

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Vers une logistique urbaine interconnectée pour les pays en voie de développement

EVA PETITDEMANGE<sup>1</sup>, SAM BAN<sup>1</sup>, MATTHIEU LAURAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CENTRE GENIE INDUSTRIEL, Université de Toulouse, IMT Mines Albi  
Campus Jarlard, 81013 Albi CT Cedex 09, France  
[eva.petitdemange@mines-albi.fr](mailto:eva.petitdemange@mines-albi.fr)  
[Sam.ban@mines-albi.fr](mailto:Sam.ban@mines-albi.fr)  
[Matthieu.lauras@mines-albi.fr](mailto:Matthieu.lauras@mines-albi.fr)

---

**Résumé** – La livraison du dernier kilomètre est un élément crucial du processus de la chaîne d'approvisionnement, en particulier dans les pays en développement. Cependant, les méthodes de livraison traditionnelles sont souvent caractérisées par des inefficacités, telles que des coûts élevés, des délais de livraison longs et une mauvaise précision de la livraison. L'essor du e-commerce et la croissance de la vente au détail en ligne ont ajouté une pression supplémentaire sur la livraison du dernier kilomètre dans ces pays. Pour relever ces défis, l'Internet Physique (IP) est apparu comme une solution prometteuse. L'IP est un nouveau paradigme pour la logistique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement qui vise à accroître l'efficacité, la durabilité et la résilience de la chaîne d'approvisionnement. Cette étude vise à évaluer l'impact de l'IP sur la livraison du dernier kilomètre dans les pays en développement, en utilisant une approche basée sur un modèle numérique. En analysant les avantages et les limites potentiels de l'IP, cette étude contribuera à la littérature et fournira des idées et des recommandations pour la mise en œuvre de scénarios basés sur l'IP dans la livraison du dernier kilomètre dans les pays en développement.

**Abstract** – Last mile delivery is a crucial component of the supply chain process, particularly in developing countries. However, traditional delivery methods are often characterized by inefficiencies, such as high costs, long delivery times, and poor delivery accuracy. The rise of e-commerce and the growth of online retail have added further pressure to last mile delivery in these countries. To address these challenges, Physical Internet (PI) has emerged as a promising solution. PI is a new paradigm for logistics and supply chain management that aims to increase the efficiency, sustainability, and resilience of the supply chain. This study aims to assess the impact of PI on last mile delivery in developing countries, using a digital model-based approach. By analyzing the potential benefits and limitations of PI, this study will contribute to the literature and provide insights and recommendations into the implementation of PI-based scenarios in last mile delivery in developing countries.

**Mots clés** – Internet Physique, Livraison dernier kilomètre, Pays en Développement, Double Numérique

**Keywords** – Physical Internet, Last Mile Delivery, Developing Countries, Digital Model.

---

### 1 INTRODUCTION-

La livraison du dernier kilomètre est une étape clé du processus de livraison qui consiste à acheminer les biens et services de la plateforme de transport au seuil de la porte du client. Dans les pays en développement, cette étape est particulièrement importante pour permettre à la population d'accéder aux biens et services, notamment dans les zones rurales et éloignées. La réussite de la livraison du dernier kilomètre peut avoir un impact significatif sur l'économie, le bien-être social et la qualité de vie des populations de ces régions. Elle est également essentielle pour le développement du e-commerce, car la satisfaction et la fidélité des clients dépendent en grande partie de la qualité de la livraison. Toutefois, les pays en développement sont confrontés à des défis particuliers tels que les contraintes d'infrastructure, les problèmes de sécurité et l'accès limité à la technologie et aux

ressources. Par conséquent, il est crucial de prendre des mesures pour améliorer cette étape clé de la chaîne d'approvisionnement. (De Guimarães et al., 2020).

Les pays en développement sont souvent confrontés à des défis complexes en matière de logistique, en particulier dans les grandes villes. Les performances logistiques des pays en développement sont souvent inférieures à la moyenne mondiale. Selon les estimations de la Banque mondiale, l'indice de performance logistique dans ces pays est environ la moitié de celui des pays développés. Cette différence peut s'expliquer par l'absence de données fiables, mais également par les problèmes de logistique urbaine, qui sont les principaux obstacles rencontrés dans ces pays (Kraay, 2018). (Reda et al., 2020) ont mené une étude sur les caractéristiques de la logistique et de la chaîne d'approvisionnement des pays

développés, émergents et en développement. Après avoir effectué une analyse documentaire approfondie de plus de 300 articles, ils ont constaté que les principaux problèmes logistiques des pays en développement sont liés à la logistique urbaine. Des embouteillages importants, des routes non sécurisées, une croissance démographique rapide, des infrastructures inadéquates et des véhicules chers et peu fiables sont autant de problèmes auxquels ils doivent faire face. Ces problèmes structurels ont un impact direct sur la performance de la logistique et entravent le processus de livraison. (Hu et al., 2019; Lagorio et al., 2016)

Pour améliorer les performances des activités de transport de marchandises dans les villes des pays en développement, des solutions sont en cours d'exploration. Le crowd-shipping, les centres de consolidation urbaine, la livraison en ligne et les modes de transport alternatifs sont autant de pistes qui sont étudiées. Toutefois, malgré ces efforts, le problème persiste et a un impact significatif sur leur économie. Les pays en développement sont confrontés à de nombreux problèmes structurels (Phun & Yai, 2016), notamment de faibles revenus, une dépendance à l'égard de secteurs spécifiques, une faible productivité, des possibilités d'emploi limitées, un système de santé et une éducation médiocres, sans compter la corruption, ainsi que des problèmes spécifiques tels que des infrastructures routières médiocres, des véhicules anciens et un manque de places de stationnement. Cela est particulièrement vrai pour les pays d'Asie du Sud-Est comme le Cambodge (Phun et al., 2018), dont l'économie est centrée sur les grandes villes connaissant une croissance démographique rapide. Par conséquent, le principal questionnement de ce projet est de savoir comment améliorer les performances des activités de transport de marchandises dans les villes des pays en développement en utilisant les moyens et les infrastructures existants. Cela peut permettre de répondre aux besoins de la population en matière de biens et services, en particulier dans les zones rurales et éloignées, et de soutenir la croissance et l'expansion du e-commerce.

Nous avons formulé l'hypothèse que l'utilisation de l'Internet Physique (IP) peut contribuer à résoudre ces défis en tirant parti de ses caractéristiques uniques (Ballot et al., 2014). L'IP vise à optimiser le flux de marchandises, de personnes et d'informations tout au long de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire les délais de livraison et d'améliorer l'efficacité de la livraison du dernier kilomètre. En outre, l'IP propose la mise en place de plateforme de partage des ressources pour réduire la nécessité pour les entreprises d'investir dans leurs propres infrastructures. En utilisant l'IP, il est possible d'améliorer la sécurité lors de la livraison du dernier kilomètre grâce à des mesures de sécurité renforcées telles que le suivi en temps réel et les modèles de livraison prédictifs. L'IP utilise également des technologies numériques et de géolocalisation pour fournir des systèmes d'adressage plus précis et plus efficaces, réduisant ainsi les difficultés de localisation des clients dans les grandes villes. Enfin, il est conçu pour minimiser les déchets et optimiser l'utilisation des ressources, ce qui permet d'accroître la durabilité et de réduire l'impact environnemental de la livraison du dernier kilomètre. En surmontant ces obstacles, l'IP a le potentiel de transformer la livraison du dernier kilomètre en améliorant l'efficacité, les économies de coûts et la satisfaction des clients. Cela nous amène à formuler la question de recherche suivante : "Quels sont les avantages potentiels de l'Internet Physique dans la livraison du dernier kilomètre dans les pays en développement ?". Dans cet article, nous visons à évaluer ce potentiel en

utilisant des expériences basées sur un modèle numérique. La section 2 propose un aperçu du paradigme de l'IP et de son potentiel pour améliorer la livraison du dernier kilomètre. La section 3 présente la méthodologie de recherche appliquée pour obtenir les résultats. La section 4 analyse les résultats et les discute.

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 *Tour d'horizon de l'Internet Physique*

L'IP est un concept qui vise à révolutionner la façon dont les biens physiques sont gérés, transportés, stockés et utilisés pour un système logistique mondial plus efficace et plus durable (Montreuil et al., 2013). L'IP s'inspire des principes de l'Internet numérique, tels que l'ouverture, l'encapsulation et l'interconnexion universelle, pour transporter des biens physiques dans des conteneurs normalisés, semblables aux paquets de données dans le monde numérique (Maslarić et al., 2016). L'IP est définie comme "un système logistique mondial construit à partir de l'interconnexion de réseaux logistiques par le biais d'un ensemble normalisé de protocoles de collaboration, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligentes pour une efficacité et une durabilité accrues (Ballot et al., 2014). L'IP vise à interconnecter les réseaux logistiques, à partager les actifs, à utiliser le transport intermodal et à employer des technologies numériques pour améliorer l'efficacité et la durabilité. Elle repose sur les principes de normalisation, d'interopérabilité, de collaboration et de modularité (Montreuil et al., 2013).

Ces principes fonctionnent ensemble pour rationaliser le processus de livraison et améliorer l'efficacité globale de la chaîne d'approvisionnement.

La normalisation dans l'IP fait référence à la normalisation des processus, des systèmes et des modes de transport, garantissant une plus grande compatibilité et interopérabilité tout au long de la chaîne d'approvisionnement. L'interopérabilité, quant à elle, permet une circulation transparente et efficace des marchandises et des informations entre tous les participants de la chaîne d'approvisionnement, ce qui favorise la connectivité et la collaboration (Montreuil, 2011). La collaboration, en tant que principe, favorise la coopération et le partage d'informations entre les entreprises, les gouvernements et les clients, contribuant ainsi à une chaîne d'approvisionnement plus efficiente et efficace. Enfin, la modularité de l'IP permet de tirer parti de modes de transport souples et adaptables, offrant une plus grande souplesse dans le processus de livraison et augmentant l'efficacité globale de la chaîne d'approvisionnement.

En intégrant ces principes, l'IP offre de nombreux avantages aux entreprises et aux clients, notamment une meilleure efficacité, une meilleure utilisation des ressources, une sécurité accrue, de meilleurs systèmes d'adressage et une meilleure durabilité. En fin de compte, la mise en œuvre de l'IP peut révolutionner le processus de logistique et de livraison, en entraînant une plus grande satisfaction des clients, des économies et des processus de livraison plus efficaces et durables.

Les avantages théoriques de l'IP ont fait l'objet de nombreuses recherches et ont été démontrés dans diverses applications, principalement dans les pays développés (Sallez et al., 2016). Selon (Matusiewicz, 2020), l'IP est un réseau logistique innovant fondé sur la technologie et la collaboration qui mérite

l'attention des universitaires et des praticiens. Cependant, il existe une lacune dans la compréhension de son impact potentiel dans le reste du monde, en particulier dans les pays en développement (Grest et al., 2021). Il s'agit d'un domaine qui nécessite une exploration plus approfondie.

## 2.2 L'Internet Physique dans les pays en développement

Toutefois, la mise en œuvre de l'IP dans les pays en développement se heurte à des difficultés telles que la nécessité d'une coordination entre les prestataires de services de transport, les obstacles réglementaires et juridiques, et le manque de volonté d'adopter ce nouveau mode d'exploitation. L'IP a le potentiel de fondamentalement changer le transport et la logistique, en améliorant l'efficacité, la durabilité et la résilience (Reda et al., 2020). Elle pourrait créer une chaîne d'approvisionnement mondiale plus connectée et plus efficace, au bénéfice des consommateurs, des entreprises et de l'environnement (Arvianto et al., 2021).

Pour surmonter ces difficultés cela nécessite l'élaboration de nouvelles normes, de nouveaux protocoles pour le transport intermodal ainsi que le partage des données et des infrastructures. En outre, il existe des obstacles réglementaires et juridiques au développement de l'IP, notamment des réglementations différentes en matière de sécurité et d'environnement selon les pays et les régions. Fondamentalement, un tel changement de paradigme dans la logistique nécessite des transformations importantes à différents niveaux (Kim, 2022), entraînant la nécessité d'un système d'information adapté utilisant des technologies avancées pour permettre l'hyperconnexion des acteurs, permettant un partage accru et standardisé des informations et un stockage massif des données. Il est nécessaire pour les acteurs d'évoluer vers ce nouveau mode de fonctionnement et de s'engager dans l'effort. Le groupement ALICE (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe) a récemment publié une feuille de route formulant les étapes importantes et les prérequis associés pour la mise en œuvre de l'IP d'ici 2050 dans les pays développés (ALICE, 2020). Malgré ces défis, l'IP peut transformer le transport et la logistique dans les pays en développement en améliorant l'efficacité, la durabilité et la résilience. En optimisant la circulation des biens et des personnes à travers différents modes de transport et en utilisant les technologies numériques, l'IP pourrait créer une chaîne d'approvisionnement mondiale plus connectée et plus efficace, au bénéfice des consommateurs, des entreprises et de l'environnement.

En conclusion, si l'IP est lentement mise en œuvre à l'échelle mondiale, elle doit être plus largement connue et adoptée, notamment dans les pays en développement. L'objectif de ce projet est d'évaluer la pertinence de l'IP pour résoudre les défis liés à l'optimisation des activités de transport de marchandises dans les villes des pays en développement en utilisant les moyens et infrastructures existants. La mise en œuvre de l'IP dans les pays en développement peut se heurter à des difficultés, mais son potentiel à faire évoluer radicalement le transport et la logistique fait qu'il mérite d'être considéré comme une solution.

## 3 METHODOLOGIE DE RECHERCHE

### 3.1 Un « Digital Model » pour évaluer les opportunités

La popularité de la simulation hybride (modélisation de simulation multi-méthodes), qui combine deux ou plusieurs méthodes de modélisation telles que la simulation d'événements discrets (DES), la dynamique des systèmes (SD) et la simulation basée sur les agents (ABM), a rapidement augmenté au cours des deux dernières décennies : (Brailsford et al., 2019; Roci, Salehi, Amir, Asif, et al., 2022; Roci, Salehi, Amir, Shoaib-ul-Hasan, et al., 2022). Dans cette étude, nous utiliserons un mélange de DES et d'ABM pour évaluer différents scénarios de logistique urbaine dans les pays en développement dans le but d'évaluer le paradigme de l'IP.

Pour modéliser avec précision la logistique urbaine dans les pays en développement, une architecture de modèle de simulation multi-méthodes est proposée. Ce modèle prend en compte les caractéristiques uniques de chaque partie prenante en les modélisant comme des agents autonomes à l'aide d'ABM et de DES. Les interactions incertaines entre les parties prenantes sont également capturées à l'aide de DES. Ce modèle décrit en Figure 1, se basant sur des données réelles, il est considéré comme un « digital model » (Kritzinger et al., 2018).

L'environnement de ces agents est défini à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), qui prend en compte des facteurs tels que l'emplacement géographique et l'accès aux ressources. La livraison des marchandises sur le dernier kilomètre est modélisée par les interactions entre les différents acteurs du réseau, en simulant le processus de cycle de vie des commandes pour chaque scénario.

Les résultats de la simulation (menée sur le logiciel Anylogic) seront évalués par rapport à des indicateurs clés de performance (KPI) tels que les performances économiques, environnementales et techniques pour une meilleure prise de décision. La méthode proposée sera testée dans des scénarios de cas réels dans les pays en développement.

#### 3.1.1 Hypothèses

L'entreprise fonctionne 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 et traite les commandes selon le principe du premier entré, premier sorti pendant les heures d'ouverture du centre (de 7 heures à 20 heures). L'étude suppose une capacité de stockage illimitée et des temps de préparation des commandes constants, et ne prend en compte que la variabilité liée à la disponibilité des véhicules de transport et à la vitesse des véhicules liée aux embouteillages.

L'aspect transport du modèle implique l'utilisation des véhicules propres de l'entreprise, principalement des motos, pour assurer les livraisons tout au long de la journée, en fonction de la capacité du type de véhicule choisi (moto, camionnette, tuk-tuks, etc.) et d'un horaire préétabli. L'itinéraire du véhicule est basé sur l'algorithme du plus court chemin et tient compte des caractéristiques de vitesse inhérentes au véhicule, ainsi que des conditions de circulation de la zone concernée, y compris les problèmes de trafic.

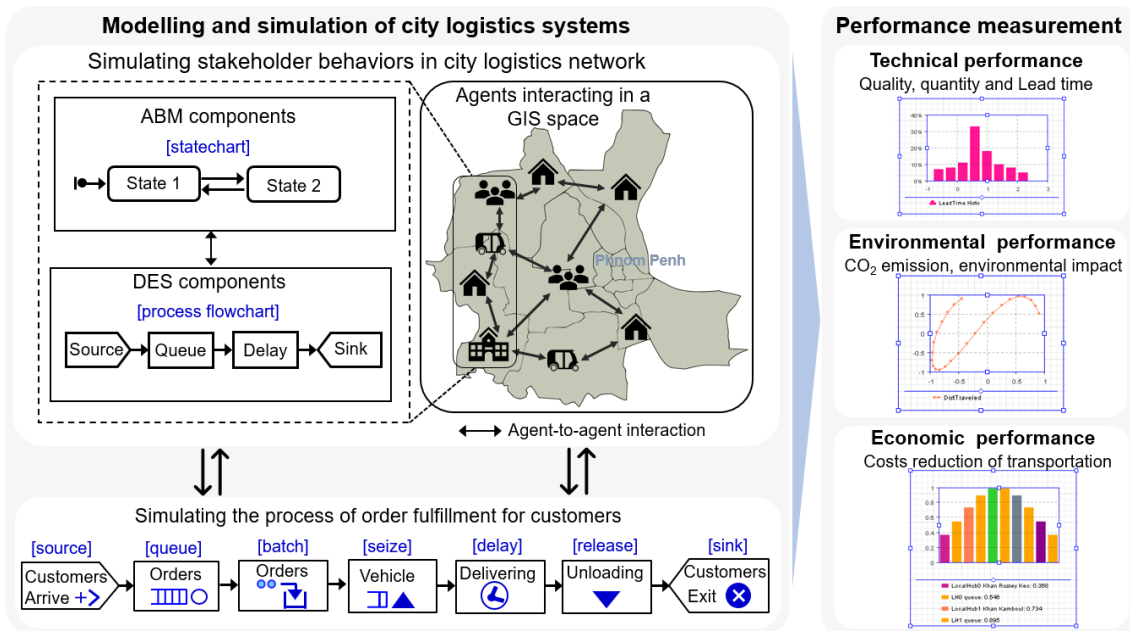


Figure 1: Principe de la simulation

### 3.1.2 Scenarios

L'objectif de cette section est d'établir un modèle de base servant de référence pour évaluer l'utilité potentielle des solutions d'IP développées dans cette recherche.

Le scénario 0 est illustré dans la Figure 2. Le scénario implique une entreprise disposant d'un centre de traitement des commandes, appelé Main, qui sert de centre de stockage et de préparation des commandes des clients dans la région désignée.

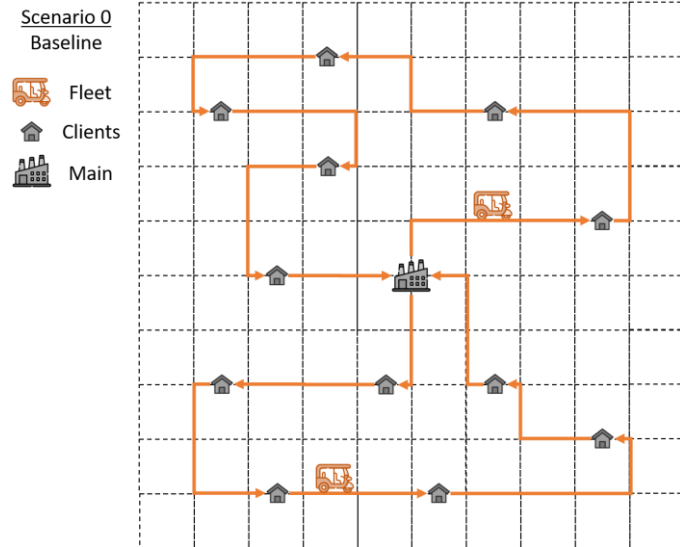


Figure 2: Scenario 0, La baseline.

Le scénario 1 (illustré à la Figure 3) propose l'ajout de pi-hubs pour prendre en charge la livraison du dernier kilomètre dans la ville. La ville est divisée en zones affectées à chaque pi-hub. Chaque pi-hub dispose de sa propre flotte de véhicules pour assurer la livraison. Les hubs sont responsables de la préparation, de l'expédition et de la livraison des commandes sur leur territoire, le réassort entre le centre de distribution et les hubs se faisant par des navettes quotidiennes. Le stock principal reste au centre de distribution avec une capacité illimitée. Dans ce scénario, les pi-hubs agissent comme des

plateformes de cross-docking où les marchandises entrantes sont déchargées, triées et consolidées, puis chargées sur les véhicules sortants sans stockage, ce qui permet une livraison plus rapide et plus efficace. Les principaux processus d'exécution des commandes ont lieu dans les pi-hubs.

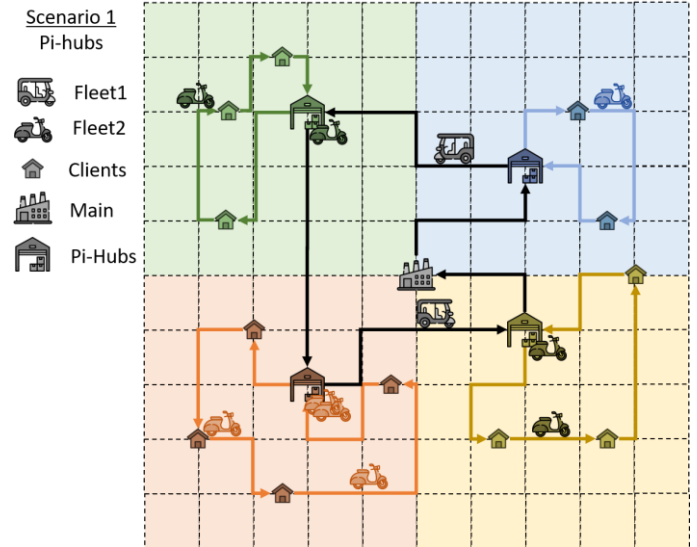


Figure 3: Scenario 1, ajout de hubs.

L'idée qui sous-tend le scénario 2 (illustré à la Figure 4) est de rapprocher le concept d'IP de la réalité en créant un réseau de transport partagé, modulaire, standard et interopérable qui relie différents réseaux de transport, à l'instar du fonctionnement de l'internet numérique. L'utilisation de composants modulaires et de matériaux normalisés est cruciale pour le succès d'un réseau, car elle permet une connectivité facile et une interaction transparente avec d'autres réseaux.

Dans ce scénario, la priorité est donnée à l'accessibilité et à une solution collaborative. Pour y parvenir, il est proposé d'utiliser les nombreux moyens de transport déjà disponibles dans les villes en développement, tels que les TukTuks et les motos-taxis, au lieu que chaque centre dispose de sa propre flotte de véhicules. Le transport des marchandises est confié à des ressources tierces qui sont disponibles à la demande, en

fonction des attentes des clients et des possibilités de transport autour du pi-hub.

Le processus dans ce scénario implique que le pi-hub reçoive les marchandises entrantes de l'entrepôt principal et les trie en fonction de leur destination. Le pi-hub peut ensuite utiliser les véhicules à la demande d'un fournisseur de transport pour récupérer les marchandises triées et les livrer à l'endroit où se trouve le client, avec l'aide du réseau IP et du partage d'informations.

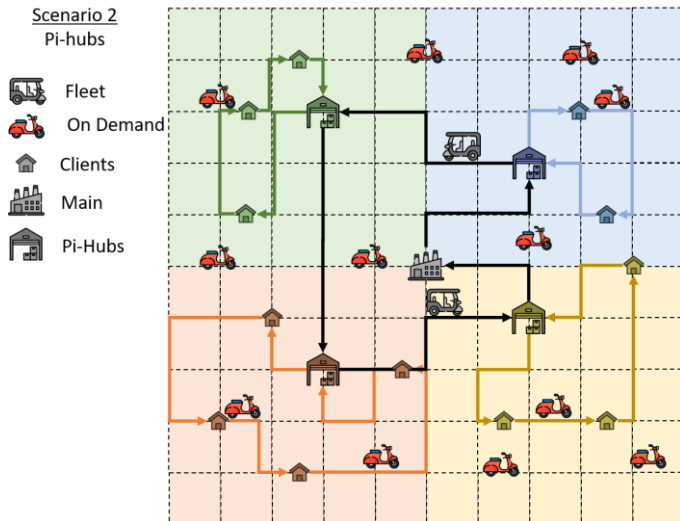


Figure 4: Scénario 2, des hubs et des véhicules à la demande

### 3.1.3 Indicateurs clés de performance

Les résultats de la simulation sont analysés à l'aide d'indicateurs clés de performance (KPI) pour évaluer l'efficacité du paradigme de l'IP et des différents scénarios. Le lead time est utilisé pour mesurer le temps de transport et le temps de préparation.

Le LeadTime est utilisé pour évaluer la dimension temporelle du paradigme de l'IP et la livraison des marchandises dans le dernier kilomètre (voir Équation 1). Cela fournit une mesure claire du temps écoulé entre la préparation des marchandises à l'entrepôt principal et leur livraison finale chez le client, et permet d'évaluer l'efficacité du processus de livraison.

#### Équation 1 : Leadtime

$$LeadTime = TLivraison - TCommandePlacee$$

L'indicateur de la fonction de coût est utilisé pour évaluer les aspects financiers du paradigme de l'IP. Il fournit une mesure des coûts encourus pour la livraison des marchandises de l'entrepôt principal jusqu'au client. Il prend en compte le type de véhicules utilisés, la distance parcourue, la consommation de carburant, le remplacement des pièces détachées et l'huile pour calculer le coût global de la livraison. Ce KPI est important pour évaluer l'efficacité du paradigme de l'IP dans le contexte d'un pays en développement.

Pour évaluer l'aspect financier, une fonction de coût est utilisée, la fonction de coût pour les scénarios 0 et 1 étant la même, le prix étant calculé sur la base d'une combinaison d'un coût initial fixe par jour et d'un tarif kilométrique (voir Équation 2 : Coût). Mais légèrement différent pour le scénario 2 en raison de l'utilisation d'un service de véhicules à la demande, nous considérons un tarif fixe (discutée avec l'entreprise locale) pour le coût de prise en charge des commandes de 5\$ par tournée. Les différentes valeurs utilisées

pour construire la fonction de coût se trouvent dans le Tableau 1.

#### Équation 2 : Coût

$$Coût = \sum_{nvehicules} Coûtparjour * Nbjour + \frac{Distancetotale * VOC}{1000}$$

En outre, une fonction d'empreinte carbone est calculée pour évaluer la durabilité, qui prend en compte le type de véhicule utilisé et le kilométrage parcouru par chaque véhicule.

La fonction KPI d'empreinte carbone est utilisée pour évaluer la durabilité du paradigme de l'IP. Il calcule la quantité d'émissions de dioxyde de carbone produites pendant la livraison des marchandises de l'entrepôt principal au site du client (voir Équation 3). Cet KPI est important pour évaluer l'impact environnemental du paradigme de l'IP et son alignement sur les objectifs de développement durable.

#### Équation 3 : Empreinte Carbone

$$EmpreinteCarbone = \sum_{nvehicules} f(DistanceTotale, Consommation, Type)$$

En conclusion, ces trois indicateurs fournissent une évaluation complète du paradigme de l'IP en termes d'efficacité, d'efficacité et de durabilité, qui sont des aspects clés de la performance de la livraison du dernier kilomètre dans un contexte de pays en développement.

Tableau 1. Données utilisées pour KPIs

	Motos	Tuk-Tuk
Coût Achat (\$)	3000	6000
Durée de vie(année)	5	5
Coût par jour Depreciation (\$/jour)	2	4
Coût Opérationnel du Véhicule (VOC) (\$/1000km) (Maintenance)	76,4	131,6
Consommation (L/100km)	1,84	5,2
A la demande - Coût	5\$ per course	-

### 3.2 Cas d'Etude

Le modèle est basé sur le cas de "Little Fashion Company", une entreprise cambodgienne de e-commerce située à Phnom Penh, avec laquelle les chercheurs ont établi un partenariat tout au long du processus de recherche.

La simulation a été réalisée sur un échantillon d'une semaine de commandes passées entre le 02-08-2021 et le 10-08-2021. Cela correspond à 9100 commandes passées par 8290 clients différents. Les types de véhicules et leurs spécificités sont détaillés dans le Tableau 1.

## 4 RESULTATS ET ANALYSES

Après avoir exécuté la simulation pendant une semaine pour les trois scénarios, nous observons que nous avons pu livrer respectivement 8742, 8854 et 8856 pour les scénarios 0, 1 et 2. Pour rappel, il y a eu 9100 commandes passées durant cette semaine. Ainsi, l'utilisation des scénarios PI nous a permis de

réduire le taux de commandes non servies de 4% à 3%, soit 100 commandes supplémentaires qui peuvent être livrées.

**Tableau 2. Résultats sur le LeadTime**

	LeadTime in hour				
	Ecart-Type	Min	Mediane	Moy	Max
S0	4,84	0,19	8,19	8,36	25,47
S1	4,46	1,17	5,11	6,61	20,38
S1/ S0	8%	-515%	38%	21%	20%
S2	4,37	1,18	3,72	5,61	18,99
S2/S0	10%	-520%	54%	33%	25%

En ce qui concerne le délai d'exécution, le Tableau 2 résume les résultats obtenus. Le délai médian est de 8,19, 5,11 et 3,72 heures pour les scénarios 0, 1 et 2. L'ajout de pi-hub et d'une flotte de motos peut améliorer le délai de 37 % par rapport au scénario de base. Cependant, l'utilisation de pi-hubs et de la flotte à la demande améliore le délai médian de 54% et nous permet de gagner une heure supplémentaire sur la livraison, ce qui est assez intéressant pour une livraison du dernier kilomètre dans le e-commerce. Par ailleurs, le délai maximal peut sembler assez élevé, mais il peut s'expliquer par les commandes qui se chevauchent sur deux jours et qui ne sont pas livrées le jour même de leur réception. Ce délai maximum est réduit de 25 heures à 19 heures. C'est une amélioration de 24% par rapport au scénario de base.

L'empreinte carbone de chaque scénario est détaillée dans le Tableau 3. Le Scénario 0 ne prend en compte que les TukTuks, les Scénarios 1 et 2 prennent en compte un mélange de TukTuks et de Motos. Les résultats montrent que l'utilisation de TukTuks comme mode de transport entraîne une consommation de carburant plus élevée que celle des motos, ce qui conduit à une empreinte carbone plus élevée dans le scénario 0. Cependant, en utilisant un système de hub et en utilisant des moyens de transport plus légers tels que les motos pour la livraison du dernier kilomètre, l'entreprise a pu réaliser une réduction significative de son empreinte carbone. En fait, il y a eu une diminution de 60 % des émissions de carbone par rapport à la base de référence, passant de 17,8 tonnes de CO2 produites par semaine à seulement 7 tonnes de CO2 produites. La mise en place d'un système de véhicules à la demande entraîne une diminution de la distance totale parcourue par les véhicules, ce qui conduit à une légère réduction de l'empreinte carbone de l'entreprise, qui passe de 7,10 tonnes de CO2 à 6,90. Cependant, cette diminution doit être considérée avec prudence car le transport a toujours lieu et des émissions sont toujours produites, seule la responsabilité est transférée aux véhicules à la demande. Elle peut donc être considérée comme un transfert de responsabilité plutôt que comme une véritable réduction des émissions de carbone entre les scénarios 1 et 2.

**Tableau 3. Résultats sur l'Empreinte Carbone**

	Empreinte Carbone			
	Main au Hub	Hub au Client	Total (tonne CO2)	Comparaison à S0
S0	17,8	-	17,8	-
S1	0,602	6,5	7,10	60,7%
S2	0,602	6,3	6,90	61,2%

Le Tableau 4 résume le coût de chaque scénario. Le calcul du coût prend en compte des facteurs tels que la dépréciation, l'entretien et les dépenses de carburant pour les véhicules. Pour le scénario de flotte à la demande, le coût est calculé sur la base d'une redevance initiale fixe et d'une redevance kilométrique. Le scénario avec sa propre flotte de TukTuk (Scénario 0) engendre le coût hebdomadaire le plus élevé, soit 10 000 \$. En passant à une flotte de motos dans le scénario 1, le coût est réduit de 30 % à 6 986 \$. La mise en place d'un parc de véhicules à la demande (scénario 2) entraîne une réduction encore plus importante de 73 %, à 2 705 \$, avec un coût de ramassage fixe de 5 \$ (valeur estimée).

**Tableau 4. Résultats sur le Coût**

	Coût (\$)			% of S0
	Main au Hub	Hub au Client	Total \$)	
S0	10000		10000	-
S1	382	6604	6886	30%
S2	245	2460	2705	73%

## 5 CONCLUSION

L'étude basée sur un modèle numérique de la mise en œuvre de l'IP pour la livraison du dernier kilomètre dans un pays en développement révèle qu'elle peut conduire à une amélioration significative des performances de livraison, à une réduction de l'empreinte carbone et à une diminution des coûts pour l'entreprise. Les résultats de la simulation sur une période d'une semaine montrent que la mise en œuvre de l'IP entraîne une augmentation de 1 % du nombre de commandes livrées, une réduction du délai médian de 54 % et une diminution de l'empreinte carbone de 60 %. En outre, la réduction des coûts de 10 000 \$ à 2 705 \$ démontre les avantages financiers potentiels de la mise en œuvre de l'IP dans un tel contexte. Ces résultats suggèrent que l'IP peut jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la livraison du dernier kilomètre dans les pays en développement et peut conduire à un système de chaîne d'approvisionnement plus durable, efficace et efficient.

En conclusion, les résultats de cette étude basée sur un modèle numérique soulignent le potentiel de l'IP pour améliorer la livraison du dernier kilomètre dans les pays en développement. Cependant, il est important de reconnaître les limites de cette étude telles que l'échantillon d'une semaine, les informations limitées sur les stocks dans le modèle numérique, et le manque de collaboration et de transport partagé dans le modèle. L'étude se concentre actuellement sur une seule entreprise, il serait donc intéressant d'inclure d'autres entreprises pour examiner le potentiel de coordination et de collaboration entre elles. Un autre aspect intéressant à considérer est le scénario de la croissance des véhicules électriques dans les pays en développement et la façon dont cela peut être analysé par le modèle numérique. En outre, le modèle pourrait être utilisé comme un outil d'aide à la décision pour déterminer l'emplacement optimal des pi-hubs. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étendre la simulation et remédier à ces limites afin de fournir une évaluation plus précise de l'impact de l'IP sur la livraison du dernier kilomètre.

## 6 REFERENCES

- ALICE. (2020). *ALICE Roadmap to Physical Internet – ALICE Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe*. <https://www.etp-logistics.eu/alice-physical-internet-roadmap-released/>
- Arviante, A., Sopha, B. M., Asih, A. M. S., & Imron, M. A. (2021). City logistics challenges and innovative solutions in developed and developing economies: A systematic literature review. *International Journal of Engineering Business Management*, 13, 18479790211039724.
- Ballot, E., Montreuil, B., & Meller, R. D. (2014). *The physical internet*. La Documentation Française.
- Brailsford, S. C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., & Osorio, A. F. (2019). Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 721-737.
- De Guimarães, J. C. F., Severo, E. A., Júnior, L. A. F., Da Costa, W. P. L. B., & Salmoria, F. T. (2020). Governance and quality of life in smart cities: Towards sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119926.
- Grest, M., Lauras, M., & Montreuil, B. (2021). Assessing Physical Internet potential for Humanitarian Supply Chains. *HICSS 2021-54th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2048-2056.
- Hu, W., Dong, J., Hwang, B., Ren, R., & Chen, Z. (2019). A scientometrics review on city logistics literature: Research trends, advanced theory and practice. *Sustainability*, 11(10), 2724.
- Kim, J. (2022). Smart city trends: A focus on 5 countries and 15 companies. *Cities*, 123, 103551.
- Kraay, A. (2018). Methodology for a World Bank human capital index. *World Bank Policy Research Working Paper*, 8593.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *Ifac-PapersOnline*, 51(11), 1016-1022.
- Lagorio, A., Pinto, R., & Golini, R. (2016). Research in urban logistics: A systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- Maslarić, M., Nikoličić, S., & Mirčetić, D. (2016). Logistics response to the industry 4.0: The physical internet. *Open engineering*, 6(1).
- Matusiewicz, M. (2020). Logistics of the future—Physical internet and its practicality. *Transportation Journal*, 59(2), 200-214.
- Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: Meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, 3, 71-87.
- Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2013). Physical internet foundations. *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics*, 151-166.
- Phun, V. K., Kato, H., & Yai, T. (2018). Traffic risk perception and behavioral intentions of paratransit users in Phnom Penh. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 55, 175-187.
- Phun, V. K., & Yai, T. (2016). State of the art of paratransit literatures in Asian developing countries. *Asian Transport Studies*, 4(1), 57-77.
- Reda, A. K., Gebresenbet, G., Tavasszy, L., & Ljungberg, D. (2020). Identification of the regional and economic contexts of sustainable urban logistics policies. *Sustainability*, 12(20), 8322.
- Roci, M., Salehi, N., Amir, S., Asif, F. M., Shoaib-ul-Hasan, S., & Rashid, A. (2022). Multi-method simulation modelling of circular manufacturing systems for enhanced decision-making. *MethodsX*, 9, 101709.
- Roci, M., Salehi, N., Amir, S., Shoaib-ul-Hasan, S., Asif, F. M., Mihelič, A., & Rashid, A. (2022). Towards circular manufacturing systems implementation: A complex adaptive systems perspective using modelling and simulation as a quantitative analysis tool. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 97-112.
- Sallez, Y., Pan, S., Montreuil, B., Berger, T., & Ballot, E. (2016). On the activeness of intelligent Physical Internet containers. *Computers in Industry*, 81, 96-104.