle), leur mobilisation est la conséquence d'une décision. Les leviers exogènes sont les leviers qui ne sont pas mobilisables par les décisionnaires du CDU. En effet, leurs actions ont des conséquences sur l'environnement dans lequel la structure CDU, au travers de son activité de livraison, évoluera. Ils peuvent être perçus comme des aléas (positifs ou négatifs) par le CDU.

Dans les deux sous-sections suivantes, nous détaillons l'ensemble des leviers d'actions qui ont été identifiés pour améliorer la rentabilité du CDU ainsi que les paramètres à utiliser pour traduire leur utilisation.

II.1 Les leviers endogènes du système

Pour commencer nous présentons les leviers d'actions endogènes qui ont été identifiés. Ceux-ci ont été mis en avant grâce à l'approche par le TRG mais également par la composition des équations du modèle économique.

- Réduction du temps passé pour un colis en souffrance

Ainsi, le premier levier relevé est la planification en amont des rendez-vous. En effet, si l'on est capable de mieux anticiper la présence des destinataires, par des appels téléphoniques ou un système de choix de créneaux horaires en ligne, alors le taux de colis en souffrance pourra être amélioré entraînant un temps perdu pour colis en souffrance plus faible. Un temps de souffrance plus faible entrainera un TP et un TQ plus élevés et finalement des coûts variables plus faibles donc un point d'équilibre économique atteint plus vite.

- Réduction du temps de recherche d'adresse

Un autre levier possible concerne l'apprentissage du plan de la ville par les conducteurs-livreurs. Cela a pour effet d'améliorer le temps de recherche des adresses lors de l'arrivée près du lieu de livraison. Une diminution de ce temps engendre une diminution du Temps Utile (TU), et plus particulièrement de sa part roulée (α). On peut alors livrer plus de colis en moins de temps participant ainsi à l'augmentation de la capacité temporelle de livraison. Ce levier se traduit par la mise en place de formation, l'utilisation de GPS ou l'embauche de conducteurs ayant de bonnes connaissances de la ville.

- Diminution de la sous-charge

Cela introduit le prochain levier qui concerne l'adéquation entre les ressources et la charge de travail. Afin d'éviter la sous-charge, il est nécessaire de dimensionner correctement le système. Il s'agit donc d'avoir un nombre de couples conducteurs/véhicules suffisants pour répondre à la demande visée. Ce paramètre est important car les salaires ainsi que le coût du véhicule représentent les postes de charges les plus élevés. En faisant l'hypothèse d'un marché existant et captable sans stratégie commerciale, il faut donc bien choisir le taux d'activité que l'on souhaite et donc le nombre de ressources nécessaire pour le satisfaire. Le taux d'activité, lui, se traduit par le nombre de stops journaliers à traiter.

- Réduire la distance parcourue

Plusieurs leviers d'actions, endogènes et exogènes, ont pour objectif de réduire la distance parcourue. En effet, l'atteinte de cet objectif permet de réduire de nombreux paramètres comme le Temps Utile, et par conséquent les coûts variables, ou encore le temps de parcours. Chaque diminution d'un temps de parcours entraine forcément une augmentation de l'autonomie : on peut faire plus de livraison dans un temps plus court. Ainsi pour réduire cette distance, la position du CDU par rapport à la demande dans la ville est un levier d'actions endogène

mobilisable pour réduire la distance parcourue.

Un autre levier, exogène cette fois, existe mais sera présenté dans la section suivante.

- Adapter la capacité des véhicules

Un autre levier concerne le choix du type de véhicules. Il s'agit là de choisir les capacités en poids et en volume des véhicules mais aussi leur autonomie. Ce levier a la particularité d'agir à la fois sur les deux dimensions des coûts fixes (coût du véhicule et capacité) et également sur les coûts variables par l'intermédiaire de la distance parcourue en fonction de l'autonomie et de la capacité.

- Ajuster le prix de vente

Enfin, le dernier levier endogène identifié est relatif au chiffre d'affaires généré. Il se traduit alors par le prix facturé par colis. Ce levier a la spécificité d'être pour partie endogène mais également exogène. En effet, bien qu'il soit du ressort du gérant de fixer le prix de vente, une partie de celui-ci est tout de même dictée à la fois par le marché et par les coûts engendrés. La détermination de ce prix peut être facilitée par l'utilisation de tous les leviers précédemment cités.

II.2 Les leviers exogènes du système

Les leviers qualifiés d'exogènes relèvent des caractéristiques de la ville mais aussi des décisions prises par les pouvoirs publics. Ces leviers sont donc mobilisables, lorsque cela est possible, par les collectivités locales qui conçoivent la ville.

- Aménager des stationnements pour les véhicules de livraison

La première action identifiée a trait à rendre plus facile la livraison en ville par la signalisation de places de stationnement réservées aux livreurs. En positionnant un nombre important d'aires de livraison, les collectivités peuvent améliorer le processus de livraison en diminuant les temps de recherche de stationnement. Cela aura alors pour effet de réduire le Temps Utile du cycle de livraison du CDU et par suite de diminuer les coûts variables mais aussi les coûts fixes (augmentation de l'autonomie). Une fois mobilisées, les conséquences de ce levier d'actions constitueront le contexte que le CDU, en tant qu'entreprise de transport, subira.

- Réduire la congestion

Dans le même esprit, les décideurs publics sont en mesure de limiter la congestion de la ville. Dans une certaine limite, bien sûr, comme nous l'indiquons dans le chapitre 1, ils ont la capacité de mettre en place une réglementation pour réduire l'accès à certaines zones, par exemple. L'état de congestion de la ville (ou du centre-ville) est, en fait, un paramètre du modèle physique du CDU. Sa diminution entraîne une réduction des temps perdus dans la congestion et finalement un gain de productivité (via la Disponibilité Opérationnelle et le Taux

de Performance). Une fois encore, l'autonomie est augmentée puisque l'on rend disponible du temps pour livrer des commandes supplémentaires à ressources constantes.

- Réduire la distance parcourue

Nous avons déjà présenté plus haut un levier d'actions endogène ayant pour objectif la réduction de la distance parcourue.

Le deuxième levier d'actions possible est moins aisé à mobiliser puisqu'il s'agit de la forme du réseau de la ville. Nous entendons par réseau à la fois la forme qui se dégage lorsque l'on regarde la ville (ou la zone de chalandise) depuis le ciel, et à la fois l'orientation et la position des rues à l'intérieur de cette forme. Cette allure influence, a priori, la distance parcourue : une ville très allongée engendrera certainement des distances plus grandes qu'une ville circulaire. Bien qu'étant une propriété intrinsèque du contexte urbain, il est, néanmoins, envisageable de moduler cette forme (ou morphologie, nous utiliserons les deux termes comme des synonymes) par la définition de la zone de chalandise du CDU.

- Améliorer la mutualisation

Ce levier est très complexe car il combine décision opérationnelle et caractéristique de la ville, ce qui en fait un levier à la fois endogène et exogène. En effet, la définition de la zone de chalandise dépend des décisionnaires du CDU. En revanche, cette zone est également définie par une densité du marché, qui est "subie" par le CDU. Cette densité se caractérise par le nombre de points potentiels à livrer dans la ville ainsi que la quantité de marchandises à livrer. D'un point de vue opérationnel, le levier d'amélioration de la mutualisation se traduit par la définition de la zone de chalandise ainsi que par une tactique d'organisation mutualisée des tournées. On peut alors définir deux paramètres pour quantifier le niveau de mutualisation : le nombre de positions par stop et le nombre de colis par position. Le premier traduit le caractère plus ou moins dense de la zone de chalandise, qui permet de garer le véhicule et d'effectuer à pied plusieurs livraisons. Le deuxième est plus révélateur de la typologie du marché, qui est composé de plus ou moins gros générateurs de flux. Nous choisissons, néanmoins, de classer ce levier comme exogène car nous considérons que la mutualisation est plutôt dictée par la densité que par de réels choix stratégiques des décisionnaires du CDU de cibler certains destinataires.

- Réduire le coût de l'énergie

Pour finir, le dernier levier d'actions exogène que nous relevons est la maîtrise du coût de l'énergie. Ce coût est dépendant de marché mais peut néanmoins faire l'objet d'un choix au sujet de sa nature. En effet, toutes les énergies n'ont pas le même coût ramené au km et cela peut faire l'objet d'une décision stratégique. De plus, selon l'énergie, plusieurs fournisseurs existent ce qui permet la négociation sur le prix. Il s'agit donc bien d'un paramètre exogène qui pèse sur le bilan économique du CDU.

II.3 Des leviers comme conditions de viabilité pour un CDU

L'ensemble des leviers d'actions cités ci-dessus ont été mis en avant grâce à l'analyse des paramètres du modèle physique, via les ratios définis par le TRG, et du modèle économique du CDU. Il est intéressant de noter que certains de ces leviers sont caractéristiques des expériences concluantes de CDU. Par exemple la particularité du réseau et de l'accessibilité de la ville est mise en évidence dans les expériences de Monaco ou de Parme (ALLEN et al. 2007 ; BROWNE et al. 2005). Néanmoins, l'impact de ces caractéristiques sur la rentabilité de ces CDU n'a pas été approfondi.

L'objectif de nos travaux de thèse est de déterminer si un CDU peut être rentable, et si oui dans quelles mesures. Les leviers évoqués se présentent ainsi comme les conditions de viabilité du CDU étudié. Nous proposons donc dans la suite de ce manuscrit de mesurer l'impact de chacun de ces leviers sur la rentabilité économique du système logistique du CDU mais aussi de vérifier qu'ils apportent des conditions suffisantes pour atteindre une viabilité pérenne.

L'hypothèse que nous ferons pour la suite de notre étude est que la demande pour alimenter un CDU existe, comme cela a été démontré par plusieurs articles dans la littérature (LIN et al. 2014 ; QUAK et al. 2014 ; VAN DUIN et al. 2008). Ainsi, nous ne discuterons pas des stratégies commerciales à mettre en œuvre pour rendre le service attractif. Le projet est plutôt de tester de façon isolée l'impact d'un panel de leviers parmi l'ensemble.

Par exemple, et pour reprendre la terminologie explicitée dans ce chapitre, il est possible de faire un tableau récapitulant quelques objectifs, leviers et paramètres. Le tableau 3.3, ci-dessous, n'est pas exhaustif et a, uniquement, pour objet d'illustrer ces trois termes. De plus, il faut noter qu'un objectif peut être décliné en plusieurs leviers, et qu'un levier ne résulte pas forcément en un paramètre dans le modèle. En effet, la mobilisation de ce levier peut se traduire par l'action simultanée sur plusieurs variables du modèle.

Objectif	Levier	Paramètre
Améliorer la qualité du système de livraison	Réduire le temps passé pour un colis en souffrance	k
Améliorer la régularité du temps de tournée	Réduire la congestion	q
Diminuer le temps de livraison	Réduire la distance parcourue	d^{CDU}
Réduire les coûts de fonctionnement	Améliorer la mutualisation	N^{ps}

TABLE 3.3 – Exemples d'objectifs, leviers et paramètres liés

D'autre part, nous avons décrit dans ce chapitre, les actions connues et répertoriées, à ce jour, pour améliorer la performance économique et physique du CDU. Comme nous le montrerons, grâce à une application numérique, dans le chapitre 5, les paramètres actuels de réglage de ces différents leviers peuvent vite arriver à saturation, sans offrir un niveau de performance correct.

C'est la raison pour laquelle, nous proposons, dans cette thèse, d'élargir d'avantage le champ des possibles en mobilisant une approche innovante qui s'appuie sur un nouveau paradigme logistique appelé l'"Internet Physique". Il s'agit de changer la manière dont les marchandises "*sont déplacées, entreposées, réalisées, fournies et utilisées*" (MONTREUIL 2013). Dans le chapitre suivant, nous présentons les principes de ce concept et son application dans un contexte urbain. Nous montrerons, surtout, en quoi il répond aux enjeux soulevés dans les chapitres précédents et, notamment, en mettant en scène les leviers que nous avons identifiés.

Chapitre 4

L'Internet Physique comme catalyseur de la performance

I Le concept d'Internet Physique

I.1 En général

I.1.a L'insoutenabilité du système logistique mondial actuel

Afin d'introduire la notion d'Internet Physique (que l'on notera dorénavant PI ou II pour Physical Internet), nous commençons par exprimer l'origine de la réflexion amenant à un changement nécessaire de la logistique dans sa globalité (d'une échelle mondiale à une échelle urbaine).

Le sujet s'est contruit à partir d'un constat : le système logistique mondial est en bout de course. Il est inefficent, saturé et répond souvent mal ou peu aux enjeux actuels qu'ils soient économiques, sociaux ou environnementaux. Dans les versions successives du "Manifeste pour un Internet Physique", MONTREUIL (2009, 2011, 2013) énonce treize symptômes d'inefficience logistique et d'insoutenabilité. Nous ne les exposerons pas tous ici, mais nous souhaitons en détailler quelques uns.

Les trois premiers constats qui ont retenu notre attention concernent la façon dont les objets sont transportés. L'auteur constate d'abord que les matières expédiées sont essentiellement de l'air et de l'emballage. En effet, que l'on regarde à l'échelle d'une remorque ou d'un colis, les contenants ne sont jamais exactement adaptés à la taille du contenu. Pour illustrer ceci, on peut prendre un exemple très concret et auquel chacun a sûrement déjà été confronté au moins une fois. Il s'agit du contenu d'un colis issu d'une vente par e-commerce. Il n'est pas rare de trouver la marchandise commandée (vêtement, matériel électronique, etc.) emballée dans au moins une couche de plastique et flottante au milieu d'un carton bien trop grand pour

elle. Cela augmente le volume transporté et, indéniablement, l'occupation de l'espace dans les remorques qui, elles-mêmes, ne peuvent pas être adaptées aux multiples formes à transporter tant les possibilités sont grandes (carton, palette complète, palette incomplète, etc.). Ensuite, MONTREUIL (2013) remarque que les véhicules de transport de marchandises voyagent une grande partie de leur temps à vide. On peine effectivement encore à organiser des tournées de ramasse cohérentes et minimisant les trajets à vide. Enfin, les conducteurs opérant sur des longues distances sont confrontés à des trajets de plus en plus longs. Ils parcourent des milliers de kilomètres, vivent loin de leur domicile dans des conditions souvent difficiles.

Ensuite, on relève également des symptômes liés à l'entreposage et la disponibilité des marchandises. Les produits ne sont pas entreposés aux endroits où ils sont réellement nécessaires. Cela augmente les délais d'obtention. En outre, les installations de production ou d'entreposage sont souvent sous-exploitées et mal utilisées entraînant des voyages inutiles et coûteux en temps et donc en argent. Cela engendre un autre constat : les produits se déplacent parfois inutilement. En effet, les lieux de fabrication et/ou d'assemblage sont en majorité localisés loin des lieux d'utilisation des produits, ce qui génèrent des flux de marchandises supplémentaires et évitables.

D'autre part, de nombreux dysfonctionnements relatifs aux infrastructures de transport ainsi qu'à son organisation sont pointés du doigt. Notamment, et malgré une volonté affichée des autorités, le transport intermodal peine à être exploité et exploitable. La synchronisation nécessaire est laborieuse car elle ne peut pas s'appuyer sur des interfaces solides et bien conçues. Finalement, le choix de l'intermodalité s'avère souvent coûteux et risqué. Egalement, et comme cela a été précisé dans le premier chapitre de cette thèse, l'approvisionnement des villes est toujours pénible. Le transport de marchandises a encore du mal à être perçu comme une composante de la vie urbaine et est toujours relayé au deuxième plan.

Enfin, un constat est fait sur le manque de transparence, de généricité et de modularité de ce système logistique. Cela en fait un inhibiteur de l'innovation. Il est ainsi indispensable de prendre conscience du système dans sa globalité afin de porter une réflexion nouvelle sur cette logistique devenue insoutenable en l'état.

I.1.b La métaphore de l'Internet numérique

L'ensemble des points cités plus haut montre la nécessité de "concevoir un système pour déplacer, entreposer, réaliser, fournir et utiliser des objets physiques dans le monde entier de façon efficiente et soutenable économiquement, environnementalement et socialement" (MONTREUIL 2013). L'idée de Benoit Montreuil est fondée sur une observation : les fonctions élémentaires de la logistique (expédier, recevoir, transporter, manutentionner...) sont assez proches de celles des réseaux informatiques.

Effectivement, en informatique les objets à transmettre sont des données sous forme d'information. Ces données se déplacent en paquet entre les routeurs (ou hubs) en empruntant des voies, les câbles, et en respectant des protocoles, comme le TCP/IP, jusqu'à atteindre le destinataire. Tout est standardisé, codé et défini de manière unique et générale de sorte que l'information soit disponible le plus vite possible au bon destinataire et également que le réseau puisse s'agrandir sans remise en cause du système en place. De plus, et afin que ce réseau ouvert soit utilisable par de multiples utilisateurs ayant des profils différents, des normes de sécurité ont également été mises en place protégeant (en théorie...) les données de chacun.

Enfin, un réseau particulier, Internet, a été créé comme une grande infrastructure commune. Il permet à tout le monde de pouvoir emprunter le même réseau, rendre consultable des informations par l'ensemble ou par un panel, etc. Tout cela en respectant des standards généraux et uniques.

Ainsi, plutôt que de panser les plaies d'un système logistique à bout, ne peut-on pas réinventer son organisation en repensant intégralement le modèle ? C'est ce que propose l'Internet Physique en changeant le paradigme actuel en une logistique ouverte et hyperconnectée telle l'Internet numérique.

I.1.c Elements structurants de l'Internet Physique

L'Internet Physique est un système logistique ouvert, global, hyperconnecté et durable. Il est fondé sur l'interconnectivité physique, digitale, opérationnelle, d'affaires et législative au moyen de l'encapsulation, des interfaces et des protocoles. Entre autres, le réseau de transport multimodal est composé d'entrepôts et d'infrastructures logistiques ouverts, permettant un Web logistique (BALLOT et MONTREUIL 2014). PI est défini par de multiples éléments dont l'unité réside en leur caractère standard et universel.

Tout d'abord, PI se base sur un réseau de transport et de distribution ouvert et partagé intégrant l'ensemble des infrastructures (routières, ferroviaires, etc.) ainsi que toutes les installations. Les installations, comme les centres de distribution par exemple, sont vues comme des hubs informatiques (que l'on nommera PI-hubs). Elles ont une mission de routage des biens. Ces biens sont d'ailleurs contenus dans des conteneurs modulaires (PI-conteneurs) adaptés à la taille du produit, encapsulables les uns avec les autres, écologiques, sécurisés et tracés informatiquement en permanence (via des puces RFID par exemple). Leur conception est telle que la manutention et le chargement sont facilités. En outre, le réseau ne gère plus directement des biens physiques mais des PI-conteneurs tels les datagrammes de l'Internet numérique.

L'utilisation du réseau est organisée via un marché ouvert de transport des marchandises (type bourse au fret) unique. Les fournisseurs sont certifiés et évalués par les utilisateurs pour améliorer constamment la performance logistique. L'ensemble de ces éléments repose sur

l'interconnexion, véritable clé de voute du processus logistique.

I.1.d Les effets envisagés

L'objectif d'une telle révolution est de répondre aux enjeux actuels mais surtout d'améliorer considérablement la performance du système en place. Bien qu'encore peu nombreuses à cause de la relative jeunesse (bientôt dix ans tout de même) du concept, des études ont été menées afin d'anticiper les gains qu'offrirait PI. Il s'avère qu'on observerait une réduction de 30% des coûts induits et de presque 60% des gaz à effets de serre tout en conservant une satisfaction client similaire voire meilleure (BALLOT et al. 2012 ; SARRAJ et al. 2014). De plus, le temps de livraison en magasin est estimé entre 71 et 79% plus court en utilisant le Web logistique offert par PI. Le potentiel proposé est convaincant.

Finalement, l'Internet Physique peut être vu comme une version 2.0 de la logistique mondiale qui est capable de s'appuyer sur une infrastructure déjà existante (ensemble des routes et des centres logistiques en place) pour faire évoluer le système vers un fonctionnement durable. Il ne s'agit pas d'une utopie mais d'un changement de mentalité et d'échelle de réflexion comme nous allons le montrer dans la suite de notre propos.

Néanmoins, le périmètre de notre étude n'est pas celui de l'Internet Physique tel que décrit dans cette section. En effet, notre objet est la ville, voire son centre-ville, qui diffère de la logistique mondiale par certaines caractéristiques qui lui sont propres. Alors peut-on envisager d'appliquer un tel concept à cette échelle ? Est-ce raisonnable et quels en seraient les effets ? C'est ce que nous mettons en scène dans la section suivante.

I.2 La logistique urbaine hyperconnectée

Le périmètre de nos travaux de recherche est centré sur la logistique urbaine. Il est donc bien moins large et global que celui de PI. Cependant, cela ne signifie pas qu'il n'est pas envisageable d'organiser la ville en répondant à ses principes fondamentaux. En effet, comme le montrent CRAINIC et MONTREUIL (2015) dans la continuité des propositions de MONTREUIL (2009, 2011, 2013), les villes peuvent être des nœuds du réseau logistique mondial (voir Figure 4.1). Ainsi, s'intéresser à la logistique de celles-ci revient à zoomer sur une maille.

Cette maille doit ensuite être définie. Selon nous, et en accord avec les travaux de CRAINIC et MONTREUIL (2015), chaque maille du réseau basé sur PI est une mise en abyme du réseau lui-même. La mise en abyme est l'effet qui se produit lorsque l'on se regarde dans un miroir placé en face d'un autre miroir. On voit alors une image perpétuellement répétée. Dans le cas de PI, cela signifie qu'à chaque fois que l'on zoome sur un nœud du réseau, le réseau inclus dans ce nœud est organisé de la même façon que celui du niveau supérieur (voir Figure 4.2).

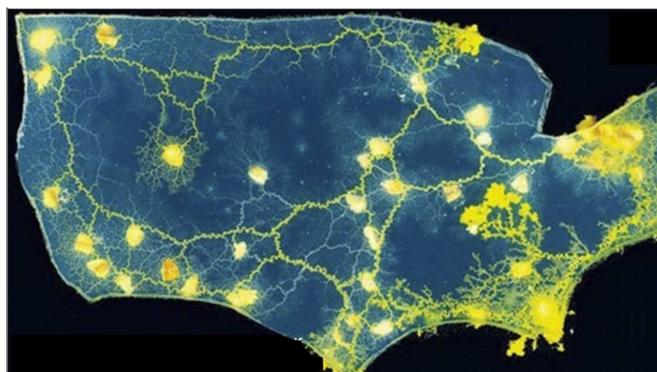


FIGURE 4.1 – Les villes comme nœuds du Web logistique mondial (source :MONTREUIL (2015))

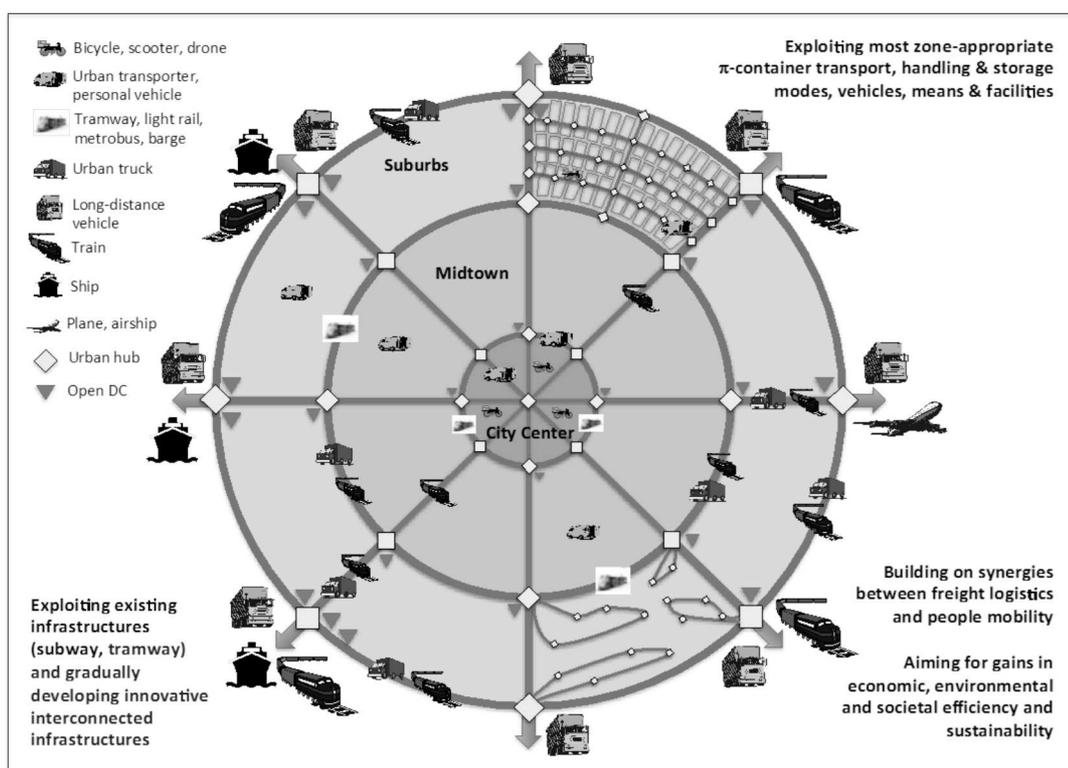


FIGURE 4.2 – Vision de la logistique urbaine hyperconnectée (source :CRAINIC et MONTREUIL (2015))

Ainsi, une vision Internet Physique de la ville serait basée sur une logistique urbaine hyperconnectée dans laquelle tous les composants seraient destinés à une interconnexion efficiente et intégrée à tous les niveaux. Les biens seraient déplacés dans les PI-conteneurs modulaires et intelligents. Les véhicules seraient adaptés au transport de ces PI-conteneurs. Ils seraient également peu, voire pas, polluants et conçus pour répondre aux contraintes d'un déplacement en ville. Les marchandises pourraient transiter dans la ville via des PI-hubs, multimodaux et efficaces, équipés de chariots de manutention également intelligents et PI-compatibles.

Le champ de recherche lié à cette logistique hyperconnectée est vaste. Certains axes de

recherche interviennent plutôt à un niveau conceptuel et contribuent aux réflexions sur les briques de base à mettre en place. D'autres sont orientés vers l'évaluation et la validation de PI. Nous positionnons nos travaux dans la deuxième catégorie. Nous ne cherchons pas à définir le concept mais à l'appliquer tel qu'il a été défini, notamment par CRAINIC et MONTREUIL (2015). Nous travaillons sur l'usage plutôt que sur le développement de PI à l'échelle de la ville. Plus particulièrement, nous nous intéressons au gain de performance obtenu par un CDU dont l'organisation interne et externe serait dictée par ce concept.

Pour cela, nous allons faire un zoom encore plus fin sur les PI-hubs. Dans la proposition faite par CRAINIC et MONTREUIL (2015) et illustrée par la figure 4.2, ceux qui sont représentés n'assurent pas tous la même fonction et n'ont pas tous la même taille. Nous allons montrer en quoi ces PI-hubs peuvent être assimilés à des éléments déjà décrits dans ce manuscrit, dont le CDU. Nous détaillerons les similitudes qui nous permettent d'affirmer que ce dernier peut être considéré comme un PI-hub ; ainsi que les modifications que cela implique sur son fonctionnement.

II Un CDU dans Internet Physique

II.1 La notion de PI-hub

Un PI-hub est une plateforme de crossdocking ne gérant que des PI-conteneurs. Il peut être décrit à deux niveaux. D'abord, d'un point de vue général, les PI-hubs ont un rôle de routeurs en tant que nœuds du réseau. Les biens sont déplacés de PI-hubs en PI-hubs autour de la planète. Ensuite, on peut avoir une vision plus micro et s'intéresser au fonctionnement interne d'une telle installation.

En effet, la puissance de PI ne réside pas uniquement en l'utilisation d'un réseau intelligemment maillé et ouvert, mais aussi sur une nouvelle gestion des marchandises au sein des points de transfert. Cette organisation repose sur une amélioration de l'agencement physique des PI-hubs et de l'accessibilité à l'information sur la marchandise tout au long de son acheminement. Ce point est fondamental car il permet d'entrer dans un processus d'anticipation.

Dans Internet Physique, les flux de produits sont optimisés grâce à la prise en compte de l'origine et de la destination d'un bien dès sa fabrication. Quand bien même notre sujet d'étude est local et réduit (la ville), il faut, dans une optique PI, toujours penser global. Ainsi, les quais de chargement/déchargement d'un PI-hub sont également modulables et adaptables à la marchandise qui arrive. En outre, l'utilisation de PI-conteneurs apporte de la flexibilité au système en facilitant la manutention qu'elle soit manuelle, mécanisée, automatisée voire robotisée.

Grâce au traçage informatique des PI-conteneurs, le gérant d'un PI-hub est capable de

définir le prochain routage des marchandises avant même leur arrivée. Le conducteur sait alors en amont le quai auprès duquel il doit se garer pour décharger puis charger la prochaine tournée. Nous montrons dans la figure 4.3 ce à quoi pourrait ressembler un PI-hub routier. On voit dans cette figure que le routage des PI-conteneurs, au sein même de la structure de crossdocking, est orienté.

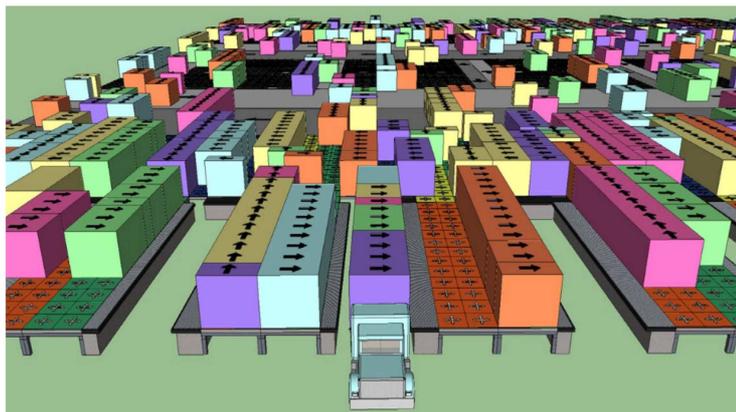


FIGURE 4.3 – Un exemple de PI-hub routier (source :MONTREUIL et al. (2014))

II.2 Les PI-hubs de la logistique urbaine hyperconnectée

Malgré la définition générale d'un PI-hub donnée ci-dessus, il est légitime de s'interroger sur la place d'une telle structure dans un contexte urbain. Effectivement, les plateformes de crossdocking, telles qu'illustrées par la figure 4.3 sont plutôt de grosses infrastructures localisées en périphérie ou à plusieurs kilomètres des villes.

Nous proposons d'adapter les travaux de CRAINIC et MONTREUIL (2015) à l'échelle d'une ville européenne de taille moyenne. Dans ce contexte, la zone étudiée est certainement plus petite que celle présentée par les auteurs. Nous restreignons à la partie "City center" du schéma de la figure 4.2. Cependant, le même niveau de détails que dans la partie "suburbs" serait observable (voir Figure 4.4).

En effet, si l'on s'intéresse de plus près à ces multiples hubs, on s'aperçoit qu'ils correspondent aux éléments structurants de la logistique urbaine déjà existants. Nous soutenons qu'à notre échelle d'observation, un PI-hub en zone urbaine peut tout à fait être une aire de livraison ou un Point d'Accueil des Marchandises (PAM). Le rôle de ces Espaces Logistiques Urbains est le même que celui d'un PI-hub : effectuer un routage et un transfert de charge de la marchandise.

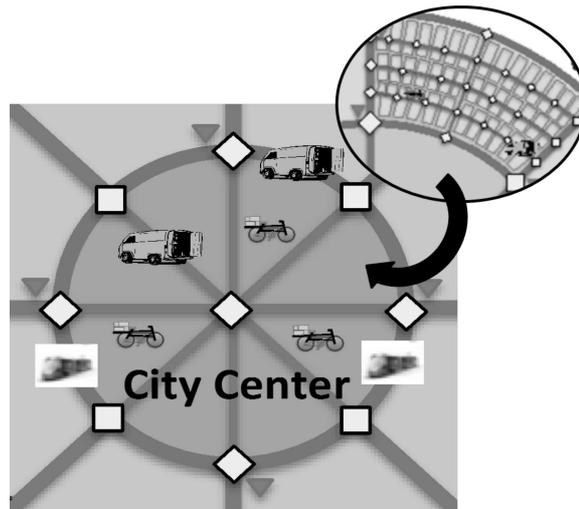


FIGURE 4.4 – Détail de la zone d'étude (adapté de CRAINIC et MONTREUIL (2015))

En abordant les choses de cette manière, il apparaît alors que PI ne consiste pas en une révolution, ni même en une utopie, mais une mise en cohérence et en commun de tous les moyens logistiques disponibles dans la ville. Prenons l'exemple des Boîtes Logistiques Urbaines (BLU) qui fonctionnent actuellement comme des casiers sécurisés recevant la marchandise. Dans une logistique urbaine hyperconnectée, les PI-conteneurs feraient office de BLU et pourraient être ré-utilisés par la suite.

Finalement, l'idée de PI est de chercher un optimum global plutôt qu'un optimum local. Pour cela, il ne s'agit pas de tout jeter pour tout refaire, mais bien de faire évoluer les infrastructures actuelles pour qu'elles deviennent PI-compatibles. Dans notre cas, la logistique urbaine est une aubaine car elle regorge d'éléments structurants dont les principes reposent sur les fondements de PI, à savoir : la mise en commun des moyens (CDU, ZLU, par exemple), la synchronisation intelligente des flux (BLU, PAM) et le maillage du réseau (PAV, utilisation des transports en commun). Il est donc envisageable d'utiliser les concepts existants pour imaginer une ville dans laquelle la logistique serait hyperconnectée.

Dans une telle ville, le premier point d'entrée serait un PI-hub dont la mission principale serait le routage et l'organisation d'une pénétration optimale dans la ville. Une infrastructure de ce type semble correspondre à un CDU. C'est la raison pour laquelle, nous montrerons dans la sous-section suivante en quoi un CDU peut être envisagé comme un PI-hub.

II.3 Le CDU : un PI-hub

Selon nous, le CDU peut avoir le rôle d'un PI-hub. Nous proposons de développer les modifications que cela engendrerait sur son fonctionnement interne et externe, au sein d'une logistique urbaine hyperconnectée. Nous adoptons, ici, une vision dans laquelle l'ensemble de

la logistique serait organisée selon le concept de PI. Il s'agit donc d'une situation projetée. Nous sommes, toutefois, conscients que des phases transitoires sont nécessaires pour atteindre ce niveau d'intégration.

Tout d'abord, et d'un point de vue très pratique, dans un "PI-CDU" seuls des PI-conteneurs circuleraient et il n'y aurait alors plus ni de colis ni de palettes à manipuler. Les moyens de manutention seraient adaptés à ceux-ci et le personnel formé à leur utilisation. De plus, le traçage, via des puces RFID, de chaque PI-conteneur permettrait de scanner le contenu d'un camion sans avoir à le décharger mais surtout sans avoir à scanner chaque conteneur un par un. Ainsi, un gain de temps serait observé au déchargement par rapport à la situation actuelle.

Ensuite, la constitution des tournées aurait lieu en amont de l'arrivée des véhicules grâce à un accès fiable aux informations relatives au contenu des véhicules mais aussi aux véhicules directement. De cette manière, à l'arrivée d'un véhicule, le personnel devrait déjà savoir quel PI-conteneur prendre et surtout à quelle tournée il sera affecté. En outre, un véhicule à destination du CDU pourrait déjà contenir une grande part de marchandises à destination d'une même zone de la ville et voir sa cargaison complétée à son arrivée sur la plateforme.

Les changements les plus importants, induits par l'Internet Physique, auraient surtout un impact sur l'organisation des livraisons effectuées depuis le CDU. Cela s'explique par l'intégration de ce CDU, en tant que PI-hub, dans un réseau global et ouvert. Ainsi, grâce à la coordination entre les couches routage et liaison de PI (BALLOT et MONTREUIL 2014 ; MONTREUIL et al. 2012), un PI-CDU bénéficierait d'une meilleure visibilité sur son activité. Cette anticipation permettrait un ajustement régulier des moyens humains avec les moyens matériels, ce qui améliorerait considérablement la sous-charge potentielle. Cette anticipation se traduit également par une meilleure planification des tournées de livraison et de ramasse. Le CDU pourrait avoir accès bien en amont des livraisons qu'il sera en mesure d'effectuer dans la semaine. Ainsi, il pourrait organiser les tournées en concordance avec les destinataires. En outre, l'utilisation du réseau maillé augmenterait les points de livraison asynchrones tels les PAM ou les BLU.

D'autre part, du fait des PI-conteneurs, qui sont plus adaptés et ajustés à leur contenu, et à la planification amont, qui permet un meilleur groupage des flux, PI devrait permettre une amélioration des taux de remplissage des véhicules et de mutualisation des tournées. En effet, la logistique urbaine s'inscrivant dorénavant dans un contexte global, il n'y a pas de raison que ce phénomène n'ait pas lieu à cette échelle. De cette manière, on observerait une augmentation du nombre de livraison en un temps identique voire plus faible (dans le cas de l'aire urbaine).

D'ailleurs, le positionnement qui consiste à voir le CDU comme un nœud du réseau d'Internet Physique plutôt que comme le dernier maillon de la chaîne logistique présente l'intérêt de stimuler les processus de logistique inverse. En effet, la force de PI est de proposer une solution

dans laquelle chaque étape de déplacement d'une marchandise est anticipée dans le but d'avoir un cran d'avance sur son trajet. De cette manière, il est toujours possible de planifier des tournées de ramasse cohérentes avec les tournées de livraison des véhicules. De plus, on peut même imaginer des situations dans lesquelles la marchandise récupérée est directement livrée chez le destinataire sans passage par le CDU. Alors, il n'y aurait plus de retour systématique après la livraison en ville et le véhicule (et son conducteur) pourrait soit effectuer une autre tournée avec la marchandise collectée, soit se rendre dans un autre CDU, plus proche, pour s'approvisionner. Les tournées pourraient être plus longues et plus remplies. Ce choix est d'ailleurs certainement plus intéressant puisque, comme nous l'avons montré dans le chapitre 2 de ce manuscrit, les allers-retours sont la source de dépenses importantes pour le CDU. En évitant les retours au CDU tout en assurant une charge de travail cohérente aux livreurs, les coûts devraient être améliorés.

Enfin, et toujours par rapport à la prise en compte d'un réseau plutôt que d'un élément isolé, dans un contexte PI le CDU ne serait pas le seul autour de la ville (CRAINIC et MONTREUIL 2015; FAURE et al. 2014). En effet, l'interconnexion se caractérise par un ensemble de hubs répartis uniformément autour de la ville afin d'offrir une couverture spatiale améliorée et réactive. Les points de livraison ne sont pas à des kilomètres mais juste à côté, ce qui permet d'ajuster rapidement les tournées en cas d'imprévu. Par conséquent, les PI-CDU se partageraient les flux de manière organisée. Bien que le modèle économique que nous avons proposé dans le chapitre 2 soit celui d'un CDU, on peut tout à fait expliquer la pertinence d'une organisation en multi-CDU.

Effectivement, comme nous le rappelons avec la figure 4.5, la part de flux qu'un CDU peut capter tout en étant rentable est limitée. Si l'on réplique le modèle indépendamment à chaque CDU autour de la ville, on voit alors qu'il est avantageux pour chacun de partager le marché accessible. Ce dernier point est d'ailleurs un élément clé puisqu'il va permettre de dimensionner le réseau d'une logistique urbaine hyperconnectée capable d'améliorer la répartition des flux dans la ville, le nombre de véhicules mais aussi la coordination entre les différents acteurs. L'Internet Physique semble répondre aux enjeux locaux des zones urbaines.

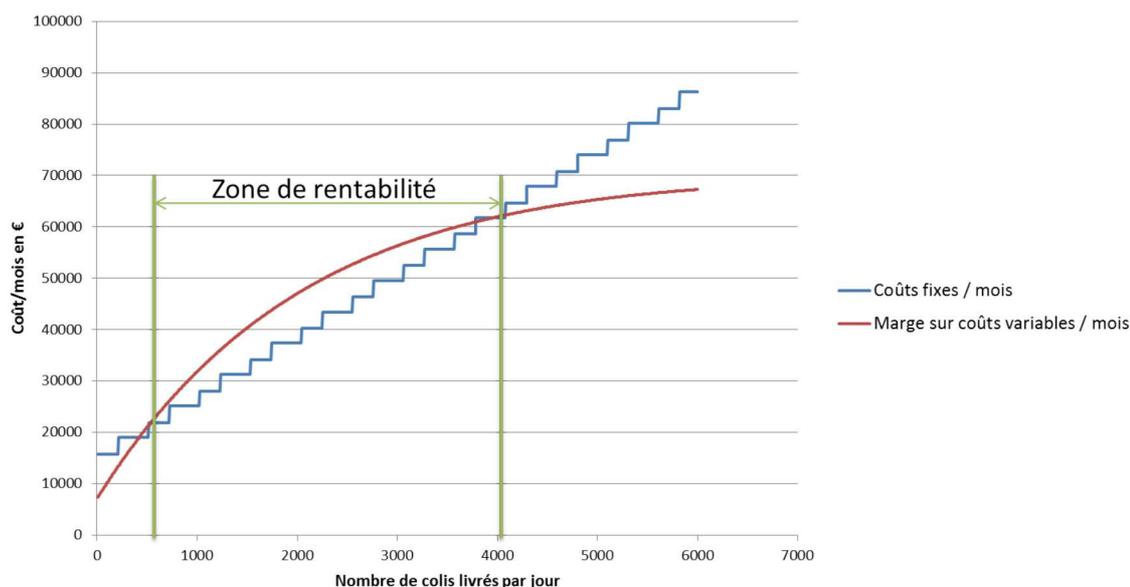


FIGURE 4.5 – Exemple d’une évolution de marge sur coûts variables

Néanmoins, notre étude est focalisée sur la rentabilité d’un CDU. C’est la raison pour laquelle, nous resterons concentré sur la performance d’un CDU en tant qu’entité d’un système plus global autour duquel gravitent plusieurs CDU.

Organisation actuelle	Organisation Internet Physique
Multiples contenants (colis, palettes, etc.)	PI-conteneurs
Codes barre propres à chaque transporteur	Puces RFID ou autres technologies alternatives
Scan de chaque colis/palette	Scan d’un ensemble de PI-conteneurs
Constitution des tournées au moment de l’arrivée du fret	Planification des tournées avant l’arrivée du fret
Prise de rendez-vous occasionnelle	Planification des tournées en respectant les disponibilités des destinataires
Peu de prévisions sur la journée de travail du personnel	Mise en adéquation des moyens humains et matériels
Remplissage au maximum des véhicules mais avec beaucoup de vide	Remplissage optimisé
Peu de tournées de ramasse	Une logistique inverse intégrée
Organisation de tournées entre le CDU et le centre-ville	Organisation de tournées entre le CDU, le centre-ville et des points en périphérie
CDU unique autour de la ville	Multiples CDU autour de la ville

TABLE 4.1 – Modifications entraînées sur le CDU par PI

Le tableau 4.1 synthétise les modifications engendrées par une organisation de la logistique d'un CDU en adéquation avec les préconisations d'Internet Physique. Nous présentons dans la section suivante les impacts attendus de cette organisation sur la performance du CDU.

III Impacts potentiels sur la performance

III.1 Retour sur les leviers du modèle et leurs interactions avec PI

Nous avons introduit dans les sections précédentes ce que serait la logistique urbaine et plus particulièrement un CDU dans un "monde Internet Physique". Nous souhaitons dans cette section faire un premier état des lieux de la performance envisagée du CDU dans ces conditions de fonctionnement. Pour commencer, nous proposons de reprendre les leviers et actions identifiés dans le chapitre 3 et d'anticiper l'effet de PI sur ceux-ci.

Nous avons relevé deux types d'actions susceptibles de modifier la performance du CDU : des actions endogènes ou des actions exogènes. Selon nous, PI ne peut pas, dans sa description actuelle, avoir un effet sur l'intégralité de ces leviers. En effet, malgré le vaste champ d'actions de PI, certains leviers relèvent plus de propriétés intrinsèques à l'environnement que de décisions humaines et donc modifiables par le réseau de distribution. Ainsi, nous avons reporté dans le tableau 4.2 les paramètres sur lesquels l'organisation de la logistique du CDU selon les principes de l'Internet Physique peut avoir un impact et ceux sur lesquels PI n'a pas d'effets. Nous les noterons respectivement PI actif et PI inactif.

	Paramètres résultant d'actions exogènes	Paramètres résultant d'actions endogènes
PI inactif	Taux de congestion, Morphologie de la ville, Coût de l'énergie	Localisation précise de l'adresse, Autonomie et motorisation des véhicules
PI actif	Aménagement de stationnements, Paramètres de mutualisation	Taux de souffrance, Sous-charge, Localisation du CDU, Capacité des véhicules, Prix de vente

TABLE 4.2 – Champ d'action de PI

Pour commencer, nous considérons que PI ne va pas agir sur le Taux de congestion. Bien que le nombre de véhicules de transport de marchandises devrait être diminué grâce à une meilleure mutualisation et coordination des livreurs avec les destinataires, la congestion dans une ville de taille moyenne européenne est essentiellement due aux véhicules de particuliers. En effet, nous traitons ici de la congestion subie par les véhicules de livraison (ou de ramasse). Or sa principale

source est l'accumulation des voitures, qui cherchent à se garer, qui déposent une personne etc. Ainsi, selon nous l'Internet Physique ne va pas changer les modes de fonctionnement des particuliers et ne pourra donc pas agir de façon notable sur la congestion.

Ensuite, la morphologie de la ville, responsable de la distance parcourue, ne sera pas modifiée par PI. La répartition des flux peut être faite de manière plus efficiente mais sa forme ne pourra pas être changée. C'est la raison pour laquelle, nous décidons que PI sera peu impactant sur ce paramètre.

Le coût de l'énergie est dépendant du marché national voire mondial. Si les codes du transport et de sa mise en concurrence risquent d'être bouleversés par les mutations des pratiques induites par PI, ce n'est pas le cas du marché des fournisseurs d'énergie. L'accessibilité à l'énergie ne sera pas modifiée par la mise en place d'une logistique urbaine hyperconnectée. Nous considérons pour cette raison que ce levier ne sera pas mobilisable par Internet Physique pour améliorer la performance d'un CDU.

Nous avons identifié dans le chapitre 3, la recherche précise de l'adresse de livraison comme une action d'amélioration possible. Cela consiste à améliorer le temps qu'un livreur peut passer à chercher l'emplacement exact d'un destinataire. Dans un PI-CDU, malgré l'apport des technologies et l'accès facilité aux informations concernant la destination de la marchandise, cette dernière étape avant la remise du colis ne sera pas plus modifiée que par l'utilisation d'un GPS et la connaissance terrain. Ainsi, PI ne pourra pas être actif sur cette action.

Enfin, l'autonomie et la motorisation des véhicules restent dans le champ de développement du secteur automobile. Certes l'Internet Physique va engendrer des nouveaux systèmes de chargement des PI-conteneurs sur les véhicules mais il ne sera pas à l'origine des avancées sur les motorisations. En revanche, les acteurs de la logistique urbaine hyperconnectée, et notamment un PI-CDU, seront équipés par les véhicules ayant la plus grande autonomie et la motorisation la plus économique (d'un point de vue monétaire et environnemental).

Les autres leviers, présentés dans le chapitre 3, ont, selon nous, la possibilité d'être mobilisés différemment dans un contexte d'Internet Physique. Nous détaillons dans la sous-section suivante les effets attendus sur la performance du CDU.

III.2 La performance du CDU dans ce contexte

Au regard du fonctionnement décrit dans les sections précédentes, les performances physiques et économiques du CDU devraient être améliorées. Pour mémoire, nous avons décomposé le processus de livraison par le CDU en différents temps en nous inspirant des définitions apportées par le TRG (voir figure 3.2). A partir de cela, nous avons défini des ratios caractérisant la performance physique du système qui sont le Taux de Qualité (TQ), le Taux de Performance (TP), la Disponibilité Opérationnelle (DO), le rapport du Temps Requis sur le Temps d'Ou-

verture et enfin le Taux de Rendement Global (TRG). Nous décrivons dans cette sous-section l'impact sur ces indicateurs d'une livraison faite par un CDU organisé selon les principes de PI.

Tout d'abord, le maillage régulier du réseau offrira des points de stationnement intelligemment placés à l'intérieur de la ville et de sa zone centrale. Les véhicules de livraison bénéficieront d'aires de livraison connectées qu'ils pourront réserver et qui seront sécurisées de telle sorte qu'elles seront plus facilement disponibles. De plus, l'aménagement de ces PAV sera tel que la manœuvre aura lieu rapidement. On observera donc une diminution du Temps lié à la recherche et au stationnement en lui-même.

En outre, la planification amont des flux aura pour effet d'améliorer la mutualisation et le remplissage des véhicules. Les arrêts seront moins fréquents dans une tournée puisque plus de destinataires pourront être livrés à partir d'un même stop et plus de colis seront déposés. La partie roulée du Temps Utile sera certainement réduite tandis que la partie "autre" sera plus importante. On devrait voir une inversion des proportions. Finalement, le Temps Utile devrait être relativement stable voire légèrement amélioré. D'un point de vue physique, cela n'a aucun intérêt si les sources de gaspillage, telles que le Taux de souffrance, les pannes ou encore la congestion, n'ont pas été éliminées, le cas échéant réduites. D'un point de vue économique, le Temps Utile est lié aux coûts variables. Ils sont d'ailleurs proportionnels à celui-ci. Ainsi, plus le Temps Utile sera faible moins ces coûts seront importants. Il y a donc un intérêt général à travailler sur cette valeur.

Puis, l'anticipation, omni-présente dans la définition de l'Internet Physique, l'ajout de points de livraison de proximité dans le réseau (comme les PAV ou les BLU) et la manutention plus simple vont réduire le taux de souffrance. En effet, dans un PI-CDU les livraisons seront programmées en fonction des disponibilités des destinataires et les marchandises seront chargées dans des PI-conteneurs sécuritaires et protégeant le contenu. La mise en place de PI doit donc entraîner une amélioration du Taux de Qualité (TQ) du CDU dans son processus de livraison.

Ensuite, et comme nous l'expliquions dans la sous-section précédente, un CDU au cœur d'un réseau Internet Physique n'organisera plus ses tournées comme il le fait actuellement avec un retour systématique au CDU. En effet, le véhicule pourra être amené à continuer sa route ou à rejoindre un autre CDU une fois ces livraisons terminées. C'est pourquoi la Disponibilité Opérationnelle (DO) devrait être meilleure dans ce contexte, de même que les coûts variables qui dépendent de la distance parcourue en allers-retours vers le CDU. Ce levier est donc important puisqu'il agit sur les performances physiques et économiques du CDU.

D'autre part, le quotient entre le Temps Requis et le Temps d'Ouverture ($\frac{TR}{TO}$) sera également amélioré en raison de la diminution de la sous-charge de travail. Nous avons expliqué dans la section précédente que PI permettait de mieux accorder les moyens humains et matériels. De

plus, il implique l'ajout systématique d'activités complémentaires à la livraison telles que des tournées de ramasse, de la récupération de PI-conteneurs vides ou encore de la maintenance d'Espaces Logistiques Urbains. Ce gain apportera une amélioration générale de la performance du CDU indiquée par la valeur du TRG (FAURE et al. 2015).

Enfin, l'ajustement de la capacité des véhicules via l'utilisation des PI-conteneurs agit sur les paramètres de mutualisation (on peut charger plus de marchandises à destination d'une même zone) mais surtout sur les coûts fixes du CDU. En effet, on peut, dans ces conditions, livrer plus de colis à moyens constants. La courbe de coûts fixes aura donc une pente plus douce. De plus, la politique de facturation sera, sans doute, modifiée par PI. Les codes de la concurrence vont être chamboulés tout en laissant à chacun la possibilité d'exister. Effectivement, il n'est pas question de diminuer le volume de marchandises entrant et sortant de la ville mais uniquement de changer les règles de fonctionnement afin d'obtenir un ensemble plus cohérent. Ainsi, on peut penser que le mode de tarification et le prix du marché actuel sera modifié.

Nous avons décrit dans ce chapitre les mutations entraînées par PI et l'évolution de la performance qui devrait être observée. Nous proposons d'aller plus loin dans la démarche en appliquant le concept à un cas d'étude. Cela sera l'occasion de valider le travail exposé et de quantifier l'effet catalyseur de l'Internet Physique sur les performances économiques et physiques d'un CDU.

Chapitre 5

Etude de cas

Nous proposons dans cette étude de cas de tester l'influence d'un panel de leviers d'actions et de paramètres parmi ceux présentés dans les chapitres précédents. Dans un premier temps, nous étudierons, à partir de cas théoriques, l'impact de trois paramètres exogènes : le coût de l'énergie, le colis moyen et la distance parcourue en fonction de la morphologie de la ville. Ensuite, un cas réel sera introduit pour tester l'influence de plusieurs leviers d'actions endogènes : la réduction du nombre de colis en souffrance, l'ajustement de la capacité des véhicules et, enfin, la politique de facturation du service de livraison.

I Etude de l'influence de trois paramètres exogènes

I.1 Les paramètres choisis

Le modèle physique, basé sur le Taux de Rendement Global, a permis d'identifier des leviers d'actions possibles pour améliorer la performance opérationnelle du système de livraison du CDU et par conséquent sa performance économique (comme cela a été montré dans le chapitre 3). Cette identification peut être faite à plusieurs niveaux d'intervention.

D'une part, l'analyse théorique (telle que celle qui a été conduite dans le chapitre 3) permet de lister un ensemble d'actions ayant, *a priori*, un rôle dans la performance du système au vue de sa description physique. D'autre part, et pour un système donné, l'évaluation de chaque indicateur du TRG peut être effectuée afin de cibler les sources d'inefficacité les plus importantes et ainsi mobiliser en priorité les leviers impliqués.

L'étude de cas que nous menons dans cette partie concerne les leviers d'actions exogènes du système. Par conséquent, le contexte dans lequel ces leviers vont pouvoir être mobilisés n'est pas toujours connu. De plus, les résultats issus de l'action de ces leviers vont être subits par la suite sans possibilité de retour en arrière. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi de

les étudier en premier dans ce chapitre.

Le premier levier que nous étudierons concerne les caractéristiques en volume et en poids d'un colis moyen. En effet, notre modèle est basé sur l'utilisation d'un colis moyen, représentant l'activité de livraison. Ce colis est à l'origine de nombreuses hypothèses telles que le prix facturé du premier colis, la capacité des véhicules, les paramètres de mutualisation ; etc. Ainsi, il semble indispensable de vérifier l'effet sur le modèle économique d'une erreur sur ce paramètre. Si notre estimation de ce colis, basée sur les interviews auprès du CDU stéphanois (voir annexe A), est fautive, cela impacte-t-il fortement la performance de notre système ? D'autre part, si l'estimation est bonne mais que le marché cible du CDU évolue (par exemple, traiter des palettes plutôt que des colis), le modèle reste-t-il toujours valable ? Ce sont les questions auxquelles nous répondrons dans la sous-section suivante.

Ensuite, nous nous intéresserons à l'impact d'une variation du prix de l'énergie sur les grandeurs économiques. Ce choix se justifie par les considérations environnementales qui entourent la mise en place d'une solution de type CDU. Cette préoccupation majeure se traduit souvent par le choix de la motorisation des véhicules. Nous souhaitons, ainsi, vérifier si les frais d'utilisation sont réellement importants dans la performance économique du CDU.

Enfin, les différentes expériences de CDU à travers l'Europe, semblent montrer que les projets concluants sont ceux se situant dans des contextes géographiques particuliers (par exemple Monaco, Parme...). En plus de cela, la distance parcourue apparaît comme un facteur important dans le processus de livraison. C'est pourquoi, nous proposons, dans la dernière section de cette partie, de nous intéresser à l'effet économique produit par la forme de la ville pour le CDU. Cette morphologie représente une propriété intrinsèque que l'on peut difficilement faire évoluer sans gros changement dans la politique d'urbanisme de la ville. On peut, cependant, envisager de la moduler en choisissant une zone de chalandise plus avantageuse mais est-ce suffisant ou même nécessaire ? Serait-ce la raison pour laquelle un CDU fonctionne mieux dans une ville donnée que dans une autre ? Autant de questions auxquelles nous répondrons à la fin de cette partie.

I.2 Analyses de sensibilité

I.2.a Analyse de robustesse du modèle économique par rapport au colis moyen

On dit d'un système qu'il est robuste s'il résiste bien aux causes d'agressions ou d'altération. Dans notre cas, il s'agit de valider si le modèle reste valide, dans son comportement, malgré une erreur ou une variation sur un paramètre d'entrée, en l'occurrence le colis moyen. Nous cherchons donc à quantifier la sensibilité du modèle par rapport à une erreur sur l'estimation de ce colis moyen. L'objectif est double : vérifier que les conclusions relatives au comportement

du système sont valables quel que soit ce colis moyen et évaluer sa part d'influence dans la performance économique du CDU.

La définition du colis moyen est une hypothèse que l'on subit, ensuite, dans le modèle mais également dans la réalité. L'analyse de robustesse que nous allons conduire repose sur l'étude des dérivées partielles. Cette approche nous permettra d'obtenir des tendances sur l'implication de ce paramètre que nous validerons, dans la seconde partie de ce chapitre, par une application numérique basée sur un cas réel.

La complexité de ce paramètre est qu'il est à l'origine d'autres paramètres du modèle. En effet, la capacité (en charge) des véhicules a été estimée à partir de ce colis moyen. De la même façon, le prix facturé du 1^{er} colis ainsi que la position du colis facturé 1€ sont issus de cette estimation. Par conséquent, le nombre de véhicules nécessaires et les conducteurs associés découlent du besoin en capacité pour livrer ce colis moyen.

Dans le modèle, le colis moyen intervient lors du calcul du nombre de colis livrés par jour. C'est donc cette variable que nous considérerons. Nous commençons notre analyse en calculant la dérivée des coûts variables mensuels (C^{vm}) par rapport au nombre de colis mensuel (N^{cm}). Pour cela, nous décomposons la distance parcourue mensuellement en une distance parcourue par colis (d^c) et un nombre de colis. La dérivée est donc une constante dépendant de la distance "unitaire", du prix de l'énergie par kilomètre (c^e) et du coût d'usure des pneumatiques par kilomètre (c^u).

$$\frac{\partial C^{vm}}{\partial N^{cm}} = (c^e + c^u) \times d^c \approx 0 \quad (5.1)$$

Or, l'ensemble de ces paramètres sont très faibles (respectivement inférieurs à 0,2km et 0,2€), on peut donc les considérer comme négligeables. Le colis moyen a un effet négligeable sur les coûts variables. Ces derniers sont donc robustes à une erreur sur l'estimation du colis. Ensuite, nous nous intéressons aux coûts fixes (C^{fm}). Ces derniers sont liés au colis moyen via le nombre de véhicules et de conducteurs nécessaires. Ainsi, on peut exprimer la dérivée de la façon suivante (avec éventuellement un coefficient de relation avec le nombre de colis) :

$$\frac{\partial C^{fm}}{\partial N^{cm}} = \sum_{i=1}^n c_i^v + S^{lm} \quad (5.2)$$

Afin de pouvoir estimer l'importance de cette constante, il est nécessaire d'avoir une échelle de référence. On pourrait envisager de comparer cette constante au chiffre d'affaires (tant que c'est négligeable par rapport au chiffre d'affaires alors on peut considérer l'impact faible), néanmoins cela est difficilement réalisable face à la relation étroite entre le chiffre d'affaires et le nombre de colis. On ne peut donc pas, analytiquement, émettre de conclusion sur la

robustesse du modèle des coûts fixes vis-à-vis du colis moyen. Nous utiliserons pour cela une application numérique dans la deuxième partie de ce chapitre.

La même remarque peut être faite à propos du chiffre d'affaires mensuel (R^m). En effet, ce dernier est extrêmement lié au colis moyen via son nombre et son prix de facturation. Sa dérivée partielle en fonction du nombre de colis est, elle-même, en relation avec ce dernier.

$$\frac{\partial R^m}{\partial N^{cm}} = p_1 \ln \left(\frac{p_{N^{cm}}}{p_1} \right) \left(\frac{1 - \lambda(1 - \lambda)(1 - \lambda^{N^{cm}})}{(N^{cm} - 1)^2(1 - \lambda)^3} \right) \quad (5.3)$$

On aurait donc tendance à dire que le modèle est fortement perturbable par une erreur sur ce colis moyen. Pourtant, cela nécessite une étude approfondie étant donné que les paramètres liés à ce colis sont estimés en cohérence avec ce dernier. Finalement, on trouve essentiellement des relations de proportionnalité entre le colis moyen et, par exemple, la capacité des véhicules ou encore le prix facturé. Il semblerait alors qu'une mauvaise estimation de ce paramètre engendre plutôt une erreur relative (sur les valeurs obtenues) qu'une erreur absolue (sur le comportement). Là encore, nous nous appuyerons sur une application numérique pour valider cette analyse.

I.2.b Analyse de sensibilité du modèle à une variation du prix de l'énergie

Après avoir testé la robustesse de notre modèle face à une erreur sur une donnée d'entrée, nous voulons tester sa sensibilité à une variation sur une variable d'entrée. Il s'agit donc d'étudier l'effet d'une petite évolution d'un paramètre, ici le coût de l'énergie, sur les grandeurs économiques, toute chose égale par ailleurs afin de vérifier que le modèle reste valide si l'on doit faire face à une forte augmentation de ce coût.

Pour effectuer cette analyse, nous allons également utiliser les dérivées partielles. De plus, nous faisons le choix de normaliser l'ensemble des coûts par rapport au chiffre d'affaires. De cette manière, nous obtenons la part du coût de l'énergie vis-à-vis du chiffre d'affaires et nous quantifions, ainsi, la sensibilité du modèle à une variation du coût de l'énergie.

Tout d'abord, le chiffre d'affaires et les coûts fixes sont indépendants du coût de l'énergie. Leur dérivée partielle par rapport à cela est donc nulle (voir équations 5.4 et 5.5). Ces deux grandeurs économiques peuvent donc être considérées comme insensibles à une variation du coût de l'énergie.

$$\frac{\partial R^m}{\partial c^e} = \frac{\partial \left(p_1 \left(\frac{1 - \lambda^{N^{cm}}}{1 - \lambda} \right) + s^m + a^m \right)}{\partial c^e} = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial C^m}{\partial c^e} = 0 \quad (5.5)$$

Ensuite, les coûts variables dépendent de ce coût mais dans une proportion trop faible pour pouvoir sensiblement influencer sur la performance économique du système. En effet, si l'on dérive les coûts variables par rapport au coût de l'énergie, alors on obtient une constante égale à la distance parcourue que l'on peut comparer au chiffre d'affaires en faisant le rapport entre les deux.

$$\frac{\partial C^{vm}}{\partial c^e} = \frac{D^m}{R^m} \approx 0 \text{ lorsque } D^m \ll R^m \quad (5.6)$$

Il apparaît alors que quel que soit le nombre de colis livrés, puisque c'est de cela que dépendent la distance parcourue mensuellement (D^m) et le chiffre d'affaires, la distance est négligeable par rapport aux gains (voir équation 5.6). Cela est caractéristique de la logistique urbaine pour laquelle le nombre de kilomètres nécessaires par euro de chiffre d'affaires est faible.

Ainsi, la dérivée, exprimée par l'équation 5.6, est proche de zéro. Notre modèle reste donc valide même si une forte variation du prix de l'énergie était observée. Finalement, on retrouve un résultat plutôt logique. L'impact économique d'un choix de motorisation n'est pas tellement sur l'usage mais plutôt sur les coûts d'investissements qui en résultent et sur la capacité (en charge) qu'elle offre. Toutes considérations environnementales ou sociales mise à part, il ne s'agit donc pas de se doter des véhicules ayant le plus faible coût d'énergie mais plutôt de celui dont le rapport entre le coût d'achat (ou de location) et la capacité est le plus avantageux.

Dans la section suivante, nous utilisons un autre type d'approche pour évaluer l'impact de la morphologie sur la rentabilité du CDU : la réflexion à partir de cas génériques.

I.3 Réflexion à partir de cas génériques pour évaluer l'impact de la morphologie sur la rentabilité d'un CDU

Nous avons choisi d'utiliser des cas génériques, plutôt que des cas réels, pour tester l'impact de la morphologie sur la rentabilité du CDU. Ce choix se justifie par deux raisons. La première est l'aspect non-modifiable, dans la réalité et par les décideurs du CDU, de cette forme. Bien que la zone de chalandise soit définie par le gérant, la répartition des points de livraison, à l'intérieur de cette aire, ainsi que le réseau pour y accéder, sont subis par le CDU. Ainsi, l'utilisation de cas génériques permet de mieux correspondre à ce qu'il se passe dans la réalité.

La deuxième raison est que nous souhaitons pouvoir comparer différentes formes entre elles. Pour cela, il est nécessaire de s'assurer que l'ensemble des paramètres caractérisant les villes sont semblables, voire identiques. Ce n'est, malheureusement, pas souvent possible en réalité, les villes ayant chacune des spécifications particulières. C'est pourquoi, l'utilisation de cas génériques nous a permis d'avoir la main sur ces paramètres.

I.3.a La génération des morphologies

Nous avons, tout d’abord, développé un outil informatique permettant de générer ces villes. L’intérêt principal de réaliser cette étape par nous-même est que nous en maîtrisons, alors, tous les paramètres structurels, notamment son réseau routier et sa forme. Ce sont ces deux paramètres que nous avons utilisés.

Le point d’étude de cette section est la forme de la ville, c’est pourquoi il est nécessaire que le réseau routier soit identique pour chaque morphologie. Afin de ne pas introduire un biais relatif à ce réseau routier, nous choisissons de générer des routes suivant un quadrillage régulier tel la ville de New-York. Nous obtenons donc d’abord une grille.

Pour obtenir la forme de la ville, nous définissons, ensuite, une ellipse à partir de son grand axe et de son petit axe, puis nous procédons de façon similaire à l’utilisation d’un ”emporte-pièce”, c’est-à-dire que nous venons découper la grille initiale avec cette ellipse. Nous ne conservons alors que la partie de la grille se trouvant à l’intérieur de l’ellipse. Ainsi, plus la maille de la grille sera petite, moins l’effet de bord sera important et plus la forme de la ville sera dessinée.

La démarche que nous avons suivie est représentée par le diagramme 5.1 ci-dessous.

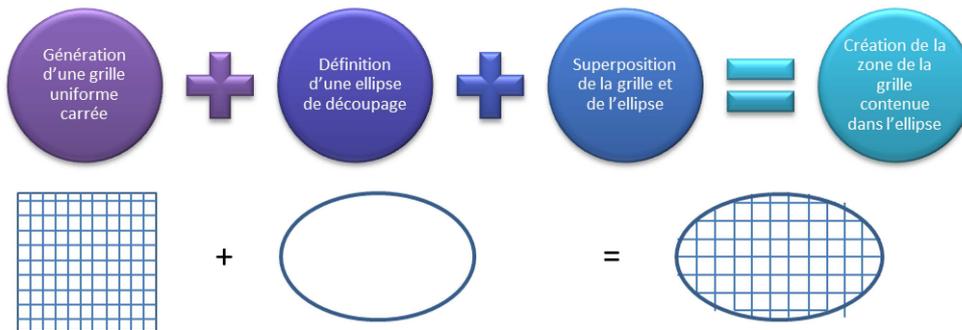


FIGURE 5.1 – Méthode d’obtention des configurations de ville

La première étape consiste donc à paramétrer la surface et la maille de ce réseau afin d’obtenir la grille initiale. Pour réaliser cela, nous avons utilisé le système d’information géographique QGis. Ce logiciel est doté d’une fonction de génération de grille dont la géométrie peut être sauvegardée dans une base de données.

Ensuite, nous avons développé un outil informatique en langage C qui permet, à partir de paramètre de grand et petit axes de l’ellipse, de générer le réseau de la ville ainsi que des points de livraison. Des copies d’écrans montrant l’interface de cet outil sont disponibles en annexe B.

Il faut préciser, ici, l’utilisation d’une ellipse pour définir la forme de la ville. Cela peut paraître surprenant, mais surtout restrictif. Il n’en est point. En effet, l’ellipse permet d’obtenir

bien plus qu'une morphologie. Etant donné que la grille de départ est carrée, si l'on choisit un des axes de l'ellipse très grand, alors on obtient un rectangle. De plus, si les deux axes sont égaux, on obtient alors un cercle. Enfin, on peut jouer aussi sur la position du centre de cette ellipse par rapport au centre du carré initial pour obtenir un plus grand nombre de formes. Ainsi, il est possible de générer au moins quatre morphologies différentes, ce qui est déjà représentatif d'une majorité des villes européennes de taille moyenne (quelques exemples ci-dessous sur la figure 5.2).

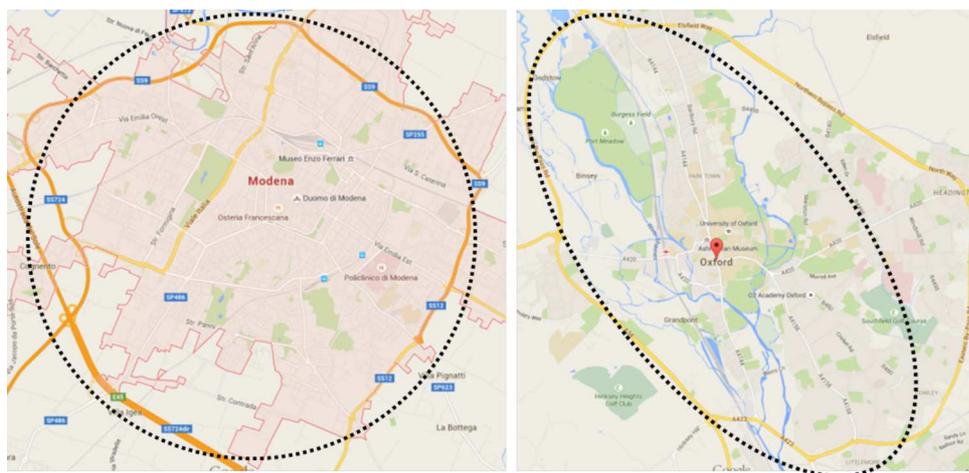


FIGURE 5.2 – Identification de la forme générale des villes de Modène et Oxford

Les principales difficultés dans le développement de l'outil ont été la génération des points sur les arcs du réseau et la reconstruction du réseau après l'ajout des points de livraison et l'intersection avec l'ellipse. En effet, la grille obtenue via le logiciel QGIS est représentée, informatiquement, par deux tables géo-référencées : les points d'intersection d'une part et les arcs entre le premier et le dernier point de chaque ligne ou colonne. Il a donc été nécessaire d'utiliser les équations de droite de chaque arc afin de générer des points de livraison sur le réseau. Ensuite, l'équation de l'ellipse a été utilisée pour sélectionner les points du réseau se trouvant dans la zone intérieure. Enfin, les arcs entre chaque point du réseau (intersection et livraison) ont été créés.

Présentation des configurations obtenues

Nous avons sélectionné deux morphologies que nous souhaitons étudier ici : le cercle et le rectangle. Ce choix permet de représenter un large nombre de villes européennes, mais aussi de mettre en évidence des différences explicites entre les morphologies. Selon nous, une forme se différencie économiquement d'une autre par la distance parcourue pour livrer tous les points du réseau. C'est la raison pour laquelle nous avons, dans un premier temps, décidé d'observer la distance parcourue à travers une ville circulaire et une ville rectangulaire pour un même nombre de points.

Nous sommes partis d'une grille de $2\text{km} \times 2\text{km}$, qui représente le réseau initial de nos villes génériques. Ce réseau est composé de rues disposées en quadrillage régulier de $20\text{m} \times 20\text{m}$. L'hypothèse que nous faisons est que si la maille est suffisamment fine, alors il n'y a pas de biais dû au réseau. En effet, notre objectif est de tester l'influence de la morphologie de la ville, à travers sa forme extérieure, sur la performance économique et non de la structure du réseau. C'est pourquoi, le maillage défini est si fin.

Afin de ne pas, non plus, introduire un biais lié à l'échelle, nous avons délibérément choisi d'utiliser des surfaces assez petites. Nous affirmons que si un phénomène est observable à une petite échelle, alors il est accentué à grande échelle. C'est la raison pour laquelle, à l'intérieur de cette aire de 4km^2 , les morphologies testées auront toutes une surface de 1km^2 . Finalement, cela revient à observer l'hyper-centre d'une ville de taille moyenne. Ainsi, pour une surface constante de 1km^2 , nous avons calculé les coefficients nécessaires pour obtenir un cercle et un rectangle. Les deux configurations, qui représentent deux villes génériques, sont illustrées par la figure 5.3.

Pour chaque configuration, nous avons placé un CDU en périphérie ouest (étoiles violettes à gauche sur la figure 5.3). A l'intérieur de chaque forme, nous avons généré, de façon aléatoire et suivant une loi uniforme, cinquante points de livraison. Ces points correspondent à des stops dans le modèle économique. Ainsi, à chaque point généré est attribué un poids, un volume et un nombre de colis à livrer. Ce nombre de colis à livrer traduit les paramètres de mutualisation du modèle économique à savoir le nombre de colis par position et le nombre de positions par stop.

Il faut noter, ici, que ces représentations graphiques ont été réalisées via un affichage par un web-SIG (système d'informations géographiques en ligne) connecté à une base de données géo-référencée. Les illustrations issues de ce web-SIG, qui seront utilisées dans cet ouvrage, ont fait l'objet d'un travail de recherche qui est précisé dans l'annexe C de ce manuscrit.

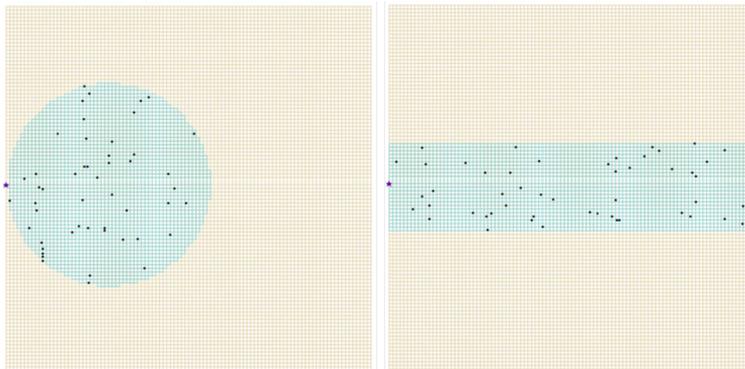


FIGURE 5.3 – Les deux configurations obtenues

Le nombre de points à générer dans la zone a été déterminé de telle sorte que la densité

soit suffisante pour observer la forme. De plus, cette valeur correspond à un niveau d'activité moyen proportionnellement à la taille de la ville choisie. Nous avons répété ce processus de génération de configurations dix fois pour chacune des formes. Afin d'obtenir une estimation de la distance parcourue pour chacune des répliques, nous avons résolu le problème de tournées de véhicules (appelé plus couramment VRP pour Vehicle Routing Problem). Ce problème, largement traité dans la littérature (BEARDWOOD et al. 1959 ; TOTH et VIGO 2002), est basé sur l'algorithme de Dijkstra, algorithme de plus court chemin. Il est important de préciser ici que nous ne cherchons pas une solution optimale au problème mais une solution raisonnable et faisable. De plus, ce n'est pas l'objet de cette thèse. Plus de détails concernant l'algorithme de résolution du VRP qui a été utilisé se trouve dans l'article d'AZAMI et al. (2015).

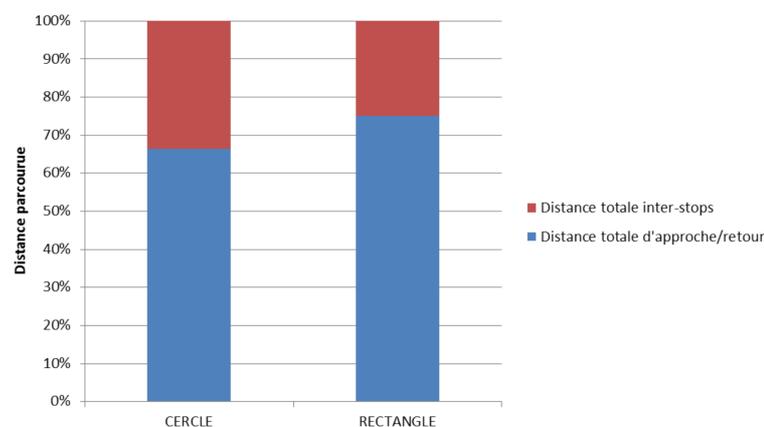


FIGURE 5.4 – Répartition moyenne des distances au sein de la distance parcourue pour une surface de 1km^2 contenant 50 stops

Les résultats provenant de la résolution du VRP pour chacune des dix répliques montrent que, contrairement à ce que l'on pensait, si une distinction entre les morphologies existe, elle ne porte pas tant sur la distance parcourue mais sur la répartition des distances qui composent cette distance parcourue (voir figure 5.4). Au cours d'une tournée de livraison, nous distinguons deux types de trajet. Il y a, d'une part, les trajets relatifs à l'approche du CDU jusqu'au premier point de livraison et du dernier stop jusqu'au CDU. C'est ce que nous appellerons le parcours d'approche ou parcours d'aller-retour entre le CDU et le premier, puis le dernier point. D'autre part, il y a le trajet pour se déplacer entre les différents points de livraison que nous avons caractérisé par la distance interstops.

Ainsi, comme on peut l'observer sur la figure 5.4, la part la plus conséquente dans la distance parcourue est la part de la distance d'approche. Cela s'explique par le plus grand éloignement des points dans le cas du rectangle. En effet, la forme rectangulaire étant plus étendue que la forme circulaire, le point le plus loin du CDU dans le cas du rectangle est plus éloigné de celui-ci que dans le cas du cercle. De plus, il semble se dessiner que plus la surface va être

importante, plus cette distance d’approche va augmenter et donc plus les formes vont être différenciées. En conséquence, nous avons donc décidé de nous attacher à évaluer cette distance d’approche en fonction de la surface et de la forme dans le but de pouvoir conclure sur l’impact sur la rentabilité de cette dernière. C’est l’objet de la sous-section suivante.

I.3.b Modélisation de la distance d’approche

Afin d’évaluer la distance d’approche du CDU à son premier client et du dernier client au CDU, nous faisons l’hypothèse que la distance moyenne du CDU à n’importe quel point de livraison du réseau est équivalente à la distance du CDU au centre de gravité de la surface dans laquelle sont répartis ces mêmes points. Dans les cas que nous traitons ici, nous avons considéré une répartition uniforme des points de livraison. De cette manière, le centre de gravité du cercle est son centre et celui du rectangle est le point de croisement des diagonales.

Si l’on superpose deux surfaces identiques, l’une circulaire et l’autre rectangulaire, on remarque bien un éloignement du centre de gravité de la forme rectangulaire par rapport au CDU (voir figure 5.5). On intuite alors que plus la surface sera grande plus la différence entre les deux morphologies sera importante. Pour cela, il est nécessaire d’exprimer ces deux distances en fonction de la surface.

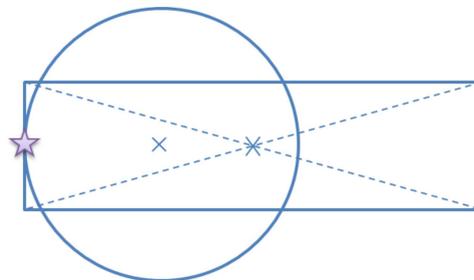


FIGURE 5.5 – Illustration de l’éloignement entre les centres de gravité d’un cercle et d’un rectangle ayant la même surface

Nous introduisons, pour cela, les notations suivantes : r est le rayon du cercle et la distance du CDU au centre de gravité lorsque le CDU se trouve en périphérie de la ville circulaire, l est la demi-longueur du rectangle (d’est en ouest) tandis que h est le hauteur (nord-sud). Ainsi la distance entre un CDU, se trouvant à l’ouest (ou à l’est) et à égale distance du nord et du sud, et le centre de gravité est l . De plus, afin de conserver les proportions du rectangle, nous posons la relation 5.7. Ces notations sont récapitulées par la figure 5.6.

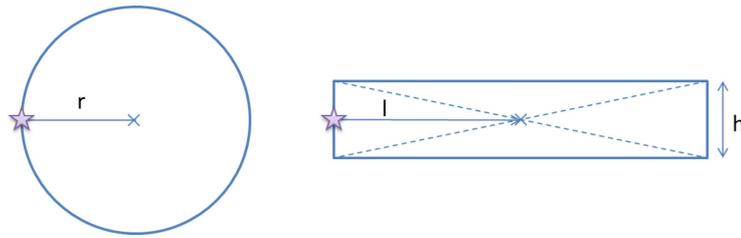


FIGURE 5.6 – Définitions pour calculer la distance au centre de gravité du cercle et du rectangle

$$l = \gamma h \tag{5.7}$$

A partir du calcul des aires de chaque surface, nous pouvons obtenir une expression des paramètres r et l :

$$S_{cercle} = \pi r^2 \iff r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \text{ avec } S \neq 0 \tag{5.8}$$

$$S_{rectangle} = 2lh, \text{ avec } l = \gamma h \iff l = \sqrt{\frac{\gamma S}{2}}, \text{ avec } S \neq 0 \text{ et } \gamma \neq 0 \tag{5.9}$$

Finalement, il est possible de tracer l'évolution de la différence entre ces deux longueurs en fonction de la surface. Nous obtenons une courbe croissante qui signifie que plus la surface augmente, plus l'écart entre les deux distances d'approche est important, comme nous l'illustre la figure 5.7.

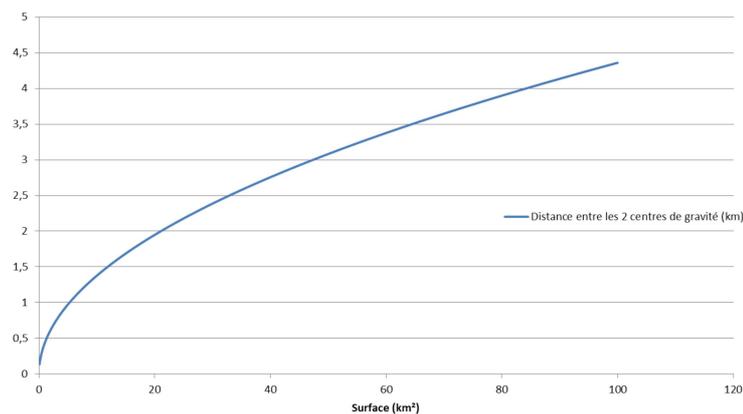


FIGURE 5.7 – Evolution de l'écart entre les centres de gravité en fonction de la surface

Néanmoins, cet écart n'est pas suffisant pour mettre en avant la différence entre les morphologies. En effet, si l'on essaye d'évaluer la marge sur coûts variables et les coûts fixes pour une surface donnée, on s'aperçoit qu'il n'y a pas toujours de différence notable d'une forme à

une autre malgré la différence dans les distances d'approche. Cela s'explique par le caractère indirectement contraignant de la distance parcourue.

Effectivement, la distance, en soi, n'est pas limitante en ville car l'autonomie en énergie (pour des véhicules motorisés) est suffisante pour réaliser l'ensemble des tournées. En revanche, le temps de tournée qui en découle est un facteur limitant. Un conducteur est contraint par un temps de travail maximal par jour qui peut être atteint par une distance parcourue trop importante. Il est donc nécessaire de s'intéresser à la surface à partir de laquelle le nombre de tournées maximales pour un conducteur change entre les deux formes entraînant un surcoût (pour le même nombre de colis, si on a besoin de plus de tournées et donc de plus de ressources). Ainsi, le paramètre de sortie à observer n'est pas tant la distance mais plutôt le temps d'une tournée.

C'est la raison pour laquelle, dans la sous-section suivante, nous présentons les résultats que nous avons obtenus lorsque nous nous sommes intéressés à l'évolution du temps d'une tournée par rapport à la surface.

I.3.c Résultats

Notre objectif est de comparer les morphologies circulaires et rectangulaires entre elles, à partir de la durée des tournées. Pour cela, nous avons utilisé la décomposition des temps du processus de livraison décrit dans le chapitre 3 sur le TRG. A partir de ces différentes étapes, nous sommes en mesure d'estimer le temps d'une tournée pour un nombre de colis donné. Le travail présenté ici est une étude de cas. Ainsi, les valeurs données aux différents paramètres permettent de représenter une situation. Il faut donc différencier les valeurs obtenues, qui sont illustratives, et les conclusions que l'on en tire.

Pour différentes valeurs de densité (en nombre de stops par km^2), nous avons estimé le temps de tournée en fonction de la surface pour chacune des morphologies. Ainsi, à iso-surface, la différence entre les formes porte sur la distance d'approche, telle qu'elle a été présentée dans la sous-section précédente. Afin de différencier clairement la forme circulaire de la forme rectangulaire, nous choisissons d'effectuer les simulations avec $\gamma = 2$. D'autre part, les valeurs que nous avons attribuées à chacun des paramètres du modèle physique, ont été choisies à partir d'interviews réalisées auprès du CDU de Saint-Etienne, notamment la capacité du véhicule correspond à un véhicule GNV adapté à la ville et actuellement sur le marché. Les précautions à prendre concernant cette estimation ont déjà été exposées dans la sous-section précédente. Les valeurs utilisées pour chaque paramètre sont récapitulées dans le tableau 5.1.

Les valeurs de densité choisies ont été sélectionnées afin de représenter des réalités de villes de tailles moyennes. De plus, il faut noter que nous avons utilisé des paramètres de mutualisation qui pourraient augmenter ou réduire le nombre de colis livrés tout en conservant une même

densité de stops par km^2 . On peut alors imaginer que quelle que soit la demande dans la ville la densité est identique mais les paramètres de mutualisation sont plus ou moins importants. De même, la fourchette de surfaces testées a été choisie suffisamment large pour représenter un maximum de réalité.

Paramètre	Valeur pour la simulation
Nb colis/position	7
Nb position/stop	2,9
Vitesse moyenne d'approche (km/h)	30
Vitesse moyenne entre les stops (km/h)	15
Temps chargement/colis (min)	1
Temps contact destin./position (min)	2
Temps A/R au camion/stop (min)	2
Temps recherche stationnement/stop (min)	5
Temps recherche adresse/position (min)	0
Pourcentage de temps perdu dans la congestion	5%
Pourcentage de temps perdu pour un colis en souffrance	5%
Capacité véhicule en nb de colis	70%

TABLE 5.1 – Valeurs utilisées pour effectuer les simulations

Enfin, à partir de la durée de travail journalière (ici 7,5h), nous avons calculé le temps maximal par tournée en fonction du nombre de tournée maximum réalisée par jour. Ce critère est important puisqu'il est au cœur du calcul des besoins en ressource pour un niveau d'activité et une zone de chalandise donnés. Nous présentons dans le graphique 5.8, et à titre d'exemple, les courbes obtenues pour une densité de 10 stops/ km^2 . L'ensemble des courbes obtenues sont consultables dans l'annexe D.

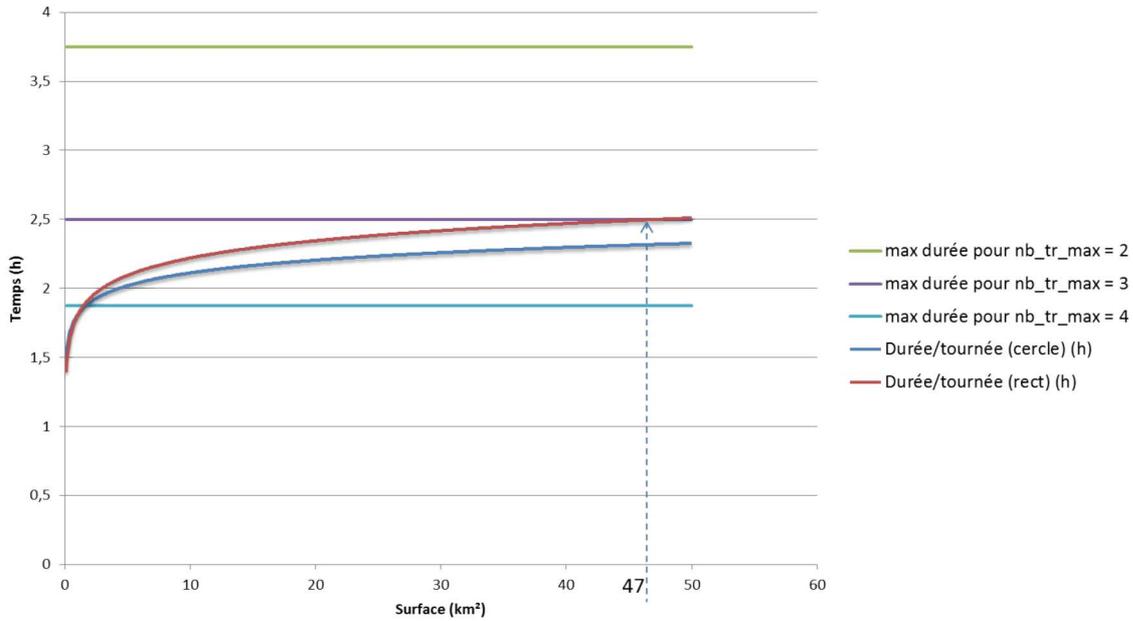


FIGURE 5.8 – Evolution du temps d’une tournée en fonction de la surface pour une densité de 10 stops/km²

On peut ainsi observer les points de décalage entre les formes. En effet, dans la courbe 5.8, présentée ci-dessus, tant que la superficie de la ville rectangulaire ne dépasse pas environ 47 km², on ne distinguera pas de différences économiques importantes avec la ville circulaire. Effectivement, les couples conducteurs/véhicules auront les mêmes contraintes sur le nombre de tournées maximal par jour. En revanche, les ressources seront moins utilisées dans la ville circulaire puisque le temps de tournée (chargement inclus) est plus court. Au-delà de cette limite, la forme rectangulaire deviendra plus pénalisante puisque les conducteurs seront limités à deux tournées par jour contre trois pour la ville circulaire. Par conséquent, soit le nombre de couples conducteur/véhicule (de capacité identique) sera plus important pour livrer le même nombre de clients, soit la capacité des véhicules devra être augmentée pour minimiser le nombre d’allers-retours et donc diminuer le temps de trajet.

A partir des graphiques obtenus pour chaque densité, on peut relever la surface correspondant aux points d’intersection entre les courbes de temps de tournée et celle de temps maximal. Il est alors possible de placer ces points sur un graphique avec en abscisse la densité et en ordonnée la surface. Nous obtenons, de cette manière, une sorte d’abaque pour chaque morphologie et chaque temps de tournée maximal (voir figure 5.9).

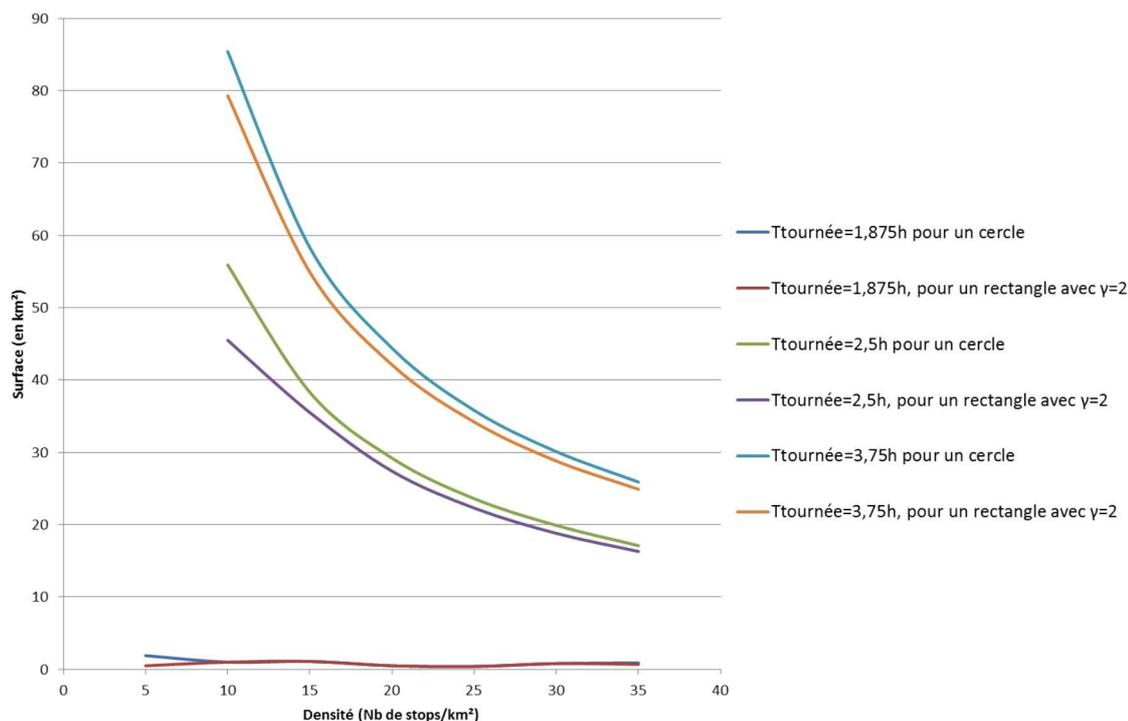


FIGURE 5.9 – Exemple d'un abaque obtenu

On remarque, en premier lieu, que les courbes concernant la forme rectangulaire sont systématiquement en-dessous de celles du cercle. Cela signifie que pour une même densité les "iso-temps" seront atteints pour une surface moins importante. Prenons l'exemple d'un temps de tournée de 2,5h pour une densité de 20 stops/km², une forme rectangulaire ne devra pas dépasser une surface de 27,4km² tandis qu'une ville plutôt circulaire pourra s'étendre sur 29,2km².

Cet abaque peut être utilisé de différentes façons. Il peut d'abord être perçu comme un apport de validation théorique à l'hypothèse selon laquelle la forme de la ville joue un rôle dans la performance économique d'un CDU à travers le temps de parcours. Ensuite, l'abaque peut servir à définir les choix tactiques liés au CDU tels que la zone de chalandise ou le taux d'activité. En effet, on peut choisir d'utiliser l'abaque soit en fixant la surface soit en fixant la densité.

Pour une zone de chalandise fixée (en forme et en surface), l'abaque sert à anticiper les ressources nécessaires en fonction du taux d'activité ou, à l'inverse, le taux d'activité envisageable en fonction des ressources disponibles. Dans l'autre sens, pour un marché bloqué à une densité de 30 stops/km², on peut déterminer la surface maximum envisageable pour un effectif donné.

Nous avons fait un zoom sur les courbes représentant un temps de tournée de 2,5h (cf figure 5.10). Cela correspond à un maximum de trois tournées par jour sur une journée de 7,5h et est assez représentatif des conditions de travail des conducteurs en ville. On s'aperçoit alors

que tant que la surface de la ville ne dépasse pas 15km^2 , environ, il n'y a aucune différence entre la morphologie rectangulaire et la morphologie circulaire. Etant donnée la superficie des villes européennes de taille moyenne, cela signifie que, dans les conditions de simulation mentionnées, la forme de la ville (ou de la zone de chalandise) n'aura que très peu d'impact sur la performance économique d'un CDU. Néanmoins, plus le niveau d'activité sera faible, plus l'écart entre les formes se creusera et plus un impact économique sera observé.

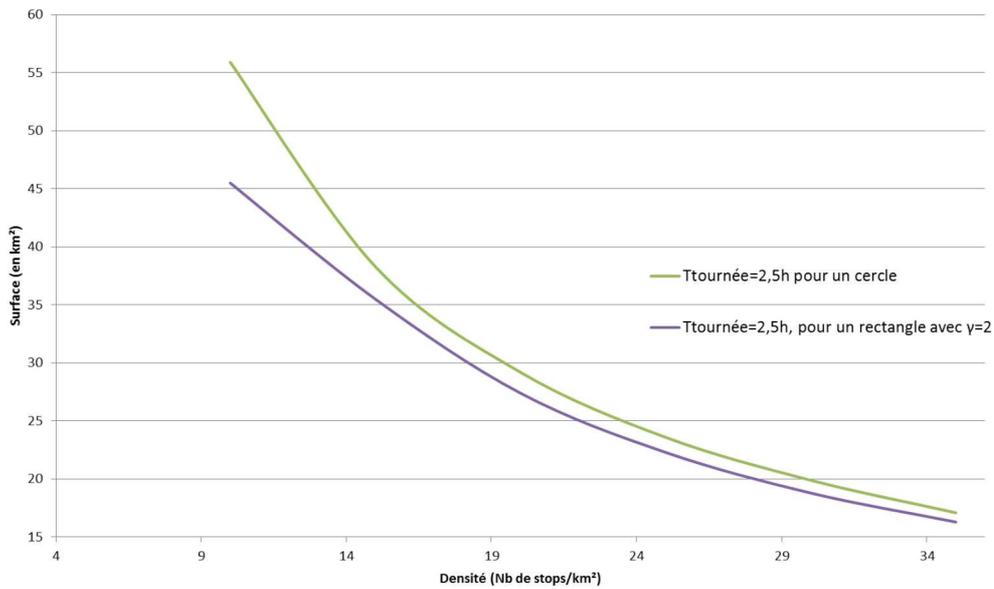


FIGURE 5.10 – Zoom sur les iso-temps de 2,5h

Cependant, il est nécessaire de rappeler que cet abaque n'est valable que dans certaines conditions. Il représente une situation pour un γ donné et dans les conditions définies de temps de chaque étape du processus. Enfin, l'abaque n'est vrai que lorsque le CDU est positionné en périphérie plein est ou plein ouest d'une ville uniformément répartie. Ainsi, pour compléter la démarche, il faudrait réaliser les abaques pour chacune de ces conditions.

Néanmoins, le travail présenté dans ce manuscrit met en avant un outil de comparaison entre les morphologies qui n'existaient pas. Il participe, également, à démontrer l'impact de celles-ci sur la rentabilité du CDU. Plus qu'une condition de viabilité, ce levier exogène apparaît comme étant au cœur des décisions tactiques pour un CDU comme, par exemple, la définition de la zone de chalandise.

II Application à un cas réel pour tester les leviers endogènes

II.1 Contexte

II.1.a Le contexte géographique

Le contexte de ce deuxième cas d'étude est la ville de Saint-Etienne. Nous souhaitons utiliser une situation réelle pour évaluer l'impact de plusieurs leviers d'actions endogènes. Le choix de Saint-Etienne s'explique par la proximité locale de la ville, qui nous permet d'avoir une bonne connaissance de son contexte. D'autre part, la ville est équipée, depuis juin 2013, d'un CDU (appelé "Simplicité"), ce qui nous a permis d'obtenir de nombreuses informations sur le fonctionnement et ainsi de vérifier notre modèle.

Saint-Etienne est une ville française située à 60km de Lyon et appartenant à la région Rhône-Alpes. La ville recense plus de 171000 habitants (chiffres 2014) et 400000 dans l'intégralité de l'agglomération. On comptabilise 2400 commerces de détails. La ville s'étend sur presque 80km² mais son centre-ville est beaucoup plus petit (moins de 4km²).

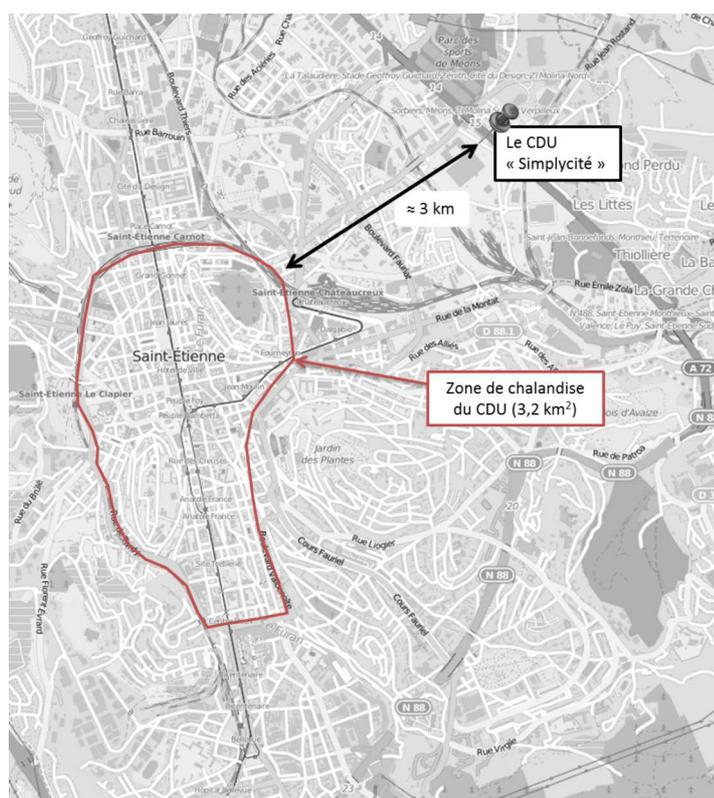


FIGURE 5.11 – Le contexte géographique du CDU "Simplicité" de Saint-Etienne

Le CDU "Simplicité" a été inauguré en juin 2013. Il est stratégiquement situé à l'est de la commune, à proximité de l'autoroute reliant Lyon, Clermont-Ferrand, Bordeaux et Marseille. Il est constitué d'un entrepôt de 500m² à une distance d'environ 3km du centre-ville. Sa zone de

chalandise est limitée à une partie du centre-ville d'une surface d'environ 3,2km² (voir figure 5.11). D'un point de vue organisationnel, il a la particularité d'avoir pour partie prenante l'agglomération, la ville, des fédérations de transporteurs et l'actionnaire-gérant. Ce modèle de gestion évolue, néanmoins, au fur et à mesure que l'expérimentation progresse et que le CDU se fait une place dans le paysage local.

Le CDU stéphanois sert de contexte de base à cette étude de cas. Nous avons, notamment, utilisé les informations récoltées auprès des différents acteurs pour effectuer les simulations que nous présenterons dans les sous-sections suivantes. De nombreux paramètres ont donc été fixés et sont identiques quel que soit le levier d'actions étudié. Les valeurs prises représentent donc, autant que possible, le contexte stéphanois et même parfois français.

II.1.b Le contexte économique et organisationnel

Le modèle que nous avons mis en place est alimenté par différents types de données : économique, organisationnelle et temporelle. Nous ne présentons, ici, que les paramètres principaux utilisés pour les volets économiques et organisationnels. L'intégralité du modèle est détaillé en annexe E. Pour plus de clarté, nous les énonçons sous la forme de tableaux (cf tableaux 5.2 et 5.3).

Paramètre	Valeur (en € /mois)
Logiciel Informatique	500
Bâtiment	920
Assurance	740
Salaire resp. niveau 1	2440
Salaire conducteur	1700
Charge resp. niveau 1	1125
Charge conducteur	510

TABLE 5.2 – Principales valeurs économiques utilisées pour effectuer les simulations

Paramètre	Valeur
Nb jours travaillés/semaine	5
Temps ouverture CDU/jour (h)	7,5
Distance moyenne du CDU au CV (km)	3
Vitesse moyenne du CDU au CV (km/h)	30
Surface du centre-ville (km ²)	3,2
Vitesse moyenne entre les stops (km/h)	15
Nb colis/position	7
Nb position/stop	2,9

TABLE 5.3 – Valeurs des paramètres organisationnels principaux utilisées dans les simulations

II.2 Les paramètres identifiés

Nous avons identifié trois paramètres dont l'impact sur la performance économique du CDU va être plus précisément quantifié : le Taux de colis en souffrance dans le système, le type de véhicules utilisé et le prix de vente de la prestation de livraison. Ce choix a été guidé par trois observations. La première concerne les valeurs obtenues lors de l'évaluation du TRG pour le scénario dit "initial", qui est présenté dans le paragraphe suivant. La deuxième est le caractère endogène des actions mobilisées pour faire évoluer ces variables. Et enfin, nous avons également choisi des variables dont les valeurs sont relativement modifiées lors d'une organisation de la logistique basée sur l'Internet Physique.

La situation initiale correspond au fonctionnement actuel du CDU stéphanois. Il est caractérisé par un taux de souffrance de 5%, l'utilisation d'une flotte mixte composée pour moitié de véhicules électriques, dont la capacité est de 70 colis (en colis moyen tel que défini dans le chapitre 2) et pour moitié de véhicules thermiques d'une capacité de 100 colis. Enfin, la tarification du 1^{er} colis est à 1,5€ et le 850^{ième} colis est à 1€. Il faut préciser que ce paramétrage concernant la tarification correspond aux prix pratiqués actuellement par le CDU. Ils sont légèrement en dessous du prix du marché pour compenser l'effort demandé aux transporteurs pour venir livrer leur fret jusqu'au CDU. Ce scénario sera noté S0 dans toute la suite de cette étude.

De plus, et afin d'être dans des zones de fonctionnement limitant les effets de bords, nous effectuerons systématiquement les relevés du TRG, et des ratios qui en sont issus, au point de fonctionnement correspondant à 30% du flux captable dans la ville. Ce point correspond à l'objectif affiché par les parties prenantes du CDU stéphanois et est donc synonyme de succès pour la structure. Le résultat de l'évaluation est présenté dans le tableau 5.4.

L'analyse de ces valeurs met en évidence l'importance d'une diminution du taux de colis en

souffrance. En effet, il est pris en compte très bas dans la processus d'évaluation, ainsi on en subit les conséquences tout au long du processus. Dans un système de production, cela revient à essayer au maximum de faire produire aux machines-goulot des pièces de bonne qualité. De plus, la présentation de l'Internet Physique montre que ce paramètre est un des premiers à être amélioré par le système grâce aux technologies de traçabilité mais aussi à une meilleure coordination entre les acteurs.

Ratio	Valeur
TQ	0,952
TP	0,991
DO	0,904
$\frac{TR}{TO}$	0,896
TRG	0,764

TABLE 5.4 – Valeurs obtenues pour les ratios du système au point de fonctionnement 30%

Ensuite, l'une des principales forces de l'Internet Physique est de répondre à la problématique des faibles taux de remplissage des véhicules observés lors des enquêtes sur le transport terrestre (BALLOT et MONTREUIL 2014). Comme l'évaluation du TRG montre également une sous-charge de travail pénalisante liée à une mauvaise adéquation entre la capacité du véhicule et la charge de travail, nous choisissons d'observer l'impact du choix de véhicule sur la rentabilité du CDU et sa performance physique. Il faut noter qu'afin de rester dans une représentation proche de la réalité, nous simulerons, en plus des PI-conteneurs, l'utilisation de modèles de véhicule adaptés à la livraison en ville et existants réellement sur le marché actuel. C'est la raison pour laquelle des motorisations différentes (par rapport à la source d'énergie), et ayant des capacités et des coûts différents, seront introduites.

Enfin, le prix de vente n'apparaît comme un paramètre influent dans le TRG (ce qui est normal puisqu'il ne fait pas partie du modèle physique), néanmoins, il paraît primordial dans le contexte actuel et dans la perspective d'une logistique organisée par l'Internet Physique. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 4, les villes de demain seront conçues autour de la collaboration et de la mutualisation nécessitant la remise en question des politiques tarifaires actuelles.

Lors de nos simulations, nous faisons l'hypothèse d'un marché accessible et disponible. En effet, afin de mettre en évidence l'évolution de l'activité d'un CDU, nous considérons que la structure a la capacité d'augmenter sa part de marché en adoptant une démarche commerciale et en effectuant du démarchage. Il s'agit donc de situations simulées et projetées. De plus, BATAIA et al. (2014) ont montré, dans des travaux prospectifs, qu'il est envisageable qu'à partir d'un certain seuil les transporteurs aient un intérêt économique à laisser leur fret au

CDU. Ainsi, l'activité pourra systématiquement augmenter dans la limite du marché qu'un CDU est capable de capter dans la ville de Saint-Etienne.

Dans la sous-section suivante, nous présentons les scénarios établis et les résultats obtenus par simulation, qui permettent de mettre en évidence l'impact de chacun des paramètres présentés ci-dessus. Avant cela, nous revenons sur l'importance de l'estimation du colis moyen dans l'évaluation de la performance du CDU. En effet, dans la section précédente, nous avons montré analytiquement qu'une mauvaise estimation du colis moyen (unité de base de nos modèles physique et économique) peut engendrer une erreur sur les valeurs mais pas sur le comportement de la marge sur coûts variables et des coûts fixes. Afin de confirmer cela, nous commençons par présenter l'application numérique que nous avons effectuée.

II.3 Résultats

II.3.a Application numérique relative à l'erreur sur le colis moyen

Nous cherchons ici à vérifier la robustesse de notre modèle économique face à une erreur dans l'estimation du colis moyen. Nous avons montré dans la section I.2.a que le chiffre d'affaires ainsi que les coûts fixes sont étroitement liés au colis moyen et nous n'avons pas pu conclure sur la robustesse du modèle de façon analytique. En effet, si l'on considère le modèle de façon générique, alors il y a des zones dans lesquelles on ne peut pas se prononcer. Il faut donc regarder plus précisément le seuil qui nous intéresse.

Pour cela, nous avons défini trois scénarios pour lesquels la capacité des véhicules est différente. Si l'on commet une erreur sur l'estimation du colis moyen alors cela signifie que le véhicule considéré peut contenir autant, respectivement moins, de colis supplémentaires que l'erreur sur son estimation. C'est pourquoi nous avons choisi un scénario dont les véhicules ont une capacité de 70 colis (c'est notre scénario de base). Puis, nous considérons les scénarios correspondant à une augmentation, respectivement diminution, de 7% de la capacité. Cela revient à ajouter ou enlever 5 colis. Les résultats que nous observons sont présentés sous forme de graphique (figure 5.12).

Tout d'abord, on remarque que la marge sur coûts variables est la même quelle que soit la capacité du véhicule. Cela s'explique par la part très faible représentée par les coûts variables comparativement au chiffre d'affaires. En effet, les coûts variables dépendent de la distance parcourue qui génère des frais relatifs à la consommation d'énergie. Or le coût kilométrique de l'énergie ainsi que la distance parcourue sont très faibles et sont finalement absorbés par le chiffre d'affaires. Ainsi, bien qu'il puisse y avoir une différence inférieure à 10€ d'un scénario à un autre, cela n'est pas visible sur la courbe mais surtout cet écart n'est pas significatif. C'est pourquoi, nous ne présenterons souvent qu'une courbe de marge sur coûts variables valables

pour l'ensemble des scénarios étudiés.

Ensuite, nous nous intéressons aux coûts fixes. La différence de capacité est visible sur ces courbes là. De façon logique, les écarts n'ont pas lieu sur la hauteur des marches mais sur leur longueur. Cela s'explique par des coûts liés à l'embauche d'un livreur et à l'achat (ou location) d'un véhicule indépendants de l'estimation du colis moyen. En revanche, la longueur des marches est la conséquence directe des capacités volumiques et de masses d'un véhicule.

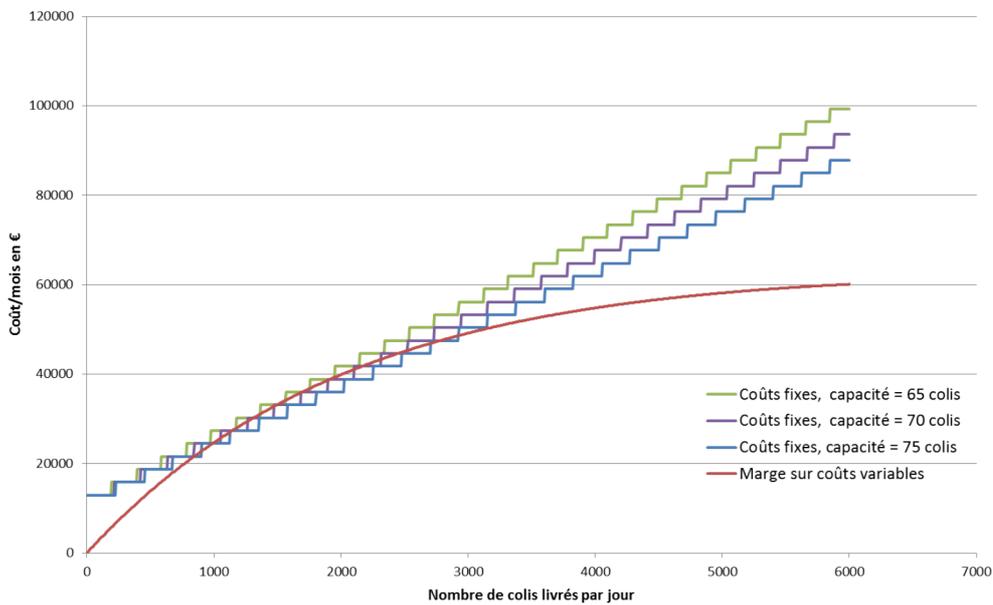


FIGURE 5.12 – Effet d'une erreur de $\pm 7\%$ sur l'estimation du colis moyen

Effectivement, plus le taux d'activité augmente (nombre de colis livrés quotidiennement grand), plus l'écart entre les courbes de coûts fixes se creusent. Néanmoins, la zone correspondant à une sorte de "régime permanent" de l'activité de livraison du CDU n'est pas le point le plus à droite de l'axe des abscisses. En effet, le CDU stéphanois sera considéré comme une réussite s'il arrive à capter 30% du flux sur son marché. Ainsi, ce point correspond à la borne maximale de notre système. Nous allons donc nous intéresser plus particulièrement à ce qu'il se passe à ce point de fonctionnement (voir figure 5.13).

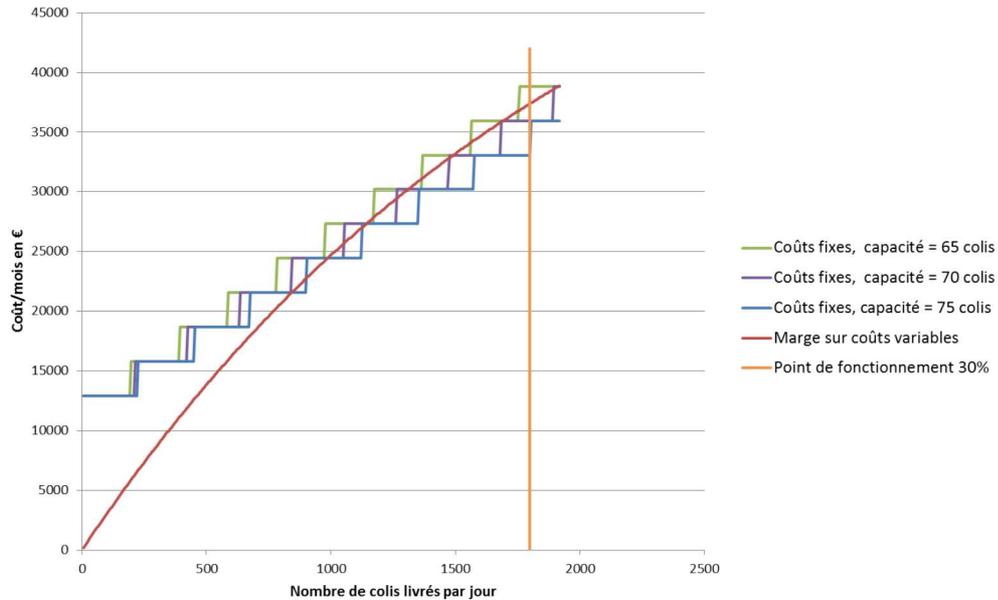


FIGURE 5.13 – Zoom sur le point de fonctionnement 30% du flux

On observe d'abord, que ce point est dans la situation la plus critique c'est-à-dire que l'erreur entraîne l'ajout ou la suppression d'un couple conducteur/véhicule. Néanmoins, si l'on calcule l'écart relatif que représente ce décalage par rapport aux coûts fixes considérés (à savoir ceux pour un véhicule avec une capacité de 70 colis), alors une erreur de 7% sur l'estimation du colis moyen engendre une erreur de 8% sur l'évaluation des coûts fixes. En effet, nous appuyons cela par les calculs suivants :

$$e^- = \frac{(C_{70}^f - C_{75}^f)}{C_{70}^f}$$

$$= 0,08$$

où

e^- : Erreur entraînée par une sous-estimation de la capacité

C_{70}^f : Coûts fixes pour un véhicule dont la capacité est de 70 colis à 30% du flux

C_{75}^f : Coûts fixes pour un véhicule dont la capacité est de 75 colis à 30% du flux

et

$$e^+ = \frac{(C_{70}^f - C_{65}^f)}{C_{70}^f}$$

$$= -0,08$$

où

e^+ : Erreur entraînée par une sur-estimation de la capacité

C_{70}^f : Coûts fixes pour un véhicule dont la capacité est de 70 colis à 30% du flux

C_{65}^f : Coûts fixes pour un véhicule dont la capacité est de 65 colis à 30% du flux

Plusieurs conclusions découlent de ces observations. D'abord, le comportement de notre modèle économique est validé. En effet, quelque soit l'erreur sur le colis moyen, l'allure des courbes reste la même. Ensuite, la robustesse du modèle est également validée à condition de rester sur notre zone d'étude, à savoir entre 0 et 30% du flux captable. Au-delà de cette échelle, les écarts se creusent et le modèle perd en précision.

Enfin, l'erreur observée sur les coûts fixes tend à montrer que les résultats des simulations devront plutôt être abordés avec une vision à long terme qu'avec une vision opérationnelle. C'est-à-dire que l'on pourra s'appuyer sur notre modèle pour pré-dimensionner le système ainsi que pour décider quel levier d'actions privilégier. En revanche, un pilotage plus opérationnel du type : quelle taille de flotte exactement, ne pourra pas être fait sans une analyse plus poussée sur l'estimation du colis moyen. Ainsi, l'ensemble des analyses faites dans cette étude de cas s'appuyera essentiellement sur l'allure des courbes et leur position relative les unes par rapport aux autres, alors que les résultats numériques seront manipulés avec précautions.

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les résultats obtenus par simulation de l'impact des trois leviers d'actions que nous avons sélectionnés. Il faut noter que l'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet de chaque levier testé sur la performance du système. Ainsi, nous choisissons de mobiliser les leviers les uns après les autres. C'est-à-dire, lorsqu'une action est étudiée alors les variables représentant les autres actions deviennent des paramètres et ainsi de suite. De cette manière, nous pourrions isoler l'effet de chacun sur la rentabilité du CDU.

II.3.b Impact d'une variation du taux de souffrance sur la performance économique du CDU

Toutes les considérations précédemment citées prises en compte, nous commençons maintenant cette étude de cas. Le premier levier d'action dont nous testons l'effet sur la rentabilité du CDU concerne la qualité de la livraison. Il se traduit par le Taux de souffrance du système. Nous allons simuler trois situations.

Le premier scénario correspond au fonctionnement actuel du CDU. C'est la situation S0 que nous avons décrite plus haut dans ce chapitre. Le Taux de souffrance de 5% a été estimé à partir d'un entretien réalisé avec le gérant du CDU. La principale cause de retour de la marchandise est l'absence du destinataire.

Le deuxième scénario que l'on simulera (noté S1b) représente une situation dans laquelle des mesures ont été prises pour améliorer la synchronisation entre le livreur et le destinataire. Cela peut se traduire par la mise en place d'un système de prise de rendez-vous. Nous estimons qu'1 % de retour pourrait être évité avec ce processus. Ainsi, le scénario S1b aura un Taux de souffrance de 4%.

Enfin, la dernière situation envisagée correspond à l'intégration du CDU dans un réseau régi par les lois de l'Internet Physique (scénario S2b). D'un point de vue organisationnel, la planification des tournées est faite plus en amont, les colis sont tracés via des puces RFID (ou autres technologies de l'information) ce qui permet au destinataire de pouvoir suivre sa marchandise et éventuellement indiquer la plage de livraison souhaitée. De plus, d'un point de vue technologique, la livraison est presque tout le temps possible grâce aux PI-conteneurs sécurisés qui offrent la possibilité d'être déposés facilement dans les BLU ou PAM de la ville. Il est encore difficile d'estimer le gain apporté par l'ensemble de ces modifications et des études devraient être réalisées pour le quantifier. Néanmoins, nous supposons envisageable réduire le Taux de souffrance à 2%.

Scénario	Taux de souffrance
S0	5%
S1b	4%
S2b	2%

TABLE 5.5 – Scénarios étudiés

Dans cette étude, nous avons simulé l'utilisation de la flotte mixte de véhicules, telle que celle qui équipe le CDU actuellement. De plus, ce dernier bénéficie de subventions de la part des collectivités que nous avons également intégrées à chaque simulation. Enfin, quelques activités complémentaires, de type tournée pour un expressiste ou stockage, sont effectuées mensuellement et donc prises en compte dans nos paramètres d'entrée. On observera donc un décalage de l'origine de la courbe de marge sur coûts variables, qui ne commencera pas au point (0, 0), mais au point (0, $s^m + a^m$), comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2.

Les résultats obtenus par les simulations ont été condensés dans le graphique 5.14. Nous appuyerons notre analyse sur celui-ci.

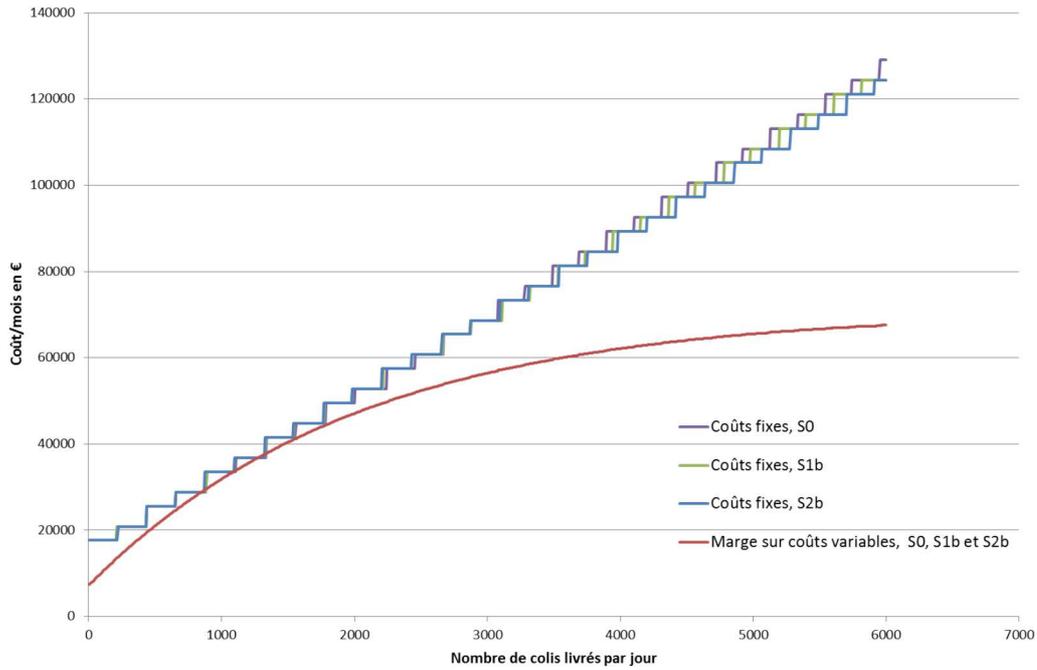


FIGURE 5.14 – Simulation d’une amélioration du taux de souffrance

Pour commencer, on n’observe pas, de manière générale, une importante différence entre les trois scénarios. Jusqu’à environ 3000 colis, il n’y a pas de décalage notable entre les courbes. Ensuite, les paliers du scénario S0 se raccourcissent puisque sa capacité est entamée par des colis qui ne seront finalement pas livrés. Ce phénomène s’explique par le nombre de colis qui peuvent être livrés dans une tournée incomplète. En effet, plus on avance dans l’axe des abscisses moins le temps entre deux stops est grand. Ainsi, pour un temps de tournée identique, plus de colis seront livrés lorsque le nombre de colis est grand. De cette manière, plus le niveau d’activité est important plus le Taux de souffrance devient pénalisant car il réduit la capacité du véhicule (on charge des colis que l’on ne livrera pas mais qui nécessitent du temps de transport). Finalement, on observe donc une augmentation progressive de la capacité entraînée par une réduction du taux de souffrance. Toutefois, on remarque que cela ne se produit pas dans notre zone d’étude (entre 0 et 1800 colis). D’un point de vue économique, le taux de souffrance a donc un faible impact.

En revanche, ce n’est pas le cas des indicateurs liés au TRG. Nous relevons toujours le point de fonctionnement à 30% (ou 1800 colis) et synthétisons les résultats dans le tableau 5.6). Tout d’abord, le Taux de Qualité est, évidemment, amélioré autant que le Taux de souffrance. C’est le propre du Taux de Qualité de mettre en évidence la performance qualitative du système. Le Taux de souffrance traduisant le rebut du processus, s’il est meilleur alors le Taux de Qualité l’est aussi.

Ensuite, le Taux de Performance est identique pour les trois scénarios. Bien que la congestion

pénalise également le temps passé pour ne finalement pas livrer un colis, les temps de parcours sont trop proches pour qu'une différence soit perceptible sur le Taux de Performance. Cela est également le cas pour la Disponibilité Opérationnelle. En effet, bien qu'une légère dégradation soit constatée du scénario S0 jusqu'au scénario S2b, elle n'est pas représentative. Elle est probablement dûe à une part moins importante du temps de tournée par rapport au temps d'aller-retour vers le CDU.

Le quotient entre le Temps Requis et le Temps d'Ouverture est également légèrement dégradé à ce point de fonctionnement puisque l'on a besoin de moins de temps pour effectuer un même nombre de livraison. En revanche, on ne se trouve pas dans une zone charnière qui permet de reculer d'une marche et donc d'économiser une ressource.

Enfin, le TRG est amélioré entre le scénario S0 et S2b puisque le Temps Requis est globalement réduit. Finalement, le Taux de souffrance est essentiellement un levier améliorant la performance physique du système plutôt qu'économique. Il apporte tout de même une source de progrès. Notamment, le scénario basé sur les performances d'Internet Physique (S2b), s'avère d'une meilleure qualité. La performance du service de livraison est donc améliorée.

Ratio	S0	S1b	S2b
TQ	0,952	0,962	0,980
TP	0,991	0,991	0,991
DO	0,904	0,903	0,903
$\frac{TR}{TO}$	0,896	0,894	0,890
TRG	0,764	0,770	0,781

TABLE 5.6 – Comparaison des performances physiques des scénarios S0, S1b et S2b pour 30% du flux

II.3.c Impact de la capacité et de la motorisation des véhicules sur la rentabilité du CDU

Nous proposons d'étudier maintenant l'impact du choix du véhicule sur la performance économique et physique d'un CDU. Nous avons sélectionné trois véhicules adaptés à la livraison en ville, présents actuellement sur le marché et envisagés lors des projets de CDU. Le premier véhicule fait partie de la flotte actuelle du CDU stéphanois. Il s'agit d'un véhicule électrique de Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) de 4,5t, de capacité de 18m³, de charge utile de 1,2t et avec une autonomie de 90km. Cette autonomie peut varier en fonction des conditions climatiques (par exemple perte d'autonomie lors de journées très froides), néanmoins, nous nous positionnons dans une situation de fonctionnement dite "normale". Il faut noter que c'est le plus gros véhicule exclusivement électrique existant à l'heure actuelle en Europe. Sa capacité,

en équivalent colis moyen, est de 70.

Le deuxième type de véhicules étudié est un véhicule thermique de PTAC 3,5t, de capacité volumique de 20m^3 , dont la charge utile est de 750kg et l'autonomie est d'environ 800km. Un tel véhicule peut transporter 100 colis moyens. Il fait également partie de la flotte du CDU de Saint-Etienne.

Le dernier véhicule est équipé d'un moteur fonctionnant au Gaz Naturel de Ville (GNV) de PTAC 4,7t et dont la capacité volumique est de 18m^3 et la charge utile de 1,2t. Si l'on traduit celui-ci en colis moyen, on obtient une capacité de 70 colis moyens. De plus, l'autonomie kilométrique est d'environ 250km.

Malgré la capacité en poids plus importante des véhicules électrique et au GNV, le nombre de colis moyens en charge est inférieur que dans un camion thermique car le volume est plus petit. En effet, les agencements actuels de ces types de véhicules (essentiellement dûs à la batterie pour l'électrique et aux réservoirs pour le GNV), réduisent l'espace disponible.

Pour finir, nous testerons également l'utilisation par le CDU et sa chaîne d'approvisionnement de PI-conteneurs. Pour cela, nous utiliserons la motorisation au GNV. Ce choix se justifie par le fait que ce type de motorisation répond assez bien aux enjeux sociétaux et environnementaux actuels. En ce qui concerne la capacité, les simulations effectuées par BALLOT et MONTREUIL (2014) montrent que l'utilisation de PI-conteneurs permet une amélioration de 15% du taux de remplissage. Dans notre modèle, les véhicules sont toujours chargés au maximum avant de "déclencher" une nouvelle tournée, nous n'observons donc pas de perte liée à un mauvais taux de remplissage. Néanmoins, de l'espace est perdu dans l'évaluation du volume possible puisque l'on ne peut pas empiler les colis. C'est la raison pour laquelle, nous faisons l'hypothèse qu'au moins 10% de ces gains peuvent être répercutés par une augmentation de la capacité du véhicule. Ainsi, nous utiliserons des PI-conteneurs offrant une capacité de 77 colis à un véhicule roulant au GNV pour décrire un scénario s'appuyant sur l'Internet Physique.

Afin d'alléger l'écriture, nous conservons la notation S0 pour parler du scénario de base décrivant la situation stéphanoise (utilisation d'une flotte mixte électrique/thermique). La notation S1c représentera un scénario composé d'une flotte uniquement électrique. S2c nommera une situation n'utilisant que des véhicules thermiques. L'utilisation exclusive de véhicules GNV sera notée S3c. Et enfin, un scénario de véhicules chargés de PI-conteneurs portera la notation S4c. L'ensemble de ces notations est repris dans le tableau 5.7 ci-dessous.

Scénario	Motorisation	Capacité	Autonomie (km)	Coût/mois (€)
S0	Elec.+ Therm.	70-100	250-800	2500-1000
S1c	Electrique	70	90	2500
S2c	Thermique	100	800	1000
S3c	GNV	70	250	650
S4c	GNV	PI-conteneurs = 77	250	650

TABLE 5.7 – Caractéristiques des véhicules étudiés

Comme pour les cas précédents, nous utiliserons les courbes de coûts fixes et de marges sur coûts variables pour décrire les résultats obtenus après les simulations (figure 5.15).

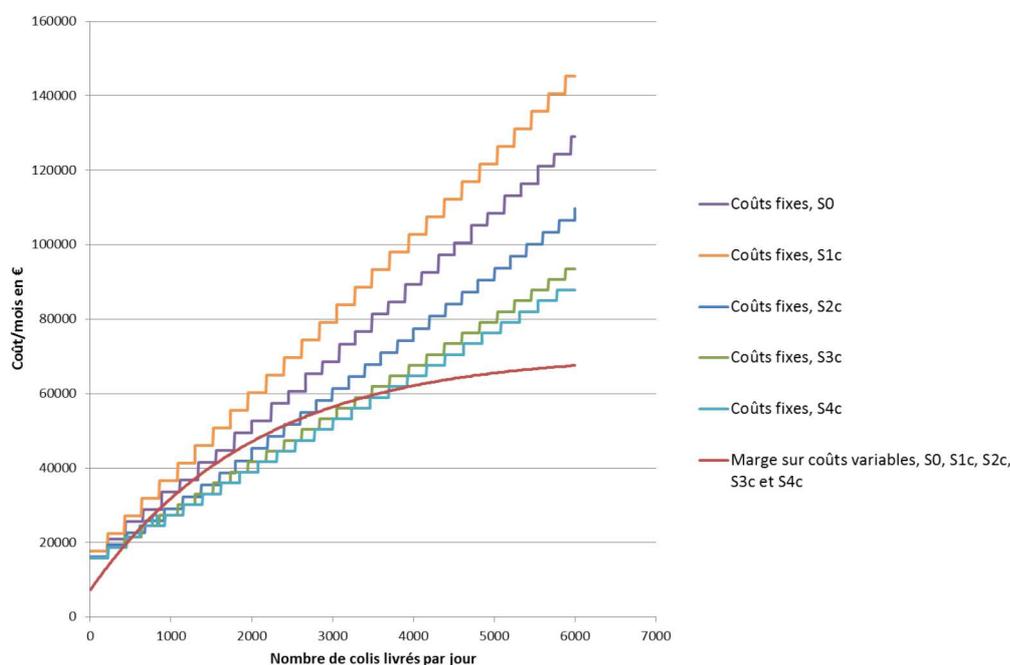


FIGURE 5.15 – Simulation de l'utilisation de différents véhicules

En premier lieu, on remarque que la marge sur coûts variables n'est toujours pas impactée par la différence de capacité des véhicules. Tout comme les deux sous-sections précédentes, la distance parcourue n'est pas assez importante pour entraîner des coûts prépondérants. En revanche, on observe bien une différence relative aux coûts fixes entre les véhicules suite à plusieurs facteurs.

Tout d'abord, les coûts d'achat/location ne sont pas les mêmes selon la motorisation. C'est, par exemple, très visible lorsque l'on compare l'utilisation des véhicules électriques (scénario S1c) et des véhicules au GNV (scénario S3c). Alors que leur capacité est identique (70 colis), la pente de la courbe de coûts fixes des véhicules électriques est beaucoup plus accrue que celle

représentant l'utilisation de véhicules GNV. Le GNV est donc beaucoup plus intéressant, d'un point de vue économique, que l'électrique.

En outre, le faible coût de l'énergie ne peut pas compenser les frais fixes importants générés par l'embauche d'un conducteur et l'achat/location d'un véhicule. Ainsi, à capacité égale, si le CDU n'utilise que des véhicules électriques, il ne pourra a priori jamais atteindre la rentabilité alors que cela sera possible avec des véhicules au GNV.

Ensuite, un autre facteur important est la capacité temporelle corrélée à la capacité volumique. Il s'agit là du nombre de tournées réalisables quotidiennement par un conducteur en fonction de son temps de travail et de la capacité de son véhicule. Pour mieux comprendre notre propos, nous effectuons un zoom des courbes précédentes entre les points de fonctionnement de 0 à 30% du flux (figure 5.16).

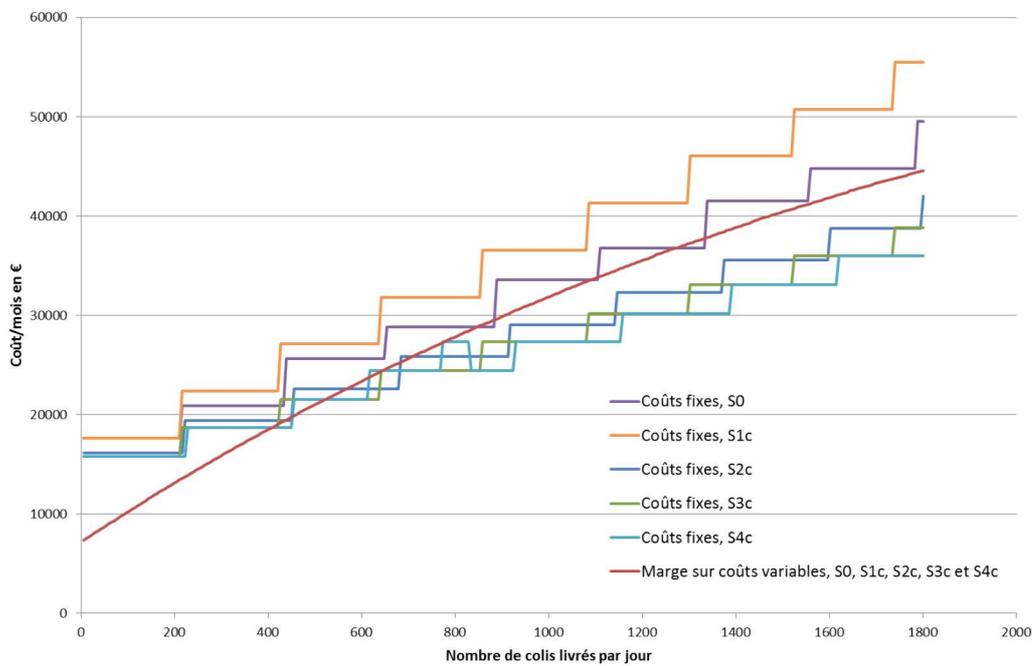


FIGURE 5.16 – Simulation de l'utilisation de différents véhicules de 0 à 30% du flux

Cela se traduit par la longueur des marches et donc par un décalage entre les niveaux d'activité nécessitant un couple conducteur/véhicule supplémentaire. Comme nous le disions précédemment, la longueur des marches retranscrit la capacité journalière en nombre de colis d'un véhicule. En effet, les véhicules considérés dans notre étude ont des capacités leur permettant de réaliser plus d'une tournée pleine par jour. De plus, on s'aperçoit que dans le cas du CDU, le critère limitant n'est ni la distance ni véritablement la capacité unitaire mais la capacité temporelle d'un livreur, c'est-à-dire le nombre de tournées qu'il est en mesure de réaliser sachant que son temps de travail journalier est borné.

Le paramètre qui va déterminer ce nombre de tournées réalisable par jour est le rapport

entre le temps nécessaire pour effectuer une tournée pleine et le temps de travail quotidien d'un livreur. Notre modèle calcule les ressources au plus juste en considérant des tournées dites "incomplètes", qui sont donc moins longues et qui complètent la charge de travail des conducteurs. Ainsi, avant d'ajouter un couple livreur/véhicule, nous vérifions si la charge restante ne peut pas être effectuée par les véhicules déjà disponibles.

Ainsi, si l'on regarde de plus près le graphique 5.16, on remarque que jusqu'à environ 700 colis, le scénario n'utilisant que des véhicules thermiques (S2c) est plus avantageux car sa capacité journalière est plus importante. Cela est dû à une capacité unitaire initiale plus grande (100 colis) que les autres véhicules et à des temps de tournées très grands pour tous les scénarios ce qui restreint le nombre de tournées pleines par jour. Puis à partir de 700 colis, les tournées se raccourcissent dans l'ensemble, puisque les points se rapprochent les uns des autres. Or le véhicule ayant une plus grande capacité effectue des tournées plus longues. De cette manière, alors que les véhicules électriques, GNV et ceux équipés de PI-conteneurs ont la possibilité de faire 3 tournées pleines et éventuellement 1 tournée incomplète, les véhicules thermiques sont limités à 2 tournées pleines et 1 incomplète, cela limite alors leur capacité journalière et donc la longueur de la marche. Dans ce cas là, suivant le taux d'activité que le CDU est capable d'atteindre, il aura intérêt à choisir plutôt un type de véhicule qu'un autre.

En outre, on observe un phénomène intéressant sur la courbe des coûts fixes lié à l'utilisation de PI-conteneurs (scénario S4c). Entre 760 et 820, 5 livreurs sont nécessaires pour effectuer toutes les livraisons puis brusquement il n'y en a besoin plus que de 4. Ce s'explique justement par la durée des tournées et le fait de pouvoir répartir la charge restante sur les autres véhicules. En effet, nous avons considéré qu'une tournée incomplète peut avoir lieu si le temps nécessaire pour livrer les colis est au moins égal au temps nécessaire pour faire l'aller-retour entre le CDU et les premier et dernier point de livraison. Bien qu'une tournée soit de plus en plus longue au départ, sa durée moyenne finit par se stabiliser. De même les points étant de moins en moins éloignés les uns des autres, le temps supplémentaire requis pour livrer un colis se stabilise. Ainsi, à partir d'un certain point (ici environ 760), la durée de la tournée est suffisamment courte pour pouvoir en faire 3 par jour tout en laissant la possibilité de faire une tournée incomplète. On peut donc répartir la charge du 5^e véhicule sur les autres puisqu'à nombre égal de colis, cela prend un petit peu moins de temps (les points sont plus proches les uns des autres). Cet effet de mutualisation permet d'ailleurs aux PI-conteneurs d'être les plus performants.

Finalement, la rentabilité du CDU est donc intimement liée au choix de sa flotte. En effet, on observe bien une hiérarchisation des scénarios. De plus, alors que certains franchissent les zones de rentabilité (courbe de marge sur coûts variables au dessus de la courbe des coûts fixes) de manière assez franches (scénarios S2c, S3c et S4c), d'autres semblent peiner à les atteindre. Par exemple, avec toutes les précautions que l'on doit prendre sur nos valeurs numériques,

une solution se basant uniquement sur une flotte électrique apparaît comme impossible à rentabiliser et ce, malgré les subventions et activités complémentaires considérées.

Nous souhaitons compléter notre analyse par une observation des valeurs obtenues suite à l'évaluation du TRG et de tous ses ascendants. En effet, il est intéressant de noter que les bonnes performances économiques relevées coïncident avec des bonnes performances physiques du système. Nous rappelons que l'objectif était de tester l'impact d'un levier physique du CDU sur ses performances opérationnelles et économiques. Nous avons synthétisé dans le tableau 5.8 les valeurs obtenues au point de fonctionnement correspondant à 30% du flux.

Ratio	S0	S1c	S2c	S3c	S4c
TQ	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952
TP	0,991	0,991	0,992	0,991	0,992
DO	0,904	0,893	0,936	0,893	0,917
$\frac{TR}{TO}$	0,896	0,917	0,844	0,917	0,974
TRG	0,764	0,773	0,747	0,773	0,844

TABLE 5.8 – Comparaison des performances physiques du CDU selon le type de véhicules utilisé pour 30% du flux

Tout d'abord, le Taux de Qualité (TQ) est égal pour chacun des scénarios puisque le même Taux de souffrance a été appliqué. Ensuite, un léger décalage est observé entre les Taux de Performance (TP). Cela est dû à la congestion qui impacte différemment le temps de parcours. En effet, nous avons considéré la congestion comme une pénalité du temps. On applique un coefficient égal au Taux de congestion à chaque phase roulée. Comme les capacités des véhicules sont différentes, les répartitions des tournées sont différentes. Ainsi, à un même point de fonctionnement le temps de la tournée n'est pas le même d'un véhicule à un autre et la congestion ne pénalise donc pas identiquement. C'est pourquoi on observe une légère différence entre les Taux de Performance de chaque scénario.

Puis, la Disponibilité Opérationnelle est meilleure pour le scénario S2c qui utilise des véhicules thermiques. Cela s'explique par le nombre d'allers-retours effectué. Les véhicules thermiques ont une capacité plus importante ce qui leur permet de faire moins d'allers-retours entre le centre-ville et le CDU. On remarque d'ailleurs que les scénarios S1c et S3c dégradent cet indicateur par rapport au scénario S0 qui utilise une flotte mixte électrique/thermique et réduit donc le nombre d'allers-retours. En revanche, le scénario Internet Physique (S4c) l'améliore grâce à un bon compromis entre la capacité et le temps de parcours.

De plus, le quotient entre le temps requis et le temps d'ouverture est amélioré pour tous les scénarios sauf le S2c. Cela représente la position du point de fonctionnement sur la marche suivant l'axe des abscisses. En effet, cela signifie que pour le scénario S2c, ce point est plutôt

au début de la marche ce qui nécessite un livreur sans pouvoir l'occuper tout son temps. A contrario, le scénario S4c est, quant à lui, bien calibré pour répondre à cette demande et améliore de près de 8% le scénario du CDU actuel. Le scénario Internet Physique, s'avère être particulièrement performant au niveau d'activité visé par le gérant du CDU, à savoir 30% du flux sur son marché, en combinant un bon taux de charge et une minimisation des allers-retours entre le centre-ville et le CDU.

Finalement, tous les scénarios présentés, à l'exception du S2c, améliorent la performance physique globale du CDU en augmentant le TRG. Le levier présenté ici est donc bien un levier d'actions physique capable de rendre le système plus efficient. Néanmoins, le TRG reste un indicateur ponctuel et il est indispensable d'être vigilant à cela. C'est le cas du scénario S2c qui apparaît comme globalement moins performant à ce point de fonctionnement. Cela ne doit pas être généralisé. Toutefois, le point observé correspond au taux d'activité envisagé par les gestionnaires du CDU, ce qui signifie que ce scénario n'est pas adapté à ce besoin.

Pour conclure, nous avons montré, à travers cette étude de cas, que la capacité et la motorisation de la flotte sont des leviers d'actions prépondérants de la performance physique et économique du CDU. Ils apparaissent comme des conditions de viabilité importantes du système puisque sur les courbes observées certains scénarios permettent d'atteindre une confortable rentabilité tandis que d'autres courent toujours au dessus de la marge sur coûts variables. Nous avons ainsi mis en avant qu'il existe des situations dans lesquelles le CDU peut être rentable. Notamment, une flotte entièrement GNV semble être une solution de pérennité. A plus long terme, le PI-CDU se positionne comme la meilleure solution, répondant à tous les enjeux du CDU (économique, opérationnel) mais aussi de la ville (environnementaux, sociétaux).

La sous-section qui suit s'intéresse à l'impact de la politique tarifaire du CDU sur sa performance économique.

II.3.d Influence de la politique tarifaire

Le dernier levier que nous étudions concerne la politique tarifaire. Nous entendons par cela la définition du prix de vente de l'acte de livraison. Nous avons fait le choix de considérer un prix facturé par colis. Ce prix suit une loi logarithmique décrivant le phénomène d'éloignement géographique. Pour rappel, nous choisissons d'étudier une situation dans laquelle les transporteurs organisent des tournées pour déposer leur fret au CDU. Ainsi, nous avons défini que plus un transporteur est dévié de sa trajectoire pour remettre sa marchandise au CDU, moins il va accepter de payer cher pour le service de livraison finale. De cette manière, nous avons établi une relation entre le chiffre d'affaires, le prix facturé du 1^{er} colis et le rang du colis facturé à 1€, qui est rappelée dans l'équation 5.10, ci-dessous.

$$R^m = p_1 \left(\frac{1 - \lambda^n}{1 - \lambda} \right), \text{ avec } \lambda < 1 \quad (5.10)$$

où

$$\lambda = e^{\frac{1}{n-1} \ln \left(\frac{p_n}{p_1} \right)}, \text{ avec } \lambda < 1, p_1 \neq 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}^* - \{1\} \quad (5.11)$$

Nous avons choisi de comparer cinq scénarios. Nous prenons comme scénario de base, celui utilisant des véhicules GNV (S3c) et ayant la même politique tarifaire que le CDU stéphanois, c'est-à-dire un 1^{er} colis à 1,5€ et le 850^e facturé 1€. Ce choix se justifie par les résultats obtenus dans la sous-section II.3.c, et qui montre que ce type de véhicules est le plus avantageux d'un point de vue économique et physique. De plus, le CDU stéphanois envisage de changer sa flotte mixte contre des véhicules GNV. Il nous a donc semblé opportun d'effectuer nos essais avec ceux-ci. En outre, cela ne change pas le comportement des solutions mais uniquement leur position relative par rapport aux coûts fixes.

Ainsi, l'ensemble des simulations sera effectué avec une flotte de véhicules GNV. En ce qui concerne les choix de tarification, nous avons simulé deux politiques de facturation du 1^{er} colis (à savoir 1,3€ et 1,8€) et deux rangs possibles pour le colis facturé à 1€ (respectivement 400^e et 1500^e). Les scénarios choisis sont récapitulés dans le tableau 5.9 et les résultats de l'évaluation économique sur la figure 5.17.

Scénario	p_1	n (= rang du colis facturé 1€)
S3c	1,5€	850
S1d	1,3€	850
S2d	1,8€	850
S3d	1,5€	400
S4d	1,5€	1500

TABLE 5.9 – Scénarios de facturation simulés

Contrairement aux autres leviers présentés dans ce chapitre, le choix de la facturation agit sur la marge sur coûts variables et non sur les coûts fixes. Cela est logique puisque le prix facturé n'a pas d'influence sur les besoins en ressources. En revanche, un écart, même minime en apparence, sur le prix du 1^{er} colis modifie de manière significative l'évolution de cette marge sur coûts variables et donc de la rentabilité. Ce constat est encore plus vrai avec la position du colis facturé à 1€ qui change considérablement la courbure. Ce point est, cependant, assez intuitif puisque c'est le propre de ce paramètre de tasser plus ou moins cette courbe.

Ainsi, l'action consistant à ajuster le prix de facturation s'avère être une condition primordiale de viabilité du CDU. En effet, on observe sur les courbes de gros écart entre les scénarios.

Notamment, le scénario S3d semble mettre le CDU dans une position difficile puisque la rentabilité ne pourra jamais être atteinte. A l'inverse, le scénario S4d entre très rapidement dans la zone bénéficiaire pour ne plus jamais en sortir. Cependant, il correspond à une situation où le colis est quasi-systématiquement facturé au-dessus du prix du marché alors que le scénario S3d facture rapidement en-dessous de ce prix. On met ainsi en évidence l'équilibre que représente ce prix. Il ne s'agit pas d'un choix non rationnel mais bien motivé par le contexte économique stéphanois.

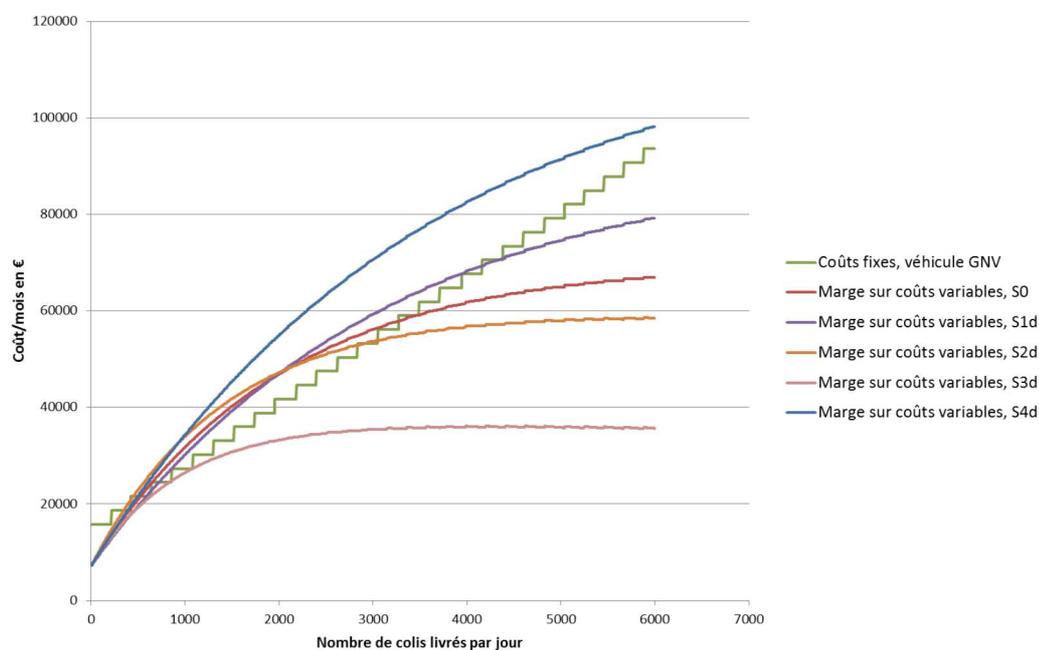


FIGURE 5.17 – Simulation de différentes politiques tarifaires

Nous nous intéressons donc plus en détails aux trois scénarios dont les représentations graphiques se trouvent "en sandwich" entre celles des scénarios S3d et S4d. Ces situations diffèrent les unes des autres par le prix facturé du 1^{er} colis. Nous effectuons un zoom entre 0 et 30% du flux sur le graphique précédent.

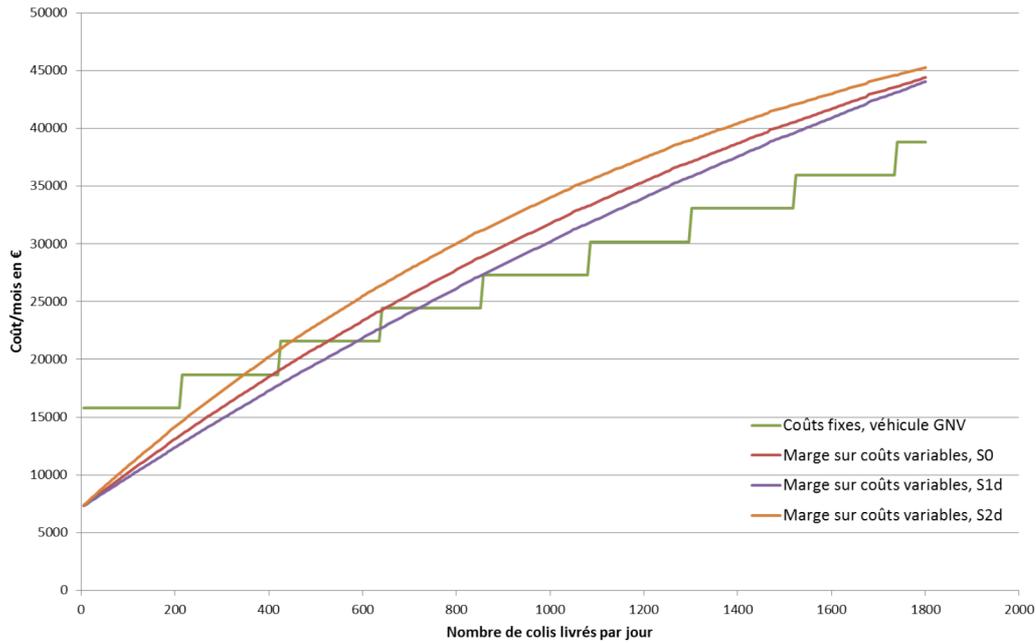


FIGURE 5.18 – Simulation de différentes politiques tarifaires de 0 à 30% du flux

Tout d’abord, les trois scénarios permettent d’atteindre la rentabilité. Plus le 1^{er} colis est facturé cher (scénario S2d), plus la viabilité du CDU est rapide. Cela signifie que les coûts nécessaires au fonctionnement de la structure sont plus rapidement couverts par les revenus générés. Néanmoins, la situation la moins favorable au CDU (scénario S1d) s’avère être très adaptée au contexte de lancement d’un nouveau système de livraison en ville.

En effet, en facturant les premiers colis légèrement en-dessous du prix du marché, tout en fixant le colis à 1€ dans la zone de "régime permanent" du système, on est en mesure d’obtenir une situation à l’équilibre dès que l’activité absorbe 12% du marché (720 colis) et avec une structure équipée de 4 conducteurs. Ce choix stratégique est certainement très payant car on peut espérer d’abord attirer les transporteurs en leur proposant un service de qualité mais à bas prix, puis le prix est finalement normal pour les transporteurs les plus réticents et qui entrent ainsi dans une structure qui fonctionne déjà. Tant que les subventions sont versées et que le CDU peut maintenir des activités complémentaires, il n’est pas nécessaire de se placer au-dessus du marché et risquer de ne pas obtenir les contrats.

Le prix joue donc un rôle important dans la rentabilité du CDU. Nous avons mis en évidence qu’avec le modèle de tarification envisagé, un gérant possède plusieurs leviers pour adapter son prix de vente au contexte géographique. De plus, notre analyse montre l’importance de prendre des décisions à long terme lorsqu’il s’agit de la logistique urbaine. En effet, il ne s’agit pas de compenser immédiatement les coûts engendrés par la mise en place du CDU mais de construire une solution permettant d’atteindre une pérennité de la structure via sa rentabilité.

Dans la dernière sous-section de ce chapitre, nous mettons en lumière les bénéfices d'un scénario intégrant Internet Physique par rapport à la situation stéphanoise actuelle.

II.3.e Vers un PI-CDU

Nous finissons cette étude de cas en simulant ce que serait le CDU stéphanois s'il était un PI-CDU. Nous avons montré, tout au long de ce chapitre, les bénéfices de chacune des actions activées par l'Internet Physique aussi bien sur la performance physique que sur la performance économique du CDU. Nous avons donc construit un scénario combinant l'ensemble de ces améliorations (SPI) et que nous souhaitons comparer au scénario actuel S0. Les valeurs des différents paramètres sont présentées dans le tableau 5.10.

Scénario	p_1	n	Motorisation	Capacité	Autonomie	Souffr.
S0	1,5€	850	Elec.+ Therm.	70-100	250-800	5%
SPI	1,5€	850	GNV	PI-cont. = 77	250	2%

TABLE 5.10 – Scénarios de facturation simulés

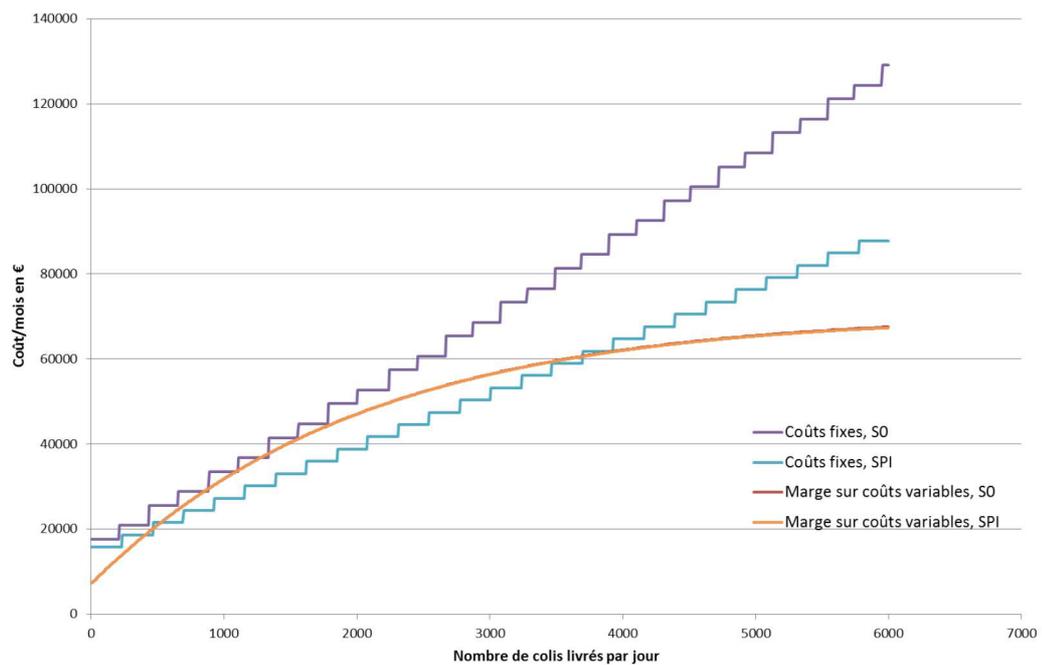


FIGURE 5.19 – Simulation d'un PI-CDU

Le scénario SPI apparaît clairement plus intéressant que le scénario actuel. D'abord la rentabilité est assurée, ce qui n'est pas le cas de la situation actuelle. Ensuite, la capacité nécessaire pour gérer le flux est moins importante. Par exemple, 8 couples livreurs/véhicules sont nécessaires pour livrer 1800 colis dans le scénario SPI alors que l'on en a besoin de 9 dans

le scénario S0. De plus les conducteurs sont mieux occupés comme on peut le voir grâce à la valeur du quotient $\frac{TR}{TO}$, qui est améliorée par le scénario SPI (voir tableau 5.11).

Ensuite, on observe un gros écart sur les coûts fixes. En effet, la courbe de coûts fixes du scénario SPI est largement en dessous de celle du scénario S0. Cela s'explique par l'utilisation de véhicules moins chers (GNV) et des PI-conteneurs ayant une capacité plus importante que la flotte mixte électrique/thermique. Si l'on relève les coûts engendrés pour livrer 1800 colis, on obtient une amélioration de presque 30%.

$$g = \frac{(C_{S0}^f - C_{SPI}^f)}{C_{S0}^f}$$

$$= 0,27$$

où

g : Gain économique de PI

C_{S0}^f : Coûts fixes pour le scénario S0 à 30% du flux

C_{SPI}^f : Coûts fixes pour le scénario Internet Physique à 30% du flux

De plus, la performance physique est améliorée avec un taux de rendement global de presque 85% contre 76% pour le scénario de base (voir tableau 5.10). La livraison par le CDU devient efficiente aussi bien économiquement que physiquement.

La marge sur coûts variables est, quant à elle, identique pour les deux scénarios puisque nous n'avons changé la politique tarifaire dans le scénario PI comme nous l'expliquons dans le chapitre 4.

Ratio	S0	SPI
TQ	0,952	0,980
TP	0,991	0,992
DO	0,904	0,915
$\frac{TR}{TO}$	0,896	0,949
TRG	0,764	0,844

TABLE 5.11 – Comparaison des performances physiques du CDU en fonctionnement actuel et dans un réseau Internet Physique pour 30% du flux

Nous avons montré dans cette étude la pertinence du concept d'Internet Physique dans le cas du CDU. A une échelle locale, l'organisation d'un PI-CDU est proche de celle d'un CDU et pourtant sa performance est bien meilleure. De plus, elle semble correspondre à la

vocation première d'un CDU qui est la mutualisation comme moyen d'améliorer le transport de marchandises en ville.

Dans le cas de Saint-Etienne, des solutions viables pour le CDU ont été mises en évidence. Au travers de cette étude cas, nous avons montré qu'il existe bien des leviers endogènes et des facteurs exogènes qui influent sur la rentabilité d'un CDU.

Conclusion

Le bon approvisionnement en marchandises d'une ville est indispensable pour conserver et stimuler l'attractivité de cette dernière. Malgré cela, il est, depuis des années, dévalorisé et mis à mal à cause des nuisances qu'il engendre. Dans le but de créer des centres-villes piétons agréables pour les habitants, les collectivités ont tendance à barrer la route aux véhicules, notamment de livraison. Pourtant, le e-commerce a considérablement augmenté la demande en ville, contraignant les acteurs de la livraison urbaine à des rythmes toujours plus importants et à des fonctionnements toujours plus complexes.

Face à ce constat, la notion de logistique urbaine est apparue, visant à organiser le « dernier maillon » de la chaîne logistique en apportant des réponses adaptées à ses besoins spécifiques. Plusieurs solutions ont été développées pour améliorer le transport de marchandises en zone urbaine (aire de livraison, réglementation, etc...). Nous nous sommes intéressés dans cette thèse au Centre de Distribution Urbaine (CDU). Cette plateforme de mutualisation logistique placée au plus près du centre-ville mais aussi des grands axes routiers a pour mission de consolider les flux à destination de la ville afin, notamment, de réduire le nombre de camions pénétrant l'aire urbaine et d'utiliser des modes de livraison plus doux comme, par exemple, le véhicule électrique ou le triporteur.

Bien qu'intéressant sous un angle théorique, ce type de solutions peine à atteindre une zone d'équilibre économique et à remplir pleinement son rôle. Dans ce contexte, l'objectif de nos travaux de thèse a été d'identifier si un CDU peut être rentable dans une ville européenne de taille moyenne. Au cours de nos recherches, nous avons répondu que oui mais sous certaines conditions que nous nous sommes attachés à préciser et à tester.

Nous avons, pour cela, commencé par définir la logistique urbaine et présenté les grandes catégories de solutions existantes. Nous avons ensuite effectué un état de l'art concernant les démarches d'évaluation de ces solutions et mettant en évidence une lacune concernant l'évaluation économique des Centres de Distribution Urbaine au sens de l'étude de leur rentabilité (**Chapitre 1**). Cela nous a permis de formuler notre problématique.

Nous avons d'abord choisi d'utiliser l'étude de la marge sur coûts variables comme indicateur de la rentabilité d'un CDU (**Chapitre 2**). Nous avons construit un modèle économique du

CONCLUSION

CDU à partir de la définition du chiffre d'affaires, des coûts fixes et des coûts variables, qui répond au besoin d'indicateurs opérationnels. Puis, nous avons montré en quoi les représentations graphiques des coûts fixes et de la marge sur coûts variables mettent en évidence des leviers d'actions pour un gérant de CDU désireux d'améliorer la performance économique de sa structure.

Ensuite, nous avons complété notre approche par une description opérationnelle du processus de livraison. Nous avons ainsi développé un modèle physique du CDU assorti d'un panel d'indicateurs de performance physique (**Chapitre 3**). Ce modèle prend sa source dans l'analyse d'un cycle de production via le Taux de Rendement Global et ses indicateurs dérivés (Taux de Qualité, Taux de Performance, Disponibilité Opérationnelle, etc.). Ils servent à évaluer la performance d'un moyen de production tout au long du cycle. Ce concept a pu être appliqué au processus de livraison par le CDU et a permis de mettre en avant d'autres leviers d'actions capables d'améliorer à la fois la performance physique et économique du CDU. L'intérêt de ce choix a été de proposer à un gérant des actions conformes à la réalité de son quotidien.

Par la suite, la notion d'Internet Physique a été introduite (**Chapitre 4**). Nous avons présenté ce nouveau concept pour l'organisation de la logistique mondiale, puis en quoi cela pouvait s'appliquer à l'échelle urbaine. Nous avons défendu l'hypothèse qu'un CDU peut être assimilé à un PI-hub dans une logistique urbaine hyperconnectée. Nous avons alors décrit son fonctionnement dans ce contexte et les effets attendus sur les performances, là encore, physiques et économiques.

Enfin, nous avons voulu valider certaines conditions de viabilité identifiées dans les chapitres précédents à l'aide d'une étude de cas (**Chapitre 5**). Pour cela, nous nous sommes appuyés d'abord sur des cas génériques, puis sur un cas réel représentant le cas du CDU stéphanois. La première approche a servi à tester l'impact de la morphologie sur la rentabilité d'un CDU. Nous avons ainsi montré que la forme de la ville avait un effet non négligeable sur la performance économique du CDU. En revanche, ce n'est pas tant la distance parcourue qui pénalise une morphologie plutôt qu'une autre mais le temps de parcours d'une tournée. En effet, nous avons également mis en évidence que le coût de l'énergie n'est pas suffisamment élevé au regard des coûts fixes et du chiffre d'affaires pour que la distance soit un facteur différenciant.

Dans un second temps, nous avons utilisé le CDU de Saint-Etienne pour évaluer l'impact de leviers ayant des origines endogènes. Cela a, notamment, été l'occasion de comparer différents types de flottes de véhicules. Nous avons alors relevé plusieurs situations dans lesquelles le CDU ne peut pas atteindre l'équilibre économique. Ce résultat a validé l'hypothèse selon laquelle un CDU peut être rentable sous certaines conditions mais il a aussi mis en avant l'écart entre la description théorique d'un CDU et son fonctionnement réel. Par exemple, alors que la plupart des CDU sont équipés d'une flotte de véhicules électriques, nous avons montré que dans les

conditions d'utilisation simulées, cette solution n'est pas viable. En outre, nous avons aussi pu confirmer les gains apportés pour un CDU par l'Internet Physique. A travers ce cas d'étude, les bénéfices de PI ont été quantifiés, montrant son aptitude à répondre aux enjeux d'une ville comme Saint-Etienne. La nouveauté de ce travail réside donc à lever un verrou concernant la viabilité des CDU en fonction de leur contexte et de leur organisation interne.

Nous relevons, cependant, plusieurs limites à notre travail. Tout d'abord, d'un point de vue technique, notre modélisation de la distance entre les stops comme une fonction de la surface repose sur l'hypothèse de surface infinie. Cela implique une dissipation des effets de bords qui pourraient être pénalisante. Il serait donc nécessaire d'affiner cette évaluation en utilisant un module de calcul de la distance plus précis. Néanmoins, et comme nous l'avons relevé plus haut, la distance n'influence que très peu la performance du CDU et une bonne approximation suffit à obtenir un résultat exploitable.

La deuxième limite de cette étude concerne le mode de facturation de la livraison. Nous avons choisi d'avoir une approche assez simplificatrice qui consiste à facturer chaque colis unitairement et proportionnellement au précédent. Il est, en fait, envisageable que le prix facturé soit plutôt proportionnel par palier, ce qui traduirait la part de marchandises provenant de chaque transporteur. En revanche, cette modélisation introduirait, certainement, un biais au niveau des zones paliers qu'il serait alors nécessaire d'observer avec précisions.

La dernière limite que nous relevons est relative aux travaux sur l'Internet Physique. Nous avons, parfois, considéré l'Internet Physique comme une sorte de boîte à outils dans laquelle nous avons pioché les principes à appliquer. Bien que nous ayons essayé d'adopter une vision globale d'un CDU dans PI, nous avons conservé notre contexte, notamment économique, pour quantifier ses apports. Cette approche est certainement un peu restrictive. De la même manière que PI vise à repenser entièrement le fonctionnement de la logistique, il serait sans doute nécessaire de repenser le modèle économique d'un PI-CDU. En effet, étant donné que la ville serait maillée par des PI-CDU, on pourrait avoir des coûts fixes liés à un système de navettes pour répartir correctement la marchandise.

Néanmoins, notre approche présente l'avantage d'aborder l'Internet Physique comme quelque chose d'envisageable et de réaliste. Bien qu'une situation où une logistique en mode PI soit encore assez loin (quoi que...), des phases transitoires sont possibles mais surtout nécessaires. Le travail que nous avons effectué se positionne comme préliminaire et ouvre la voie à des réflexions plus poussées sur la logistique urbaine hyperconnectée. Une perspective de recherche serait d'analyser plus finement les interactions et le rôle de plusieurs PI-CDU autour de la ville. Il faudrait étudier les liens entre les PI-CDU mais aussi la répartition des marchandises entre eux ainsi que le dimensionnement : combien de PI-CDU sont nécessaires dans une ville comme Saint-Etienne.

CONCLUSION

D'autre part, les travaux que nous avons conduits s'inscrivent dans le projet de recherche ANR ANNONA. Dans ce cadre, le modèle économique proposé devrait être mis au regard d'un modèle d'évaluation environnementale (ANDRIANKAJA et al. 2015). La combinaison de ces deux approches permettra d'asseoir l'étude de l'écart entre la théorie et la pratique ainsi que le développement d'un modèle d'évaluation *ex ante* de la performance d'un CDU. On peut envisager de mettre en avant, grâce à l'évaluation environnementale des leviers d'actions améliorant à la fois la rentabilité du CDU et ses émissions environnementales.

D'ailleurs, on pourrait même aller plus loin dans la réflexion autour de la durabilité en proposant des actions sociétales. Pour cela, une piste de recherche serait d'appliquer le cadre d'étude de la norme ISO26000. Cette norme, non certifiante, se présente plutôt comme un guide des bonnes pratiques pour qu'une entreprise s'inscrive dans un processus de responsabilité sociétale (c'est le développement durable appliqué aux entreprises). A travers six questions centrales, déclinées en domaines d'actions, la norme balaye l'ensemble des secteurs sur lesquels une entreprise doit porter ses efforts pour adopter une attitude éthique et responsable. On pourrait envisager d'utiliser ces domaines d'actions comme un cadre d'évaluation plus large. Nous proposons en annexe F quelques pistes de réflexion.

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse ont permis de montrer qu'un CDU est une solution qui mérite l'attention particulière qui lui est portée. D'abord, car il répond aux enjeux de notre société, mais aussi car il s'inscrit dans une logique de la ville du futur qui demande sans cesse de nouveaux modèles. Les principes de mutualisation et de consolidation, éléments de base d'un CDU, connaissent une résonance particulière. A l'heure où le covoiturage et l'auto-partage sont devenus des modes de transport de personne à part entière, il est temps que le transport de marchandises suive le mouvement et accepte ces solutions transverses. Ce changement n'aura lieu que si les conditions qui pourraient faire le succès des CDU sont entendues par les parties prenantes, politiques en tête, qui acceptent de voir leur mode de fonctionnement repensé pour faire une ville plus agréable pour tous.

Bibliographie

- ADEME (2005). *Les Centres de Distribution Urbaines : Quels outils d'évaluation environnementale ?*
- ALBERGEL, Armand, Erwan SEGALOU, Jean-Louis ROUTHIER et Casimir DE RHAM (2006). *Mise en place d'une méthodologie pour un bilan environnemental physique du transport de marchandises en ville*. Programme National Marchandises en Ville.
- ALLEN, Julian, Michael BROWNE, Allan WOODBURN et Jacques LEONARDI (2012). « The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport ». In : *Transport Reviews* 32.4, p. 473–490. ISSN : 0144-1647. DOI : 10.1080/01441647.2012.688074.
- ALLEN, Julian, George THORNE et Michael BROWNE (2007). *BESTUFS good practice guide on urban freight transport*. Monograph. Commission Européenne.
- ANDRIANKAJA, Dina, Natacha GONDRAN et Jesus GONZALEZ-FELIU (2015). « Evaluation environnementale des organisations de la logistique urbaine par une approche d'analyse du cycle de vie : application sur le CDU de Saint-Etienne ». In : *Logistique & Management A* paraître (Numéro spécial).
- ARMAND, Pauline, Karine EVRARD SAMUEL et Van-Dat CUNG (2013). « Logistique urbaine : Quelle organisation pour quel modèle économique ? » In : CIGI2013. La Rochelle.
- ARVIDSSON, Niklas et Michael BROWNE (2013). « A review of the success and failure of tram systems to carry urban freight : the implications for a low emission intermodal solution using electric vehicles on trams ». In : *European Transport* 54. ISSN : 1825-3997.
- AUBERT, PL et Jean-Louis ROUTHIER (1999). « FRETURB, un modèle de simulation des transports de marchandises en ville ». In : *Transport Modes and Systems*. 8th World Conference on Transport Research. T. 1. Antwerp, Belgium : Pergamon, Amsterdam, The Netherlands, p. 531–544.
- AZAMI, Asmaa, Jesus GONZALEZ-FELIU, Patrick BURLAT et Joelle MORANA (2015). « Estimer le comportement du chauffeur en milieu urbain à travers des modèles de tournées. » In : 16ème conférence ROADEF, Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, Marseille, France.

BIBLIOGRAPHIE

- BALLOT, Eric et Benoit MONTREUIL (2014). *L'Internet Physique : Le réseau des réseaux des prestations logistiques*. PREDIT. La Documentation française. 224 p.
- BALLOT, Eric, Benoit MONTREUIL et Remy GLARDON (2012). *Simulation de l'internet physique. Contribution à la mesure des enjeux et à sa définition*. Rapport final. PREDIT, Groupe Opérationnel 4.
- BATTAIA, Guillaume, Lucile FAURE, Guillaume MARQUES, Romain GUILLAUME et Jairo MONTOYA-TORRES (2014). « A methodology to anticipate the activity level of a collaborative network : an urban consolidation center ». In : *Supply Chain Forum : An International Journal* 15.4, p. 70–83.
- BEARDWOOD, Jillian, J. H. HALTON et J. M. HAMMERSLEY (1959). « The shortest path through many points ». In : *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 55.4, p. 299–327. DOI : 10.1017/S0305004100034095.
- BEYER, Antoine (2013). « Les ports fluviaux, outils d'une métropolisation durable ». In : Colloque International Futurs urbains.
- BOERKAMPS, Jeroen et Arjan VAN BINSBERGEN (1999). « GoodTrip—A new approach for modelling and evaluation of urban goods distribution ». In : *City Logistics I*. Institute of Systems Science Research. Eiichi Taniguchi & Russel G. Thompson.
- BONNAFOUS, Alain et Yves CROZET (2014). *Les indicateurs d'efficience du transport ferroviaire en France*. OCDE.
- BOUDOUIN, Daniel (2006). *Guide méthodologique : Les espaces logistiques urbains*. Paris : La Documentation Française.
- BOYER, Kenneth K., Andrea M. PRUD'HOMME et Wenming CHUNG (2009). « The last mile challenge : evaluating the effects of customer density and delivery window patterns ». In : *Journal of Business Logistics* 30.1, p. 185–201.
- BROWNE, Michael, Julian ALLEN et Jacques LEONARDI (2011). « Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London ». In : *IATSS Research* 35.1, p. 1–6. ISSN : 0386-1112. DOI : 10.1016/j.iatssr.2011.06.002.
- BROWNE, Michael, Marzena PIOTROWSKA, Julian ALLEN et Allan WOODBURN (2008). « The potential use of urban consolidation centres in the hotel industry in London ». In : *Innovations in City Logistics*. Nova. Eiichi Taniguchi & Russel G. Thompson, p. 83–96.
- BROWNE, Michael, Michael SWEET, Allan WOODBURN et Julian ALLEN (2005). *Urban freight consolidation centres : final report*.
- CERTU (1998). *Plans de déplacements urbains PDU - Prise en compte des marchandises*. CERTU. Hors Collection. CERTU. ISBN : 2-11-090848-3.
- CHANUT, Odile et Gilles PACHÉ (2012). « Integrating 3PL in urban logistics organization ». In : *Problems and Perspectives in Management* 10.2.

- (2013). « La culture de mutualisation du PSL peut-elle favoriser l'émergence d'une logistique urbaine durable ? » In : *RIMHE : Revue Interdisciplinaire Management, Homme(s) & Entreprise* 7.3, p. 94–110. ISSN : 2259-2490.
- CHEN, Qin, Jane LIN et Kazuya KAWAMURA (2012). « Comparison of Urban Cooperative Delivery and Direct Delivery Strategies ». In : *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 2288, p. 28–39. DOI : 10.3141/2288-04.
- CHWESIUK, Krzysztof, Kinga KIJEWSKA et Stanisław IWAN (2010). « Urban consolidation centres for medium-size touristic cities in the Westpomeranian Region of Poland ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 6264–6273. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.036.
- COMI, Antonio et Luca ROSATI (2013). « CLASS : A City Logistics Analysis and Simulation Support System ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 87, p. 321–337. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2013.10.613.
- COST 321 (1998). *COST 321 : urban goods transport-final report of the action*. Transport Research, European Commission Directorate General Transport.
- COURIVAUT, Nicolas (2004). « Les livraisons/enlèvements en centre-ville : quels problèmes ? Quelles solutions ? » Thèse de doct.
- CRAINIC, Teodor Gabriel et Benoit MONTREUIL (2015). « Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics ». In : *Proceedings The 9th International Conference In City Logistics*. The 9th International Conference In City Logistics. Tenerife, Spain, to appear.
- DABLANC, Laetitia (2007). « Goods transport in large European cities : Difficult to organize, difficult to modernize ». In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 41.3, p. 280–285. ISSN : 0965-8564. DOI : 10.1016/j.tra.2006.05.005.
- DABLANC, Laetitia, Daniele PATIER, Jesus GONZALEZ-FELIU, Virginie AUGEREAU, Jacques LEONARDI, Herve LEVIFVE, Teo SIMMEONI et Li CERDA (2011). *City logistics best practices : a handbook for authorities*. SUGAR.
- DAGANZO, Carlos F. (2005). *Logistics Systems Analysis*. Springer Science & Business Media. 310 p. ISBN : 978-3-540-27516-9.
- DAVID, B., R. CHALON et B. FAVRE (2011). « ICT and new human-machine interactions for trucks and buses in the future : e-Truck and e-Bus perspectives ». In : *Human-Computer Interactions in Transport, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., ISBN*, p. 978–1.
- DAVIS, Brian A. et Miguel Andres FIGLIOZZI (2013). « A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks ». In : *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 49.1, p. 8–23. ISSN : 1366-5545. DOI : 10.1016/j.tre.2012.07.003.
- DE ASSIS CORREIA, Vagner, Leise Kelli DE OLIVEIRA et André LEITE GUERRA (2012). « Economical and Environmental Analysis of an Urban Consolidation Center for Belo Hori-

BIBLIOGRAPHIE

- zonte City (Brazil) ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, p. 770–782. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.146.
- DE LANGHE, Katrien (2014). « Analysing the Role of Rail in Urban Freight Distribution ». In : *Next Generation Supply Chains : Trends and Opportunities*, p. 223.
- DELAÎTRE, Loïc et Cédric DE BARBEYRAC (2012). « Improving an Urban Distribution Centre, the French Case of Samada Monoprix ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, p. 753–769. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.145.
- FAURE, Lucile, Patrick BURLAT et Benoit MONTREUIL (2015). « Physical Internet to improve viability of an Urban Consolidation Center ». In : *International Journal of Production Research, Special Issue on Physical Internet* Submitted Paper, 35p.
- FAURE, Lucile, Benoit MONTREUIL, Patrick BURLAT et Guillaume MARQUES (2014). « Ex ante sustainability improvement assessment of city logistics solutions : learning from a simple interlinked pooling case ». In : *Proceedings of 1st IPIC*. 1st International Physical Internet Conference. Québec, Canada.
- FILIPPI, Francesco, Agostino NUZZOLO, Antonio COMI et Paolo DELLE SITE (2010). « Ex-ante assessment of urban freight transport policies ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 6332–6342. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.042.
- GÉRARDIN, Bernard (2007). *Dix ans d'expérimentations en matière de livraisons en ville : premier bilan critique*. CERTU.
- GIORGI, L. et A. TANDON (2002). « Introduction : the theory and practice of evaluation ». In : *Project and Policy Evaluation in Transport*. Ashgate, Aldershot.
- GONZALEZ-FELIU, Jesus (2008). « Models and methods for the city logistics : The two-echelon capacitated vehicle routing problem ». Thèse de doct. Politecnico di Torino.
- GONZALEZ-FELIU, Jesus, Christian AMBROSINI, Pascal PLUVINET, Florence TOILIER et Jean-Louis ROUTHIER (2012). « A simulation framework for evaluating the impacts of urban goods transport in terms of road occupancy ». In : *Journal of Computational Science* 3.4, p. 206–215. ISSN : 1877-7503. DOI : 10.1016/j.jocs.2012.04.003.
- GONZALEZ-FELIU, Jesus, Nicolas MALHENE, Eleonora MORGANTI et Joelle MORANA (2014). « The deployment of city and Area Distribution Centers in France and Italy : Comparison of Six Representative Models ». In : *Supply Chain Forum* 15-4.39. ISSN : 1624-6039.
- GONZALEZ-FELIU, Jesus, Nicolas MALHENE, Eleonora MORGANTI et Anna TRENTINI (2013). « Développement des espaces logistiques urbains : CDU et ELP dans l'Europe du Sud-Ouest ». In : *Revue Française de Gestion Industrielle* 32.4, p. 73–92.
- GONZALEZ-FELIU, Jesus et Joelle MORANA (2010). « Are city logistics solutions sustainable? The Cityporto case ». In : *TeMA-Trimestrale del Laboratorio Territorio Mobilità Ambiente* 3.2, p. 55–64.

- GONZALEZ-FELIU, Jesus et Josep-Maria SALANOVA (2012). « Defining and Evaluating Collaborative Urban Freight Transportation Systems ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Seventh International Conference on City Logistics which was held on June 7-9, 2011, Mallorca, Spain 39, p. 172–183. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.099.
- GRAINDORGE, Tatiana (2012). « Contribution à une méthodologie d'évaluation a priori de transport urbain durable ». Thèse de doct. Bordeaux 1.
- GRAINDORGE, Tatiana et Dominique BREUIL (2014). « Evaluation of the Urban Freight Transportation (UFT) projects ». In : *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference : Transport Solutions from Research to Deployment*.
- HENRIOT, Frédéric, Danièle PATIER, Philippe BOSSIN et Bernard GÉRARDIN (2008). *Méthodologie d'évaluation des innovations en matière de logistique urbaine*. PREDIT.
- HUANG, Samuel H., John P. DISMUKES, J. SHI, Qi SU, Ge WANG, Mousalam A. RAZZAK et D. Eugene ROBINSON (2002). « Manufacturing system modeling for productivity improvement ». In : *Journal of Manufacturing Systems* 21.4, p. 249–259. ISSN : 0278-6125. DOI : 10.1016/S0278-6125(02)80165-0.
- INTERFACE TRANSPORT (2009). *Logistique urbaine : les pratiques réglementaires des 50 plus grandes villes françaises*. CERTU.
- INTERFACE TRANSPORT, GÉRARDIN CONSEIL et LET (2009). *Logistique et distribution urbaine*. Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques.
- KAWAMURA, Kazuya et Yandan LU (2007). « Evaluation of Delivery Consolidation in U.S. Urban Areas with Logistics Cost Analysis ». In : *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 2008, p. 34–42. DOI : 10.3141/2008-05.
- Kiala et UPS débutent leur co-branding cet été | Kiala France (2014). URL : <https://www.kiala.fr/kiala-et-ups-debutent-leur-co-branding-cet-ete> (visité le 02/06/2015).
- LANZA, Gisela, Johannes STOLL, Nicole STRICKER, Steven PETERS et Christof LORENZ (2013). « Measuring Global Production Effectiveness ». In : *Procedia CIRP*. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, p. 31–36. ISSN : 2212-8271. DOI : 10.1016/j.procir.2013.05.006.
- LARKIN, Jill H. et Herbert A. SIMON (1987). « Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words ». In : *Cognitive science* 11.1, p. 65–100.
- LEVIFVE, Hervé et Pierre BERGER (2014). *Le projet TramFret – Mise en place d'un transport de marchandises par le tramway*.
- L'HOSTIS, Alain et Alexis CONESA (2010). « Définir l'accessibilité intermodale ». In : *Systèmes de Transport Urbain*. Sous la dir. de Thomas Thévenin ARNAUD BANOS. IGAT. Hermès, p. 24.

BIBLIOGRAPHIE

- LIN, Jane, Qin CHEN et Kazuya KAWAMURA (2014). « Sustainability SI : Logistics Cost and Environmental Impact Analyses of Urban Delivery Consolidation Strategies ». In : *Netw Spat Econ*, p. 1–27. ISSN : 1566-113X, 1572-9427. DOI : 10.1007/s11067-014-9235-9.
- LIPSEY, Richard G. et Peter Otto STEINER (1975). *Analyse économique (economics)*. Trad. par Jean-Dominique LAFAY et Serge PERCHERON. Cujas.
- MACHARIS, Cathy et Yvonne M. BONTEKONING (2004). « Opportunities for OR in intermodal freight transport research : A review ». In : *European Journal of operational research* 153.2, p. 400–416.
- MARCUCCI, Edoardo et Romeo DANIELIS (2008). « The potential demand for a urban freight consolidation centre ». In : *Transportation* 35.2, p. 269–284.
- MELO, Sandra, Patricia BAPTISTA et Alvaro COSTA (2014). « Comparing the Use of Small Sized Electric Vehicles with Diesel Vans on City Logistics ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111, p. 350–359. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2014.01.068.
- MELO, Sandra et Alvaro COSTA (2011). « Definition of a set of indicators to evaluate the performance of urban goods distribution initiatives ». In : *City Distribution and Urban Freight Transport : Multiple Perspectives*. Edward Elgar, Northampton, p. 120–149.
- MONTREUIL, Benoit (2009). *Physical Internet Manifesto : globally transforming the way physical objects are handled, moved, stored, realized, supplied and used*.
- (2011). « Toward a Physical Internet : meeting the global logistics sustainability grand challenge ». In : *Logist. Res.* 3.2, p. 71–87. ISSN : 1865-035X, 1865-0368. DOI : 10.1007/s12159-011-0045-x.
- (2013). *The Physical Internet Manifesto, version 1.11*.
- (2015). « Physical Internet : A conceptual journey ». 2nd International Physical Internet Conference. Paris - France.
- MONTREUIL, Benoit, Eric BALLOT et Frederic FONTANE (2012). « An Open Logistics Interconnection model for the Physical Internet ». In : *Information Control Problems in Manufacturing*. INCOM2012. T. 14. Bucarest, Romania, p. 327–332.
- MONTREUIL, Benoit, Russell MELLER, Collin THIVIERGE et Zachary MONTREUIL (2014). « Functional design of physical internet facilities : a unimodal road-based crossdocking hub ». In : *Progress in Material Handling Research* 12, p. 379–431.
- MORANA, Joelle et Jesus GONZALEZ-FELIU (2011). « Le transport vert de marchandises : l’expérience de la ville de Padoue en Italie ». In : *Gestion : Revue Internationale de Gestion* 36.2, p. 16–24.
- MÜLLER-EBERSTEIN, F. et M. FRANKE (2000). « Projekt CarGo Tram in Dresden ». In : *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik* 124.5, p. 337–340.

- MUNUZURI, Jesus, Pablo CORTES, Jose GUADIX et Luis ONIEVA (2012). « City logistics in Spain : Why it might never work ». In : *Cities* 29.2, p. 133–141. ISSN : 0264-2751. DOI : 10.1016/j.cities.2011.03.004.
- MUNUZURI, Jesus, Juan LARRANETA, Luis ONIEVA et Pablo CORTES (2005). « Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement ». In : *Cities* 22.1, p. 15–28. ISSN : 0264-2751. DOI : 10.1016/j.cities.2004.10.003.
- NAKAJIMA, Seiichi (1988). *Introduction to TPM : Total Productive Maintenance*. Eleventh Printing edition. Cambridge, Massachusetts : Productivity Press. 129 p. ISBN : 978-0-915299-23-2.
- NUZZOLO, Agostino et Antonio COMI (2014). « City Logistics Planning : Demand Modelling Requirements for Direct Effect Forecasting ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia 125, p. 239–250. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2014.01.1470.
- OCDE (2003). *Transport urbain de marchandises Les défis du XXIe siècle : Les défis du XXIe siècle*. OECD Publishing. 162 p. ISBN : 978-92-64-10281-1.
- OGDEN, K.W. (1992). *Urban goods movement : a guide to policy and planning*. Ashgate Publishing.
- OSTERWALDER, Alexander et Yves PIGNEUR (2010). *Business Model Generation : A Handbook For Visionaries, Game Changers, And Challengers Author : Alexander Osterwalder, Yves.* Wiley.
- PANERO, Marta A., Hyeon-Shic SHIN et Daniel Polo LOPEZ (2011). *Urban Distribution Centers – A Means to Reducing Freight Vehicle Miles Traveled*. C-08-23. New York State Energy Research et Development Authority.
- PAPOUTSIS, Konstantinos, Michael GOGAS et Eftihia NATHANAIL (2012). « Urban distribution concepts : a SWOT analysis on best practices of urban logistics solutions ». In : 2nd International conference on Supply Chains. Katerini, Grèce.
- PATIER, Daniele et Michael BROWNE (2010). « A methodology for the evaluation of urban logistics innovations ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 6229–6241. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.033.
- QUAK, Hans, Susanne BALM et Bineke POSTHUMUS (2014). « Evaluation of City Logistics Solutions with Business Model Analysis ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia 125, p. 111–124. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2014.01.1460.
- QUAK, Hans et Lorant TAVASSZY (2011). « Customized Solutions for Sustainable City Logistics : The Viability of Urban Freight Consolidation Centres ». In : *Transitions Towards Sustainable Mobility*. Sous la dir. de Jo A. E. E. van NUNEN, Paul HUIJBREGTS et Piet RIETVELD. Springer Berlin Heidelberg, p. 213–233. ISBN : 978-3-642-21191-1 978-3-642-21192-8.

BIBLIOGRAPHIE

- QUAK, Hans, Ron VAN DUIN et Johan VISSER (2008). « City logistics over the years... Lessons learned, research directions and interests ». In : *Innovations in City Logistics, Nueva York, Nova Science*, p. 37–54.
- ROCA-RIU, Mireia et Miquel ESTRADA (2012). « An Evaluation of Urban Consolidation Centers Through Logistics Systems Analysis in Circumstances Where Companies have Equal Market Shares ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, p. 796–806. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.148.
- ROUTHIER, Jean-Louis (2001). *Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine*. Ed. Techniques Ingénieur. 16 p.
- RUSSO, Francesco et Antonio COMI (2010). « A classification of city logistics measures and connected impacts ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 6355–6365. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.044.
- (2011). « A model system for the ex-ante assessment of city logistics measures ». In : *Research in Transportation Economics* 31.1, p. 81–87. ISSN : 0739-8859. DOI : 10.1016/j.retrec.2010.11.011.
- SARRAJ, Rochdi, Eric BALLOT, Shenle PAN, Driss HAKIMI et Benoit MONTREUIL (2014). « Interconnected logistic networks and protocols : simulation-based efficiency assessment ». In : *International Journal of Production Research* 52.11, p. 3185–3208. ISSN : 0020-7543. DOI : 10.1080/00207543.2013.865853.
- So Colissimo* (2015). URL : http://www.colissimo.fr/particuliers/recevoir_un_colis/avec_So_Colissimo/So_Colissimo.jsp (visité le 02/06/2015).
- SUKSRI, Jintawadee et Raluca RAICU (2012). « Developing a Conceptual Framework for the Evaluation of Urban Freight Distribution Initiatives ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Seventh International Conference on City Logistics which was held on June 7-9, 2011, Mallorca, Spain 39, p. 321–332. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.111.
- TANIGUCHI, Eiichi et Russell G. THOMPSON, éd. (1999). *City Logistics I*. Institute of Systems Science Research. Kyoto : Eiichi Taniguchi & Russel G. Thompson.
- TANIGUCHI, Eiichi, Russell G. THOMPSON et Tadashi YAMADA (2003). « Predicting the effects of city logistics schemes ». In : *Transport Reviews* 23.4, p. 489–515. DOI : 10.1080/01441640210163999.
- (2014). « Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia 125, p. 4–14. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2014.01.1451.
- TANIGUCHI, Eiichi et Rob E.C.M. VAN DER HEIJDEN (2000). « An evaluation methodology for city logistics ». In : *Transport Reviews* 20.1, p. 65–90.

- THOMPSON, Russell G. (2015). « Evaluating City Logistics Schemes ». In : *City Logistics : Mapping the Future*. CRC Press Taylor & Francis Group. Eiichi Taniguchi & Russell G. Thompson, p. 101–113.
- THOMPSON, Russell G. et Kim HASSALL (2006). « A methodology for evaluating urban freight projects ». In : *Recent Advances in City Logistics. The 4th International Conference on City Logistics*.
- TOTH, Paolo et Daniele VIGO (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia, PA, USA : Society for Industrial Applied Mathematics. 376 p. ISBN : 978-0-89871-579-8.
- TRENTINI, Anna (2012). « Proposition d'un système de transport urbain mixte : application dans le cadre de la ville moyenne de La Rochelle ». Thèse de doct. La Rochelle : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- TURBLOG (2011). *Deliverable 2 : Business Concept and models for urban logistics*. Transferability of urban logistics concepts and practices from worldwide perspectives. European (7th RTD Framework Programme).
- VAGHI, Carlo et Marco PERCOCO (2011). « City logistics in Italy : success factors and environmental performance ». In : *City distribution and urban freight transport. Multiple perspectives, Emerald, Northampton*, p. 151–175.
- VAN DUIN, Ron et Jesus MUNUZURI (2015). « Urban Distribution Centers ». In : *City Logistics : Mapping the Future*. CRC Press Taylor & Francis Group. Eiichi Taniguchi & Russell G. Thompson, p. 115–134.
- VAN DUIN, Ron, Hans QUAK et Jesus MUNUZURI (2008). « Revival of the cost benefit analysis for evaluating the city distribution center concept ? » In : *Innovations in City Logistics*. Sous la dir. d'Eiichi TANIGUCHI et Russell G. THOMPSON. Nova Science Publishers, Inc. New-York, p. 97–114. ISBN : 978-1-60456-725-0.
- (2010). « New challenges for urban consolidation centres : A case study in The Hague ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 6177–6188. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.029.
- VAN DUIN, Ron, Antal VAN KOLCK, Nilesh ANAND, Lorant TAVASSZY et Eiichi TANIGUCHI (2012). « Towards an Agent-Based Modelling Approach for the Evaluation of Dynamic Usage of Urban Distribution Centres ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, p. 333–348. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.112.
- VAN ROOIJEN, Tariq et Hans QUAK (2010). « Local impacts of a new urban consolidation centre – the case of Binnenstadservice.nl ». In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2.3, p. 5967–5979. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2010.04.011.
- WATSON, Peter L. (1975). *URBAN GOODS MOVEMENT. A DISAGGREGATE APPROACH*.
- WITKOWSKI, Jarosław et Maja KIBA-JANIAK (2012). « Correlation between City Logistics and Quality of Life as an Assumption for Referential Model ». In : *Procedia - Social and*

BIBLIOGRAPHIE

Behavioral Sciences. Seventh International Conference on City Logistics which was held on June 7- 9,2011, Mallorca, Spain 39, p. 568–581. ISSN : 1877-0428. DOI : 10.1016/j.sbspro.2012.03.131.

Annexe A

Définition du colis moyen

Caractéristiques de la marchandise	
Nb de tournées/jour	3
Nb de palettes au sol pour un véhicule électrique	6
Poids moyen d'un colis (kg)	8
Nb moyen de colis/ position	3
Poids moyen palettes (kg)	87
Nb moyen de palettes/position	1

Relevé d'une journée-type					
	Min/jour	Max/jour	Min/tournée	Max/tournée	Moyenne
Nb de palettes	12,00	18	4,00	6,00	5,00
Nb de colis	10	50	3,33	16,67	10,00
Nb de positions	30	40	10,00	13,33	12,00
Nb d'arrêts	10	15	3,33	5,00	4,2

Définition du colis moyen	
Poids moyen d'un colis (kg)	8
Nb moyen de colis par palette	$87/8 = 10$

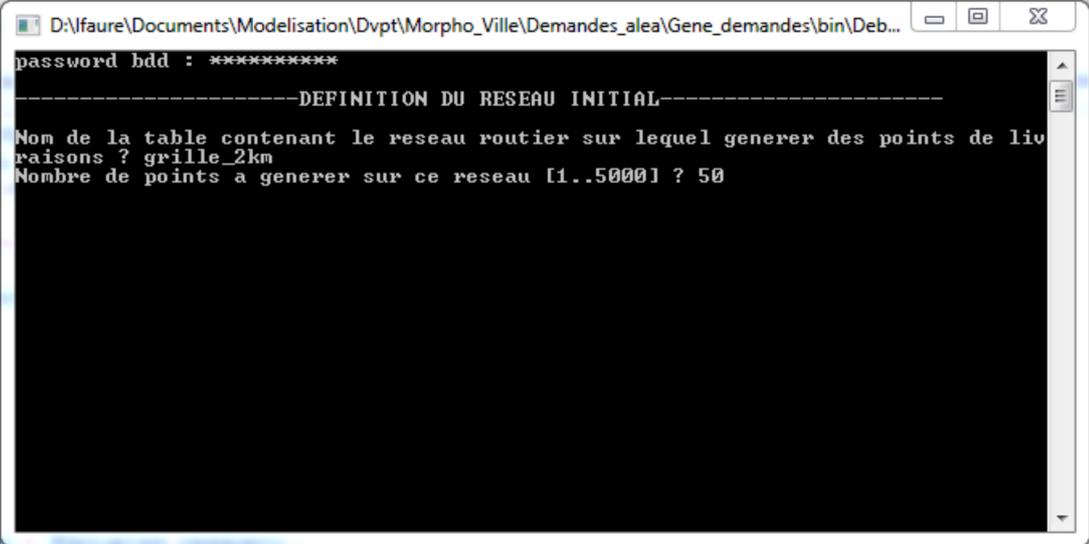
Paramètres induits	
Nb stop/tr	4
Nb position/stop	$4/12=2,9$
Nb de colis moyen par palette	$6*10+10 = 70$
Nb colis/pos	MOYENNE(10;3) = 7

FIGURE A.1 – Définition du colis moyen à partir de données transporteur

ANNEXE A. DÉFINITION DU COLIS MOYEN

Annexe B

Générateur d'instances



```
D:\ifaure\Documents\Modelisation\Dvpt\Morpho_Ville\Demandes_alea\Gene_demandes\bin\Deb...
password bdd : *****
-----DEFINITION DU RESEAU INITIAL-----
Nom de la table contenant le reseau routier sur lequel generer des points de liv
raisons ? grille_2km
Nombre de points a generer sur ce reseau [1..5000] ? 50
```

FIGURE B.1 – Définition de la grille initiale dans laquelle la ville va être dessinée

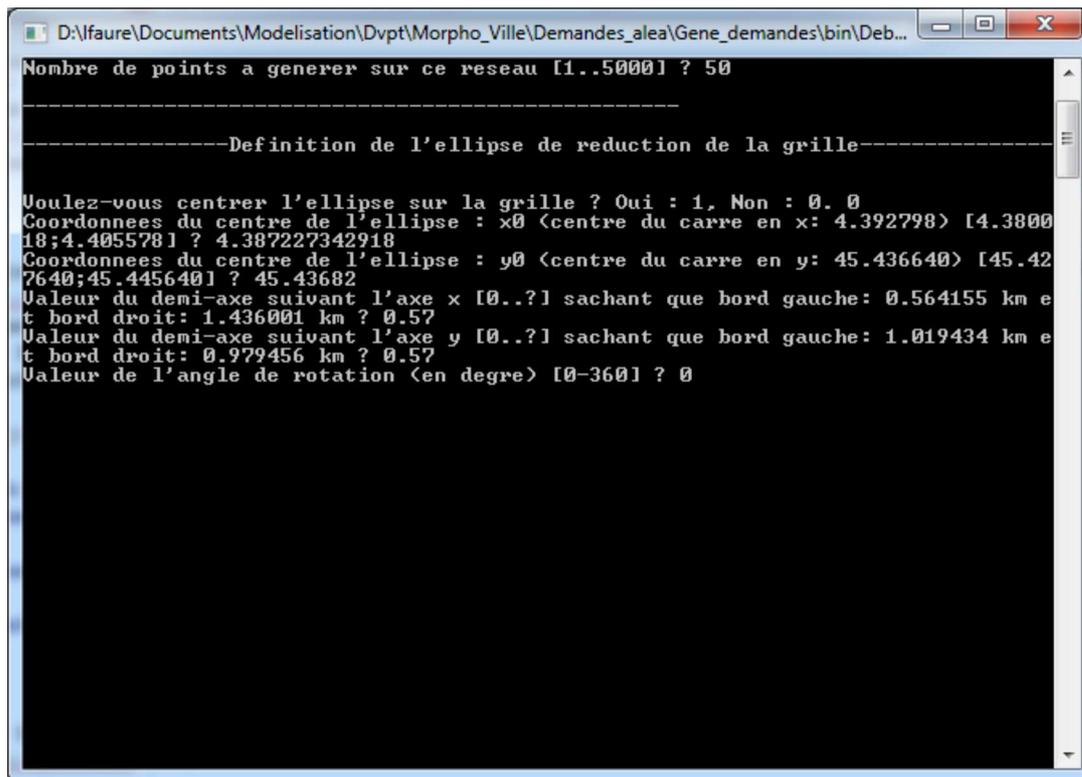


FIGURE B.2 – Définition de l'ellipse qui déterminera les contours de la ville

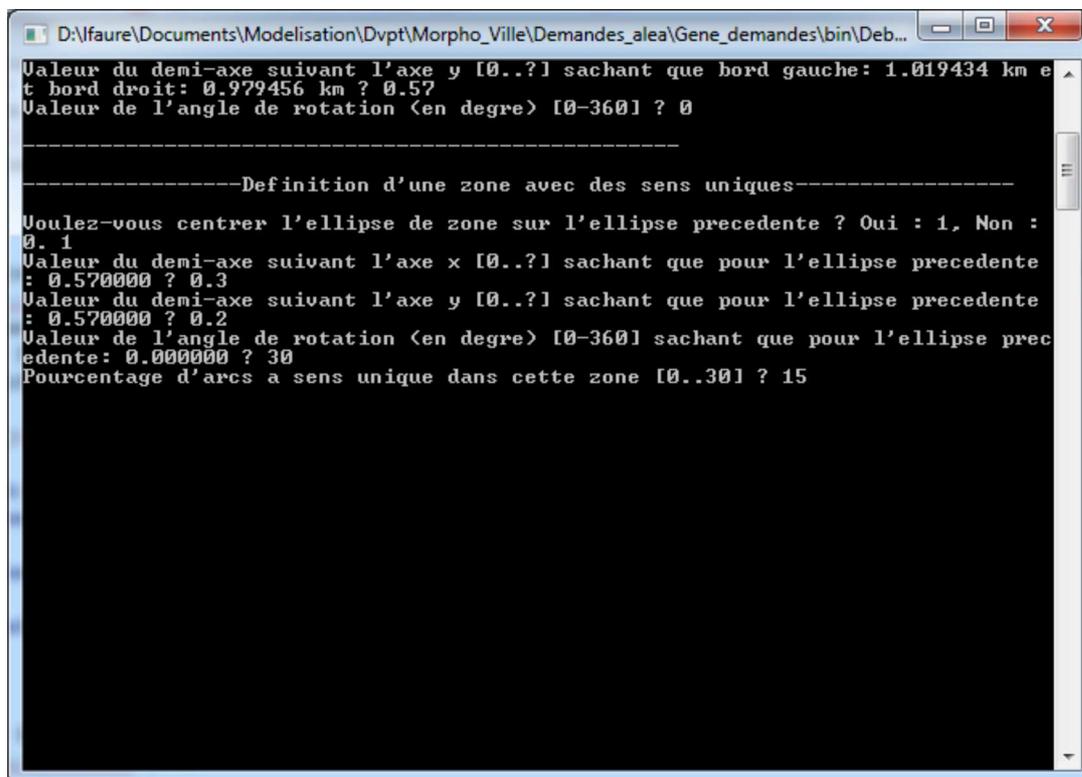


FIGURE B.3 – Définition d'un zone contenant des sens unique et équivalente à un centre-ville

```

D:\faure\Documents\Modelisation\Dvpt\Morpho_Ville\Demandes_alea\Gene_demandes\bin\Deb...
-----Definition de la flotte-----
Voici la liste des vehicules existants :
id: 0, poids: 1800.00, vol: 20.00
id: 1, poids: 500.00, vol: 8.00
id: 2, poids: 900.00, vol: 6.00
id: 3, poids: 1500.00, vol: 7.00
id: 4, poids: 1800.00, vol: 18.00
id: 5, poids: 250.00, vol: 3.00
id: 6, poids: 800.00, vol: 10.00
id: 7, poids: 20.00, vol: 2.00
id: 8, poids: 1000.00, vol: 20.00
id: 9, poids: 1200.00, vol: 18.00
Voulez-vous utiliser un (ou plusieurs) vehicule de la liste ? Oui : 1, Non : 0.
1
Combien de vehicule dans la liste voulez-vous utiliser (entier) [1..10] ? 2
ID du vehicule a utiliser [0..9] ? 9
ID du vehicule a utiliser [0..9] ? 1
Voulez-vous definir un (ou plusieurs) nouveau(x) vehicule ? Oui : 1, Non : 0. 0

```

FIGURE B.4 – Définition de la flotte qui sera utilisée

```

D:\faure\Documents\Modelisation\Dvpt\Morpho_Ville\Demandes_alea\Gene_demandes\bin\Deb...
ID du vehicule a utiliser [0..9] ? 9
ID du vehicule a utiliser [0..9] ? 1
Voulez-vous definir un (ou plusieurs) nouveau(x) vehicule ? Oui : 1, Non : 0. 0
-----
Fin de la generation du reseau. Tapez entrer
Fin de la creation de tous les arcs intermediaires. Tapez entrer
Nb d'arcs a sens unique = 150 et nb d'arc dans la zone restreinte = 954
Termine.
Process returned 0 (0x0)   execution time : 309.658 s
Press any key to continue.

```

FIGURE B.5 – On indique à l'utilisateur que le programme a terminé

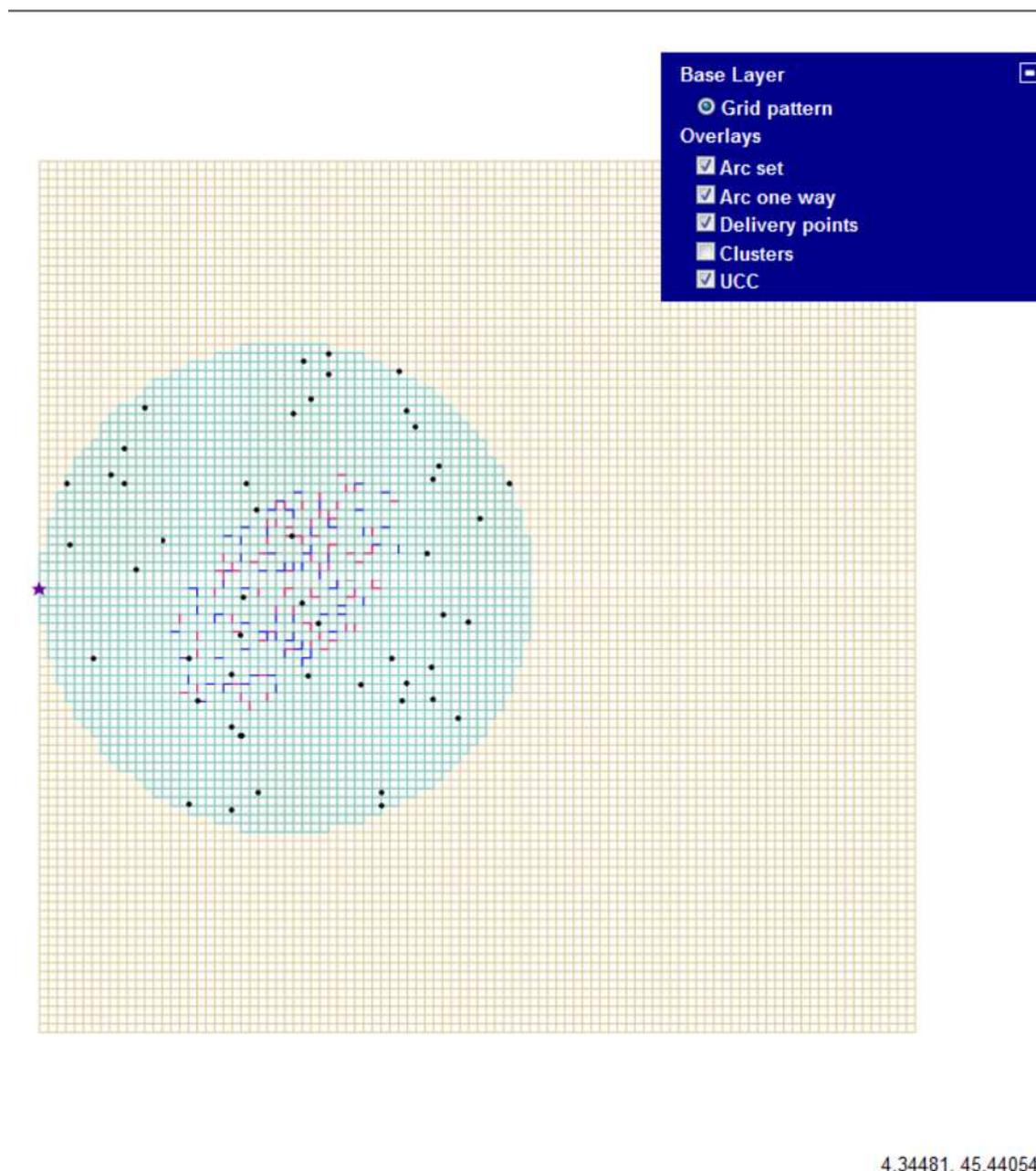


FIGURE B.6 – Affichage sur un SIG de la configuration obtenue

Annexe C

Web-SIG

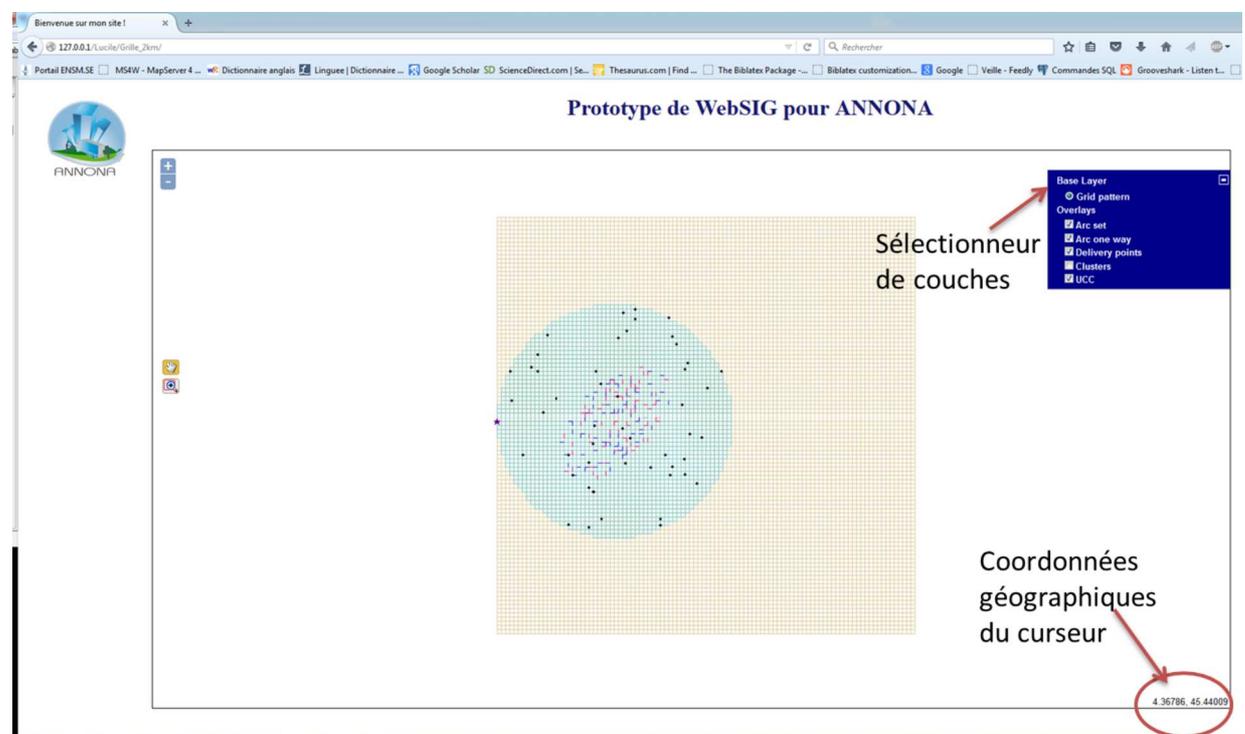


FIGURE C.1 – Exemple d’affichage d’une configuration générée par notre programme sur le Web-SIG

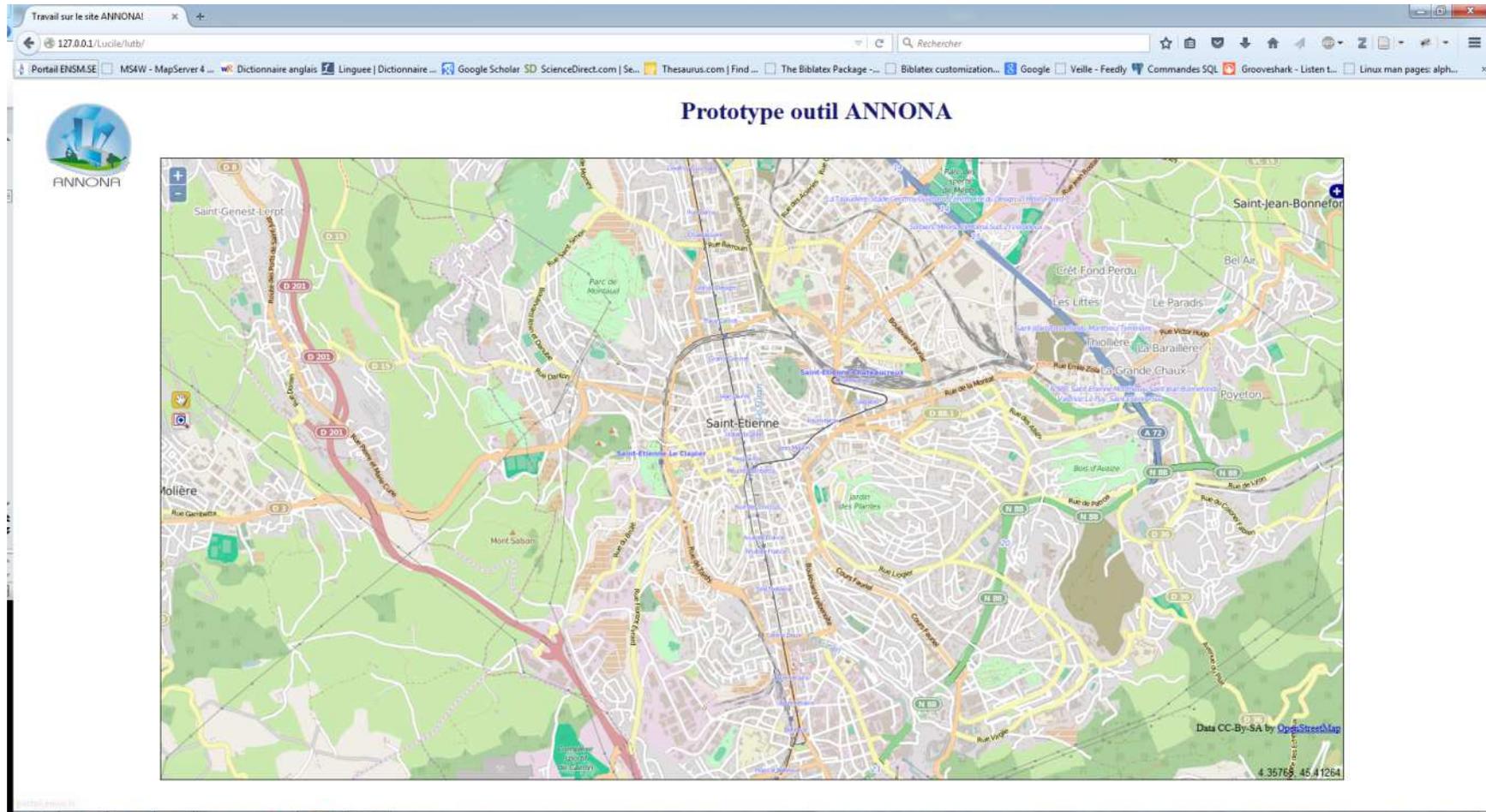


FIGURE C.2 – Affichage de la carte de Saint-Etienne par chargement de la base de données OpenStreetMap

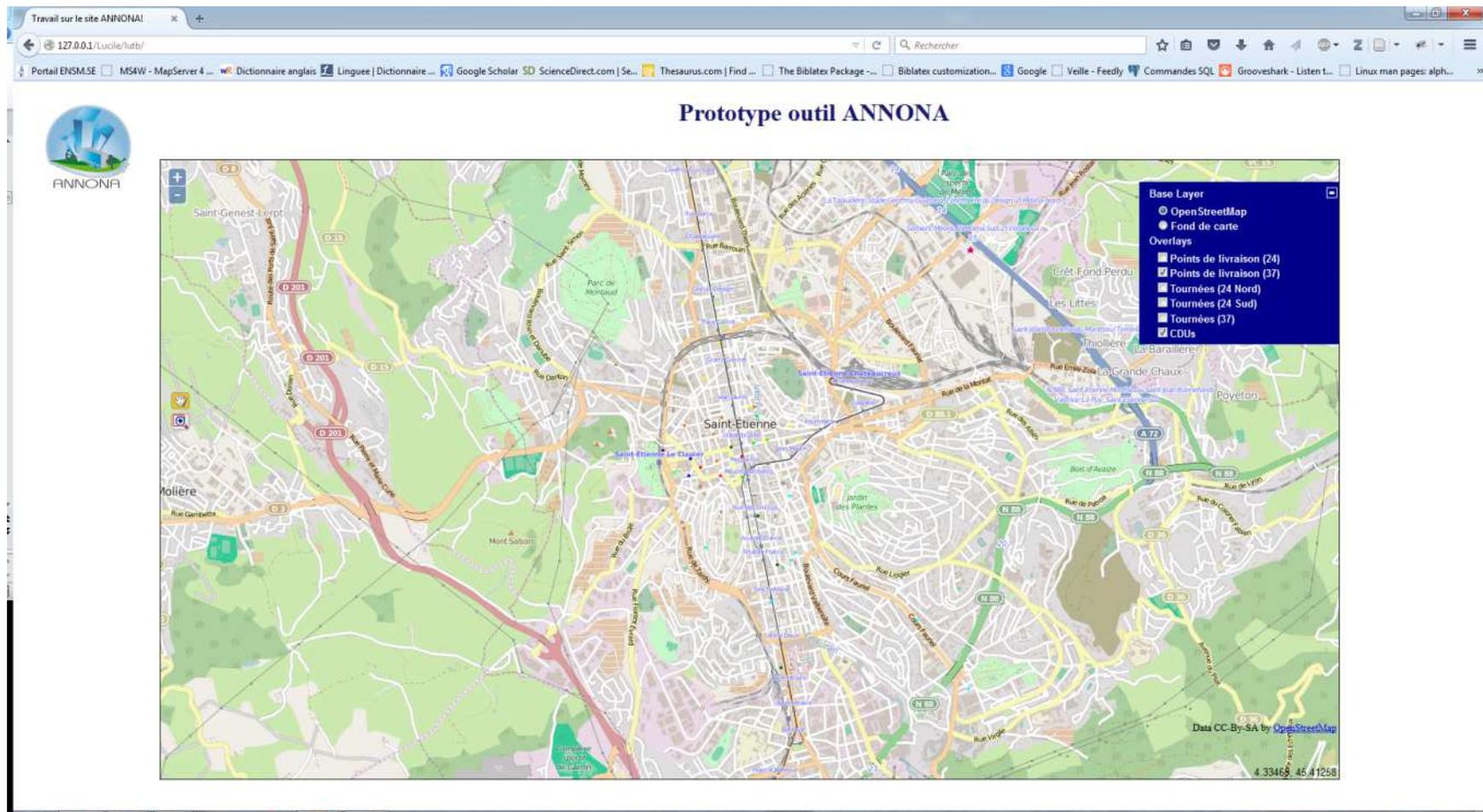


FIGURE C.3 – Ajout de points de livraison et d'un CDU dans la ville de Saint-Etienne

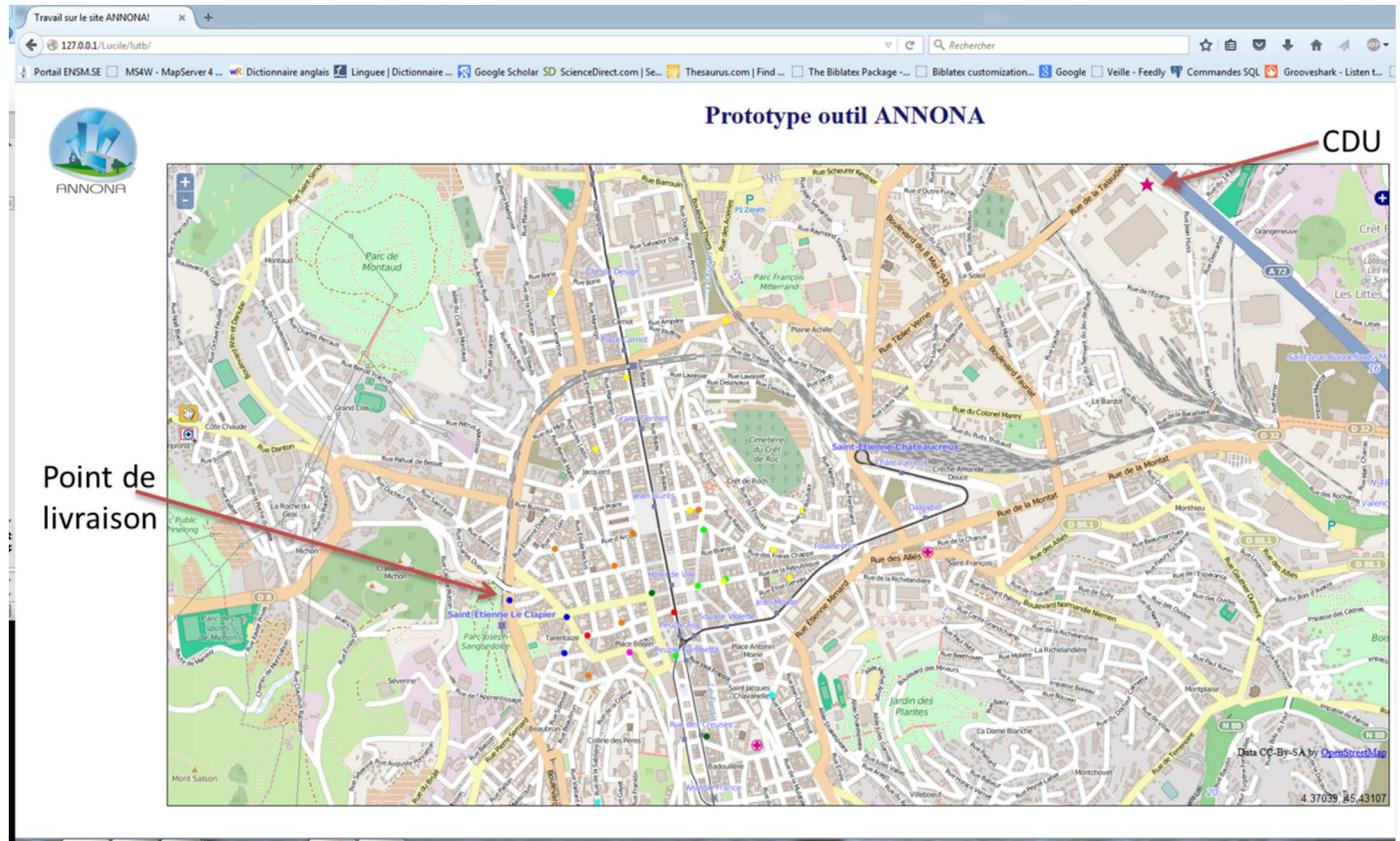


FIGURE C.4 – Zoom sur le CDU et quelques points de livraison

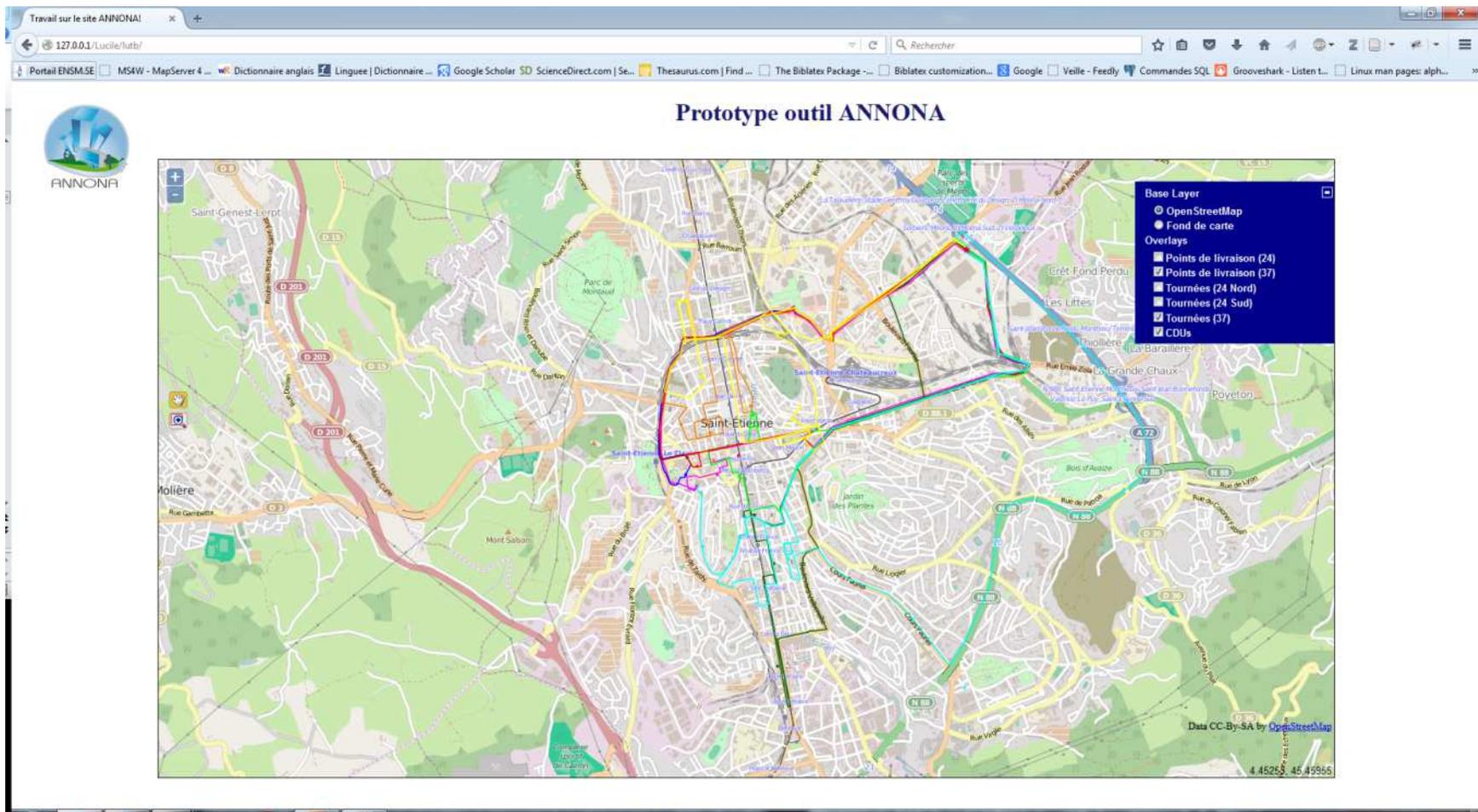


FIGURE C.5 – Affichage des tournées réalisées pour livrer les points affichés

Annexe D

Courbes de temps selon la morphologie

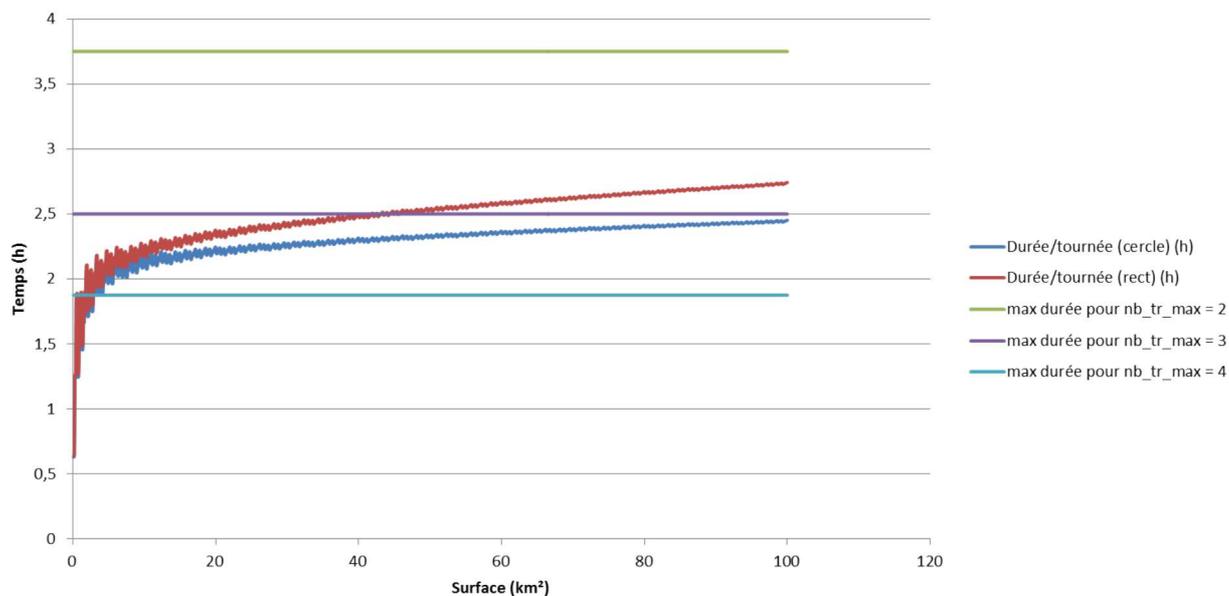


FIGURE D.1 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 5 stops/km²

ANNEXE D. COURBES DE TEMPS SELON LA MORPHOLOGIE

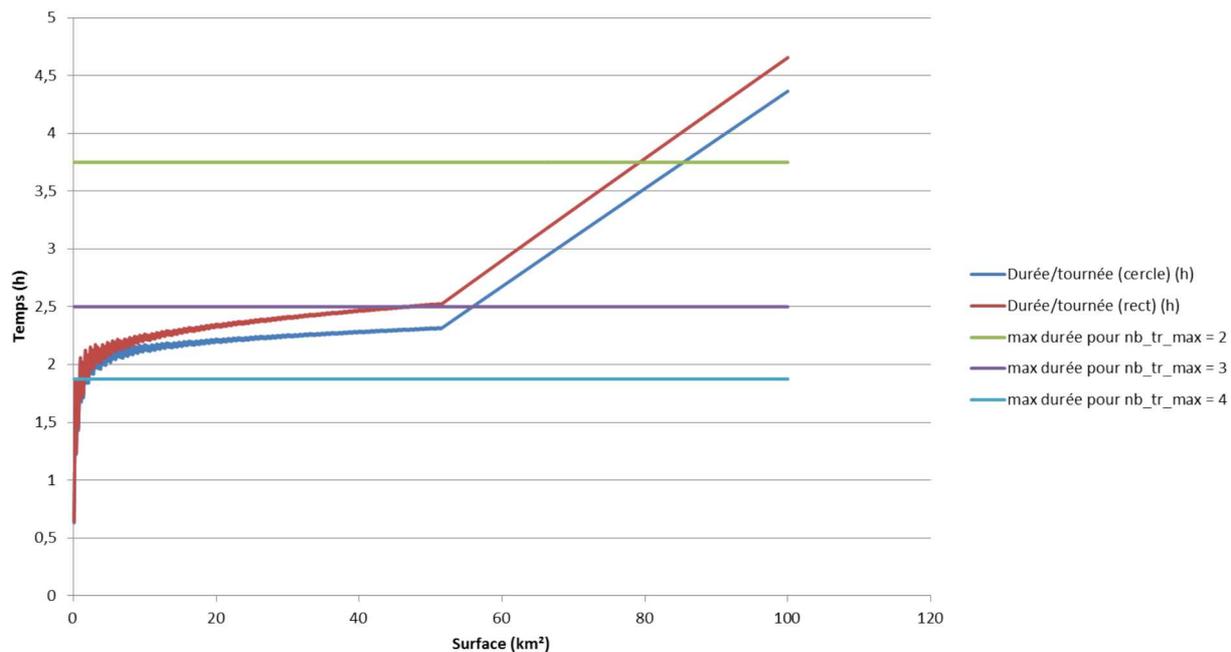


FIGURE D.2 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 10 stops/km²

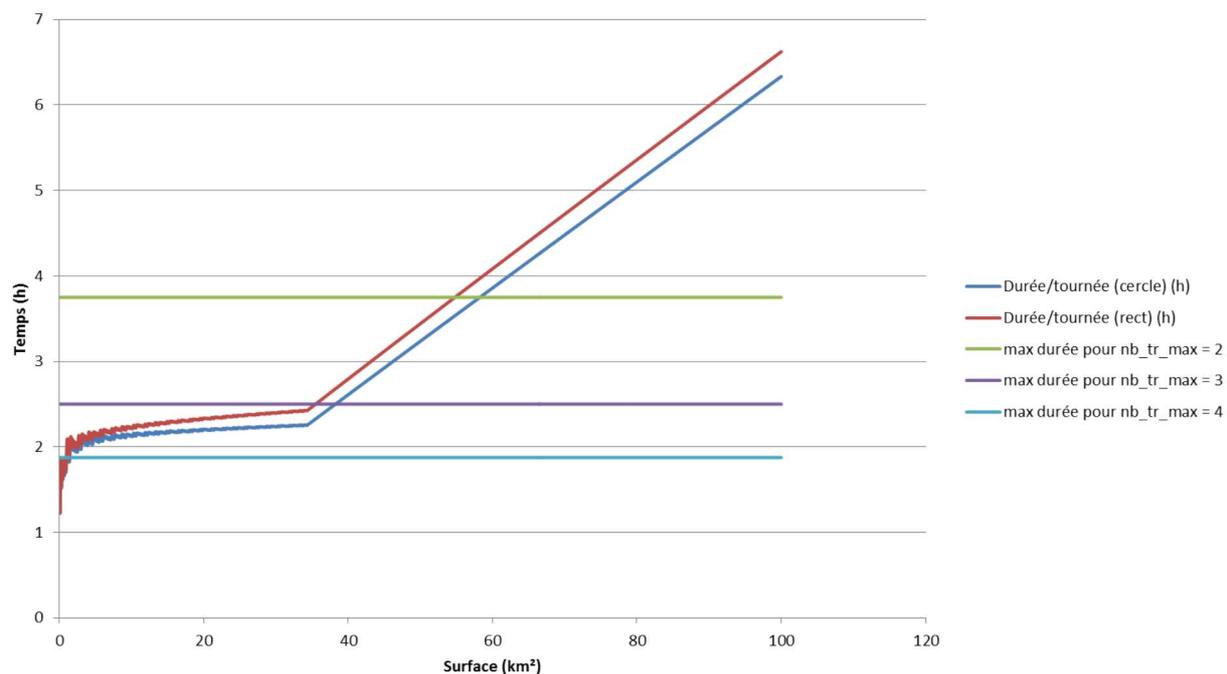


FIGURE D.3 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 15 stops/km²

ANNEXE D. COURBES DE TEMPS SELON LA MORPHOLOGIE

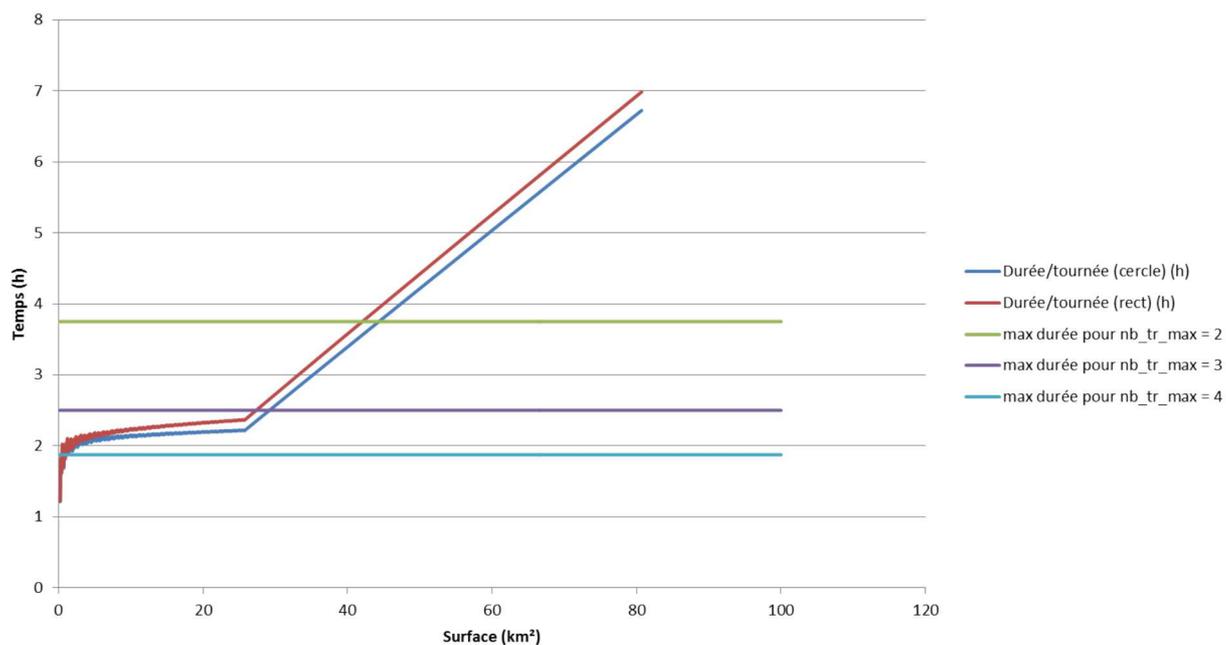


FIGURE D.4 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 20 stops/km²

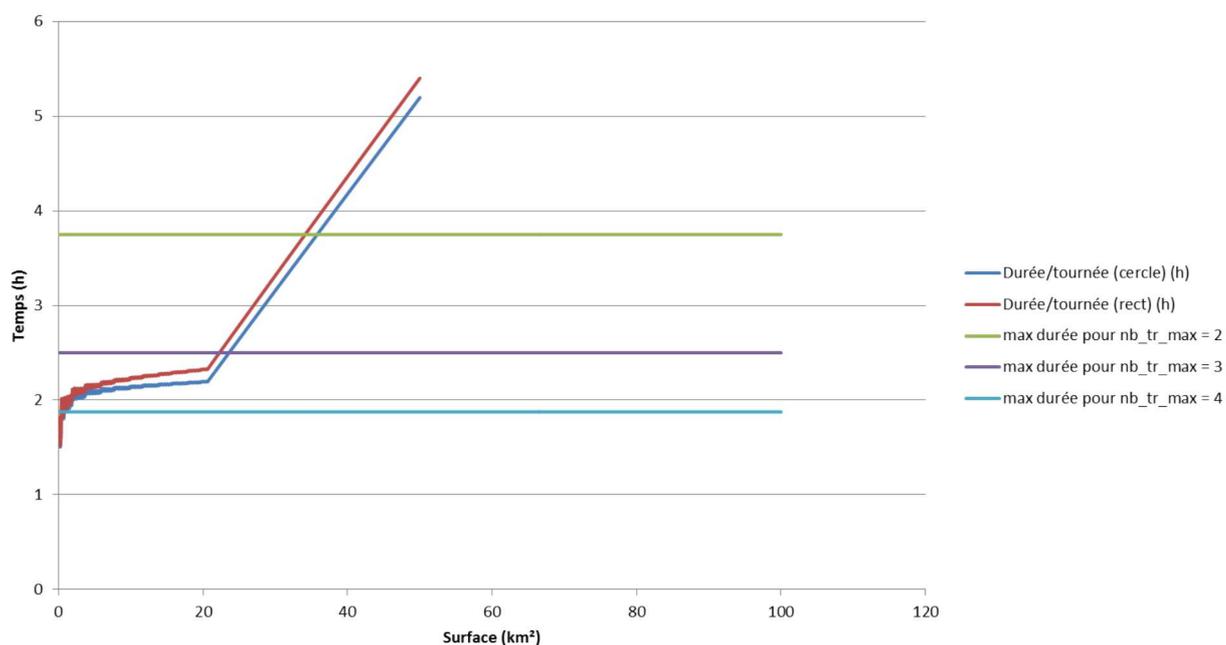


FIGURE D.5 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 25 stops/km²

ANNEXE D. COURBES DE TEMPS SELON LA MORPHOLOGIE

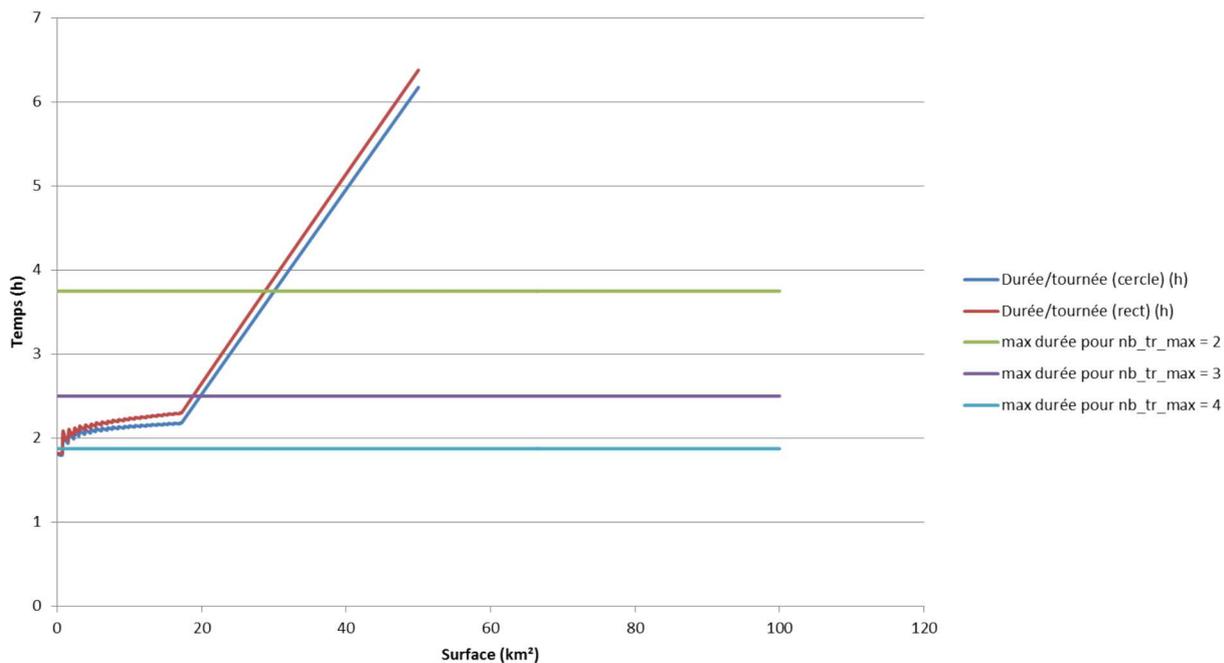


FIGURE D.6 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 30 stops/km²

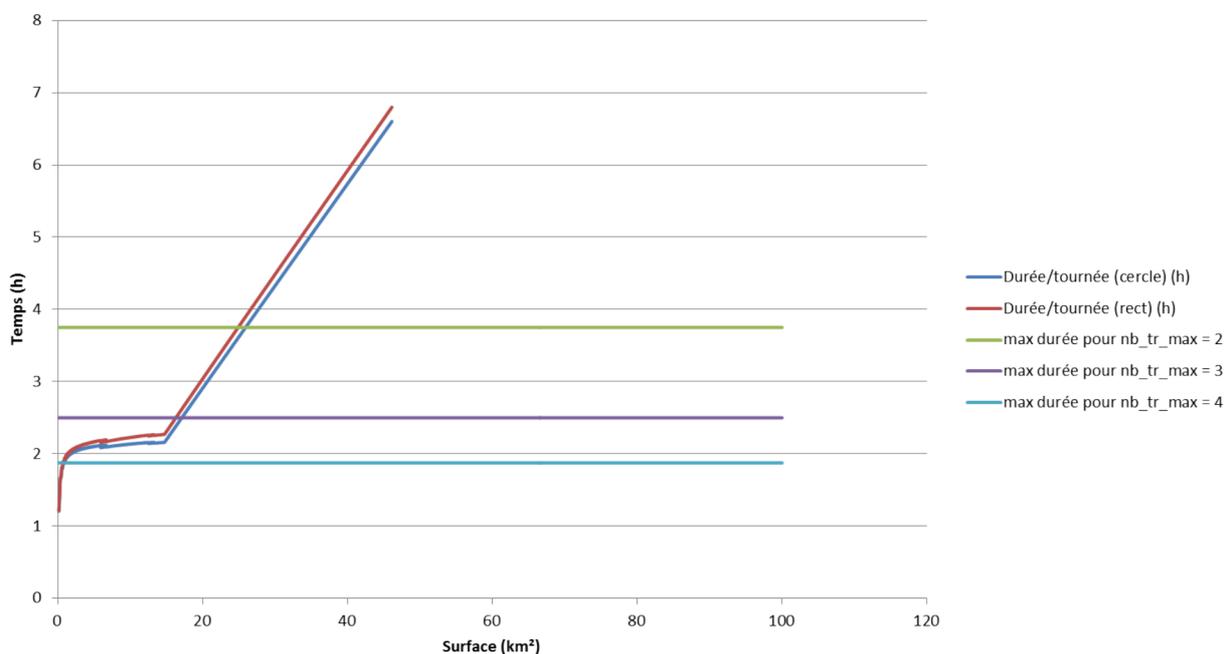


FIGURE D.7 – Courbe montrant l'évolution de la durée moyenne d'une tournée en fonction de la surface et pour une densité de 35 stops/km²

Annexe E

Outil d'aide à la décision par la simulation

Nos modèles s'appuient sur un outil contenu dans un fichier Excel. Il est composé de plusieurs macros (programmées en langage VBA) et formules. Il contient huit onglets dont quatre correspondent à des données d'entrée et quatre à des résultats soit économiques soit physiques (TRG par exemple).



FIGURE E.1 – Les différentes sources d'informations de l'outil décrivant le modèle

Les données économiques ont été rassemblées de telle sorte qu'elles correspondent aux intitulés d'un bilan comptable. Un décideur souhaitant utiliser l'outil peut donc facilement retrouver les informations à entrer.

ANNEXE E. OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION PAR LA SIMULATION

DONNEES COMPTABLES				
Ligne comptable	Paramètres exogènes en €/mois (sauf exceptions)			
	Prix max facturé du 1er colis	1,5	position du colis à 1€	850
706/708	Prix facturé/colis si prix fixe	1	alpha (coeff de réduction du prix)	0,9995225
741	Subventions/an	50000		
602	Prix électricité HC €/kWh	0,14		
	Consommation veh élec kWh/km	0,50		
	Prix gaz €/kg	0,88		
	Consommation veh GNV kg/km	0,124		
	Prix Diesel €/L	1		
	Consommation veh thermique L/km	0,13		
604	Sous-traitance	550		
606	Achats non stockés mat & fourm	375		
611	Presta générale hors logiciel info	220		
61164	Logiciel informatique	500		
613	Location veh élec	2500		
	Location veh GNV	650		
	Location gd veh thermique	1000		
	Location petit veh thermique	650		
	Location bât	920		
615	Entretiens et réparations	480		
616	Assurance	740		
622	Honoraires comptable	490		
625	Deplacements/missions	120		
626	Télécom	90		
627	Services bancaires	80		
628	Cotisations diverses	120		
633/635	Impôts	150		
641	Salaire resp n1	2440		
	Salaire cond +	1700		
	Salaire cond	1500		
645	Charges resp n1	1125		
	Charges cond +	510		
	Charges cond	450		
647	Médecine du travail /salarié	15		
	Prime de paniers/CHAUFF	265		
661	Intérêts sur emprunts	170		
	Prime intéressement (uniquement resp)/mois	1450		

FIGURE E.2 – Les entrées économiques

Les données organisationnelles sont plutôt à destination d'un gérant. On laisse la possibilité d'intégrer les données de fonctionnement actuel (nombre de conducteurs, etc...) afin de pouvoir comparer la situation en cours avec une situation projetée.

DONNEES ORGANISATIONELLES	
Paramètres RH	
Nb jours travaillés/semaine	5
Nb semaines travaillées/an	50,00
Temps ouverture CDU/jour (h)	7,5
Nb resp. n1	1
Nb cond +	0
Nb de conducteurs (capacité)	2
Nb tournées max/cond/jour	3
Nb cond. tournées TNT	1
Paramètres géographiques	
Distance moy du CDU au CV (km)	3
Vitesse moy du CDU au CV (km/h)	30
Surface du centre-ville (km ²)	3,2
Vitesse moy entre les stops (km/h)	15
Paramètres logistiques	
nb de colis captable ds la ville/an	1500000
Nb colis/position	7
Nb position/stop	2,9

FIGURE E.3 – Les entrées organisationnelles

ANNEXE E. OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION PAR LA SIMULATION

Les données concernant les véhicules peuvent évoluer au cours du temps. On peut effectivement intégrer un nouveau véhicule ou faire varier la capacité de l'un des véhicules déjà "programmés". Il faut alors mettre à jour la macro qui calcule le nombre de véhicules nécessaire pour répondre à la demande. Dans cet onglet, l'utilisateur peut choisir les véhicules qu'il souhaite utiliser dans la simulation. Le calculateur choisit les véhicules dans l'ordre de remplissage et au maximum de sa capacité (pas de répartition de la charge).

DONNEES VEHICULES	
Paramètres véhicule élec	
Capacité d'un camion (nb de colis)	70
Distance max d'un camion / jour (km)	90
Paramètres véhicule GNV	
Capacité d'un camion (nb de colis)	70
Distance max d'un camion / jour (km)	250
Paramètres grand véhicule thermique	
Capacité d'un camion (nb de colis)	100
Distance max d'un camion / jour (km)	800
Paramètres petit véhicule thermique	
Capacité d'un camion (nb de colis)	50
Distance max d'un camion / jour (km)	700
Paramètres tournée TNT	
Nb de positions livrées/jour	60
Prix facturé/position (€)	2,4

Véhicules à utiliser (mettre des croix)				
	Electrique	Gaz	Thermique (grand)	Thermique (petit)
v1		x		
v2		x		
v3		x		
v4		x		
v5		x		
v6		x		
v7		x		
v8		x		
v9		x		
v10		x		
v11		x		
v12		x		
v13		x		
v14		x		
v15		x		
v16		x		
v17		x		
v18		x		
v19		x		
v20		x		
v21		x		
v22		x		
v23		x		
v24		x		
v25		x		
v26		x		
v27		x		
v28		x		
v29		x		
v30		x		
v31		x		
v32		x		
v33		x		

FIGURE E.4 – Les entrées concernant les véhicules

Les temps pris en compte dans le processus sont également renseignés. On peut penser qu'ils sont moins modifiés que les autres paramètres, étant donné qu'ils demandent une bonne connaissance du système. De plus, ils représentent des réglages assez fins du système.

DONNEES TEMPORELLES	
Paramètres tournée (capacité)	
Temps chargement/colis (min)	1
Temps contact client/position (min)	2
Temps A/R au camion/stop (min)	2
Temps recherche de stationnement/stop (min)	5
Temps recherche adresse/position (min)	0
Temps entre 2 stops (min)	0,416
Pourcentage de temps perdu en congestion	5%
Pourcentage de temps perdu pour colis en souffrance	5%
Temps pannes ou recharge sur temps d'ouverture/mois (h)	0,5

FIGURE E.5 – Les données sur les temps du processus

ANNEXE E. OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION PAR LA SIMULATION

L'onglet "sorties-log" contient l'ensemble des données logistiques qui sont calculées par le modèle à partir des données d'entrée. L'unique valeur sur laquelle l'utilisateur peut agir est le pourcentage de colis traité qui correspond en fait à la situation ponctuelle que l'on souhaite évaluer. Lorsque l'on se place dans une approche plutôt exploratoire avec une projection en fonction du nombre de colis, ce paramètre est incrémenté par une macro afin d'obtenir les points à placer sur les courbes présentées tout au long de ce manuscrit.

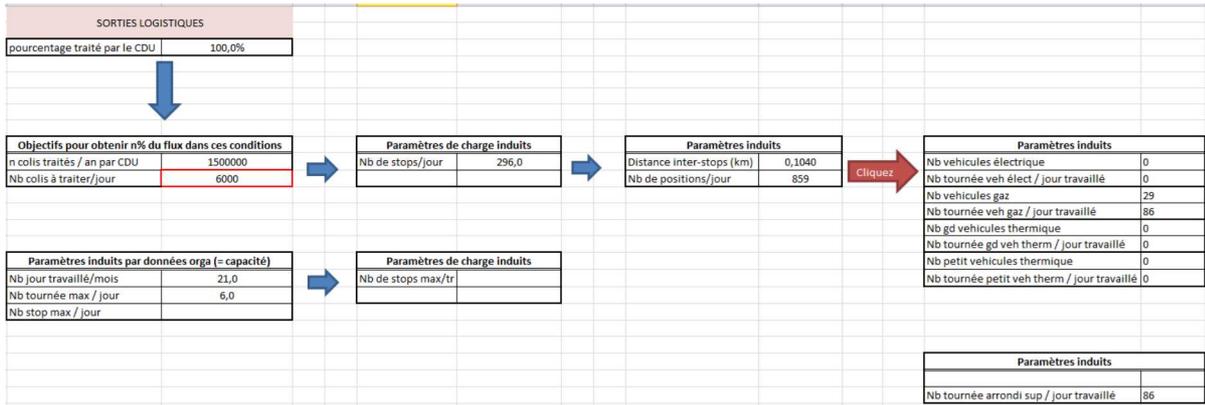


FIGURE E.6 – Les sorties logistiques de l'outil

Ensuite, l'onglet "TRG" contient les résultats des calculs de chaque ratio du TRG ainsi qu'une représentation de la répartition des temps dans le processus.

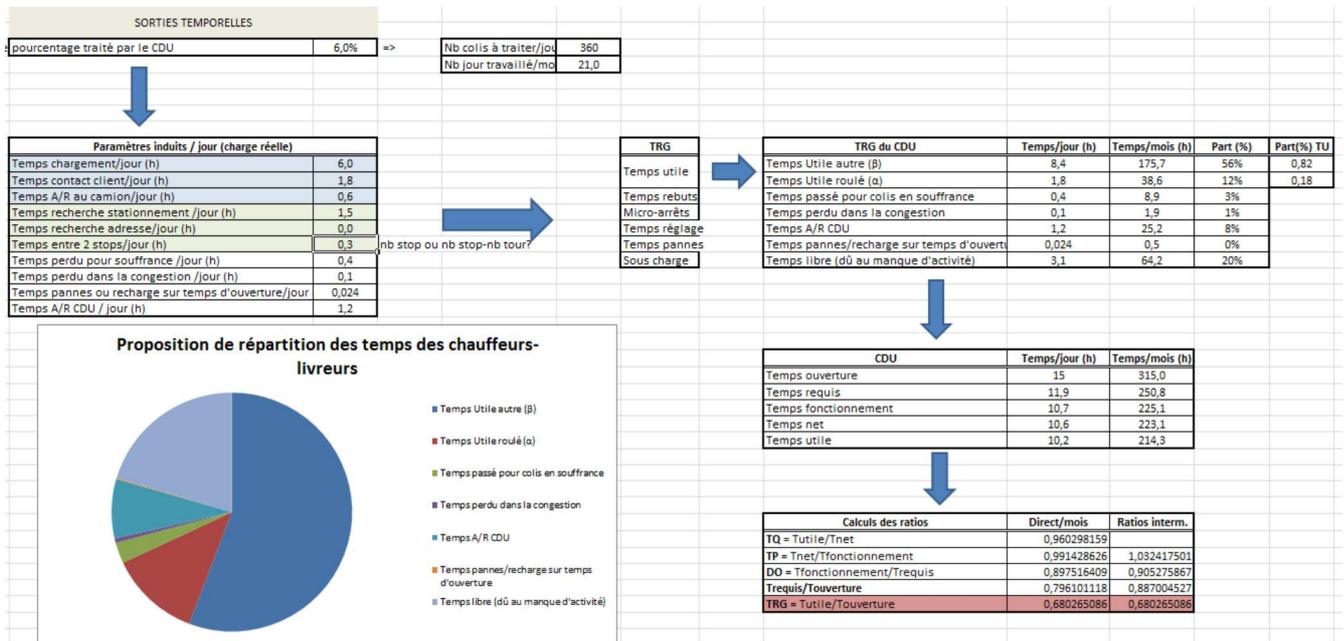


FIGURE E.7 – Les indicateurs liés au TRG

ANNEXE E. OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION PAR LA SIMULATION

On a également intégré un onglet permettant le pilotage opérationnel du système et qui contient des indicateurs plutôt "temps réel" tels que la durée moyenne d'une tournée ou le chiffre d'affaires journalier.

SORTIES DIMENSIONNEMENT							
pourcentage traité par le CDU	6,0%	=>					
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">Nb colis à traiter/jour</td> <td style="width: 30%; text-align: center;">360</td> </tr> <tr> <td>Nb jour travaillé/mois</td> <td style="text-align: center;">21,0</td> </tr> </table>	Nb colis à traiter/jour	360	Nb jour travaillé/mois	21,0
Nb colis à traiter/jour	360						
Nb jour travaillé/mois	21,0						
							
Paramètres induits (en charge)							
Nb chauffeurs nécessaire / jour	2,00	2,00					
Nb chauffeurs entier/ jour	2,00	2,00					
Distance parcourue / tournée	10,8						
Durée moy totale/tournée (h)	1,99						
Durée moy tournée hors charg. (h)	0,94						
CA /jour (€) nouveau tarif	640,25 €						
CA/jour (€) tarif fixe	504,00 €						

FIGURE E.8 – Le pilotage opérationnel du système

Enfin, les sorties économiques du modèle sont présentées dans le dernier onglet. On trouve l'évaluation économique du point de fonctionnement actuellement testé ainsi que la possibilité de lancer les macros qui tracent l'évolution des ces grandeurs économiques en fonction du nombre de colis livrés par jour.

ANNEXE E. OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION PAR LA SIMULATION

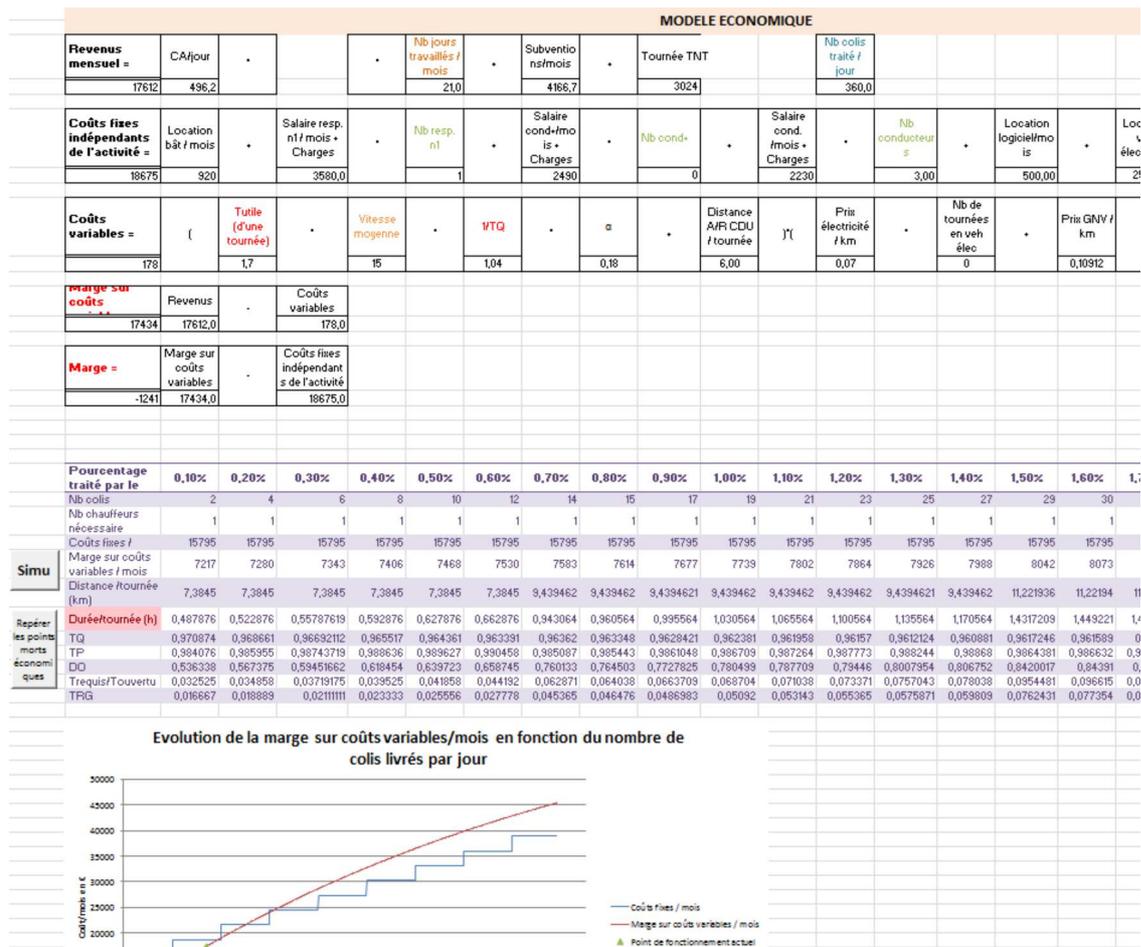


FIGURE E.9 – Les sorties économiques de l’outil

Annexe F

L'ISO 26000

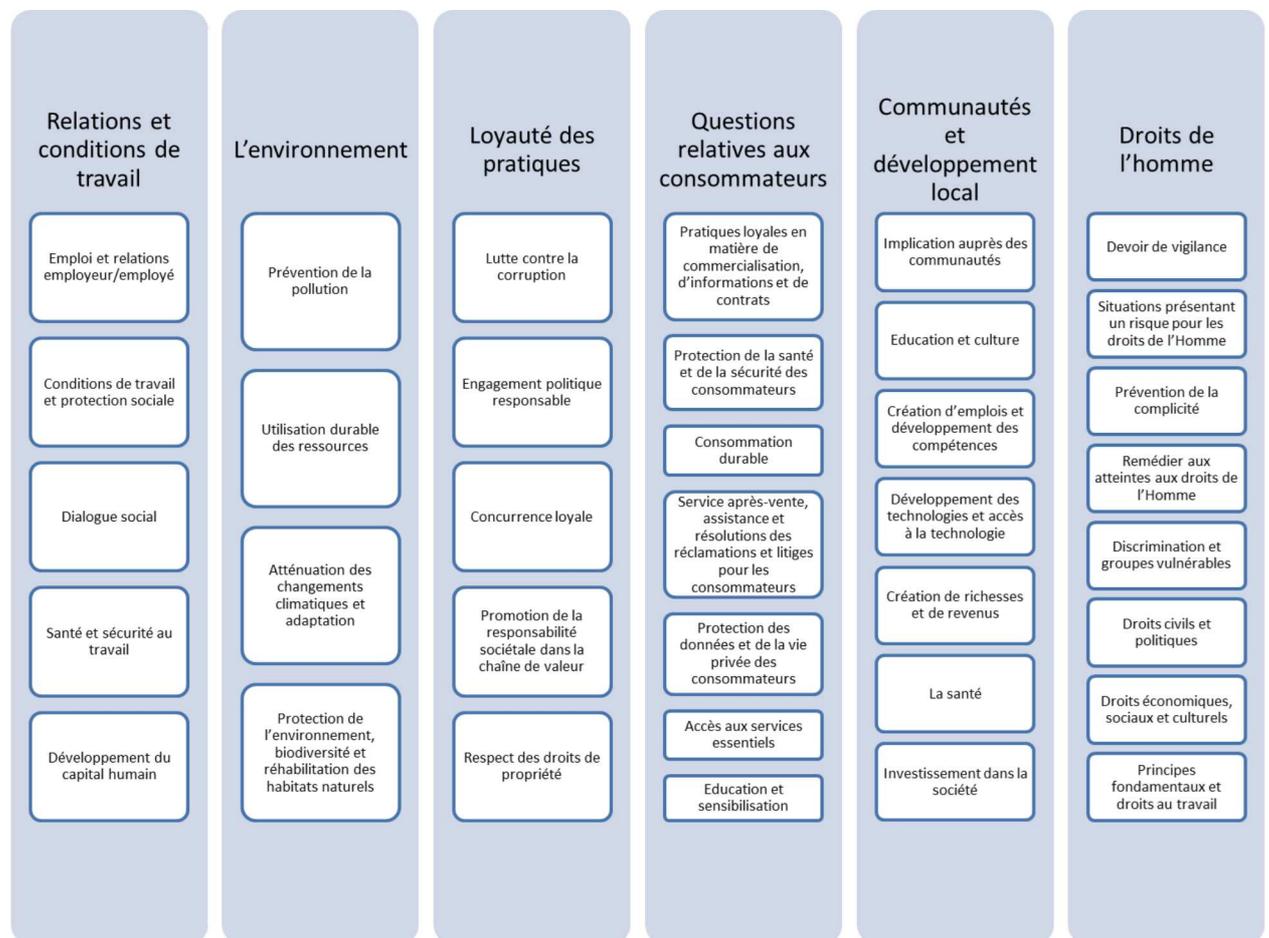


FIGURE F.1 – Les questions centrales et les domaines d'actions de l'ISO 26000

Questions centrales	Domaines d'action sélectionnés	Indicateurs proposés	Données nécessaires	Mode pour le recueil des données	Unités
Relations et conditions de travail					
	D2 : Conditions de travail et protection sociale	Stress en situation de conduite	▫ Temps perdu à cause des embouteillages	▫ Entretien avec un panel de chauffeurs	heure
	D5 : Développement du capital humain	Formation à l'éco-conduite	▫ Nombre de chauffeurs formés à l'éco-conduite	▫ Entretien avec la direction	Nb
			▫ Nombre de chauffeurs appliquant l'éco-conduite	▫ Entretien avec un panel de chauffeurs	Nb
L'environnement					
	D1 : Prévention de la pollution	Emissions de polluants (CO ₂ , NO _x , SO _x , VOC, PM10) (CO, O ₃ , NO ₂ , C ₆ H ₆ , Nucléaire)?	▫ Distance parcourue par type de véhicule ▫ PTAC ▫ Norme Euro des véhicules ▫ Type de motorisation des véhicules ▫ Vitesse moyenne de déplacement	▫ Entretien avec les transporteurs et CDU	Tep kg/Jr µg/m ³
	D2 : Utilisation durable des ressources	Consommation carburant (fuel, méthane)			
	D3 : Atténuation des changements climatiques et adaptation	Tonnes équivalent CO ₂			
Loyauté des pratiques					
	D2 : Engagement politique responsable	Mise en place et application d'une réglementation adaptée	▫ Parution du "décret municipale"		-
	D3 : Concurrence loyale	S'inscrire au registre des transports			-
Questions relatives aux consommateurs					
	D6 : Accès aux services essentiels	Niveau de service : Coût, Délai, Qualité	▫ Evaluation du niveau de service perçu	▫ Enquête terrain auprès des clients/consommateurs	-
	D7 : Education et sensibilisation	Charte : Pourcentage d'adhésion des commerçants et chargeurs	▫ Nombre de commerçants/chargeurs adhérents à la charte	▫ Entretien avec la collectivité	Nb
			▫ Nombre de commerçants/chargeurs dans le centre-ville	▫ Entretien avec les associations de commerçants et de chargeurs	Nb
Communautés et développement local					
	D3 : Création d'emplois et développement des compétences	Développement de compétences sur la logistique urbaine	▫ Nombre d'emplois créés par le CDU	▫ Entretien avec la collectivité	Nb
			▫ Promotion de l'exemple du CDU stéphanois auprès d'autres collectivités	▫ Entretien avec la collectivité	-
	D5 : Création de richesses et de revenus	Attractivité du centre-ville		▫ Enquête terrain auprès des habitants	-
		Valorisation du foncier logistique	▫ Surface frichée réaffectée	▫ Entretien avec la collectivité	m ²
Droits de l'Homme					
	D5 : Discrimination et groupes vulnérables	Intégration de personnes en situation de handicap	▫ Nombre d'emplois "réservés"	▫ Entretien avec la direction	Nb

FIGURE F.2 – Ebauche de proposition d'un cadre d'évaluation d'un CDU basé sur l'ISO 26000

NNT : 2015 EMSE 0803

Lucile FAURE

EVALUATION OF THE ECONOMICAL PERFORMANCE OF URBAN CONSOLIDATION CENTERS

Speciality: Industrial Engineering

Keywords: City Logistics, UCC, Profitability, Physical Internet

Abstract:

The supply of freight inside cities is the last link of global logistics. Cities are actually in the middle of contradictory issues. On one hand the e-commerce revolution has significantly increased the ingoing flow inside the city. On the other hand people yearn to create pleasant pedestrian spaces of life in which vehicles are not welcome. Yet, freight supply is required to keep the attractiveness of city. It is necessary to provide solutions meeting all these needs.

A lot of solutions have been studied to face city logistics issues. Among them, we focus our research on a flow pooling solution exploiting an Urban Consolidation Centre (UCC). It consists of a centralization platform for the distribution of freight intended for the city centre. The purpose is to pool freight from different carriers to limit the use of resources in urban areas. This kind of project is particularly designed to avoid semis from entering the city. Thus, the warehouse is located as close as possible to city centres as well as being as accessible as possible for carriers.

Despite the enthusiasm for the UCC concept, this type of solution has not shown much success until now. That is why we choose to concentrate our approach on the observation and assessment of logistics costs to operate a UCC in real life with the aim to answer the question: Can an UCC be viable in a middle size European city? Particularly, we show this is the case but with some specific conditions that we present in details.

To do so, we developed two models: the first one is an economical model based on operational costs and the second is a physical model based on the study of process 'times. The combination between both models gave the opportunity to highlight some levers. Then we tested these levers on case studies and we suggest some improvement of the performance thanks to a new logistics organisation called « Physical Internet ».

NNT : 2015 EMSE 0803

Lucile Faure

EVALUATION DE LA PERFORMANCE ECONOMIQUE DES CENTRES DE DISTRIBUTION URBAINE

Spécialité: Génie Industriel

Mots clefs : Logistique urbaine, CDU, rentabilité, Internet Physique

Résumé :

Les villes sont de plus en plus au cœur d'enjeux contradictoires. D'un côté le e-commerce a considérablement augmenté les flux circulant en ville. D'un autre côté on aspire à créer des espaces de vie agréables et piétons, dans lesquels les véhicules de marchandises sont souvent proscrits. L'approvisionnement est pourtant indispensable pour conserver l'attractivité de la ville.

Face à cela, la logistique urbaine est apparue, visant à organiser le dernier maillon de la chaîne logistique en élaborant des solutions dont les aires de livraison, la réglementation ou encore les Centres de Distribution Urbaine (CDU). Il s'agit d'une plateforme de mutualisation logistique, localisée à proximité du centre-ville et des grands axes routiers. Sa mission est de consolider le fret à destination de la ville afin de réduire le nombre de camions et d'utiliser des modes de livraison doux tel le véhicule électrique ou le triporteur.

Pourtant les CDU peinent à atteindre une zone d'équilibre économique. L'objectif de cette thèse est d'identifier si un CDU peut être rentable dans une ville européenne de taille moyenne. Nous montrerons que oui mais sous certaines conditions que nous préciserons et testerons.

Pour cela, nous avons développé deux modèles, l'un économique basé sur les coûts opérationnels du CDU, et l'autre physique basé sur les temps du processus de livraison. Ce dernier présente l'intérêt d'identifier des leviers pour améliorer la performance économique du CDU et de pouvoir tester leur impact. Nous avons illustré certains leviers dans une étude de cas au cours de laquelle l'impact de la morphologie, le type de véhicules ou encore le prix de vente, par ex., ont été testés.