



Juillet 2018

**RESEARCH ARTICLE****Simulation de la mutualisation logistique du dernier kilomètre : Pratique verte de minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> dans la ville de CASABLANCA – Maroc****Acharki Hakim and Rajaa Mohammed**Université Abdelmalek Essaadi, Laboratoire : Management Logistique Gouvernance et Economie  
Appliquée, Tétouan - Maroc

---

**RESUME**

---

**Keywords:**Mutualisation logistique  
Dernier kilomètre  
Minimisation de CO<sup>2</sup>  
Logistique verte  
Environnement

La logistique du dernier kilomètre a toujours représenté un maillon problématique pour les chaînes d'approvisionnement. En effet, représentant presque le quart des coûts du transport jusqu'au consommateur, elle induit également à des émissions très importantes compte tenu de la vitesse de circulation, des problèmes de stationnement et de la congestion. C'est dans cette optique qu'on s'est lancé pour essayer de proposer des solutions au problème environnemental que connaît la ville de Casablanca en matière de transport de marchandises en ville, en se basant sur les enquêtes déjà réalisées et les nôtres.

L'objectif étant de démontrer l'impact d'une stratégie de mutualisation pour ce dernier maillon sur les émissions et pouvoir ainsi prétendre la considérer comme une pratique verte pour le milieu urbain casablancais. Ce travail s'inscrit dans l'effort national de l'AMDAL en matière d'amélioration de la logistique du dernier kilomètre en particulier et de la logistique le milieu urbain en général.

---

---

**ABSTRACT**

---

**Keywords:**Pooling logistics  
Last Mile  
CO<sup>2</sup> Minimization  
Green logistics  
Environment

Last mile logistics has always been considered as a critical link within the supply chain. In fact, if we consider that it represents almost the quarter of shipping costs to the consumer, it induces at the same time very significant emissions of CO<sub>2</sub> that eventually depend on driving speeds, parking problems and traffic congestion. Considering these facts, we tried to suggest several solutions to the current situation of Casablanca, using our own surveys and those that has already been conducted by other researchers.

The major aim is to illustrate the impact of a pooling strategy of this last link on CO<sub>2</sub> emissions and consequently being able to consider it as a green practice for the urban environment of Casablanca. This study is a part of the efforts undertaken by the AMDAL regarding the improvement of the last mile logistics particularly and logistics in the urban environment generally.

---

## Introduction

Peu de choses représentent le « visage » d'une entreprise plus que la partie transport de la chaîne d'approvisionnement souvent appelée logistique du dernier kilomètre. Pour quelque chose qui ne concerne apparemment que des livraisons courtes et rapides, la logistique du dernier kilomètre semble couvrir beaucoup de territoire. Non seulement géographique mais également d'image de marque et de responsabilité sociétale. A ce niveau les entreprises doivent se poser la question : « A quel prix pouvons-nous amener ce produit aux mains du consommateur afin d'avoir une image positive ? » la question doit être analysé non seulement sur le volet économique mais doit également prendre en considération le volet environnemental qui impacterait par conséquent le volet social. En effet, les entreprises doivent se poser.

Aujourd'hui, l'organisation en chaîne logistique doit permettre, par un jeu de collaborations, de tendre les flux tout en garantissant des niveaux de service élevés. Un haut niveau de collaboration entre les différents maillons de la chaîne permet d'accroître la visibilité de chacun concernant la demande finale et facilite une prise de décision réactive face à l'incertitude de cette dernière.

Toutefois, aucune collaboration ne peut exister sans une aide de l'infrastructure nationale aussi bien en zone extra-urbaine ou urbaine. Pour le cas du Maroc, qui n'avait en 2010 que quelques dizaines de ha dédiées aux plateformes logistiques modernes, a pu atteindre en 2014 les 550 ha aménagés entre Tanger, Casablanca et d'autres régions qui accueillent des flux industriels. Ceci n'étant pas le fruit du

hasard, l'optimisation de toute chaîne logistique passe par l'optimisation globale de la chaîne en générale et celle du dernier maillon en particulier. Selon plusieurs études, les coûts liés au dernier kilomètre représentent une part très importante (20%) du coût du transport depuis le tout premier fournisseur jusqu'au client final.

Le raisonnement économique démontré jusqu'à présent par les différents acteurs, bien qu'intéressant, ne relève pas de la préoccupation actuelle de l'état en matière d'efforts. Selon différents événements (COP22, l'engagement du Maroc dans la lutte contre les effets du changement climatique, etc.), la préoccupation est plutôt penchée sur le volet environnemental, pour le cas du transport, sur les émissions et la congestion.

C'est pourquoi, l'ADML ainsi que d'autres auteurs publics et privés ont fait des efforts avec des initiatives telles que l'entreprise responsable en modifiant les matières prises en compte dans leur production, optant pour certaines stratégies d'externalités à des prestataires de services logistiques offrant un potentiel d'optimisation important par des économies d'échelles et des taux de remplissage intéressants.

Le choix de cette thématique pourra apporter une contribution à la fois pratique et managériale aux travaux académiques déjà présents : Pratique par le diagnostic actuel de la réalité des pratiques du dernier kilomètre. Managérial par l'analyse, l'évaluation et la communication des résultats de l'étude qui permettront éventuellement de déterminer les différents aspects et impacts du recours aux stratégies de mutualisation proposées sur les

performances environnementales du transport de marchandises en ville.

L'objectif de ce papier est de répondre à la problématique centrale : « *La mutualisation de la logistique du dernier kilomètre à Casablanca permet-elle de proposer un modèle éco-responsable ?* »

Afin de réduire l'ambiguïté du questionnement, et faciliter sa compréhension, on propose de la réduire à une question dérivée, à savoir : « *les niveaux de performance de la mutualisation en milieu urbain à Casablanca permet-il de la considérer comme étant une pratique logistique éco-responsable ?* ».

Pour répondre à cette question, on s'est proposé de faire appel au plan d'investissement marocain en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> en zone urbaine et qui vise à réduire les émissions de 35% afin d'évaluer les résultats obtenus en fonction de la stratégie simulée et pouvoir la comparer à ce référentiel gouvernemental. D'un autre côté, des études exploratoires et documentaires ont été mise en place afin de cerner l'aspect conceptuel de la recherche.

On tient juste à préciser que cette étude rejoint les travaux effectués par (Pan, 2010), (Muñoz-Villamizar, 2015) et (Gonzalez-Feliu J. et al., 2011, 2012, 2013) en matière de modélisation et simulation des stratégies de mutualisation du transport logistique aussi bien en milieu urbain qu'en périurbain. D'un autre côté, on s'est basé sur le modèle de (Hickman, 1999) afin d'évaluer les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules de transport pris en considération dans l'étude.

La valeur ajoutée de ce travail est que cette étude s'inscrit dans une optique de

résolution d'un problème empirique basé sur un besoin réel exprimé explicitement par l'AMDL sous forme d'axes de plan d'actions.

## **1. Revue de littérature**

Cette partie vise à élucider une revue de littérature dédiée à la thématique choisie et en accord avec l'objet d'étude. En effet, bien que la logique de mutualisation ne date pas d'hier, les travaux relatifs à sa mise en place en milieu urbain sont peu nombreux, spécialement pour le dernier kilomètre.

De ce fait, on se propose de présenter les différents apports des auteurs en la matière afin de tracer les grandes lignes qui permettront de cadrer ce sujet et de s'inscrire dans une démarche constructive plutôt que répétitive.

### **1.1. Mutualisation logistique**

Le concept de mutualisation dépasse largement l'idée de la consolidation ou le groupage assez répandus comme pratiques dans le monde professionnel. Il concept l'accord de partenariat qui consiste à mettre en commun de manière volontaire des ressources (infrastructures, systèmes d'information, véhicules, etc.) dans le but d'atteindre soit un niveau de performance particulier, soit des gains économiques, écologiques et sociétaux.

Les études et pratiques portant sur ce mode de collaboration ont permis de dégager plusieurs solutions permettant d'assurer la compétitivité des entreprises tout en minimisant leur impact sur l'environnement.

On s'intéressera dans le présent travail à un aspect bien particulier de la collaboration horizontale. Ladite collaboration concerne les entreprises qui fournissent des biens ou services complémentaires, qu'elles soient concurrentes ou non et qui partagent une même infrastructure ou moyens de livraison. Il s'agit de la notion de mutualisation logistique. Dans le présent papier, on traitera de la mutualisation logistique selon deux axes primordiaux :

- Mutualisation des infrastructures et véhicules d'un groupes de fournisseurs au profit de plusieurs clients (Pan, 2010), (Ballot et Fontane, 2010) et (Moutaoukil, 2013).
- Mutualisation des véhicules avec tournées de livraison dans l'objectif de maximiser la charge. (Pan, 2010), (Muñoz-Villamizar, 2015) et (Howard et Marklund, 2011).

Comme constaté au niveau des travaux des auteurs relatifs à la mutualisation logistique, la prise en considération des préoccupations environnementales quant à ces pratiques revêt un aspect récent. A ce titre, aussi bien (Pan, 2010) que (Ballot et Fontane, 2010) se sont concentrés sur la dimension environnementale en prenant en considération les distances parcourues et le nombre de véhicules comme principales variables à minimiser afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des différents scénarios.

Bien que (Moutaoukil, 2013) déclare étudier le volet développement durable dans son étude, il se concentre uniquement sur les aspects économique et environnemental en négligeant le volet social de la triade du développement durable.

Il est important de signaler que l'ensemble de ces travaux prennent en considération une mutualisation logistique industrielle à échelle périurbaine, de ce fait, les auteurs considèrent des flux de marchandises et de véhicules très importants (en semi-remorques et palettes). Contrairement à la logique poursuivie par ces auteurs, qui traite d'une demande stationnaire et par lots répartis sur des délais espacés, la logique de la logistique urbaine et plus précisément celle du dernier kilomètre connaît une demande stochastique et une forte fréquence de livraison avec des délais très courts.

En plus, certains des travaux dont (Pan, 2010) et (Leitner, 2011), éventuellement, prennent en considération la possibilité d'un report modal entre moysn de transport plus économiques et plus écologiques (ferroviaire et routier) ce qui n'est malheureusement pas pris en compte dans ce travail compte tenu de l'état actuel des pratiques de transport de marchandises au Maroc. En effet, étant encore à l'état embryonnaire, la mutualisation des marchandises en ville reste encore limitée au transport routier de manière très timide sous forme de « consolidation » entre certains clients.

La spécificité de ce travail dans le contexte urbain et plus particulièrement du dernier kilomètre réside dans la modalité de livraison de petites quantités exprimés en kilogrammes à distribuer par semaine vers les différentes destinations choisies lors de l'échantillonnage en grappes. L'objectif étant de pouvoir comparer les différents niveaux de performance du réseau logistique actuel avec les différents modèles simulés par les méthodes d'optimisation sous-contraintes.

En effet, compte tenu du fait que ces stratégies n'ont toujours pas vu le jour dans les pratiques urbaines de la ville de Casablanca, la simulation offre la possibilité de prendre en considération des hypothèses proches de la réalité (même circuits, même vitesse de circulation, même quantités à livrer, même destinations, même origines, etc. les résultats ne sont toutefois pas généralisables du moment qu'ils ne sont applicables que pour les scénarios étudiés.

L'intérêt est de comparer les niveaux de performances de ces scénarios relativement à la situation actuelle que connaît la ville de Casablanca. De ce fait, la simulation s'avère l'outil le plus approprié afin d'aboutir à cette fin et la mieux appropriée à ce type de recherche.

## **1.2. Emissions de CO<sub>2</sub> dans le fret routier**

Il serait absurde de présenter des énoncés relatifs à l'impact des émissions du dioxyde de carbone sur l'atmosphère terrestre. C'est un constat sur lequel les praticiens et les théoriciens s'accordent et qui gagne de plus en plus d'intérêt dans les perspectives politiques, théoriques et sociales ; chose qui a poussé les états et gouvernements à s'intéresser à cette problématique universelle compte tenu de son impact sur le bien-être et santé des êtres vivants en général, et de l'Homme en particulier.

C'est dans cette perspective que le Maroc a proposé en 2014 un plan d'investissement vert ayant pour objectif de contribuer à la lutte contre les effets du changement climatique. Ce plan vise à réduire les pratiques à fortes externalités négatives dont le transport représente un secteur très problématique. L'état vise à réduire les

émissions de CO<sub>2</sub> relatives au transport routier de 35% (soit environ 181 tonnes en moins). C'est sur cette optique là qu'on a construit le seuil d'optimisation à prendre en considération dans les résultats à obtenir par les simulations.

Dans l'objectif d'évaluer les niveaux de performance relativement au scénario de référence, soit le scénario actuel au niveau de la ville de Casablanca, on s'est fixé d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> dégagées par les différents véhicules de livraison du milieu urbain faisant partie de l'observation terrain ainsi que ceux simulés.

En se basant sur les travaux de (Hickman, 1999), (Jancovici, 2007), (Pan, 2010) entre autres, on a pu conclure que les émissions de CO<sub>2</sub> sont strictement liées aux distances parcourues par les véhicules de livraison ainsi que la vitesse moyenne de circulation. Le choix du modèle de (Hickman, 1999) est fait du fait qu'elle est qualifiée d'approche analytique ou méthodologie détaillée mélangeant données techniques et d'activité.

L'objectif du modèle analytique de (Hickman, 1999) est d'estimer de façon très précise les émissions de CO<sub>2</sub> relativement aux différents paramètres de contrôle (type de véhicule, vitesse, condition de route, entre autres). Le détail de ce modèle sera présenté un peu plus en avant dans le présent papier au niveau de la partie méthodologique.

## **2. Méthodologie**

L'étude s'inscrit dans une perspective d'étude prévisionnelle basée sur l'étude de simulation en prenant en compte les données terrains. Il s'agit d'une recherche action à caractère très particulier basée sur

un besoin réel émanant de l'AMDL (ayant explicitement évoqué son intérêt pour l'amélioration de la logistique urbaine au Maroc lors du salon LogisMed en 2015 à Casablanca).

A ce titre, on s'est permis de contacter l'organisme pour proposer cette solution d'optimisation et de minimisation des émissions des GAS. La lettre était une invitation pour participer au programme de lutte contre les effets du changement climatique en proposant des solutions réalistes et réalisables compte tenu des projets déjà existants et du plan d'action en vigueur ou en cours.

Se basant sur les données terrains, on vise à corroborer l'hypothèse de base et qui se résume à : **les niveaux de performance de la mutualisation logistique du dernier kilomètre à Casablanca permet de la considérer comme étant une pratique verte.**

Afin de corroborer ou réfuter cette hypothèse, il serait judicieux de déterminer les performances de chaque modèle et de le mesurer par rapport au référentiel gouvernemental marocain. De ce fait, on se positionne dans une démarche quantitative visant à étudier l'impact environnemental d'une stratégie collaborative en logistique pour le dernier kilomètre pour la ville de Casablanca.

### 2.1. Scénarios à simuler

Comme mentionné au niveau de la revue de littérature, la mutualisation logistique revêt plusieurs formes mais qui s'articulent autour de deux principes majeurs :

mutualisation du transport et mutualisation des plateformes.

On peut à présent composer les différentes formes de partenariat en combinant les différentes configurations comme illustré au niveau du tableau 1 :

Scénario	Transport fournisseur		Plateforme (Hub mutualisé)		Transport client	
	Direct	Multi-pick	Oui	Non	Direct	Multi-drop
S0	✓	✓		✓		✓
S1	✓		✓		✓	
S2	✓		✓			✓
S3		✓	✓			✓
S4		✓		✓		✓

Tableau 1 : Scénarios de mutualisation du dernier kilomètre à Casablanca

Le scénario S0 est celui pris comme référence quant aux pratiques actuels dans la ville de Casablanca (un scénario non-mutualisé). Bien que dans la pratique on trouve d'autres configurations additionnelles, on se contentera de ces scénarios pour la présente étude. Le hub intermédiaire est évoqué comme unité de stockage mais également de cross-docking pour le scénario S2.

### 2.2. Echantillon de l'étude

Le présent thème s'attache à traiter les émissions de CO2 urbaines relatives à la logistique du dernier maillon. Plus précisément, on cherche à identifier quels sont les impacts de ce maillon de la chaîne urbaine sur le volet environnemental et comment une stratégie collaboration horizontale telle que la mutualisation logistique peut contribuer à la minimisation de ces rejets.

Il est toutefois très compliqué de s'attaquer à l'étude de la logistique urbaine de toute la

ville compte tenu du coût, au temps et aux ressources que cela peut engendrer. C'est la raison pour laquelle on s'est vu contraint de prélever un échantillon représentatif de la population en se basant sur un critère particulier : la nature du quartier (résidentiel, administratif, commercial et industriel). On opte à présent pour le mode d'échantillonnage en grappes (échantillonnage probabiliste).



Figure 1 : Quartiers de la ville de Casablanca

Pour ce faire, on a fait appel à l'outil professionnel en ligne MarketCheck® avec une marge d'erreur de 5% et un niveau de confiance de 95% ce qui permet d'obtenir la taille de l'échantillon de 373 sur une population de 12 725 clients à livrer.

Ainsi, en se basant sur l'échantillon de 373 PDL (point de livraison) à partir de la population étudiée. Il conviendrait maintenant de calculer le nombre de grappes relatifs à l'étude suivant la formule ci-contre :

$$\text{Grappes} = \frac{n}{\text{nombre d'unités /grappe}}$$

Ainsi, on a pu calculer le nombre de grappes, soit le nombre de quartiers, à prendre en considération dans l'étude de simulation à savoir :

$$\text{Nombre de grappes} \cong 5 \text{ Quartiers}$$

Pour donner suite aux détails de calculs présentés ci-dessus, l'étude portera sur cinq quartiers de la ville de Casablanca qu'on choisira par échantillonnage aléatoire simple et ce par un tirage au sort sur Excel. Pour ce faire, on a transcrit les noms des 25 quartiers sur la feuille Excel, et on a attribué à chaque quartier un nombre aléatoire calculé par le logiciel grâce à la fonction =ALEA(). Une fois ceci fait, on a collé les valeurs attribuées de manière à ne pas engendrer un deuxième tirage aléatoire.

On a trié le tableau par ordre croissant (l'ordre décroissant ou croissant n'ont aucun impact sur la logique aléatoire du moment que c'est au niveau de l'application de la fonction Excel que la logique aléatoire a été déployée. Ceci a permis d'obtenir les cinq quartiers ci-dessous :

Chiffre aléatoire affecté par Excel	Quartier
0,01002738	Derb Omar
0,03908915	Derb Ghallef
0,15623707	Aïn Sebaâ
0,18871732	Sidi Othmane
0,22154354	Maârif

Tableau 2 : quartiers pris en considération dans l'étude par tirage aléatoire simple

Les chiffres aléatoires générés par Excel n'ont aucun sens pour être interprétés. Ils ont comme seule fin d'affecter aléatoirement une valeur à chaque quartier pour avoir une même chance d'être choisi une fois le tri (croissant ou décroissant) sera effectué.

### 2.3. Modèles, hypothèses et paramètres

Les quatre modèles proposés dans la partie méthodologique représentent un réseau logistique de I fournisseurs (point d'origine) et J points de livraison (point de destination). Du moment que la seule variable qui compte est celle relative aux

schémas de livraison, on ignore le processus de production des sites d'origine ainsi que le processus de stockage dans les hubs intermédiaires. Ainsi, on suppose que les fournisseurs disposent de stocks suffisants pour couvrir le besoin hebdomadaire de leurs clients qui suivent une demande stochastique.

On présente, à titre d'exemple, le modèle relatif au scénario d'entrepôt mutualisé livré par camion direct et distribution par multi-drop, soit le scénario **S1** :

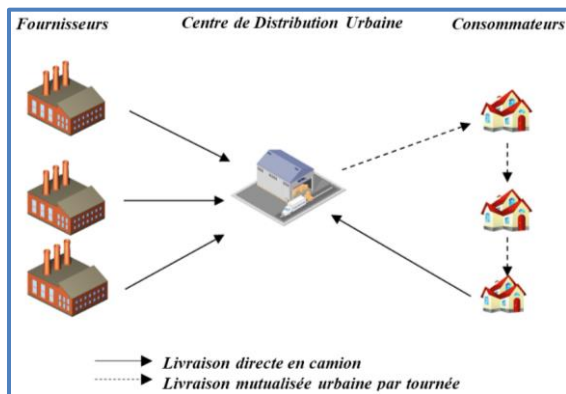


Figure 2 : Modèle relatif au scénario S1

La modélisation des différents scénarios est faite de manière à permettre de déterminer, à partir d'une analyse du critère environnemental des résultats de simulation, les scénarios les plus pertinents en termes d'objectifs environnementaux (en fonction du référentiel gouvernemental stipulant 35% de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour le transport routier).

Les modèles pris en considération dans l'étude sont issus de la programmation linéaire en nombres entiers relatifs aux divers problèmes de VRP (Vehicle Routing Problem). Selon qu'il s'agisse d'un problème de hub ou de tournée, on passe d'un MDCVRP (Multi Depot Capacitated Vehicle Routing Problem) à un CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem).

Des modèles qui ont été empruntés à Ernst et Krishnamoorthy et qui ont été adaptés par plusieurs auteurs dont principalement (PAN, 2010) et (Muñoz-Villamizar, 2015).

On prend par exemple le cas du scénario S1, on obtiendrait le modèle CVRP suivant :

$$\min \sum_i \sum_j d_{ij} X_{ij}$$

Sous-contraintes :

$$\sum_i X_{ij} = 1, \quad \forall j$$

$$Y_{ik} \geq \frac{\sum_j X_{ij} D_j}{CAP}, \quad \forall i$$

$$\sum_j X_{ij} D_j \geq U * CAP * Y_i, \quad \forall i$$

$$X_{ik} \in \{0,1\}$$

$$Y_i \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall i$$

Avec :

- $i$  : Plateforme (hub)  $\{1, 2, \dots, n\}$
- $j$  : points de livraisons  $\{1, 2, \dots, n\}$
- $d_{ij}$  : Distance entre la plateforme  $i$  et le point de livraison  $j$
- $D_j$  : Demande du point de livraison  $j$ .
- $CAP$  : Capacité des véhicules.
- $U$  : Capacité de remplissage minimal des véhicules.

L'ensemble des modèles proposés dans l'étude ainsi que la théorie mobilisée en matière de minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> du transport permettent de conclure qu'il n'y a pas de modèle spécifique visant à minimiser les CO<sub>2</sub> directement. Ce dernier est lié à la distance parcourue, au nombre de véhicules utilisés et à la charge transportée. On tient également à préciser qu'on se base sur l'hypothèse que les émissions relatives aux infrastructures ne sont pas prises en compte dans l'étude du moment que ces dernières se situent en zones périurbaines et de ce fait, on ne peut les considérer comme



contribuables à l'impact environnemental urbain.

De plus, il s'agit d'infrastructures déjà implantées et dont on cherche à maximiser l'utilité par l'ajout du segment « dernier kilomètre » dans ses flux internes de marchandises.

Les hypothèses de travail relatives à ces modèles se résument en ce qui suit :

- La capacité des moyens de transport est limitée en poids et en volume.
- Le transport dans le réseau du dernier kilomètre est assuré par un transporteur (Prestataire de services logistiques).
- Les produits sont compatibles et empilables.
- Chaque plateforme peut servir plus d'un client et chaque client peut être servi à partir de plusieurs plateformes. Il n'y a pas de liens entre hubs.
- Les procédures de stockage et de production ne sont pas prises en considération dans la simulation de minimisation.
- On considère que les fournisseurs disposent d'un stock illimité des produits à livrer par client

En ce qui concerne l'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub>, comme signalé antérieurement, on s'est basé sur le rapport Delivrable 22 MEET de (Hickman, 1999) :

$$E_{g/km} = E_{vide}(\nu) \times C_{charge} \times C_{route}$$

Avec :

$$E_{vide} = E_{chaud} + E_{démarrage} + E_{évaporation}$$

Afin de faciliter l'évaluation des émissions relatives aux CO<sub>2</sub> du transport, on a proposé certaines hypothèses de travail :

- Le coefficient  $C_{charge}$  est adapté en fonction du taux de remplissage :  

$$C_{charge} = (K + n\gamma + p\gamma^2 + q\gamma^3 + rv + sv^2 + tv^3 + \frac{u}{v}) \times \alpha$$
- Le gradient de la route est nul :
- $C_{route} = 0$
- Types de véhicules : VUL < 3,5T, camions < 16T

Le Delivrable 22 MEET propose différents paramètres pour la charge, le type de véhicule, la vitesse de circulation ainsi que pour la motorisation prise en considération. De ce fait, le modèle a été adapté de manière à représenter les différents quartiers pris comme échantillon de l'étude. Ainsi, pour résumer les éléments qui rentrent dans l'étude de simulation, on propose le tableau suivant :

Eléments	Transport amont	Transport Client
Paramètres	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distances entre fournisseurs et hubs</li> <li>- Emission par kg/km</li> <li>- Vitesse de circulation</li> <li>- Capacités disponibles des véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distances entre hubs et clients</li> <li>- Vitesse de circulation</li> <li>- Capacités disponibles des véhicules</li> <li>- Emission par kg/km</li> </ul>
Indicateur environnemental	Emission CO <sub>2</sub>	Emission CO <sub>2</sub>

Tableau 3 : Paramètres et indicateurs de performance environnementale de la simulation des scénarios

### 3. Résultats de l'étude

Les modèles d'optimisation sous-contraintes utilisés dans l'étude ont été traité de manière numérique par le logiciel spécialisé ILOG OPL CPLEX sur une tour informatique CPU 4Gb et RAM 12Go.

Les scénarios CVRP relatifs au problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité ont subis des traitements sur Excel afin de cerner leurs résultats.

### 3.1. Résultats du scénario actuel

A ce niveau, on retrouve deux pratiques différentes. Une pratique semi-consolidée et une autre non-collaborative (d'un fournisseur unique en camion complet pour l'ensemble de la ville).

Les résultats du premier scénario ont été obtenus à la suite de l'observation terrain des pratiques et en déployant le modèle de (Hickman, 1999) ce qui a permis d'obtenir les résultats :

Quartiers	Distance totale parcourues (km)	Emission du transport amont (kg)	Emission du transport aval (kg)	Total d'émissions pour le réseau actuel du Last Mile (kg)
<b>Total</b>	<b>46 228</b>	<b>8 320t</b>	<b>52 104t</b>	<b>60 424t</b>

Tableau 4 : Total émissions de CO<sup>2</sup> pour le réseau actuel du Last Mile pour l'échantillon choisi pour 52 semaines

Pour la deuxième pratique du scénario actuel et en suivant la même démarche que pour le premier modèle, on a pu obtenir les résultats suivants :

Emplacements	Distance hebdomadaire parcourue (km)	Emission globale du Last Mile (g)	Emission / véhicule / trajet (g)	Emissions par véhicule / trajet / km
<b>Maarif</b>	96	570 877,43	81 553,92	849,52

<b>Derb ghallef</b>	105	232 870,97	77 623,66	739,27
<b>Derb Omar</b>	92	318 821,93	79 705,48	866,36
<b>Aïn Sebaa</b>	130	216 560,06	72 186,69	555,28
<b>Sidi Othmane</b>	123	228 432,41	76 144,14	619,06
<b>Total (52 semaines)</b>	<b>28 392</b>	<b>81 484 t</b>	<b>20 124 t</b>	

Tableau 5 : Estimation des émissions de CO<sup>2</sup> du transport des schémas logistiques actuels dans le périmètre étudié par la fonction d'émission CO<sup>2</sup> pendant 1 semaine

On se basera également sur ces résultats pour faire une analyse comparative sur la variable environnementale qui pour le cas de la présente étude se base essentiellement sur les émissions en matière de CO<sup>2</sup> et ce entre six différentes stratégies : deux actuelles et quatre potentiellement déployables dont une déjà mise en place par certains fournisseurs.

Pour les résultats des différents scénarios obtenus, on a préféré les reprendre sous forme d'un tableau récapitulatif et se présente comme suit :

	Scénarios optimisés			
	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>
<b>Emissions de CO<sub>2</sub> en (t/an)</b>	<b>90,12</b>	<b>131,79</b>	<b>111,87</b>	<b>190,18</b>
<b>Taux de remplissage moyen</b>	93%	74%	81%	93%
<b>Distances parcourues (km)</b>	38 854	55 658	43 327	93 651
<b>Nombre de routes</b>	1 716	2 132	1 924	2 236

Tableau 6 : Résultats environnementaux par émission de CO<sup>2</sup> pour 52 semaines pour la logistique du dernier kilomètre à Casablanca

Ainsi, on remarque que les résultats sont assez dispersés passant de 190 t.CO<sub>2</sub>/an pour le 4<sup>ème</sup> cas à 90 t.CO<sub>2</sub>/an ce qui permet d'avoir un préjugé relatif à la particularité de la ville dans l'efficacité de chaque stratégie dans la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 4. Discussion :

À la suite des résultats obtenus, on peut se permettre de présenter un tableau comparatif (tableau 7) entre les scénarios optimisés et ceux de référence :

	Scénarios actuelles			Optimisation			
	<i>Consolidation partielle</i>	<i>Non-collaborative</i>	<i>Transport global</i>	<i>S 1</i>	<i>S 2</i>	<i>S 3</i>	<i>S 4</i>
<b>Emissions de CO<sup>2</sup> en (t/an)</b>	<b>60,4</b>	<b>102,44</b>	<b>162,84</b>	<b>90,12</b>	<b>131,79</b>	<b>111,87</b>	<b>190,18</b>
<b>Taux de remplissage moyen</b>	67%	86%	-	93%	74%	81%	93%
<b>Distances parcourues (km)</b>	46 228	27 392	<b>73 620</b>	38 854	55 658	43 327	93 651
<b>Nombre de routes</b>	1 300	1040	<b>2 340</b>	1 716	2 132	1 924	2 236

D'après ce qui précède, on peut dire que les deux stratégies de mutualisation (1 et 3) permettent d'atteindre de manière « ponctuelle » le seuil de performance environnementale fixée par le gouvernement marocain en matière de programme de lutte contre les changements climatiques.

Toutefois, si on devait choisir entre les différentes stratégies, la meilleure serait la première du fait qu'elle permet non seulement de minimiser au maximum les émissions, mais de respecter les pratiques déjà mises en place par certains fournisseurs et prestataires ce qui n'induirait pas à une déséconomie d'échelle induite par la rupture de la courbe

Stratégie	Emissions des scénarios (t)	Réduction des émissions de CO <sup>2</sup>
Scénario actuelle	<b>162,84</b>	Référence
Cas 1	<b>90,12</b>	- 45%
Cas 2	<b>131,79</b>	- 19%
Cas 3	<b>111,87</b>	- 31%
Cas 4	<b>210,18</b>	<b>+ 17%</b>

d'expérience en matière des pratiques logistiques en vigueur.

D'après l'évaluation, les pratiques de mutualisation, selon les simulations faites par des données réelles, induisent à des niveaux de performance qui dépassent les

objectifs fixés par le gouvernement en termes de pratiques protectrice de l'environnement (soit des chiffres dépassant les 35% de réduction des émissions actuelles), ce qui permet de conclure qu'il s'agit bel et bien d'une pratique éco-responsable spécialement pour le premier et troisième cas.

On peut donc revenir à l'hypothèse de base : « les niveaux de performance de la mutualisation logistique du dernier kilomètre à Casablanca permettent de la considérer comme étant une pratique verte en milieu urbain » afin de pouvoir apporter des réponses corroboratives à cette hypothèse.

A ce niveau, on a pu constater que les émissions générées par les pratiques actuelles pour le dernier maillon de la chaîne urbaine pour un volume de 24t hebdomadaire transportées est assez inquiétant dans la mesure où si l'on venait à reproduire le schéma sur la population mère, on obtiendrait certainement des résultats alarmants.

Tableau 8 : Performance des stratégies de mutualisation en matière de minimisation de CO<sup>2</sup> par rapport à la pratique collaborative actuelle

D'après le tableau synthétique (tableau 8), on trouve que le premier cas permet d'obtenir une performance supérieure aux attentes soit une réduction de 45% relatives au plan gouvernemental. Bien que l'investissement et la gestion puissent être conséquents, le scénario présente des avantages en matière d'optimisation qui peuvent contribuer à une bonne synergie dans le milieu urbain.

Le deuxième cas permet également d'obtenir une réduction intéressante bien qu'il reste loin de l'objectif avec seulement 19% de réduction des émissions. Ceci ne remet pas en question sa qualité, mais ne peut, malheureusement, pas être pris en considération comme pratique verte du moment qu'il ne répond pas au seuil préalablement fixé.

Le troisième cas est intéressant malgré qu'il soit en dessous des attentes avec une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 31%. A ce niveau, le postulat de l'objectivisme peut être remis en cause si l'on intègre des variables économiques en vue de trancher sur le choix des solutions les mieux adaptées.

Enfin, le quatrième scénario s'avère insatisfaisant et contraire à l'objectif recherché par la pratique de mutualisation. En effet, voulant réduire les émissions par la mutualisation du transport, on s'est vu avec une augmentation des émissions de 17% par rapport à la situation actuelle. Ce scénario est vite rejeté du moment qu'il ne représente aucune valeur ajoutée à l'optimisation.

Ce résultat permet de conclure que toute stratégie de mutualisation n'est pas spécialement une source d'optimisation. La

mise en application des stratégies de mutualisation comme solution d'optimisation reste conditionnée l'environnement de livraison, l'unité transportée, la clientèle visée, l'espace géographique couvert, etc.

Toutefois, compte tenu de l'optimisation faite pour l'échantillon étudié, on a démontré qu'on peut réduire ces émissions de -19% jusqu'à -45% pour le scénario le plus optimisé bien que, ce dernier, soit très compliqué à mettre en œuvre compte tenu de la demande du dernier kilomètre caractérisée par de très faibles volumes, chose qui pousse à intégrer les livraisons urbaines dans les flux du dernier kilomètre.

En d'autres termes, l'optimisation est faite de sorte à ce qu'on prenne en considération également les éléments relatifs à la logistique du TMV afin de maximiser l'utilisation des véhicules et profiter de l'expérience de mutualisation du dernier maillon en faveur de la logistique de la chaîne urbaine.

De cette manière, on peut se permettre de répondre au questionnement de base, suite à la démonstration relative aux données d'enquête et à la réponse apportée à la question susmentionnée ainsi qu'à la corroboration des hypothèses dérivées que la mutualisation de la logistique du dernier kilomètre à Casablanca permet de proposer un modèle urbain vert. Ce qui implique que le principe de mutualisation du dernier kilomètre confère à la chaîne urbaine un potentiel d'optimisation très important.

La réorganisation proposée par ces schémas est de sorte à ce qu'on puisse passer d'une logique de livraison égoïste par acteur à une livraison éco-responsable partagée entre les

acteurs qui collaboreront en partageant les réseaux logistiques et les clients.

## 5. Conclusion

La présente étude vise, essentiellement, à simuler les niveaux de performance des stratégies logistiques de mutualisation pour le dernier kilomètre dans la ville de Casablanca, et ce dans l'objectif de minimiser les émissions de CO<sup>2</sup>. On s'en est inspiré pour modéliser quatre modèles permettant d'améliorer les performances du transport. Des modèles qui ont été choisis en concertation avec l'AMDL compte tenu des infrastructures disponibles. A ce niveau, on peut se permettre de présenter les différents apports de ce travail :

### *Modélisation de stratégies de la mutualisation du dernier kilomètre :*

Proposer des modèles alternatifs permettant non seulement d'améliorer la performance des émissions de manière isolée, mais également d'alléger les externalités négatives issues des congestions, des bruits, de l'occupation des voiries urbaines, etc.

A ce niveau, ces stratégies ont pour objectif de mettre en commun des infrastructures et moyens logistiques (déjà existants ou non) entre les différents acteurs de ce segment les aidant à surmonter les contraintes économiques, environnementales et sociales.

### *Participation à l'effort national pour la lutte contre le changement climatique :*

développé en 2014, cet effort vise à contribuer à la minimisation des émissions et des pratiques nuisibles à l'environnement. En matière d'émission de CO<sub>2</sub>, l'état s'est fixé une minimisation globale de 35% des émissions de CO<sup>2</sup> dans l'atmosphère marocaine. Pour ce faire, elle

s'est fixée de commencer par l'optimisation du pilier économique du royaume, la ville de Casablanca. A cet effet, on s'est basé sur cet élément pour le choix de la ville de Casablanca comme échantillon.

D'un autre côté, l'étude de l'AMDL en milieu urbain a permis de dégager les quartiers les plus problématiques en matière d'externalités négatives en milieu urbain. C'est sur cette base qu'on s'est permis de se centrer sur ces zones pour l'échantillon de l'étude.

Selon l'étude menée, cette minimisation est possible par le recours aux solutions de mutualisation simulée dans ce travail. Bien sûr l'effort de l'état en matière d'implantation des huit plateformes logistiques est pris en considération. L'étude vise alors une étude prédictive de l'impact de ces implantations sur le volet environnemental pour la ville de Casablanca.

### *Développement d'une base réelle de comparaison entre les pratiques logistiques en milieu urbain :*

en plus des observations présentées au niveau du deuxième chapitre de la troisième partie, l'analyse et l'évaluation des résultats constituent un référentiel pour les études futures en la matière.

### *Diagnostic de la logistique du dernier kilomètre :*

Réaliser un diagnostic sur la réalité actuelle des pratiques logistiques du dernier kilomètre dans la ville de Casablanca permettant aux décideurs publics de prendre les décisions relatives à ce segment. Les études menées pour la logistique urbaine par l'AMDL ne donnent pas une idée concrète sur la logistique du dernier kilomètre, de ce fait, l'Etat peut avoir des ambiguïtés lors du traitement de la

demande urbaine. De ce fait, le présent travail peut contribuer à la séparation entre ce segment et d'autres dans les résultats de leur étude.

Le présent travail offre de multiples champs de développement pour les chercheurs ambitieux de percer dans ce domaine. Tout dépend de la perspective et l'ongle sous lequel le chercheur peut utiliser les résultats ou la méthode de la présente étude. On peut par exemple parler de :

*Mutualisation urbaine généralisée* : Il s'agit d'amplifier le périmètre de mutualisation en intégrant les flux relatifs à la livraison des détaillants, magasins spécialisés et d'autres en matière de produits revendables et qui ne font pas partie de la présente étude. Ainsi, au lieu de traiter uniquement les flux et volumes du dernier kilomètre, on peut additionner ceux de la logistique urbaine en générale et considérer le TMV comme un seul pack. Chose qui ne peut être fait avec le passage par le premier kilomètre dans un premier temps.

*Mutualisation par report modal* : Cette idée rejoint celle précédente et la complète. Ainsi, on peut relancer l'idée proposée comme dernier point au niveau de la discussion des résultats et qui implique l'utilisation des autres modes de transports que ce soit le tramway ou le train (via la plateforme MITA).

*Intégration des SI* : une étude relative à l'organisation de ces stratégies peut être faite de manière à proposer des systèmes d'information adaptée à la réalité casablancaise. Que ce soit en mode stratégique (ERP, GPA) ou opérationnelle (TMS, WMS, YMS), les chercheurs peuvent reproduire le modèle en demandant

les données de l'enquête à l'auteur du rapport.

Comme tout effort de changement, il y aura certainement des réticences quant au déploiement des solutions proposées. C'est pour cette raison que les autorités locales doivent se prononcer pour l'application de la réglementation à proposer pour l'organisation des flux urbains en matière de stationnement, d'interdiction de passage, de circulation par tranche horaire, etc.

## **Bibliographie**

- Abdelhai L., Malhéné N., Gonzalez-Feliu J., "Logistique urbaine durable: le CDU, un point de convergence entre les différents acteurs", SIL 14 ENSA Marrakech, 2014.
- ADEME, "Logistique urbaine : agir ensemble, guide d'aide aux élus associations, professionnels, pour organiser le transport de marchandises en ville", n° 6849, Septembre 2010.
- Chanut O., Paché G., "La culture de mutualisation du PSL peut-elle favoriser l'émergence d'une logistique urbaine durable ?," RIMHE Rev. Interdiscip. Manag. Homme(s) Entrep., vol. 7, no. 3, p. 94, 2013.
- Danièle Patier et Jean-Louis Routhier, "Une méthode d'enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines", Université de Lyon, 2009.
- Gevaers R., Van de Voorde E., Vanelslander T., "Characteristics and Typology of Last-mile Logistics from an Innovation Perspective in an Urban Context," City Distrib. Urban Freight Transp., pp. 1–15, 2000.
- Ghilas V., Demir E., Van Woensel T., "An adaptive large neighborhood search

heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Scheduled Lines,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 72, pp. 12–30, 2016.

▪ Gonzalez-Feliu J. Morana J., “A la recherche d’une mutualisation des livraisons en milieu urbain : le cas du groupe NMPP,” *Rev. Française Gest. Ind.*, pp. 1–20, 2010.

▪ Gonzalez-Feliu J., “Costs and benefits of logistics pooling for urban freight distribution: scenario simulation and assessment for strategic decision support,” *Semin. CREI*, pp. 1–24, 2011.

▪ Gonzalez-Feliu J., Joelle Morana, “A la recherche d’une mutualisation des livraisons en milieu urbain : le cas du groupe NMPP,” *Revue Française de Gestion Industrielle*, 21 avril 2012.

▪ Gonzalez-feliu J. Garcia J., Le, “Le transport urbain vert de marchandises : leçon tirée de l’expérience de la ville de Padoue en Italie,” *Rev. Int. Gest. HEC Montréal*, vol. 36, no. 2, pp. 18–26, 2014.

▪ Hickman J., 1999. “Methodology for calculating transport emissions and energy consumption “, Report for the Project MEET (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport), 1999.

▪ Laura Ramoneda Cuenca, “Le problème du dernier kilomètre à Paris intra-muros: Introduction du paramètre environnemental dans la réservation d’aires de livraison”, *Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya*, 2008.

▪ Morana J., Gonzalez-Feliu J., “La logistique du dernier kilomètre: les défis d’un transport urbain ‘vert,’” *Hal Shs*, no. No. halshs-00493701, pp. 1–11, 2010.

▪ Moutaoukil A., Derrouiche R., Neubert G., Fayol I., Fauriel C., “Pooling Supply Chain : Concepts and Definitions” *Collab.*

*Networks Internet Serv.*, pp. 513–525, 2012.

▪ Raymond-Alain T., “Méthodes de recherche en Management.” *Dunod*, 2007.

▪ Salmon K., “Pratiques de logistique collaborative : quelles opportunités pour les PME/ETI ?,” *PIPAME*, pp. 1–96, 2011.

▪ Shenle Pan, “Identification et tests de principes de mutualisation logistique dans la « supply chain » de la grande consommation pour réduire les émissions de CO2”, *Séminaire IDDRI-R2DS*, Paris, 26 mai 2010.

▪ Tazi Y., “Etude pour la structuration de la logistique urbaine à Casablanca, état des lieux et perspectives”, *AMDL, LogisMed*, 13 mai 2015, Maroc

▪ Trentini A., “Proposition d’un système de transport urbain mixte: application dans le cadre de la ville moyenne de La Rochelle l’École nationale supérieure des mines de Paris,” *Mines ParisTech, Inst. des Sci. Technol.*, 2013.

▪ Voccia S. A., “Stochastic last-mile delivery problems with time constraints”, *Iowa Res. Online - Univ. Iowa’s Institutional Repos*. 2015.