

Drones de livraison : les impacts en termes de coûts de livraison et d'environnement

Auteur : Weelen, Nathan

Promoteur(s) : François, Véronique

Faculté : HEC-Ecole de gestion de l'Université de Liège

Diplôme : Master en sciences de gestion, à finalité spécialisée en global supply chain management

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15303>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

DRONES DE LIVRAISON : LES IMPACTS EN TERMES DE COÛTS DE LIVRAISON ET D'ENVIRONNEMENT

Jury:
Promoteur:
Véronique FRANCOIS
Lecteur:
Elodie BEBRONNE

Mémoire présenté par
Nathan WEELLEN
En vue de l'obtention du
diplôme de
Master en Sciences de Gestion,
à finalité spécialisée en Global
Supply Chain Management
Année académique 2021/2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice, Madame François, pour son soutien, ses conseils et son accompagnement tout au long de ce travail.

Je remercie également Madame Bebronne, ma lectrice, pour le temps accordé à la lecture de mon mémoire.

Ensuite, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de mon mémoire.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille et mes amis qui m'ont aidé et soutenu durant la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des abréviations	1
2. Introduction	3
2.1. Objectif	3
2.2. Méthodologie	3
2.3. Structure	4
3. Concepts clefs	5
3.1. La logistique du dernier kilomètre	5
3.1.1 Les enjeux économiques	5
3.1.2 Les enjeux logistiques	5
3.1.3 Les enjeux environnementaux	5
3.2. Les modes de livraison	6
3.2.1. Véhicule utilitaire léger	6
3.2.2. Vélo cargo	8
3.2.3. Casier à colis	9
3.2.4. Drone de livraison	11
3.3. Les problèmes d'optimisation	13
3.3.1. Traveling salesman problem	13
3.3.2. Vehicle routing problem	13
4. Revue de Littérature	15
4.1. Introduction par Murray et Chu	15
4.2. Le PDSTSP	18
4.2.1. Chang et Lee	18
4.2.2. Ham	18
4.3. Le FSTSP	19
4.3.1. Ponza	19
4.3.2. Agatz et al.	20
4.3.3. Wang X. et al.	20
4.3.4. Ha et al.	21
4.3.5. Carlsson et Song	22
4.3.6. Wang Z. et Sheu	22
4.3.7. Tamke et Buscher	23
4.4. Les impacts environnementaux	24
5. Etude comparative	27
5.1. Impacts en termes de coûts de livraison	27
5.1.1. Coûts des VUL	27
5.1.2. Coûts des drones	30
5.1.3. Calculs des coûts	32
5.1.3.1. Scénario 1 : VRP standard sans drone	32

5.1.3.2. Scénario 2 : VRPD avec un drone	34
5.1.3.3. Scénario 3 : VRPD avec deux drones	36
5.1.3.4. Comparaison des scénarios	38
5.2. Les méthodes d'évaluation environnementale	40
5.2.1. Bilan Carbone	40
5.2.2. Cadre GLEC	40
5.2.3. GHG protocol Product Standard	41
5.2.4. Analyse du cycle de vie	42
5.3. Impacts environnementaux	44
5.3.1. Analyse du cycle de vie	44
5.3.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude	44
5.3.3. Inventaire du cycle de vie (ICV)	45
5.3.3.1. VUL thermique	45
5.3.3.2. VUL électrique	46
5.3.3.3. Drone	47
5.3.4. Évaluation des impacts	48
5.3.4.1. Scénario 1 : VRP standard sans drone	49
5.3.4.2. Scénario 2 : VRPD avec un drone	49
5.3.4.3. Scénario 3 : VRPD avec deux drones	50
5.4. Comparaison des résultats	52
5.5. Limites de la recherche	53
6. Conclusions	55
Annexes	56
Bibliographie et références	69
Executive summary	78

Liste des abréviations

AEE	Agence Européenne pour l'Environnement
ACV	Analyse du cycle de vie
CCT	Conventions collectives de travail
CHF	Cours Franc Suisse
FSTSP	Flying Sidekick Travelling Salesman Problem
GES	Gaz à effet de serre
GLEC	Conseil mondial des émissions logistiques
GPS	Système de positionnement global
ICV	Inventaire du cycle de vie
MMA	Masse maximale autorisée
PDSTSP	Parallel Drone Scheduling Travelling Salesman Problem
TSP	Travelling Salesman Problem
TSP-D	Travelling Salesman Problem with Drone
TTW	Tank-to-Wheels
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPD	Vehicle Routing Problem with Drones
VRPD-DSS	Vehicle Routing Problem with Drones and Drone speed selection
VUL	Véhicule utilitaire léger
WTLP	Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheels

2. Introduction

En 2013, Jeff Bezos, PDG de la société Amazon, fait la une des médias en annonçant que l'entreprise planifie de livrer une partie de ses colis à l'aide d'un nouveau moyen de distribution : le drone (Rose, 2013). Au départ d'un dépôt ou d'un camion, ces drones pourront voler jusqu'à la localisation du client pour délivrer le colis, et ce, en moins de 30 minutes. La navigation autonome du véhicule, basée sur un système de positionnement global (GPS) embarqué, ne demandera aucune intervention humaine pour fonctionner.

Dans un contexte où le commerce en ligne est en constante croissance et où la logistique du dernier kilomètre est de plus en plus complexe et coûteuse, cette innovation a suscité un grand intérêt. Depuis, de nombreuses entreprises de livraison ont emboîté le pas et chacune développe leur prototype et leur système pour permettre ces livraisons. Limitée par les démarches administratives et par la législation en retard sur le sujet, l'utilisation des drones dans le cadre logistique peine cependant à voir le jour.

En parallèle, la littérature à ce sujet a elle aussi bénéficié d'un attrait conséquent et de nombreux auteurs se sont intéressés à ce nouveau concept. Ces dernières années, le nombre d'ouvrages publiés sur le sujet des drones de livraison est élevé et les concepts qui y sont abordés sont variés. En passant par l'optimisation du temps de livraison, des coûts opérationnels ou encore des impacts environnementaux, les auteurs proposent chacun leurs visions et concepts de la livraison par drone.

Généralement présentée comme une innovation offrant des performances intéressantes tant au niveau des coûts qu'au niveau de l'impact environnemental par les acteurs du secteur, les réels impacts sont néanmoins encore difficiles à évaluer au vu de l'absence de cette technologie en condition réelle. Dès lors, quels sont les impacts en termes de coûts et d'environnement de l'utilisation des drones dans la logistique du dernier kilomètre ?

2.1. Objectif

L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier l'impact en termes de coûts et d'environnement de l'introduction des drones de livraison dans le transport de marchandises. Plus précisément, dans ce mémoire, nous déterminons les coûts de livraison ainsi que les émissions d'équivalent CO₂ (CO₂e) relatives à une situation initiale dans laquelle une camionnette effectue seule les livraisons. Ensuite, la même situation est étudiée en considérant l'ajout d'un puis de deux drones pour effectuer les livraisons. Enfin, une comparaison des résultats est menée à la lumière des résultats obtenus, et ce, pour les différents cas envisagés.

2.2. Méthodologie

Pour ce faire, nous parcourons tout d'abord la littérature existante sur les drones de livraison et ces divers impacts. De ces travaux, nous sélectionnons un article qui présente, selon nous, les hypothèses les plus réalistes concernant la livraison de colis à l'aide de drones. Cette situation initiale est donc le point de départ pour nos calculs.

Ensuite, un inventaire des coûts ainsi que des émissions d'équivalent CO₂ est dressé pour permettre de déterminer les coûts totaux et par colis ainsi que les émissions totales et par colis liés aux différents cas que nous souhaitons analyser.

Enfin, à la lumière des résultats obtenus, nous établissons une série de comparaisons permettant de discuter les divers impacts.

2.3. Structure

Cette section décrit brièvement la structure de ce mémoire. Dans un premier temps, nous définissons certains concepts propres au sujet traité, dont la logistique du dernier kilomètre, les modes de livraison et les problèmes d'optimisation dans le chapitre 3.

Ensuite, une revue de littérature est présentée sur l'optimisation des coûts de livraison dans le cadre d'une utilisation de drones pour le dernier kilomètre dans un premier temps. Puis la littérature concernant les aspects environnementaux est elle aussi abordée (chapitre 4.).

L'inventaire des coûts des différents modes de livraison est effectué dans le chapitre 5.1 pour déterminer les coûts des différents scénarios dans le chapitre 5.1.3. Une conclusion préliminaire est formulée au regard de ces premiers résultats.

Ensuite, une brève présentation des méthodes de comptabilisation des impacts environnementaux est effectuée et une analyse du cycle de vie d'un drone et d'un véhicule utilitaire léger (VUL) est dès lors effectuée sur base des scénarios considérés. Des conclusions sont ensuite formulées au chapitre 5.3.4.

Enfin, nous comparons et discutons les principaux résultats obtenus dans le chapitre 5.4. avant de présenter les limites du travail au point 5.5 et de conclure dans le chapitre 6.

3. Concepts clefs

3.1. La logistique du dernier kilomètre

La logistique du dernier kilomètre est un terme utilisé dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement pour désigner les derniers kilomètres à parcourir pour terminer le processus de livraison des marchandises (Boysen et al., 2021). Dans notre étude, cela représente le moment où les colis partent du dépôt pour être livrés chez les clients, leur destination finale. Avec l'augmentation soutenue des ventes en ligne ces dernières années, 16,8% en 2021, ce type de livraison augmente également considérablement (*Global Retail E-Commerce Sales Growth*, 2022). Cela implique un plus grand nombre de véhicules dans les villes et sur les routes, ce qui favorise davantage la congestion du trafic (Boysen et al., 2021). En plus d'être la partie du processus de livraison la plus coûteuse, elle a également un impact environnemental conséquent. C'est pourquoi la logistique du dernier kilomètre est au cœur des préoccupations des entreprises de livraison et que celles-ci sont constamment à la recherche d'alternatives et d'innovations pour répondre aux divers enjeux qu'elle soulève.

3.1.1 Les enjeux économiques

Comme expliqué dans le précédent paragraphe, le dernier kilomètre représente un coût important dans le processus de livraison. D'après l'étude de l'entreprise Cushman & Wakefield (2019), il pourrait représenter près de 50% des coûts totaux de ce processus. Ces coûts peuvent s'expliquer de plusieurs manières : tout d'abord, les habitudes de consommation évoluent fortement de nos jours et le secteur de l'e-commerce gagne chaque année de plus en plus de parts de marché. Outre cette demande qui augmente, les attentes des clients en termes de personnalisation et de délais sont de plus en plus élevées et deviennent des services fondamentaux pour la majorité des clients (Kees et al., 2019). La rapidité de livraison reste donc un avantage concurrentiel pour les sociétés de ce secteur. Ces frais importants sont également dus aux itinéraires complexes, qui requièrent l'utilisation d'algorithmes pour être calculés, mais ils sont aussi dus aux retards, aux embouteillages, aux échecs de livraisons ainsi qu'aux potentielles pertes de colis (Demarque, 2021).

3.1.2 Les enjeux logistiques

Ensuite, les enjeux sont d'ordre logistique. En effet, pour pouvoir optimiser les coûts de livraison du dernier kilomètre, il faut également faire face à de nombreuses contraintes logistiques. Par exemple, la localisation des clients est un facteur aussi important qu'aléatoire. D'autre part, le nombre d'arrêts qu'une camionnette peut effectuer durant une tournée est aussi limité par la capacité du véhicule, par les horaires de travail du chauffeur ainsi que par le flux routier. Autre aspect logistique, pour pouvoir livrer dans les plus brefs délais les clients, l'entreprise doit posséder tous les produits demandés en stock, ce qui implique un grand nombre de produits disponibles stockés dans des entrepôts à des distances raisonnables des clients finaux. La demande croissante exige donc toujours plus d'espace de stockage et rend la gestion logistique de plus en plus complexe (Demarque, 2021).

3.1.3 Les enjeux environnementaux

Enfin, le dernier kilomètre a également un impact environnemental important puisque de faibles quantités doivent être livrées à un grand nombre d'endroits différents. Le nombre de véhicules sur les routes ne cesse dès lors d'augmenter, causant par la même occasion un trafic plus congestionné et plus polluant. La part des émissions de gaz à effet de serre dans le milieu urbain due à la livraison de marchandises représente près de 25% de la pollution globale (Acteos, 2015).

Ces trois enjeux majeurs auxquels sont confrontées les entreprises de livraison, couplés aux exigences des clients, expliquent pourquoi celles-ci sont engagées dans la recherche d'alternatives et de solutions pour optimiser la livraison du dernier kilomètre à la fois sur le plan économique, organisationnel et écologique.

3.2. Les modes de livraison

Cette section aborde et définit les principaux modes de livraison utilisés de nos jours pour couvrir le dernier kilomètre. Dans un premier temps, nous considérons le mode de livraison le plus utilisé, à savoir la camionnette de livraison, que nous appelons véhicule utilitaire léger (VUL) dans les sections suivantes. Ensuite, pour éviter le trafic engorgé des centres-villes, certaines compagnies optent pour des micro-dépôts et des livraisons faites à l'aide de vélos cargos. Enfin, le casier à colis est également utilisé pour permettre au personnel d'éviter les temps d'attente inutiles et aux clients de récupérer leur colis par leur propre moyen.

3.2.1. Véhicule utilitaire léger

Contexte d'utilisation

Le VUL est le mode de livraison le plus utilisé actuellement, que ce soit pour une utilisation urbaine ou rurale. Il permet de garder une grande flexibilité grâce à sa vitesse de déplacement et son autonomie élevées et bénéficie d'un réseau routier largement développé dans la majorité des pays. Le commerce en ligne étant en essor, la quantité de colis à livrer chaque jour augmente également et la capacité des VUL représente alors un réel avantage pour effectuer ces livraisons journalières. Le VUL est donc moins approprié pour des tournées comportant très peu de colis. Dépendant du réseau routier, ce mode de livraison peut présenter des limites lorsque les clients sont difficilement accessibles à cause de grandes zones piétonnières ou simplement à cause de chemins inadaptés.

Capacité

Le VUL bénéficie d'une capacité conséquente qui lui permet d'effectuer la livraison de l'ensemble des colis prévus pour la tournée du chauffeur. Ce type de véhicule est généralement limité à une masse maximale autorisée (MMA) de trois tonnes et demie comprenant une charge utile allant d'une tonne à une tonne et demie (Camions, 2022). Une fois le VUL rempli au dépôt central, le chauffeur prend la route pour livrer les colis des clients dans un ordre préétabli par un outil de planification et d'optimisation (Boysen et al., 2021). Il ne revient ensuite au dépôt qu'à la fin de la tournée, qui clôture également la journée du travailleur.

Autonomie et portée

En ce qui concerne les VUL fonctionnant avec des moteurs thermiques, on peut considérer que l'autonomie est presque illimitée. En effet, le réservoir de carburant permet de parcourir un grand nombre de kilomètres et réapprovisionner le véhicule ne prend que quelques minutes. La portée est donc elle aussi théoriquement illimitée. Seul le temps nécessaire pour atteindre et livrer les différents clients du jour pour ensuite revenir au dépôt central limite la distance pouvant être parcourue quotidiennement.

Pour les VUL électriques, l'autonomie n'est pas aussi permissive que pour les modèles thermiques. En effet, les batteries de ces véhicules permettent à ceux-ci de parcourir entre 200 et 400 kilomètres, selon les modèles (Geneste, 2020). Bien qu'il existe des recharges rapides pouvant prolonger l'autonomie en quelques minutes, il est difficile de planifier des tournées de livraison qui dépassent

cette autonomie. Malgré cela, l'autonomie est néanmoins suffisante pour les livraisons dans le cadre d'une logistique urbaine, dont les tournées dépassent rarement cette distance. (Pelletier et al., 2016).

Ressources humaines

Bien que le sujet des voitures et des camions autonomes soit d'actualité, ce type de véhicule n'est pas encore en activité dans les villes pour couvrir le dernier kilomètre. Dans ce mémoire, nous considérons uniquement les VUL nécessitant une action humaine pour être déplacés. L'utilisation de ce mode de livraison requiert donc un chauffeur pour chaque véhicule de la flotte. Cet opérateur doit acheminer le VUL et les colis suivant le parcours établi. De plus, c'est à lui que revient la tâche de remettre le colis dans les mains du client final. Une étude démontre que le chauffeur passe 60% de son temps à l'arrêt et parcourt près de 12 km par jour pour atteindre le seuil des clients à livrer (Allen et al., 2017). Malgré cela, le nombre de colis pris en charge par un chauffeur reste conséquent. Il est à noter que la condition physique du livreur a peu d'impact sur l'efficacité des livraisons.

Infrastructure

Les livraisons effectuées à l'aide de VUL s'effectuent au départ d'un dépôt central contenant un grand nombre d'articles et de colis pour desservir une région définie. Cette région est par la suite subdivisée en une multitude de zones permettant de répartir la charge de travail entre les chauffeurs. Bien qu'il serait plus optimal de définir chaque parcours pour chaque véhicule en fonction de l'ensemble des clients à desservir, la majorité des entreprises de livraison fonctionne tout de même par zone (Boysen et al., 2021). Chacune d'entre elles est ensuite desservie par un chauffeur de manière à ce que le temps nécessaire pour livrer chaque zone soit relativement similaire, c'est-à-dire la durée d'une journée de travail. Ainsi, l'optimisation du parcours se fait uniquement en fonction du groupe de clients présent dans une zone spécifique. Cette division en région uniforme est faite pour permettre à tous les employés d'avoir une charge de travail plus ou moins similaire tout en s'assurant que le nombre de livraisons de chaque région ne dépasse jamais la capacité maximale du véhicule (Boysen et al., 2021).

Principaux avantages et inconvénients

Effectuer la livraison des colis pour le dernier kilomètre à l'aide de VUL présente donc une série d'avantages qui font de ce moyen de transport celui le plus utilisé de nos jours. Dans un premier temps, nous pouvons citer son autonomie ainsi que sa portée qui sont relativement importantes et qui permettent donc de planifier un grand nombre de livraisons pour une unique tournée. De plus, la capacité du véhicule permet d'embarquer tous les colis devant être livrés durant une même tournée.

Autre point intéressant, ce mode de livraison n'a besoin que d'un opérateur pour être manœuvré, le nombre de colis pris en charge par employé est donc important. De plus, pour pouvoir effectuer ses livraisons, la camionnette peut compter sur un réseau routier bien développé. Ainsi, chaque localisation est facilement accessible.

Cependant, le VUL présente également ses limites. Malgré ce réseau routier bien développé, l'accroissement du commerce en ligne et plus globalement l'augmentation du nombre de véhicules amènent le trafic urbain à un niveau de saturation en constante élévation. En outre, la tournée du véhicule, limitée par le nombre d'heures que peut effectuer le chauffeur, devient donc moins efficace à cause du temps supplémentaire nécessaire pour traverser les rues saturées. Ces embouteillages ont deux impacts sur la tournée des véhicules : une pollution excessive et une perte de temps et d'efficacité. En effet, de plus en plus, les rues se retrouvent bondées de véhicules bloqués dans les

ralentissements, ce qui provoque une augmentation de la pollution (Ćirović et al., 2014). A cela, nous devons ajouter la multiplication des zones piétonnes qui limitent également l'accès à certains clients. Les chauffeurs doivent effectuer plus de détours, se garer à des endroits illégaux et marcher plus longtemps pour atteindre les adresses des clients à livrer (Boysen et al., 2021).

D'autres facteurs liés à la présence du client à son domicile ont un impact sur l'efficacité des livraisons. Certaines livraisons sont planifiées pour être reçues à des horaires restreints qui sont parfois difficiles à respecter dû à différents éléments, dont le trafic. Il arrive donc parfois que le client soit absent pour récupérer le colis. Celui-ci reste alors dans le véhicule, encombrant l'accès aux autres colis et retourne au dépôt pour un futur envoi. Ces livraisons inachevées représentent une perte considérable d'efficacité et de rendement dans les livraisons journalières (Boysen et al., 2021).

3.2.2. Vélo cargo

Contexte d'utilisation

Pour répondre à cette augmentation du nombre de véhicules sur les routes ainsi qu'au problème de pollution qui en découle, un autre mode de livraison est parfois envisagé : le vélo cargo. Ce vélo propulsé manuellement ou à l'aide d'un moteur électrique est principalement utilisé dans les grands centres-villes où la densité de population et la congestion routière sont élevées (Boysen et al., 2021). Équipé d'une remorque, le livreur a la possibilité de transporter des colis à la fois sur le réseau routier, mais aussi sur les pistes cyclables, ce qui lui permet d'avoir une mobilité plus flexible que les VUL dans les centres-villes. Des exemples d'utilisations réussies se voient à Anvers (Arnold et al., 2018), à Cambridge (Schliwa et al., 2015) ou encore à Vienne (Anderluh et al., 2017).

Capacité

Le vélo cargo ne possède pas une aussi grande capacité que les véhicules utilitaires. Restreint par cette capacité, le livreur ne peut pas effectuer l'ensemble de ses livraisons journalières en un trajet. Il doit donc effectuer un certain nombre de ravitaillements aux dépôts pour continuer sa tournée (Boysen et al., 2021).

Autonomie et portée

Bien moins rapide que la camionnette de livraison, le vélo cargo ne peut cependant pas couvrir de larges zones. Qu'il soit électrique ou manuel, celui-ci est limité respectivement par l'autonomie de sa batterie ou par l'effort physique nécessaire pour faire avancer ce véhicule. Il est également limité par sa faible capacité l'obligeant à dépendre des dépôts pour se ravitailler et continuer sa tournée. C'est pourquoi les vélos cargos sont principalement utilisés dans les hypercentres.

Ressources humaines

Comme pour le VUL, le vélo cargo nécessite un travailleur pour le manœuvrer et le faire avancer. Cependant, le nombre de colis livrés par jour par livreur est moindre en comparaison avec le VUL. De plus, la condition physique du personnel a un impact sur la rapidité des livraisons, sauf si le modèle est 100% électrique (Boysen et al., 2021). C'est donc un facteur supplémentaire au bon fonctionnement des livraisons.

Infrastructure

Le fait que le vélo cargo doive se ravitailler plusieurs fois par jour implique des trajets supplémentaires vers le dépôt. Pour permettre à ce mode de livraison d'être utilisé de manière

efficace, des micro-dépôts décentralisés, plus petits et plus nombreux, sont implémentés. Ils permettent aux vélos cargos de réduire le temps alloué à ces trajets supplémentaires. Une des principales décisions à prendre pour ce mode de livraison est donc la localisation et la capacité de ces micro-dépôts (Boysen et al., 2021).

Ces dépôts décentralisés sont approvisionnés par des camionnettes de livraison de telles sortes que ceux-ci représentent des clients à visiter durant les tournées journalières établies. La localisation de ces micro-dépôts est donc un paramètre important pour le bon fonctionnement de ce mode de livraison. Les entreprises doivent trouver le juste milieu entre l'augmentation des coûts fixes liés à la création des dépôts et la réduction des coûts liés aux livraisons (Boysen et al., 2021).

Principaux avantages et inconvénients

Répondant aux problématiques de la livraison par VUL en ce qui concerne la congestion des centres-villes, le vélo cargo parvient à se créer une place dans les modes de livraison utilisés pour le dernier kilomètre. Moins polluant, il permet de désengorger les villes des camionnettes tout en maintenant une qualité de service auprès des clients. Sa force réside dans le fait qu'il peut atteindre des zones comportant des restrictions d'accès ou de stationnement (Anderluh et al., 2017). Une étude de Sheth et al. (2019) montre que le vélo cargo est efficace pour les livraisons proches des dépôts, sur des routes fortement peuplées et pour des volumes faibles. De plus, le fait d'éviter les problèmes routiers rend ce mode de livraison plus fiable que les VUL.

Cependant, il présente également un certain nombre de désavantages. Tout comme le véhicule utilitaire, le vélo requiert un opérateur. Celui-ci ne peut cependant pas livrer autant de colis par jour qu'un VUL (Arnold et al., 2018). Les ressources humaines nécessaires sont donc plus importantes. De plus, l'infrastructure des micro-dépôts représente des coûts fixes relativement importants et implique une gestion plus complexe. En outre, la capacité et la portée limitées du vélo cargo rendent son utilisation moins générale : ce mode de livraison n'est adapté que pour des situations bien spécifiques. Enfin, bien que les retards soient moins fréquents grâce à sa fiabilité, le problème lié à l'absence du client à son domicile n'est pas résolu. Les colis non livrés devront encore une fois revenir aux dépôts pour un futur envoi, ce qui augmente les coûts de livraison.

3.2.3. Casier à colis

Le dernier mode de livraison standard que nous considérons est le casier en libre-service qui représente une solution à certains problèmes pour les entreprises de livraison. Sous la forme de casiers pouvant contenir plusieurs colis de manière sécurisée ou simplement sous la forme d'espaces de stockage chez des commerces partenaires, ces points relais donnent la possibilité aux clients d'aller retirer leur colis eux-mêmes en s'identifiant personnellement. Ce concept représente davantage une amélioration, une solution supplémentaire aux modes de livraison actuellement utilisés plutôt qu'une alternative à part entière.

Contexte d'utilisation

Les deux modes de livraison décrits précédemment ont en commun que le livreur doit, pour chaque client, s'arrêter pour donner le colis. Si le client n'est pas à son domicile, le colis doit par la suite retourner au dépôt pour une future livraison. Ces moments lors de la livraison représentent une perte de temps et donc un coût supplémentaire (Boysen et al., 2021). C'est pourquoi le casier à colis est proposé par les entreprises. Lorsque les clients planifient leur absence au moment de la livraison, ils peuvent dès lors choisir de se faire livrer leur colis à un point relais, qui peut être un casier ou simplement un commerce partenaire. Ainsi, le temps d'attente chez les clients et les livraisons non finalisées peuvent être évités. Pour sa part, le client est certain de pouvoir récupérer sa commande à

sa convenance (Iwan et al., 2016). De nombreux pays tels que l'Allemagne, l'Angleterre, le Canada ou encore les États-Unis utilisent déjà les casiers à colis depuis des années (Deutsch & Golany, 2018).

Capacité

Très variable, la capacité de ces casiers dépend de l'infrastructure mise en place. Passant de seulement quelques colis pour les petits casiers, à un grand nombre de colis pour les partenaires commerciaux offrant un grand espace de stockage, ces points relais profitent néanmoins d'une capacité importante et flexible grâce au large nombre de ceux-ci. La principale limite se trouve au niveau des dimensions acceptables des colis dans les casiers. En effet, d'après Faugere et Montreuil (2017), il est plus intéressant d'avoir un casier avec des compartiments de petites dimensions pour augmenter le nombre de colis et de clients pouvant être servi de cette manière. D'un autre côté, les points relais chez les commerces partenaires sont plus flexibles au niveau des dimensions, mais sont tout de même limités par l'espace disponible alloué par les partenaires pour le stockage de ces colis.

Infrastructure

La livraison par casier à colis ou point relais nécessite dans un premier temps la même infrastructure que celle des véhicules utilitaires. En effet, les colis sont tout d'abord acheminés depuis un dépôt central à l'aide de moyens de transport traditionnel comme expliqué précédemment. Ensuite, pour pouvoir stocker les colis qui seront mis à disposition des clients, l'entreprise doit s'équiper de casiers à des endroits stratégiques et établir une série de partenariats avec les commerces pour pouvoir bénéficier d'une partie de leur espace de stockage. Les points relais chez les commerces partenaires sont les plus simples à mettre en place. En effet, l'investissement est nul et ils permettent aux clients de récupérer leurs colis en même temps que de faire leurs achats du quotidien. Cependant, pour couvrir les zones efficacement, des casiers doivent être implémentés à un grand nombre de localisations. Plus le nombre de casiers est grand, plus le nombre de clients éligibles à ce mode de livraison sera grand également, mais plus les coûts d'installation seront importants. Le nombre et l'emplacement de ces casiers sont donc des choix importants dans cette stratégie de livraison (Deutsch & Golany, 2018). De plus, la taille de ces casiers est également un facteur important (Faugere & Montreuil, 2017).

Ressources humaines

Le casier à colis dépend des autres modes de livraison pour être alimenté. De ce fait, même si la réception du colis par le client ne demande pas à un livreur d'être présent, il faut tout de même prendre en compte le personnel ayant permis l'acheminement des colis jusqu'au casier. Cependant, ce personnel, qui d'habitude aurait dû visiter le domicile de plusieurs clients et s'arrêter pour donner les colis à ceux-ci, ne doit plus parcourir autant de distance. Ils ont l'opportunité de gagner du temps en déposant une série de colis dans les casiers ou chez les commerces partenaires, ce qui peut permettre une meilleure efficacité et diminuer le besoin en main-d'œuvre (Boysen et al., 2021).

Principaux avantages et inconvénients

Le principal avantage du casier à colis est qu'il permet au personnel d'économiser ses efforts en facilitant la livraison. Ainsi, les absences du client à l'adresse de livraison sont en partie évitées. Ils permettent également au livreur de déposer plusieurs colis en un seul arrêt. Ces deux points augmentent la quantité de colis livrés avec succès par un unique livreur tout en réduisant les coûts supplémentaires dus aux absences et aux multiples arrêts (Morganti et al., 2014). De plus, si le livreur se retrouve tout de même dans le cas où le client n'est pas présent à l'adresse de livraison, il a l'opportunité de déposer la commande dans un casier ou dans un point relais aux alentours. Ainsi, le

colis peut être récupéré par le client, finalisant la livraison. Un retour au dépôt et un second envoi sont donc évités. Cette optimisation permet de réduire les trajets inutiles et de ce fait, réduit l'impact environnemental des livraisons. Cependant, c'est maintenant aux clients de se déplacer pour récupérer leur colis, la réduction d'émission CO₂ est donc discutable et dépend en grande partie du fait que les clients effectuent un trajet supplémentaire ou non pour récupérer leur colis (Boysen et al., 2021). L'emplacement des casiers et des commerces partenaires est donc un facteur important pour que ce mode soit efficace, aussi bien en termes de coût que d'impact environnemental. Un autre avantage lié aux casiers est qu'ils sont généralement accessibles en permanence, même la nuit, à l'exception des commerces.

En ce qui concerne les inconvénients, il est clair que ce système ne peut pas plaire à l'ensemble des clients. Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'attente et la demande des clients au niveau de la qualité des services sont de plus en plus élevées. La tendance va dans le sens d'une livraison toujours plus rapide et à domicile, afin d'éviter aux clients de devoir se déplacer. Il est donc plus difficile de faire changer les habitudes du client dans ce sens, même si cela peut être avantageux pour celui-ci (Boysen et al., 2021).

3.2.4. Drone de livraison

Contexte d'utilisation

Les trois modes de livraison détaillés précédemment sont les plus utilisés de nos jours par les entreprises de livraison. Cependant, le dernier kilomètre représentant une grande partie des coûts et faisant toujours face à de nombreux problèmes, les entreprises sont constamment à la recherche d'innovations pour optimiser ce processus. C'est ainsi qu'intervient un nouveau mode de livraison : le drone. Cet appareil permet de transporter un ou plusieurs colis respectant une taille et un poids donnés sur de courtes distances, par voie aérienne et de manière autonome.

Capacité

Ce véhicule aérien est bien souvent limité à un unique colis dont le poids et les dimensions ne doivent pas être trop élevés. Comme exemple, nous pouvons citer le drone utilisé par la société DPD, qui possède une charge utile de 2 kg uniquement (DPD, 2022). Ou encore celui de Workhorse, dont la charge utile atteint 4,5 kg (Workhorse, 2022). Dans tous les cas, ce mode de livraison se caractérise par sa capacité fortement limitée. Cependant, selon Jeff Bezos, 86% des colis livrés par Amazon ne dépassent pas les 2,3 kg (CNN, 2013). La faible charge utile n'est donc pas un frein à l'implémentation des drones.

Autonomie et portée

Alimentés par des batteries électriques de tailles réduites, les drones ont une durée de vol fortement limitée. En effet, dans la littérature, la portée de ce véhicule est souvent estimée à 20 km pour une autonomie allant de 30 à 45 minutes (Agatz et al., 2018). Mais ce sont la vitesse de déplacement du drone et les conditions météorologiques qui sont les principaux facteurs faisant varier cette autonomie (Tamke & Buscher, 2021).

Infrastructure

D'après Murray et Chu (2015), qui sont dans les premiers auteurs à introduire le drone de livraison dans la littérature de recherche opérationnelle, deux utilisations sont à distinguer.

La première considère que les drones partent uniquement du dépôt central et effectuent ainsi des allers-retours pour servir les clients qui se situent à portée du dépôt. Dans ce cas-ci, cette organisation demande un réseau de dépôts dense et de ce fait très coûteux à mettre en place (Agatz et al., 2018). Comme décrit précédemment pour les casiers à colis, plus le nombre de dépôts est important, plus le service est performant, mais l'investissement est également plus coûteux. C'est donc un choix décisionnel important.

Dans le second concept, le drone effectue des livraisons au départ d'un VUL, se servant de celui-ci comme plateforme de décollage mobile. Le drone décolle ainsi du véhicule chez un client (a) pour effectuer sa livraison chez un autre client (b). Il rejoint ensuite le VUL chez un dernier client (c). Ce concept ne demande pas l'implémentation de nouveaux dépôts, mais requiert une flotte de camions et de drones, qui doivent être synchronisés pour livrer les différentes zones. Le problème à résoudre est ensuite de savoir quels clients doivent être servis par les camionnettes, et quels clients par les drones (Murray & Chu, 2015).

Dans les deux cas, un investissement dans les batteries est nécessaire pour permettre aux opérateurs de changer celles-ci et aux drones de repartir sans attendre les diverses recharges. Un échangeur de batterie automatique peut également être prévu dans le cas du premier concept, où un grand nombre de dépôts sont utilisés (Boysen et al., 2021).

Ressources humaines

Le concept des drones de livraison est développé et envisagé de nos jours car la technologie est de plus en plus performante et fiable tant au niveau des drones qu'au niveau des véhicules autonomes. La vision de livraison par drone se veut donc sans l'intervention d'un opérateur, à l'exception de la maintenance (changement de batteries, récupération, etc.) (Boysen et al., 2021). C'est une des grandes différences par rapport aux modes de livraison traditionnels.

Principaux avantages et inconvénients

Les nouvelles technologies telles que le drone de livraison apportent des avantages à la logistique du dernier kilomètre. En effet, ce véhicule se déplace par voie aérienne et permet ainsi d'éviter les problèmes liés à la dépendance aux réseaux routiers. Les distances à parcourir et le temps pour atteindre le client sont réduits et la qualité du service est donc meilleure. L'utilisation des drones réduit aussi le nombre de livraisons effectuées par les VUL, ce qui atténue les embouteillages mais également les coûts et la pollution que ceux-ci engendrent. De plus, alimenté en électricité, le drone est à première vue moins polluant que les VUL thermiques généralement utilisés.

Cependant, les inconvénients sont nombreux. En effet, étant une innovation récente dans le domaine commercial, la législation la concernant n'est pas définie et les entreprises de livraison sont pour le moment globalement dans l'interdiction d'utiliser ce mode de livraison. En effet, plusieurs points peuvent poser problème : pollution sonore, pollution de l'espace aérien, collision avec des bâtiments, etc. Leur future utilisation sera donc fortement encadrée. Son autonomie et sa capacité limitées sont également des points faibles. Bien que la rapidité des livraisons puisse pallier ces faiblesses, toute la logistique doit être adaptée en conséquence pour permettre à ce système de fonctionner correctement (Boysen et al., 2021). Enfin, l'aspect environnemental reste un questionnement. Même si les drones sont alimentés par électricité, de nombreuses inconnues persistent pour déterminer précisément son impact environnemental.

3.3. Les problèmes d'optimisation

3.3.1. Travelling salesman problem

Le choix du mode de livraison n'est pas le seul paramètre permettant d'optimiser la livraison du dernier kilomètre. Chaque jour, une multitude de clients doivent être livrés et l'ordre dans lequel sont effectuées ces livraisons joue également un rôle important dans cette optimisation. La définition d'un parcours passant une seule fois chez chaque client pour revenir au point de départ est un problème bien connu et étudié depuis des années. Ce problème porte le nom de "Travelling Salesman Problem" (TSP) ou problème du voyageur de commerce en français. Plus précisément, le TSP est un problème d'optimisation dont le but est de minimiser la distance totale parcourue pour relier un certain nombre de points et achever le tour en visitant une et une seule fois chaque client, cela en démarrant et en finissant d'un point précis, ici le dépôt (Gutin & Punnen, 2006).

Bien que ce problème puisse paraître simple à première vue, il reste néanmoins un problème d'optimisation combinatoire difficile à résoudre de manière exacte. Connu depuis de nombreuses années, il a fait l'objet d'un grand nombre d'études et d'articles proposant principalement des résolutions à l'aide de méthodes heuristiques (Laporte et al., 2014). En effet, il n'est pas possible de résoudre ce problème de manière exacte en des temps raisonnables, puisque le nombre de possibilités augmente de manière exponentielle avec le nombre de clients à visiter (Chatting, 2018).

Dans la suite de ce travail, nous abordons les recherches effectuées sur ce problème d'optimisation, mais dans le cadre de livraisons avec des drones. Un grand nombre d'auteurs se base sur ce problème pour ensuite l'adapter dans le but d'intégrer les drones dans leurs calculs.

3.3.2. Vehicle routing problem

Le "Travelling Salesman Problem" est typiquement le problème que nous voulons résoudre pour déterminer la distance minimale parcourue, mais aussi, après adaptation, pour déterminer les coûts minimaux pour livrer un certain nombre de clients. Bien que le TSP corresponde aux problématiques que nous voulons résoudre, il ne représente pas parfaitement la réalité. En effet, il ne tient pas compte du fait que pour effectuer ces livraisons, une flotte de véhicules peut être employée pour livrer une région spécifique (Yaddaden et al., 2021).

Le TSP, qui ne comporte qu'un seul véhicule, évolue donc en ce qui a été appelé le "Vehicle Routing Problem" (VRP). Ce problème permet de déterminer, sur base d'un groupe de demandes (clients) et d'une flotte de véhicules homogène ou hétérogène, quels véhicules vont prendre en charge quels clients et suivant quelle séquence, et ce dans le but de minimiser le coût total des livraisons (Toth & Vigo, 2002).

L'évolution de la technologie et des outils de calcul permet maintenant aux entreprises de trouver des solutions optimales dans des temps acceptables. Il en résulte une meilleure utilisation des véhicules et une meilleure optimisation des coûts. L'attrait pour l'étude de ce problème et de ces variantes est motivé par le fait que les solutions du VRP appliquées par les entreprises de livraison permettent à celles-ci d'être plus efficaces (Toth & Vigo, 2002).

Le VRP, qui est illustré dans la figure 1, est une base qui peut être déclinée en une grande variété de problèmes. Le plus connu et le plus étudié est le "Capacitated VRP" dans lequel la contrainte d'une capacité limitée pour les véhicules est ajoutée. Mais il est possible d'adapter le modèle aux réalités du terrain en ajoutant d'autres contraintes. D'après Toth et Vigo (2002), les différents VRP peuvent être caractérisés entre autres par :

- la structure du réseau routier ;
- le type et le nombre d'opérations possibles (livraison et/ou récupération) ;
- la localisation du ou des dépôts ainsi que des clients ;
- les limites de temps ;
- la fonction objective peut elle aussi être modifiée en fonction des résultats souhaités.

À travers ce mémoire, nous voulons étudier l'impact économique et environnemental de l'introduction des drones pour la livraison du dernier kilomètre. Pour pouvoir mesurer ces impacts, il faut modéliser au mieux la situation. Dans la prochaine section, nous abordons une partie des différents travaux de recherche qui ont été réalisés par le passé. Ceux-ci adaptent le TSP ou le VRP pour y incorporer les drones de livraison en définissant une série de contraintes supplémentaires permettant de représenter au mieux le problème et ensuite définir le tour minimisant l'objectif souhaité. Nous pouvons ainsi comparer les résultats obtenus pour la résolution d'un même problème avec ou sans l'utilisation de drones. Cependant, certains modèles proposés ont pour objectif la minimisation du temps pour terminer le tour, ce qui ne représente pas forcément la solution la moins coûteuse.

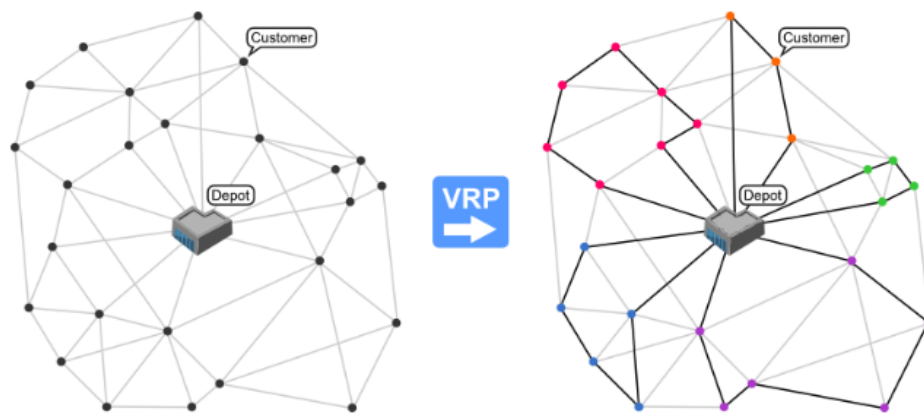


Figure 1 - Représentation d'un VRP (*Vehicle Routing Problem*, s. d.)

4. Revue de Littérature

Ces dernières années, l'attrait pour ce sujet a augmenté et de nombreux articles sont parus. Cependant, la revue de littérature ci-dessous se concentre sur les concepts et les modèles pertinents.

4.1. Introduction par Murray et Chu

Cette section est écrite sur base des travaux de Murray et Chu (2015). Dans leur travail, Murray et Chu décident d'analyser les livraisons par drone. L'utilisation des drones, qui était jusqu'à présent réservée au domaine militaire et aux médias, se voit de plus en plus utilisée dans la logistique et plus particulièrement pour le dernier kilomètre. Cette étude introduit deux modèles de programmation mathématique dont le but est d'optimiser le routage et le temps de livraison lors de l'utilisation de ces drones avec des camions de livraison. Ils proposent ainsi deux formulations de programmations linéaires en nombres entiers. La résolution des problèmes se fait grâce à deux approches heuristiques simples. Murray et Chu sont les premiers à s'être intéressés à cette nouvelle technologie dans ce cadre logistique, et ils introduisent leur article en mentionnant que les solutions trouvées permettront de réduire le temps de livraison pour les clients tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux liés à la livraison du dernier kilomètre.

Contexte

Le scénario de base pris en compte dans l'article est celui dans lequel les drones partent directement de l'entrepôt pour aller livrer tous les clients éligibles à la livraison par drone. Ensuite, les derniers clients pour lesquels le volume ou le poids du colis ne peuvent être pris en charge par le drone sont desservis par un camion. Cependant, il s'avère que cette méthode ne permet pas d'obtenir la solution la plus optimale. En effet, en assignant certains clients au camion au lieu du drone, on s'aperçoit que le temps de livraison diminue. Ces clients se situent proches du trajet initial du camion, ce qui permet de les prendre en charge via un court détour à la place d'un aller-retour complet du drone. La comparaison du temps de livraison des trois systèmes montre que l'ajout des drones permet de réduire ce temps, mais aussi qu'utiliser les drones pour toutes les livraisons éligibles n'est pas forcément optimal.

Cette approche dans laquelle les drones et les camions fonctionnent indépendamment les uns des autres est nommée "parallel drone scheduling travelling salesman problem" (PDSTSP) par Murray et Chu (2015).

Dans le cas où les clients sont trop éloignés pour être livrés par un drone démarrant du dépôt, l'article propose une seconde approche basée sur la collaboration du drone et du camion pour accomplir la tournée de livraison. Dans cette configuration, le camion se voit ajouter la fonction de dépôt mobile qui permettra au drone de décoller et de revenir lorsque le camion sera lui-même à l'arrêt pour une livraison chez un client. Cette approche est appelée "flying sidekick travelling salesman problem" (FSTSP).

Les auteurs (Murray & Chu, 2015) se basent en partie sur le travail de Lin (2011) qui considère un problème similaire dans lequel un transporteur lourd, un camion, transporte des véhicules plus légers. Bien que ce travail aborde l'aspect de deux véhicules qui peuvent se séparer et se rassembler pour servir différents clients, le FSTSP présente des caractéristiques bien différentes :

- le drone peut se séparer et revenir au camion plusieurs fois ;
- le drone ne peut livrer qu'un seul colis à la fois ;

- le drone est limité à un volume et une charge utile faible ;
- le drone est sujet à une endurance limitée.

Le flying sidekick TSP

Dans cette approche, un groupe de clients doit être servi par un camion et un drone qui collaborent. Le camion et le drone doivent partir d'un centre de distribution et revenir au même dépôt central exactement une seule fois de manière séparée ou en tandem. Le drone peut effectuer plusieurs sorties lors de la tournée qui se caractérise par un point de départ (dépôt ou client (a)), un client (b) et un point de retour (dépôt ou client (c)). Avant chaque départ du drone, un temps est nécessaire pour changer la batterie et charger le colis dans le drone. Un temps est également nécessaire pour prendre en charge le drone lors de son retour dans le camion. L'objectif du FSTSP est de minimiser la durée nécessaire pour livrer l'ensemble des clients et pour que les deux véhicules retournent au point de départ.

Pour ce faire, les auteurs définissent une série d'hypothèses spécifiques à l'ajout du drone :

- le drone ne peut livrer qu'un client par vol, alors que le camion peut livrer plusieurs clients sur le temps du vol du drone ;
- le drone se déplace à une vitesse constante, à l'exception du moment où il dépose le colis chez le client ;
- le drone et le camion ne peuvent jamais visiter deux fois le même point (client ou dépôt), même pour récupérer le drone ;
- le drone ne peut pas retourner dans le camion à une localisation intermédiaire, seuls les clients et le dépôt font office de points de rencontre ;
- l'endurance du drone est limitée.

Ensuite, la résolution du FSTSP s'effectue à l'aide d'une méthode heuristique. Pour résoudre celui-ci, les auteurs (Murray & Chu, 2015) utilisent une série d'algorithmes.

Le parallel drone scheduling TSP

Comme annoncé au début de ce chapitre, les auteurs (Murray & Chu, 2015) ont considéré deux approches distinctes. La seconde, le PDSTSP, s'applique dans le cas où le centre de distribution est à proximité de la majorité des clients à livrer. Dans ce modèle, un camion et un ou plusieurs drones livrent les clients indépendamment. Les contraintes sont globalement similaires au FSTSP à l'exception de celles spécifiques à la collaboration des deux véhicules. Dans cette approche, les drones effectuent des allers-retours pour livrer les colis alors que le VUL ne quitte et ne revient au dépôt qu'une seule fois. Cette fois encore, le problème est résolu grâce à une méthode heuristique.

Expérimentations

Les modèles ainsi développés sont ensuite testés avec une série d'expérimentations. Pour le FSTSP, 72 tests ont été effectués. Ces tests comprennent 10 clients répartis dans une région de 20 km² correspondant au réseau de Manhattan. Le dépôt est placé de manière aléatoire entre trois positions, à savoir : la moyenne des coordonnées cartésiennes des clients, la moyenne des abscisses des clients et l'origine pour l'ordonnée et, enfin, l'origine du plan. En ce qui concerne les clients, 80 à 90% d'entre eux sont éligibles à la livraison par drone dont l'endurance est limitée à 20 ou 40 minutes. Concernant la vitesse, elle est de 24, 40 ou 64 km/h pour les drones et de 40 km/h pour le camion. Le temps de préparation lors de l'envoi ou de la récupération du drone est, lui, fixé à une minute.

Les tests effectués pour le PDSTSP ont été générés avec 10 ou 20 clients qui sont placés de manière à ce que 20, 40, 60 ou 80% de ceux-ci se situent dans la zone accessible par le drone, qui a une endurance de 30 minutes. La vitesse a été fixée à 40 km/h pour les deux véhicules. Le dépôt, lui, est placé aléatoirement comme pour le FSTSP. Chaque paramètre a été répété 10 fois et chaque test a été résolu avec un camion avec un, deux ou trois drones disponibles, pour un total de 720 tests.

Résultats

Les résultats obtenus sont assez variés et ne permettent pas vraiment de définir si une approche est plus appropriée que l'autre. En effet, en fonction de la localisation du dépôt, le ou les drones vont pouvoir livrer plus ou moins de clients. Si l'on considère qu'une grande partie des clients se trouvent à proximité du dépôt, on s'aperçoit que la solution du PDSTSP obtient une durée totale plus courte que le FSTSP (figure 2). Les clients dans la portée du drone ne sont cependant pas tous livrés par celui-ci : utiliser des drones pour livrer tous les clients éligibles n'est donc pas forcément la solution optimale. Par ailleurs, plus les clients sont éloignés du dépôt et plus le nombre de clients accessibles par le drone est réduit, moins la différence entre la durée totale des solutions du PDSTSP et du FSTSP est grande. L'exemple dans lequel seuls deux clients sont à portée du drone montre que la solution du FSTSP est la plus optimale (figure 3).

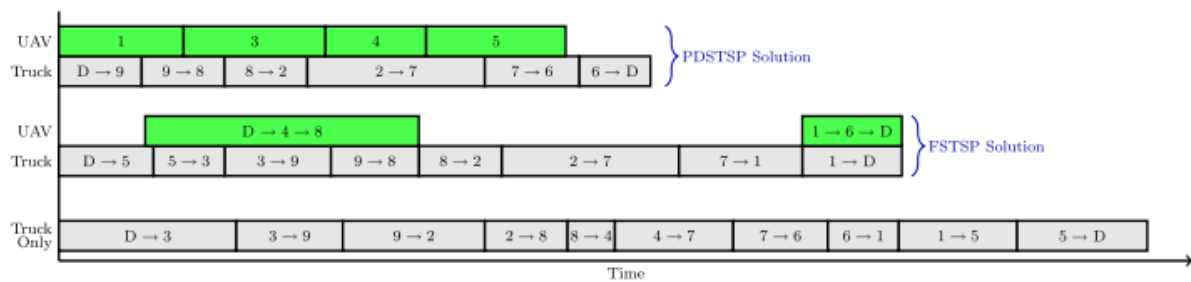


Figure 2 - Comparaison des temps de livraison du PDSTSP et du FSTSP avec une majorité de clients accessibles par drone

Dans tous les cas, l'étude montre que l'utilisation d'un ou de plusieurs drones en collaboration avec un camion pour livrer un certain nombre de clients permet toujours de réduire la durée totale de la tournée. De plus, la comparaison entre les différentes combinaisons de vitesse et d'endurance pour les drones montre que la vitesse est un facteur important pour augmenter l'efficacité de ce système, même au détriment de l'endurance. Cette réduction du temps permet de réduire les coûts liés au personnel, mais pour y arriver, des investissements sont également nécessaires.

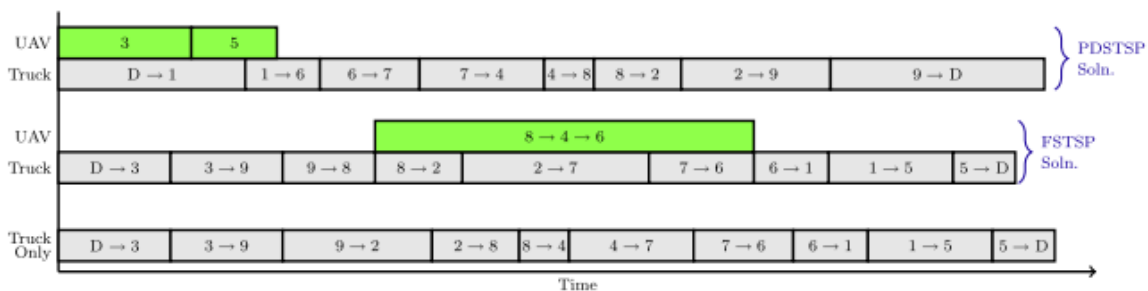


Figure 3 - Comparaison des temps de livraison du PDSTSP et du FSTSP avec seulement deux clients accessibles par drone

À la lumière de ce premier ouvrage (Murray & Chu, 2015), qui pose les bases de la livraison par drone, nous divisons la suite de la revue de littérature en deux points. Le premier reprend les articles concernant le PDSTSP et le second aborde le FSTSP et ces variantes.

4.2. Le PDSTSP

4.2.1. Chang et Lee

Le premier article que nous considérons introduit une variante du PDSTSP initialement proposé par Murray et Chu (2015). Les auteurs, Chang et Lee (2018), proposent ainsi une nouvelle approche en considérant les camions comme des dépôts itinérants, qui n'effectuent donc aucune livraison directe.

Pour résoudre ce problème, leur modèle se décompose en trois phases. La première consiste à définir des groupes de clients qui peuvent être livrés depuis une localisation précise. Cette localisation correspond au centre de la zone où le camion, transportant plusieurs drones, s'arrête pour permettre à ceux-ci de décoller et livrer les clients. Ensuite, la seconde étape est de déterminer le tour optimal pour que le camion puisse visiter ces centres, ce qui correspond à la résolution d'un TSP standard. Enfin, la dernière étape permet de relocaliser au mieux les diverses localisations en fonction des clients présents dans chaque zone.

L'étude compare ensuite l'approche présentée avec le TSP standard, sans drone. Pour ce faire, les expérimentations se basent sur un nombre de clients compris entre 10 et 100 répartis de manière aléatoire dans une zone de 400 km², dont le dépôt central est placé en son centre. Les vitesses du camion et des drones sont respectivement de 60 km/h et 90 km/h et le camion peut transporter 10 drones qui ont chacun une portée limitée à 5 km. Chaque livraison effectuée par drone est présumée durer 5 minutes.

Les résultats des expérimentations montrent que ce modèle permet de réduire le temps de complétion de plus de 15% en comparaison avec le TSP sans drone. Ils concluent en confirmant que le modèle qu'il propose est plus efficace dans l'optique de minimiser le temps de complétion du tour.

Cette étude aborde le problème sous un autre angle intéressant. Cependant, dans ce mémoire, nous ne nous penchons pas davantage sur ce concept, d'autant plus que les données utilisées sont peu représentatives de la réalité.

4.2.2. Ham

Une seconde étude, dans la continuité du travail de Murray et Chu (2015), est faite par Ham (2018) qui reprend le concept du PDSTSP pour y apporter des modifications. Notamment, il autorise les drones, après avoir déposé le colis chez le client, à effectuer un trajet supplémentaire pour récupérer un colis chez un autre client. Dans ce cas-ci, les drones ont le choix entre revenir directement au dépôt ou faire ce détour pour recevoir un second colis. Cette approche est poussée par le fait que l'augmentation du commerce en ligne augmente également le nombre de retours.

Ham (2018) propose donc une solution à l'aide d'une méthode exacte. À travers son étude, il prend en considération un puis deux dépôts d'où une multitude de camions et de drones partent pour effectuer les livraisons. De plus, les véhicules peuvent partir et revenir à des dépôts différents. En ce qui concerne les clients, ceux-ci peuvent commander plusieurs colis dont la réception peut être prévue à des heures différentes. Les drones, eux, sont capables de transporter plusieurs colis à chaque livraison (Berg et al., 2016). En outre, les temps nécessaires à la recharge des batteries sont considérés comme négligeables.

Comme pour les précédents articles, l'objectif est de minimiser le temps nécessaire à la complétion des livraisons. Pour tester le modèle, 120 cas sont générés de manière aléatoire sur une carte de 20 km². Ils sont divisés en trois groupes comprenant 20, 50 ou 100 clients, dont 10 à 20% ne sont pas éligibles à la livraison par drone. De plus, la capacité des drones et celle des camions varient respectivement entre deux et trois valeurs différentes. Les opérations de récupération de colis représentent entre 20 et 40% des tâches à effectuer par les drones, qui ont une vitesse fixée à 30% plus élevée que les camions et une endurance de 22,5 km. Les résultats démontrent qu'enlever la contrainte qui lie les véhicules à un dépôt spécifique permet de diminuer le temps de complétion de 7 à 8% supplémentaire.

4.3. Le FSTSP

Globalement, la littérature sur le concept du FSTSP est plus fournie que celle abordant celui du PDSTSP. Cette différence atteste d'un attrait plus fort pour cette approche et c'est pourquoi nous nous basons sur ce concept dans la suite de ce mémoire.

4.3.1. Ponza

Suite au premier article définissant le FSTSP (Murray & Chu, 2015), un second auteur, Ponza (2016), s'est également penché sur ce problème à travers sa thèse. Pour mener son analyse, il s'approprie et adapte le travail effectué par Murray et Chu en utilisant un autre algorithme qui permet de trouver une solution heuristique pour des problèmes de tailles réalistes.

Le modèle ainsi formulé par Ponza (2016) présente des différences par rapport à celui de Murray et Chu (2015). Par exemple, les contraintes liées à la comptabilisation du temps ont été adaptées de telle sorte que la gestion du temps soit plus cohérente et réaliste. Ces modifications impactent d'autres contraintes, qu'il adapte en conséquence. Enfin, il simplifie également certaines contraintes pour réduire leur nombre et rendre le modèle plus lisible.

Ponza (2016) fixe ensuite des valeurs différentes pour toute une série de paramètres. Le temps de préparation du drone est fixé à 40 secondes et le temps de récupération est fixé à 30 secondes. En ce qui concerne les vitesses, il fixe celle du camion à 56 km/h et celle du drone à 80 km/h en moyenne. Lors du calcul des différents temps, il applique néanmoins un coefficient de 0,8 à la vitesse du camion pour tenir compte de l'accélération, de la décélération et des divers obstacles dans le trafic. L'endurance du drone est quant à elle fixée à 1440 secondes, soit 24 minutes.

Ensuite, l'auteur (Ponza, 2016) effectue une série de tests se basant sur 5 à 10 clients dans un premier temps, puis 50, 100, 150 et 200 clients pour refléter la réalité. Ceux-ci sont répartis sur une zone de 1 000 km² et où le dépôt est placé en son centre. Le nombre de clients éligibles à la livraison par drone est fixé à 80%. Les scénarios comprenant 150 et 200 clients permettent de déterminer la limite du modèle puisqu'un unique camion accompagné d'un drone ne peut vraisemblablement pas livrer autant de clients en un jour. Chaque scénario est ensuite testé 5 fois.

Plusieurs expérimentations permettent de comparer les résultats entre le TSP et le FSTSP. Les variations de l'endurance ainsi que de la vitesse maximale sont également étudiées pour en relever les impacts.

Une sélection de 20 résultats est reprise pour discuter les résultats. Tout d'abord, on s'aperçoit que les économies de temps varient fortement, passant de 20,4% pour un test avec 10 clients à moins de 1% avec 200 clients. D'après Ponza (2016) : *"Il est clair que le gain marginal de l'utilisation de drones*

décroît plus la carte est remplie de clients”. Les économies jusqu’à 100 clients restent conséquentes avant de chuter pour les tests avec 150 et 200 clients.

Ensuite, les tests effectués par Ponza (2016) pour déterminer l’importance de l’endurance montrent qu’en moyenne, nous pouvons obtenir une amélioration de la solution de 2,5% en doublant l’endurance fixée dans son expérience. Outre l’endurance, la vitesse maximale de déplacement du drone a elle aussi été étudiée. Il montre ainsi qu’une augmentation de la vitesse de 50% peut améliorer la solution d’environ 3,5%. D’après ces résultats, il semble que la vitesse maximale du drone joue un rôle plus important dans l’optimisation de la durée de livraison que l’endurance de celui-ci. Cependant, il est à noter que ces tests n’ont pas fait l’objet d’expérimentations approfondies dans cet article, mais ils nous permettent néanmoins de définir une tendance.

4.3.2. Agatz et al.

Dans les premiers articles scientifiques traitant du sujet des drones de livraison, nous retrouvons les travaux d’Agatz et al. (2018) qui proposent un nouveau modèle de programmation en nombre entier similaire au FSTSP mais avec pour principale différence que le camion et le drone se déplacent tous deux suivant le réseau routier.

Le modèle analysé dans cette étude est appelé “Travelling Salesman Problem with Drone” (TSP-D) et a pour objectif de minimiser le coût total des livraisons. Une série d’hypothèses sont posées pour pouvoir définir le périmètre du problème : le drone ne peut transporter qu’un colis à la fois et il ne peut décoller et atterrir que chez un client ou au dépôt. Contrairement à Murray et Chu (2015), le temps nécessaire à la préparation et à la récupération du drone est considéré comme négligeable. De plus, le drone a une endurance illimitée et tous les clients sont éligibles à la livraison par drone. Enfin, le drone est autorisé à revenir chez le client à partir duquel il a démarré. Enfin, les clients sont positionnés de plusieurs manières : soit uniformément sur la carte, soit de manière circulaire pour reproduire plus fidèlement un centre-ville circulaire.

La résolution grâce à une méthode heuristique permet d’obtenir des résultats qui sont encore plus conséquents que le FSTSP de Murray et Chu (2015). En effet, ils trouvent que l’association des deux véhicules permet une économie moyenne de 30 à 38%. Globalement, les mêmes conclusions sont formulées.

4.3.3. Wang X. et al.

Les premières études décrites se basent toutes sur le TSP, considérant le problème avec un unique camion accompagné d’un ou plusieurs drones. En réalité, le nombre de clients à servir est souvent bien supérieur à la capacité d’un seul camion, même accompagné de nombreux drones. C’est pourquoi il est intéressant de considérer la situation où une flotte de camions est utilisée, chacun transportant un ou plusieurs drones. C’est ce que font Wang X. et al. (2017) dans leur article dans lequel ils développent davantage le VRP pour y incorporer l’utilisation de drones (VRPD).

Pour résoudre ce problème, voici les principales hypothèses qu’ils avancent.

- Tous les camions ainsi que les drones sont identiques et chaque camion peut transporter plusieurs drones.
- Les clients ne commandent qu’un colis, de sorte qu’ils sont tous éligibles à la livraison par drone, qui ne peut transporter qu’un colis à la fois.
- Pour éviter un maximum d’obstacles, les drones se déplacent suivant le même réseau routier que les camions.
- Le temps de préparation et de récupération des drones est négligeable.

- La vitesse du drone est définie par un multiple de la vitesse du camion.
- Un drone est lié à un et un seul camion.

L'objectif de ce modèle est de minimiser le temps pour compléter la tournée. Ils démontrent les impacts et les économies maximales possibles avec une multitude de tests faisant varier le nombre de camions, le nombre de drones, mais également la vitesse des drones. Les auteurs effectuent également des comparaisons entre les résultats du VRP standard et du VRPD.

Les résultats montrent qu'une flotte de camions accompagnés chacun d'un ou de deux drones avec une vitesse une fois et demie supérieure à celle des camions pourrait permettre une réduction du temps de livraison atteignant 75%.

4.3.4. Ha et al.

Les précédents articles ont pour la plupart pour objectif la minimisation du temps de complétion de la tournée. Cependant, outre la qualité du service induite par le temps de livraison, c'est le coût opérationnel lié à ces livraisons qui est important. C'est dans ce contexte que Ha et al. (2018) proposent une nouvelle variante du TSP-D respectant les hypothèses posées par Murray et Chu (2015). Cette variante, appelée "min-cost TSP-D", a pour objectif de minimiser le coût opérationnel total de la tournée de livraison avec un camion et un drone.

Pour résoudre ce problème, Ha et al. (2018) proposent une résolution à l'aide de deux méthodes heuristiques. Il transforme la fonction objective pour qu'elle vise à minimiser les coûts et non plus la durée. Ces coûts prennent en compte les coûts de transport mais également les coûts liés aux divers temps d'attente. Pour cela, certains ajouts sont effectués : le camion et le drone présentent chacun un coût de transport spécifique, qui est supposé moindre pour le drone, et d'autres coûts tels que le coût du personnel sont également ajoutés. L'extension du modèle est donc faite en ajoutant en série de contraintes de sorte à pouvoir isoler les temps d'attente.

Ensuite, les expérimentations se font sur base de 10, 50 ou 100 clients répartis aléatoirement dans une zone de 100, 500 ou 1 000 km². Pour chaque test, les vitesses du camion et du drone sont fixées à 40 km/h. Au total, ce sont 65 cas qui sont générés représentant chaque fois une combinaison différente des paramètres (localisation des clients et du dépôt, nombre de drones, taille de la zone, endurance et vitesse du drone, etc.)

D'après les résultats, l'introduction du drone dans la livraison du dernier kilomètre peut permettre de réduire les coûts opérationnels de 20 à 53% en fonction des paramètres introduits, et ce, pour les cas avec 10 clients. Ils analysent et comparent ensuite les cas comportant 50 ou 100 clients et obtiennent une diminution des coûts de livraison de plus de 25%.

Ils démontrent également que l'étude de ce nouveau système à l'aide d'une fonction ayant pour objectif la réduction des coûts opérationnels est importante. En effet, en moyenne, cette fonction permet d'économiser 30% des coûts opérationnels contre 20% seulement pour la fonction minimisant le temps de complétion du tour.

Ils montrent également que le nombre de drones utilisé en fonction de l'optimisation voulue varie. Ainsi, pour réduire les coûts, jusqu'à 40% des clients sont servis par drone, contre 22% dans le cas d'une optimisation de temps de complétion.

4.3.5. Carlsson et Song

Ensuite, Carlsson et Song (2018) généralisent les modèles basés sur le TSP dans la continuité des travaux effectués par Murray et Chu (2015), Agatz et al. (2018) ou encore Ha et al. (2018). Leur modèle, appelé “HorseFly Routing Problem”, présente la particularité que le drone peut cette fois-ci démarrer du camion et être récupéré par le camion lorsque celui-ci est en mouvement. De ce fait, les temps d'attente entre camion et drone qui pouvaient exister dans les anciens modèles sont supprimés. La résolution se fait à l'aide d'une méthode heuristique.

Dans leur modèle, Carlsson et Song (2018) prévoient que le camion se déplace de manières spécifiques : en zigzag ou en spirale. Le but est de couvrir au mieux l'ensemble de la zone à servir. Cette configuration implique que la majorité des clients ne sont servis que par des drones, le camion ne servant plus qu'à faire décoller et recueillir les drones comme le montre la figure 4.

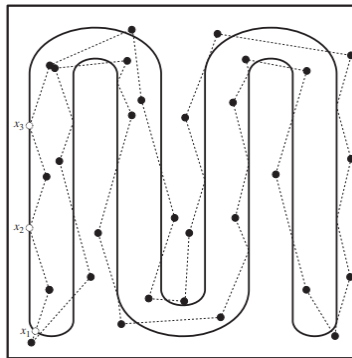


Figure 4 - HorseFly Routing Problem : le camion ne livre que deux clients (Carlsson & Song, 2018)

Ensuite, ils procèdent à des expérimentations de deux types. La première utilise les distances euclidiennes et considère 500 clients répartis uniformément dans la zone. La seconde expérimentation considère 25, 50 ou 100 clients qui sont sélectionnés aléatoirement parmi les habitants d'une ville en Californie. Dans les deux cas, la vitesse du drone est variable. La conclusion de leur étude est que les gains réalisés par l'ajout de drones au camion sont proportionnels à la racine carrée du rapport entre la vitesse du drone et celle du camion.

4.3.6. Wang Z. et Sheu

Z. Wang et Sheu (2019) s'approprient le VRPD introduit par X. Wang et al. (2017) et l'étend en considérant plusieurs camions et plusieurs drones et en permettant aux drones de changer de camions en fonction des besoins et des capacités des véhicules. Dans un premier temps, ils présentent le VRPD avec un cas réel. Ensuite, ils construisent leur modèle pour ce problème et développent les algorithmes nécessaires à sa résolution.

Dans la définition du problème, les auteurs (Z. Wang & Sheu, 2019) considèrent que les drones n'ont pas toujours la capacité d'atterrir chez les clients pour achever la livraison. C'est pourquoi les drones larguent les colis à l'aide de parachutes (McFarland, 2017). Chaque camion transporte plusieurs drones, de telle sorte que le camion ne doit pas attendre le retour d'un drone parti livrer un client pour pouvoir envoyer un second drone. Les camions n'attendent donc jamais le retour d'un drone chez le client. Ils justifient ce choix par le fait que les entreprises de transport investissent généralement plus que nécessaire dans le matériel de livraison pour être sûres de maintenir le niveau de service. De plus, ils placent dans la zone un ou deux points d'amarrage pour les drones. Ces points permettent ainsi aux drones d'attendre le passage d'un camion pour les récupérer.

Pour les expérimentations, ils génèrent aléatoirement des localisations sur une zone de 15 km². Ensuite, 20 cas sont créés en sélectionnant 8 ou 13 clients répartis de manière spécifique. Les auteurs (Z. Wang & Sheu, 2019) distinguent ainsi quatre catégories faisant varier la disposition des clients et du dépôt. En ce qui concerne les vitesses de déplacement des deux véhicules, elles sont fixées à 40 km/h et l'endurance du drone est quant à elle de 30 minutes. Les temps de récupération et de préparation sont, eux, jugés négligeables.

L'objectif du VRPD proposé est de minimiser le coût total des livraisons et les résultats montrent qu'en moyenne, le VRPD permet d'économiser 20% du coût logistique total et de livrer chaque client avec cinq minutes d'avance par rapport au VRP standard. Les résultats obtenus n'utilisent jamais plus de deux drones qui parcourent en moyenne 47,4 km pour livrer cinq clients. Ces résultats les amènent à considérer les drones de livraison comme une solution efficace pour la logistique du dernier kilomètre.

4.3.7. Tamke et Buscher

Le dernier article que nous abordons se concentre sur la vitesse utilisée par les drones. Publiés par Tamke & Buscher (2021), les auteurs considèrent le VRPD en permettant aux drones de faire varier leur vitesse durant le vol pour optimiser au mieux la consommation d'énergie et réduire davantage les coûts de livraison. Cette approche est appelée le "VRPD and drone speed selection" (VRPD-DSS). Ils formulent ainsi un problème dont l'objectif est de minimiser les coûts opérationnels d'une tournée de livraison, à savoir le carburant pour le VUL, l'énergie pour les drones et le salaire pour l'opérateur. De plus, il présente pour la première fois une méthode de résolution exacte pour le problème étudié.

Pour construire leur modèle, les auteurs (Tamke & Buscher, 2021) posent une série d'hypothèses globalement similaires aux précédents travaux concernant le VRPD. Ainsi, ils considèrent qu'un VUL peut transporter jusqu'à deux drones qui ne peuvent pas voyager avec un autre VUL de la flotte. Ces drones n'ont d'ailleurs pas l'obligation de se déplacer suivant le réseau routier et leur vitesse est choisie hors de cinq valeurs discrètes. Le temps nécessaire à la récupération des drones est ici nul puisqu'ils assument un atterrissage autonome.

Ensuite, pour leurs expérimentations, ils sélectionnent 700 localisations de clients dans une zone rectangulaire de 600 km², qui correspond à une région existante en Amérique. De ce fait, ces expérimentations permettent de tester cette approche dans une configuration proche de la réalité. Cette carte est représentée dans la figure 5. Pour les différents tests effectués, une seule localisation du dépôt est considérée et une sélection de 20, 30, 40 ou 50 localisations sont retenues, dont 75% d'entre elles sont éligibles à la livraison par drone. Les drones sont ici alimentés par des batteries lithium-ion polymères d'une capacité de 22.000 mAh avec un voltage de 44,4 V. Ils fixent ensuite le temps de livraison pour le VUL et le drone respectivement à 120 et 90 secondes, puis le temps de préparation du drone à 60 secondes. Concernant les coûts, le VUL de référence est un P70 d'UPS dont le carburant coûte 0,16 \$/km. Le salaire de l'opérateur est de 20 \$/h et le prix de l'électricité est quant à lui fixé à 0,09 \$/kWh.

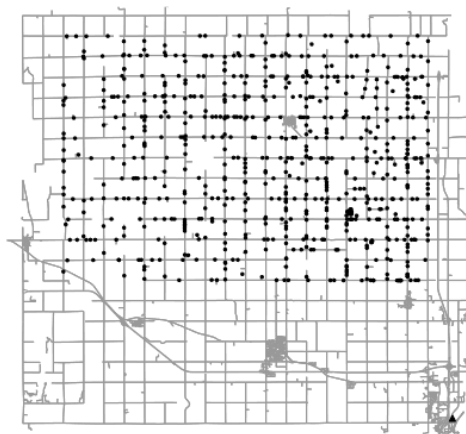


Figure 5 - Distribution de toutes les localisations des clients possibles (points) et du dépôt (triangle dans le coin inférieur droit) (Tamke & Buscher, 2021)

Les premiers résultats de cette étude comparent le VRPD et le VRPD-DSS. Il est montré que dans une optique de réduction des coûts, il est toujours plus efficace de considérer plusieurs vitesses pour un drone, surtout lorsque l'on considère deux drones. Cependant, toutes les vitesses ne sont pas pertinentes. En effet, les valeurs extrêmes (8 m/s et 16 m/s) ne sont presque jamais utilisées lors de la résolution du problème, alors que la vitesse de 12 m/s présente les meilleures performances pour le VRPD. En moyenne, la solution du VRPD avec une vitesse fixée à 12 m/s est respectivement 0,59% et 0,78% moins bonne que la solution du VRPD-DSS avec un et deux drones.

Ensuite, les auteurs (Tamke & Buscher, 2021) comparent ce VRPD-DSS avec le VRP standard et leurs résultats montrent que d'importantes économies sont possibles en utilisant un drone en collaboration avec un VUL. Cependant, ces économies sont moindres lors de l'ajout du second drone. En effet, la moyenne des écarts de coûts entre le VRPD-DSS et le VRP est comprise entre 14 % pour un drone et 20,55 % pour deux drones.

4.4. Les impacts environnementaux

Nous passons maintenant à la revue de littérature concernant les impacts environnementaux de l'utilisation de drones pour le dernier kilomètre. Les articles à ce sujet sont plus rares. En effet, la majeure partie des études sont focalisées sur l'optimisation du temps de livraison ou alors sur l'optimisation des coûts de livraison (Kirschstein, 2020).

L'un des premiers articles s'intéressant à cet aspect environnemental est celui publié par Goodchild et Toy (2018) qui compare les émissions CO_2 d'un PDSTSP avec les livraisons standards avec un camion diesel. Ils obtiennent des résultats en faveur de l'utilisation du drone. En effet, en comparaison avec les livraisons standards effectuées par un camion diesel, le PDSTSP peut réduire les émissions CO_2 quand la densité des clients à livrer est faible et lorsque l'énergie nécessaire aux drones pour fonctionner ne dépasse pas 62 Wh par kilomètre.

Ensuite, les travaux de Chiang et al. (2019) étudient les impacts de l'ajout de drones dans la livraison du dernier kilomètre avec un camion diesel standard. Cependant, ils considèrent un VRPD dont le but est de minimiser les émissions CO_2 , les camions et les drones collaborent donc pour effectuer les livraisons.

Pour leurs expérimentations, ils considèrent l'utilisation de plusieurs camions et de plusieurs drones pour livrer 200, 300, 400 ou encore 500 clients répartis sur une carte respectant le réseau routier de

Manhattan. 80% des clients sont éligibles à la livraison par drone, dont la vitesse moyenne est fixée à 40 km/h.

Les résultats sont encore une fois en faveur de l'introduction des drones pour la livraison du dernier kilomètre. En effet, outre la réduction des émissions CO₂ variables liées à la consommation d'énergie, les auteurs (Chiang et al., 2019) mettent en évidence que l'utilisation de drones réduit le nombre de camions nécessaires pour effectuer la tournée. Ainsi, les cas considérant 300 à 500 clients nécessitent un camion de moins que dans le cas d'une livraison standard sans drone.

Leur conclusion est qu'en plus d'une réduction des coûts de livraison, l'ajout de drones pour effectuer des livraisons en collaboration avec un camion diesel permet d'économiser en moyenne 20% d'émission CO₂ (Chiang et al., 2019). Ces optimisations sont d'autant plus importantes dès que l'ajout de cette technologie permet de réduire le nombre de camions nécessaire.

Le dernier article présenté est réalisé par Kirschstein (2020). Dans son étude, l'auteur propose un modèle permettant de simuler l'énergie nécessaire à la livraison par drone dans le cadre d'un PDSTSP. Il se distingue par le fait de prendre en considération les conditions environnementales ainsi que les temps d'attente lors des vols des drones dans son modèle. Cette consommation d'énergie est ensuite comparée à celle provenant de la livraison par un camion diesel, mais aussi celle avec un camion électrique. Ces expérimentations se font sur base du réseau routier de Berlin, où 100 à 200 clients sont répartis de manière aléatoire.

Les résultats obtenus sont bien plus nuancés que dans les précédents articles. En effet, d'après Kirschstein (2020), c'est le drone qui consomme le plus d'énergie dans la plupart des cas. La consommation en énergie est similaire au camion diesel uniquement lorsque les clients sont répartis sur une large zone et que le nombre de colis livrés à chaque arrêt est faible. Dans tous les cas, le camion électrique présente les meilleures performances énergétiques.

Cependant, remplacer les camions diesel par des drones peut permettre une réduction des émissions d'équivalent CO₂ étant donné que l'électricité peut être produite de manière peu polluante. Cela dépend donc du mix énergétique nécessaire à la production de l'électricité. En Europe, le coefficient d'émission CO₂e varie entre 0 et 1,1 kg CO₂e par kWh produit (European Environment Agency, 2022). L'auteur (Kirschstein, 2020) conclut que dans le cas de localisations éloignées sur une large zone, la livraison par drone apporte des économies d'émissions CO₂e uniquement si l'électricité utilisée présente un coefficient inférieur à 0,3 kg CO₂e par kWh produit. Kirschstein précise néanmoins que ses résultats sont basés sur de nombreuses hypothèses et que dans les faits, une collaboration des deux véhicules est plus probable.

Le tableau 1 synthétise la revue de littérature. Les concepts, les approches ainsi que les objectifs des différentes études y sont repris.

Publications liées au drone de livraison			
Auteur	Concept	Approche	Objectif
Murray & Chu (2015)	FSTSP / PDSTSP	Heuristique	Min temps
Chang & Lee (2018)	PDSTSP	Heuristique	Min temps
Ham (2018)	PDSTSP	Exacte	Min temps
Ponza (2016)	FSTSP	Heuristique	Min temps
Agatz et al. (2015)	TSP-D	Heuristique	Min coût
Wang X. et al. (2017)	VRPD	Heuristique	Min temps
Ha et al. (2018)	min-cost TSP-D	Heuristique	Min coût
Carlsson & Song (2018)	HorseFly Routing Problem	Heuristique	Min temps
Wang Z. & Sheu (2019)	VRPD	Exacte	Min coût
Tamke & Busher (2021)	VRPD-DSS	Exacte	Min coût
Goodchild & Toy (2018)	PDSTP	Heuristique	Min émissions
Chiang et al. (2019)	VRPD	Heuristique	Min émissions & coût
Kirschstein (2020)	PDSTSP	Heuristique	Min émissions

Tableau 1 - Résumé des publications liées au drone de livraison
(Min = minimisation)

5. Etude comparative

5.1. Impacts en termes de coûts de livraison

La revue de littérature ci-dessus est principalement portée sur les différents concepts liés aux drones de livraison qui ont été introduits ces dernières années. Grâce à ces contributions et ces différentes approches, nous pouvons admettre que l'ajout de cette nouvelle technologie apporte une optimisation considérable en termes de coûts, qui varient cependant en fonction de l'approche choisie, mais également en fonction du contexte d'utilisation (nombre de clients, distance, etc.).

Dans la suite de ce mémoire, nous utilisons les résultats d'une des études présentées pour poursuivre notre travail et établir des comparaisons. En effet, le but est de quantifier les coûts logistiques de la livraison du dernier kilomètre avant et après l'introduction du drone. Ainsi nous comparons les résultats d'une livraison effectuée de manière standard, sans drone (VRP), avec l'approche la plus récurrente relative aux drones, à savoir le FSTSP introduit par Murray et Chu (2015) ou plus généralement le VRPD. Ce concept prévoit la collaboration des deux types de véhicules pour effectuer les livraisons. Le camion fait alors office de zone de décollage et d'atterrissage pour les drones en plus d'effectuer des livraisons.

Pour mener à bien cette analyse, nous nous basons sur les résultats de Tamke et Buscher (2021). Etant donné la difficulté de résoudre les problèmes tels que le VRP, se baser sur cet article et son modèle nous permet de travailler sur une approche et un VRPD déjà résolu. Ces résultats nous permettent de déterminer au mieux les différents paramètres nécessaires pour calculer ces coûts (distance, utilisation des véhicules, etc.). Nous gardons donc la solution fournie par ce modèle et plus particulièrement les distances parcourues par le VUL et par le ou les drones ainsi que le nombre de clients pris en charge par chaque véhicule. De plus, l'article de Tamke et Buscher (2021) considère l'utilisation d'un seul ou de deux drones, ce qui rend les comparaisons plus complètes.

Cependant, bien que les auteurs (Tamke & Buscher, 2021) fournissent des données relatives aux différents coûts de livraison pour effectuer leurs expérimentations, certains coûts ne sont pas pris en compte tels que les prix d'achat des véhicules. Le but de ce chapitre est donc de redéfinir l'ensemble des coûts liés à la livraison du dernier kilomètre avec et sans l'utilisation de drones pour, par la suite, effectuer des comparaisons pertinentes sur les différents scénarios à l'aide d'une unité commune. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux de l'étude de l'impact environnemental.

5.1.1. Coûts des VUL

Tout d'abord, l'utilisation d'un VUL requiert un opérateur tout au long de sa tournée. Dans une moindre mesure, le drone nécessite également d'être manipulé de courts instants pour le changement de la batterie et pour le chargement du colis à livrer. Manœuvrer le camion et effectuer les livraisons demandent donc un temps important qui a un coût : la rémunération de la main-d'œuvre.

Selon les conventions collectives de travail (CCT) relatives au personnel roulant, le barème salarial fixe le salaire horaire minimum brut d'un travailleur à 12,1590 € (*Service public fédéral Emploi, Travail et Concertation sociale*, 2022). Les horaires de travail sont alors fixés à 38 heures par semaine. Pour tenir compte du réel coût que la rémunération représente pour l'entreprise de livraison, il faut y ajouter les diverses taxes qui incombent l'employeur : en Belgique, les cotisations patronales de sécurité sociale s'élèvent à 30% du salaire brut (108% pour les ouvriers) (*Service public fédéral*

Emploi, Travail et Concertation sociale, 2022). Le salaire minimum défini par le barème est donc à majorer de cette cotisation, le détail est repris dans le tableau 2 :

Coût des rémunérations	
Salaire minimum (barème CCT)	12,1590 €
Cotisation patronale	3,9395 €
Coût salarial	16,0745 €

Tableau 2 - Coût des rémunérations

Dès lors, l'opérateur chargé des livraisons dans nos calculs représente un coût de 16,0745 €/h.

Les prochains coûts qui doivent être pris en compte sont les frais liés aux véhicules : le prix d'achat, les assurances et l'entretien par exemple. Pour le VUL, deux modèles peuvent être envisagés : le thermique et l'électrique. Le prix de ce type de véhicules varie et l'investissement initial dans un véhicule électrique est, pour le moment, plus élevé que les modèles thermiques.

Pour déterminer la taille et le prix de ces véhicules, nous nous basons sur les récents investissements de DPD. En effet, la société a investi dans pas moins de 750 utilitaires, dont 500 électriques, pour agrandir sa flotte en Angleterre en 2021 (DPD, 2021). Les modèles thermiques et électriques choisis sont respectivement le "Maxus Deliver9" et le "Maxus eDeliver9". Plus précisément, ce sont les modèles avec des batteries de 72 kWh et 89 kWh qui rejoignent la flotte de DPD.

Sur le site de Maxus, nous retrouvons ces véhicules ainsi que les prix catalogue recommandés HTVA qui sont présentés dans le tableau 3 (Maxus, 2022). Le prix d'une camionnette "Maxus Deliver9" est donc de 35.490 € alors que le prix du modèle électrique est de 64.492 € et 75.490 € respectivement pour 72 kWh et 89 kWh. Par souci de simplification, nous calculons la moyenne des prix des deux versions électriques dans le tableau 3 :

Amortissement des véhicules	
Prix catalogue : Maxus Deliver9	35 490,00 €
Coût par kilomètre (300 000 km)	0,1183 €/km
Prix catalogue : Maxus eDeliver9	$(64\,490,00 + 75\,490,00)/2 = 69\,990,00$ €
Coût par kilomètre (300 000 km)	0,2333 €/km

Tableau 3 - Coût lié à l'amortissement des véhicules

Le coût lié à l'achat des VUL qui est utilisé dans la suite des calculs, repris dans le tableau 3, est amorti en fonction de l'utilisation des véhicules. Dans nos scénarios, nous estimons qu'un VUL peut parcourir 300.000 km sur sa durée de vie (ADEME, s. d.). Cette estimation est formulée suite au rapport de Lammert et Walkowicz (2012), qui nous apporte le kilométrage annuel de six VUL qui parcourent en moyenne 33.000 km par an. Cependant, une analyse de sensibilité faisant varier ce kilométrage total est également effectuée étant donné que ce paramètre reste variable.

Outre cet investissement, la société doit également assurer ses véhicules chaque année. Pour déterminer le coût de ces assurances, nous nous basons sur plusieurs comparateurs d'assurances qui mettent en concurrence différentes offres pour assurer un modèle de véhicule utilitaire similaire : le Renault trafic (*Comparateur assurance auto | mon-auto-assure.com*, s. d.). Au vu des différentes offres et de l'utilisation intensive du véhicule, nous prenons en considération une assurance de 1.200 € par an pour un VUL.

En plus du montant de ces assurances, la société doit également s'acquitter de la taxe de mise en circulation ainsi que la taxe annuelle de circulation. Les informations concernant ces deux taxes sont accessibles sur le site du Service Public Wallon (SPW, s. d.). On y apprend que les véhicules utilitaires sont exemptés de la taxe de mise en circulation en Wallonie et que la taxe annuelle de circulation bénéficie d'un régime particulier qui suit un barème calculé en fonction de la masse maximale autorisée (MMA). La MMA des VUL Maxus est de 3.500 kg (Maxus, 2022) ce qui correspond à une taxe annuelle de 148,76 €.

L'assurance et la taxe de circulation sont des frais annuels indépendants des kilomètres parcourus. C'est pourquoi le coût par kilomètre est déterminé dans la suite de ce travail en fonction des kilomètres parcourus dans les divers scénarios.

Interviennent ensuite les coûts d'entretien des véhicules. Pour déterminer ce coût, nous nous basons sur le rapport de Lammert et Walkowicz (2012) qui répertorie les dépenses liées à six VUL sur une période de 3 ans. La moyenne des coûts d'entretien ainsi évaluée est de 0,1732 \$/miles, ce qui correspond à 0,1059 €/km. Ce résultat comprend les coûts liés aux remplacements des pneus, qui représentent 19% du total. Étant donné que nous déterminons séparément le coût des pneus, le coût d'entretien par kilomètre doit être réduit de 19%, ce qui nous amène à 0,0858 €/km.

Les pneus et la main-d'œuvre pour le remplacement de ceux-ci sont également à prendre en compte. Dans la fiche technique des VUL Maxus fournie sur leur site, nous trouvons la référence des pneus utilisés : "Cooper 215/75 R16C" (Maxus, 2022). Le prix unitaire de ces pneus est ensuite déterminé par les différents revendeurs. Dans notre cas, nous prenons le prix de 114,28 € par pneu proposé sur un site revendeur, pour un total de 457,12 € pour un véhicule (*bonspneus.fr*, s. d.). Cette somme est à déboursier lors de chaque renouvellement des pneus.

Pour déterminer le coût par kilomètre, il faut dans un premier temps estimer la durée de vie des pneus. Cette donnée varie évidemment en fonction de l'état des routes, du type de conduite ou encore de la qualité des pneus. D'après la majorité des sites spécialisés, les pneus d'un véhicule utilitaire léger doivent être changés tous les 20.000 à 90.000 km ou entre 40.000 et 50.000 km (*Durée de vie pneu*, s. d.). Cette fourchette étant large, nous calculons la moyenne et considérons donc qu'un remplacement des quatre pneus du véhicule est effectué tous les 50.000 km. Cette opération ne demande généralement pas plus d'une heure de travail à une main-d'œuvre coûtant 50 €/h (Lammert & Walkowicz, 2012). Le coût par kilomètre de l'entretien des pneus est repris dans le tableau 4 :

Coût des pneus	
Prix de 4 pneus	114,28 x 4 = 457,12 €
Main d'œuvre (1 h)	50 €
Durée de vie des pneus	50 000 km
Coût par kilomètre des pneus	(457,12 + 50) / 50.000 = 0,0101 €/km

Tableau 4 - Coût relatif aux pneus

Dernier coût à prendre en compte, et non des moindres : le carburant. En ce qui concerne les modèles à moteur thermique, il faut prendre en compte la consommation moyenne en essence ou en diesel. La fiche technique des véhicules nous apporte l'information suivante : un VUL "Maxus Deliver9" consomme en moyenne 9,6 litres de diesel pour parcourir 100 kilomètres selon la norme WTLP (Maxus, 2022).

Pour déterminer le prix d'un litre de diesel, nous nous rendons sur le site de statistique belge, Statbel (Statbel, s. d.). Nous retrouvons l'historique des prix des produits pétroliers en Belgique, sous forme

de moyennes mensuelles. Dans le but d'atténuer l'impact de la conjoncture politique et de la guerre en Ukraine, nous calculons la moyenne sur les 12 derniers mois, de juin 2021 à mai 2022. Le prix du diesel utilisé dans nos calculs est donc de 1,5013 € HTVA pour un litre.

Étant donné que la consommation moyenne d'un VUL est de 9,6 litres de diesel pour 100 kilomètres, celui-ci consomme à chaque kilomètre 0,096 litre de diesel, ce qui correspond à un coût de 0,1441 € par kilomètre.

Pour la version électrique, il faut cette fois-ci déterminer le coût en électricité qui permet le rechargement des batteries. En Europe, l'évolution du prix de l'énergie est répertoriée sur le site Eurostat de la Commission européenne (Eurostat, 2022). Le prix moyen européen de l'électricité (hors ménage) au second semestre de 2021 est de 0,1445 €/kWh.

Cette dépense s'effectue à chaque recharge des batteries, que ce soit pour la camionnette électrique ou pour le drone. Dans le but d'obtenir un coût par kilomètre de cette dépense énergétique, nous utilisons l'autonomie de la batterie annoncée par le fabricant des véhicules. Pour le VUL électrique, l'autonomie est de 236 et 296 km avec des batteries respectives de 72 kWh et 89 kWh (Maxus, 2022). Nous prenons comme hypothèse que la moitié de la flotte possède une batterie de 72 kWh et l'autre moitié 89 kWh. La consommation moyenne d'une camionnette électrique est donc de 0,3029 kWh par kilomètre, ce qui représente 0,0438 € dépensé chaque kilomètre parcouru (tableau 5).

Coût énergétique du VUL	
Consommation moyenne	$(72/236 + 89/296) / 2 = 0,3029 \text{ kWh/km}$
Coût énergétique par kilomètre	$0,3029 * 0,1445 = 0,0438 \text{ €/km}$

Tableau 5 - Coût par kilomètre de l'énergie d'un VUL

5.1.2. Coûts des drones

Dans cette seconde section, nous déterminons les principaux coûts à prendre en considération dans le cas d'une utilisation de drones pour les livraisons du dernier kilomètre. Contrairement aux VUL, les informations concernant ce type de véhicule sont rares et de nombreuses hypothèses sont donc formulées sur base des documents et témoignages recensés.

Tout d'abord, les entreprises doivent investir dans les drones et il faut ainsi tenir compte du prix d'achat de ce nouveau type de véhicule. Le drone utilisé dans la logistique est un type de véhicule très récent et n'est, pour le moment, pas produit de manière industrielle. En effet, d'après P. Cassan, Directeur du "Programme Drones" chez La Poste : "Les systèmes de livraison par drones "industriels", donc matures, n'existent pas encore et ceux en opération actuellement sont des prototypes dont les coûts ne sont pas représentatifs." (P. Cassan, communication personnelle, 02 août 2022).

Nous pouvons néanmoins trouver quelques informations sur le coût de production de ces prototypes ainsi que sur les objectifs visés par les entreprises, malgré le fait que celles-ci restent globalement discrètes sur ce genre d'informations. Actuellement, les prix sont élevés mais les entreprises dans ce secteur prévoient une nette diminution du prix de ce type de drone dans le futur lorsqu'ils seront produits en série. Les différentes informations trouvées présentent des prix qui fluctuent énormément : Amazon prévoit de construire ses drones pour 60.000 \$ (Iddenden, 2022), la société A2Z fournit des systèmes de livraison pour les drones DJI à 4.000 \$, ce qui porte le montant total à 12.000 \$ minimum (French, 2021). Lors d'une interview de M. Marrazzo réalisée par Barenco, nous apprenons qu'un drone coûte entre 25.000 et 50.000 CHF (Barenco, 2018).

D'un autre côté, la société Matternet, qui collabore avec UPS, prévoit de vendre ses drones à 3.000 \$ dans le futur (Raptopoulos, 2013). De même pour la start-up française Atechsys, qui fournit les drones de DPD, son CEO M. Kasbari annonce qu'avec une production en série, ils pourront réduire le coût de production à 2.000 € (Capital, 2017).

Étant donné les informations divergentes entre le coût actuel et le coût futur de cette technologie, nous prenons comme hypothèse le prix de 5.000 € pour un drone. Cette hypothèse représente la situation où le marché des drones de livraison est plus développé et donc que les prix sont plus faibles. Cependant, les estimations de Matternet et Atechsys ne sont pas récentes et le coût des matières premières a fortement augmenté depuis. C'est pour cela que nous nous basons sur un prix de 5.000 € par drone. Nous ferons varier ce prix d'achat dans une analyse de sensibilité.

Le second coût lié au drone est bien évidemment la batterie. À l'inverse des voitures et camionnettes électriques, la capacité de la batterie des drones est très réduite. En conséquence, ces batteries doivent être rechargées fréquemment et ces rechargements à répétition usent la batterie rapidement. Généralement, on estime la durée de vie des batteries lithium-ion polymères entre 300 et 500 cycles. Nous prendrons donc 400 cycles comme valeur de référence (*Customized UAV Drone Battery*, s. d.). Dans l'étude de Tamke et Buscher (2021) analysée, les auteurs prennent en considération une batterie lithium-ion polymère d'une capacité de 22.000 mAh avec un voltage de 44,4 V. Ce type de batterie correspond également à celui utilisé par DPD pour ses expérimentations et son étude (Albouzeet & Kasbari, 2020). Celle-ci a un coût relativement élevé que nous estimons à 644,86 € HTVA par batterie pour 400 cycles de rechargement (Hexadrone, s. d.). Les résultats de Tamke et Buscher (2021) nous permettent de connaître le nombre de cycles de chargement nécessaire pour la complétion des livraisons des différents scénarios. C'est pourquoi nous déterminons ici le coût de remplacement de la batterie en fonction du nombre de cycles, qui s'élève donc à 1,6121 €/cycle.

Les moteurs de drones, dits "Brushless", sont très résistants et ne sont donc pas directement pris en compte dans nos calculs. En effet, leur durée de vie, allant jusqu'à 1.000 heures de vol (T-Motor, 2022), dépasse généralement la durée de vie des drones (200 à 800 heures). Dans notre cas, il faudrait en moyenne quatre ans d'utilisation pour atteindre ces 1.000 heures, ce qui dépasse la durée de vie que nous avons fixée préalablement. En ce qui concerne les hélices et les divers autres frais pouvant intervenir, nous considérons un budget annuel par drone de 300 € pour effectuer les réparations et les entretiens nécessaires.

En outre, l'utilisation de larges drones de livraison requiert la réalisation d'une série de formalités administratives pour rendre cette activité légale. De plus, la gestion du parc de drones et l'organisation des vols nécessitent une plateforme particulière. Ces besoins sont remplis par un logiciel de gestion d'activité de drones professionnels. L'entreprise Drone Geofencing (Drone Geofencing, s. d.) offre ce service pour un prix de 35 € par drone par mois. Le coût annuel par drone est donc de 420 €. Il est à noter que les drones se déplacent à l'aide d'un système GPS embarqué qui ne représente donc pas un coût supplémentaire (G. Jouanne, communication personnelle, 20 juillet 2022).

Ensuite, il faut tenir compte de l'électricité nécessaire pour alimenter et recharger les batteries. La batterie de référence présente une capacité de 22.000 mAh avec un voltage de 44,4 V, ce qui correspond à 0,9768 kWh pour chaque cycle. En multipliant cette valeur par le coût du kWh déterminé précédemment, nous obtenons le coût relatif à une recharge de la batterie, qui est de 0,1411 €/cycle.

Enfin, comme pour les VUL, la société doit se munir d'une assurance pour les drones. Étant donné que la majorité de ces assurances varient entre 250 et 450 €, nous estimons cette dépense annuelle à 350 € (*Assurance drone professionnel : quelles obligations ?*, 2016)

5.1.3. Calculs des coûts

Maintenant que nous avons déterminé la majorité des coûts qui composent la livraison du dernier kilomètre, nous pouvons analyser et calculer le coût total des livraisons des différentes situations que nous prenons en compte dans ce travail. Ensuite, nous déterminons le coût de revient pour la livraison d'un unique colis. Ces résultats nous permettent dans la section finale de comparer les quatre situations en termes de coût, mais également de faire le parallèle avec l'impact environnemental des différents scénarios.

Tout d'abord, nous nous basons sur les résultats obtenus par Tamke et Buscher (2021) dans leurs expérimentations. Pour notre étude, nous décidons de prendre comme situation de référence la moyenne des résultats obtenus pour les cas contenant 50 clients. Ce choix est justifié par le grand nombre de colis que les livreurs doivent livrer chaque jour. Les différents résultats ainsi que les moyennes globales sont affichés dans l'annexe 1.

Voici donc les hypothèses que nous utilisons dans les différents scénarios :

- un seul VUL est utilisé, peu importe le scénario ;
- les différents scénarios considèrent l'utilisation de zéro, d'un ou de deux drones ;
- nous considérons le cas où 50 clients sont à livrer ;
- le nombre moyen de clients livrés par un drone est de 10,5 et 8,15 respectivement pour l'utilisation d'un et de deux drones ;
- la distance parcourue par le VUL est de 213,63, 189,52 et 176,18 km respectivement pour les scénarios utilisant zéro, un et deux drones ;
- le temps nécessaire au VUL pour parcourir ces distances et ainsi compléter sa tournée est de 419,51, 352,78 et 321,69 minutes respectivement pour les scénarios utilisant zéro, un et deux drones ;
- la distance moyenne parcourue par un drone est de 50,03 et 43,33 km respectivement pour l'utilisation d'un et de deux drones ;
- le nombre moyen de cycles de batterie par drone nécessaire pour effectuer les livraisons est de 4,12 et 3,48 respectivement pour les cas utilisant un et deux drones ;
- les arrêts d'un VUL et d'un drone pour effectuer une livraison sont estimés à 120 et 90 secondes respectivement ;
- le temps de préparation pour le lancement d'un drone est estimé à 60 secondes ;
- la vitesse de déplacement d'un drone est variable mais se rapproche de 12 m/s de moyenne (Tamke & Buscher, 2021) ;
- la vitesse du VUL est fixée mais n'est pas donnée explicitement dans l'étude ;
- les différentes hypothèses concernant les coûts sont explicitées dans la section précédente et peuvent être adaptées en fonction du besoin dans les différents scénarios.

5.1.3.1. Scénario 1 : VRP standard sans drone

Dans ce premier scénario, nous déterminons le coût total pour effectuer l'ensemble de la tournée ainsi que le coût de revient par colis dans le cas d'une livraison standard avec l'utilisation d'un VUL, thermique ou électrique (VRP). Un unique tableau (tableau 6) reprend les coûts des deux modèles étant donné qu'ils partagent une grande partie de frais en commun. Les différents coûts sont présentés dans le tableau 6 tandis que le tableau complet des différents coûts figure dans l'annexe 2.

Coûts du VRP standard		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario		
Nombre de localisations	50 clients	
Distance parcourue	213,63 km	
Durée	419,51 min = 6,9918 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 213,63 km = 42 726 km/an	
Coûts		
Coût des rémunérations	0,5261 €/km	
Amortissement véhicule (300.000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Coût des entretiens	0,0959 €/km	
Coût assurances & taxes	0,0316 €/km	
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultats		
Coût total par kilomètre	0,9160 €/km	0,9307 €/km
Coût total des livraisons	0,916 * 213,63 = 195,6851 €	0,9307 * 213,63 = 198,8254 €
Coût de revient par colis	3.9137 €/colis	3.9765 €/colis

Tableau 6 - Coût du VRP standard

Nous observons que le coût de revient par colis est globalement similaire pour les deux modèles, même si le VUL électrique est dans ce cas-ci légèrement plus coûteux que le VUL thermique (1,6% plus cher). Cette différence se construit à deux niveaux : l'amortissement du véhicule et le prix du carburant. En effet, avec une durée de vie de 300.000 km, l'économie de coût liée à l'utilisation d'électricité à la place du diesel (0,1003 €/km) ne permet pas de compenser l'augmentation de coût lié à l'investissement initial et donc à l'amortissement du véhicule (0,1150 €/km). À première vue, le VUL thermique obtient de meilleurs résultats.

Cependant, les coûts d'amortissement des véhicules sont directement liés à la durée de vie des VUL. Ainsi, si la distance totale pouvant être parcourue par un VUL augmente/diminue, les coûts d'amortissement diminuent/augmentent en conséquence. Ce paramètre étant l'un des plus difficiles à déterminer de manière précise, nous présentons dans la figure 6 une analyse de sensibilité en faisant varier la durée de vie du VUL entre cinq valeurs, à savoir 100.000, 200.000, 300.000, 400.000 et 500.000 km au total.

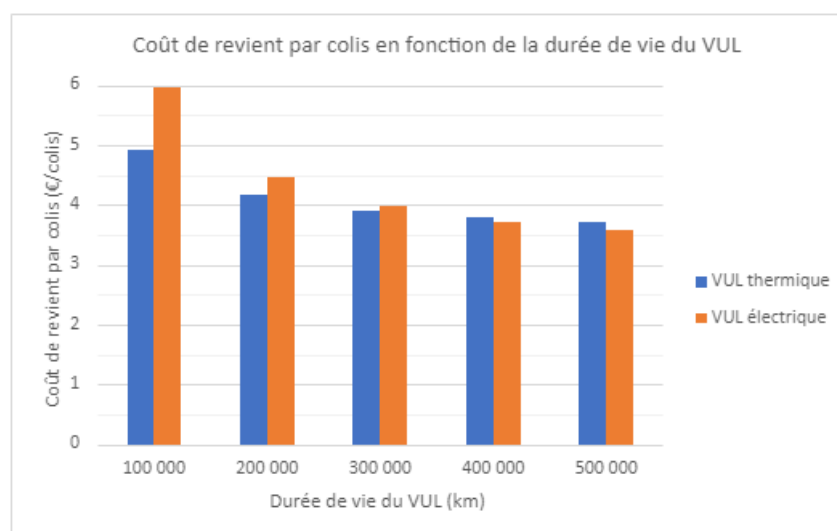


Figure 6 - Coût de revient par colis en fonction de la durée de vie du VUL

On observe que l'écart entre les coûts de revient par colis diminue plus la durée de vie du VUL augmente, jusqu'à atteindre un coût de revient égal pour les deux modèles aux alentours de 344.000 km. Au-delà de cette valeur, c'est le VUL électrique qui présente un coût par colis le plus optimal. Les

écarts commencent donc à 21,23% en faveur d'un VUL thermique pour 100.000 km, pour terminer par un écart de 3,74% en faveur d'un VUL électrique parcourant 500.000 km. Ces valeurs dépendent bien évidemment du prix d'achat des VUL ainsi que du prix de l'énergie et du carburant, qui peuvent fortement varier en fonction des régions et de la période de comptabilisation.

5.1.3.2. Scénario 2 : VRPD avec un drone

Dans ce scénario, nous calculons les coûts liés à l'utilisation d'une camionnette à moteur thermique ou électrique qui collabore avec un drone pour effectuer la tournée de livraison. Dans un premier temps, nous étudions les coûts liés à l'utilisation du VUL puis ceux liés au drone. Pour répartir au mieux les coûts entre le VUL et le drone, il faut soustraire au temps total des livraisons le temps de préparation nécessaire pour le lancement du drone. En moyenne, le drone effectue 10,5 livraisons lors d'une tournée, ce qui correspond à 10,5 minutes. C'est le temps supplémentaire que l'opérateur doit consacrer au drone pour qu'il effectue les livraisons planifiées.

Coûts du VRPD avec un drone (VUL)		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario		
Nombre de localisations	39,5 clients	
Distance parcourue	189,52 km	
Durée	352,78 - 10,50 = 342,28 min = 5,7047 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 189,52 km = 37 904,00 km/an	
Coûts		
Coût des rémunérations	0,4839 €/km	
Amortissement véhicule (300.000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Coût des entretiens	0,0959 €/km	
Coût assurances & taxes	0,0356 €/km	
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultats		
Coût total par kilomètre	0,8778 €/km	0,8925 €/km
Coût total des livraisons	0,8778 * 189,52 = 166,3606 €	0,8925 * 189,52 = 169,1466 €
Coût de revient par colis	4,2117 €/colis	4,2822 €/colis

Tableau 7 - Coût d'un VUL pour le VRPD avec un drone

Le tableau 7 nous présente les premiers résultats concernant les coûts liés à l'utilisation du VUL. Le tableau complet se retrouve quant à lui dans l'annexe 3. Les mêmes conclusions que le premier scénario sont formulées en ce qui concerne l'écart entre les résultats du VUL thermique et électrique étant donné que seuls les coûts communs tels que les rémunérations, les assurances et les taxes varient. Nous remarquons cependant que le coût de revient par colis est plus élevé que dans le précédent scénario, ceci est dû au nombre plus important de kilomètres parcourus pour livrer un colis. En effet, le coût par kilomètre et le coût total des livraisons sont, eux, inférieurs.

Ensuite, nous déterminons les coûts liés au drone, que nous retrouvons dans le tableau 8 ainsi que dans l'annexe 4 pour le détail. Comme attendu, le coût de revient par colis est inférieur à celui du VUL et permet dès lors de réaliser une économie de coûts.

Drone	
Données du scénario	
<i>Nombre de localisations</i>	10,5 clients
<i>Distance parcourue</i>	50,03 km
<i>Durée à rémunérer</i>	10,5 min = 0,175 h
<i>Kilométrage annuel (estimation)</i>	200 jours * 50,03 km = 10 006 km/an
<i>Nombre de kilomètre par cycle</i>	12,1432 km/cycle
Coûts	
<i>Coût des rémunérations</i>	0,0562 €/km
<i>Amortissement véhicule (3 ans : 30 018 km)</i>	0,1666 €/km
<i>Coût des entretiens</i>	0,1609 €/km
<i>Coût assurances & taxes</i>	0,0770 €/km
<i>Coût du carburant / énergie</i>	0,0116 €/km
Résultats	
<i>Coût total par kilomètre</i>	0,4723 €/km
<i>Coût total des livraisons</i>	0,4723 * 50,03 = 23,6275 €
<i>Coût de revient par colis</i>	2,2502 €/colis

Tableau 8 - Coût du drone pour le VRPD avec un drone

Si l'on observe les coûts totaux présentés dans le tableau 9, nous constatons une réduction du coût de revient par colis de 2,91 et 3,04% respectivement en comparaison avec le VRP, thermique et électrique, du premier scénario. Cette optimisation est fortement inférieure à celles généralement présentées dans la littérature et entre autres par rapport aux résultats de Tamke et Buscher (2021). Cette différence s'explique par le fait que nous considérons davantage de frais pour déterminer les coûts de revient, dont l'amortissement des véhicules.

Résultat du VRPD avec un drone		
	<i>VUL thermique</i>	<i>VUL électrique</i>
<i>Coût VUL</i>	166,3606 €	169,1466 €
<i>Coût drone</i>	23,6275 €	
<i>Coût total</i>	189,9881 €	192,7741 €
<i>Coût de revient par colis</i>	3,7998 €/colis	3,8555 €/colis

Tableau 9 - Coût de revient par colis pour le VRPD avec un drone

Comme expliqué dans l'énumération des coûts, le prix d'achat des drones est une valeur difficile à déterminer et nous avons pris comme hypothèse un prix d'achat de 5.000 € dans nos scénarios. Si les entreprises parviennent à réduire ce coût, comme le laissent entendre les sociétés Atechsys et Matternet (Capital, 2017; Raptopoulos, 2013), l'optimisation pourrait s'accroître et permettre de meilleures économies. Nous faisons donc varier le prix du drone entre plusieurs valeurs dans la figure 7 pour représenter au mieux les différentes possibilités.

Nous constatons que le prix de revient par colis pour les livraisons avec le drone diminue drastiquement avec la diminution du prix d'achat de cette technologie. L'impact sur le coût de revient par colis total (VRPD) est lui plus limité, bien que notable.

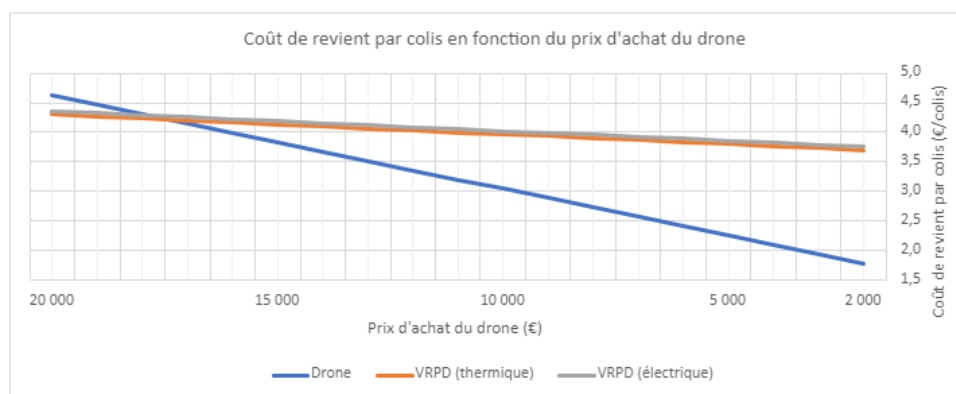


Figure 7 - Coût de revient par colis en fonction du prix d'achat du drone (VRPD - 1 drone)

5.1.3.3. Scénario 3 : VRPD avec deux drones

Dans le dernier scénario, nous considérons l'utilisation de deux drones qui collaborent avec un VUL pour effectuer la tournée de livraison. Comme pour le précédent scénario, nous distinguons les coûts liés au VUL de ceux liés aux drones pour ensuite obtenir le coût de revient par colis pour le VRPD avec deux drones. Le temps alloué aux drones pour leur préparation est cette fois-ci de 16,3 minutes, que nous déduisons du temps total de la tournée pour le calcul des coûts du VUL. Les résultats liés au VUL sont repris dans le tableau 10 et le détail se retrouve dans l'annexe 5.

Coûts du VRPD avec deux drone (VUL)		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario		
Nombre de localisations	33,7 clients	
Distance parcourue	176,18 km	
Durée	321,69 - 16,3 = 305,39 min = 5,0898 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 176,18 km = 35 236,00 km/an	
Coûts		
Coût des rémunérations	0,4644 €/km	
Amortissement véhicule (300.000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Coût des entretiens	0,0959 €/km	
Coût assurances & taxes	0,0383 €/km	
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultats		
Coût total par kilomètre	0,8610 €/km	0,8757 €/km
Coût total des livraisons	0,8610 * 176,18 = 151,6910 €	0,8757 * 176,18 = 154,2808 €
Coût de revient par colis	4.4914 €/colis	4.5781 €/colis

Tableau 10 - Coût d'un VUL pour le VRPD avec deux drones

Une fois encore, les résultats suivent la même tendance que les deux premiers scénarios pour la comparaison des deux VUL. Nous notons néanmoins une réduction du coût par kilomètre ainsi que du coût total des livraisons étant donné que les drones prennent en charge davantage de clients que les autres scénarios.

Les coûts liés aux drones sont ensuite calculés et présentés dans le tableau 11 figure dont le détail est en annexe 6.

Drones	
Données du scénario 3	
Nombre de localisations	16,3 clients
Distance parcourue	86,66 km
Durée à rémunérer	16,3 min = 0,2717 h
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 86,66 km = 17 332 km/an
Nombre de kilomètre par cycle	12,4511 km/cycle
Coûts	
Coût des rémunérations	0,0504 €/km
Amortissement véhicule (3 ans : 30 018 km)	0,1923 €/km
Coût des entretiens	0,1641 €/km
Coût assurances & taxes	0,0888 €/km
Coût du carburant / énergie	0,0113 €/km
Résultats	
Coût total par kilomètre	0,5069 €/km
Coût total des livraisons	0,5069 * 86,66 = 43,9280 €
Coût de revient par colis	2,6950 €/colis

Tableau 11 - Coût des drones pour le VRPD avec deux drones

Les coûts totaux sont ensuite présentés dans le tableau 12. Certes, le coût de revient par colis est inférieur au VUL et au VRP, mais celui-ci est plus élevé que dans le second scénario, avec un seul drone. Encore une fois, c'est l'investissement nécessaire pour acheter les drones qui augmente ces coûts. Dans cette configuration (5.000 € par drone), le VRPD avec deux drones devient presque aussi coûteux que le VRP standard.

Résultats du VRPD avec deux drone		
	VUL thermique	VUL électrique
Coût VUL	151,6910 €	154,2808 €
Coût drone	43,9280 €	
Coût total	195,6190 €	198,2088 €
Coût de revient par colis	3,9124 €/colis	3,9642 €/colis

Tableau 12 - Coût de revient par colis pour le VRPD avec deux drones

Il est clair que la réduction du prix d'achat du drone est un facteur important pour permettre l'optimisation des coûts. Une étude de sensibilité présente les coûts de revient par colis en faisant varier ce prix d'achat, comme pour le second scénario. Cette analyse s'illustre dans la figure 8. Nous constatons que le prix d'achat des drones a plus d'impact sur le coût de revient par colis total que dans le VRPD avec un seul drone. Dans ce scénario, plus de localisations sont visitées par les drones et les coûts qui leurs sont liés affectent donc plus les totaux.

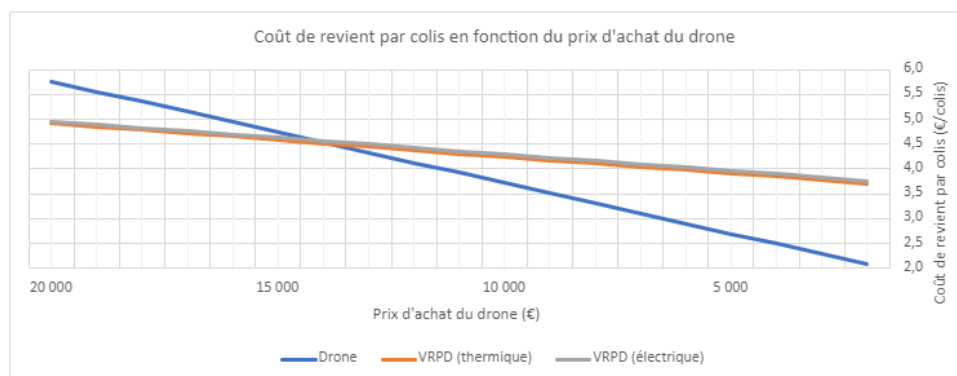


Figure 8 - Coût de revient par colis en fonction du prix d'achat du drone (VRPD avec deux drones)

5.1.3.4. Comparaison des scénarios

Les différents résultats concernant les coûts de revient par colis sont présentés et comparés dans la figure 9. Nous constatons qu'avec les hypothèses de base, à savoir un prix d'achat des drones fixé à 5.000 €, l'optimisation des coûts par colis n'est visible que pour le VRPD avec un seul drone. Cependant, la figure 9 montre également les valeurs de ces coûts en prenant comme hypothèse deux autres prix d'achat : 2.000 € et 20.000 €. Dans un premier temps, il apparaît clairement qu'un prix d'achat des drones excessif, ici 20.000 €, rend l'introduction de ceux-ci pour la logistique du dernier kilomètre totalement inadaptée. En effet, dans cette configuration, les coûts de revient par colis pour le VRPD avec un et deux drones sont respectivement 9,87% et 25,52% plus élevés que pour le VRP standard. Ensuite, si nous nous basons sur les objectifs de coûts de production des sociétés telles que Atechsys (2.000 €/drone) (Capital, 2017), l'optimisation est alors plus conséquente et permet de réduire ce coût d'en moyenne 5,3%.

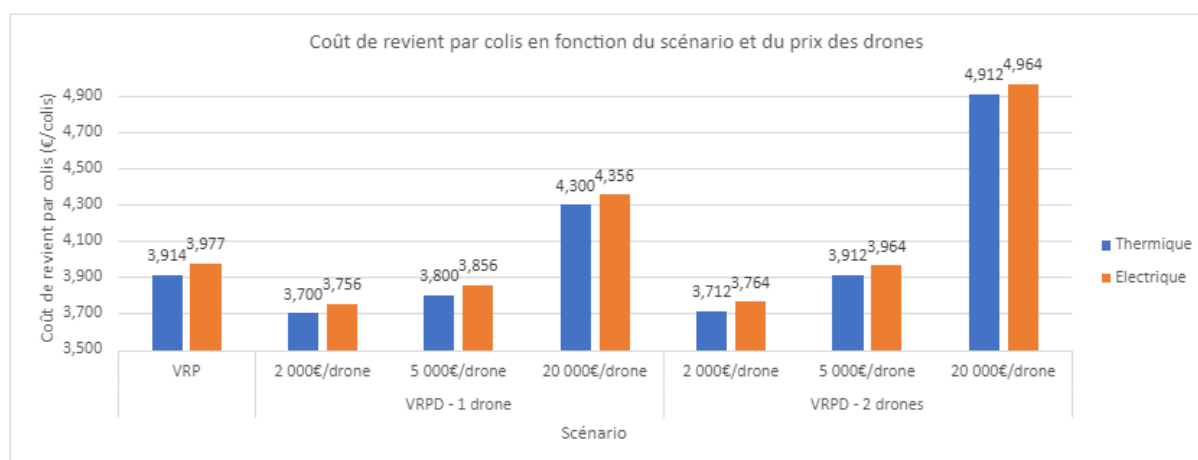
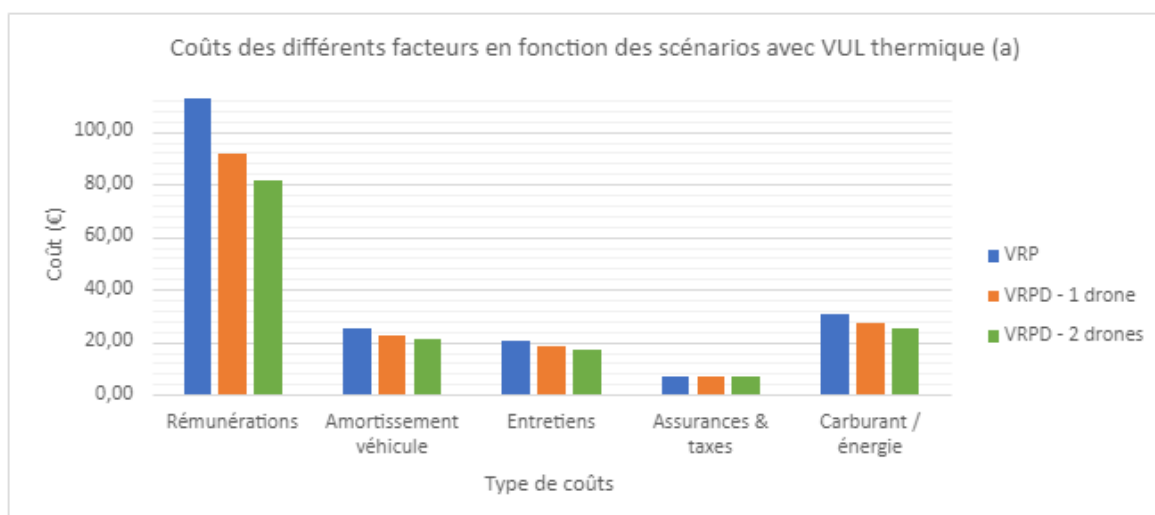
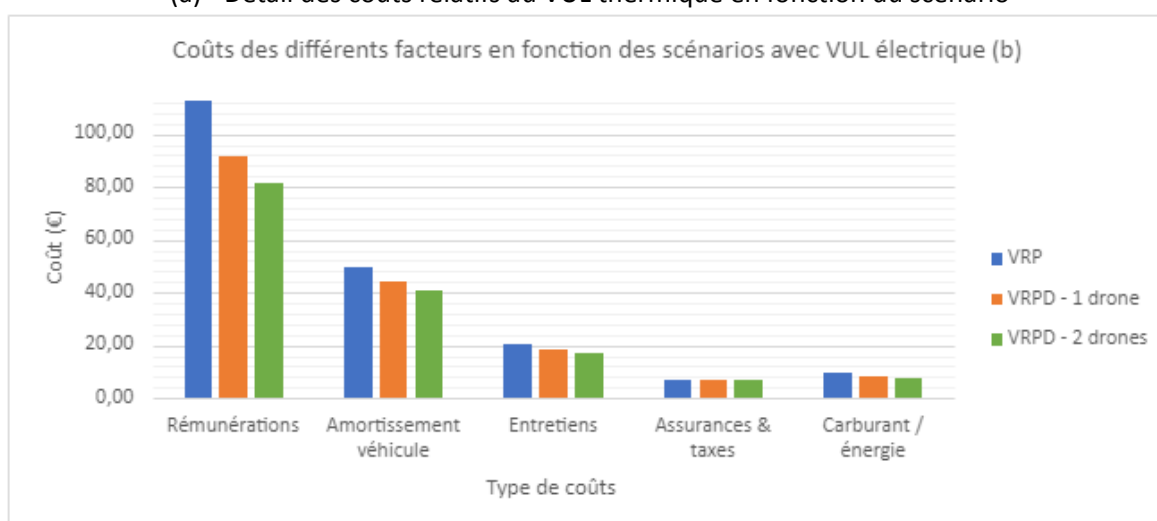


Figure 9 - Coût de revient par colis en fonction du scénario et du prix des drones

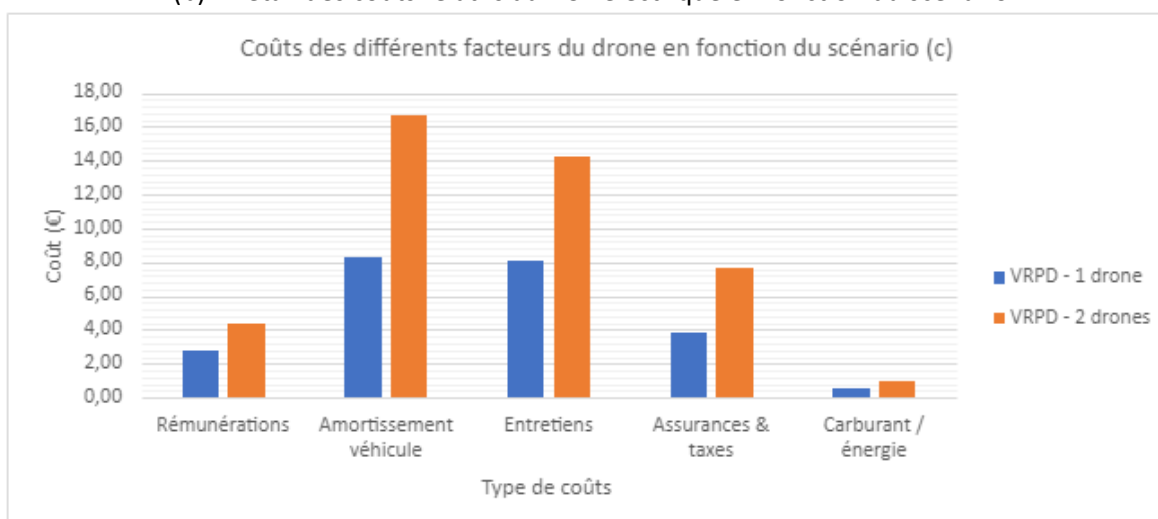
Ensuite, nous pouvons comparer les coûts totaux relatifs aux livraisons ainsi que leurs composantes. Les graphiques de la figure 10 (a, b et c) présentent les différents coûts des véhicules en fonction des scénarios abordés. Nous constatons dans les deux premiers graphiques que c'est le poste "Rémunérations" qui obtient la meilleure optimisation suite à l'ajout des drones. En parallèle, le coût des rémunérations relatives aux drones est faible et la somme des deux est donc inférieure à la valeur du VRP standard. Ensuite, pour les cas avec un VUL thermique (a), le second poste qui présente des améliorations substantielles est celui du "Carburant / énergie". En effet, la consommation d'électricité à la place du diesel est dans ce cas-ci plus rentable. Pour les cas avec un VUL électrique (b), cette optimisation est moindre étant donné que les deux véhicules utilisés fonctionnent à l'électricité. Les coûts en énergie liés aux drones (c) sont, eux, très faibles et permettent une optimisation des coûts. Ensuite, la diminution des coûts du poste "Amortissement" est plus prononcée pour le VUL électrique (b) que pour le VUL thermique (a). Cependant, dans les deux cas, les ajouts des coûts liés à l'investissement des drones amènent les totaux à une valeur supérieure à celle du VRP standard. Enfin, les coûts totaux liés aux entretiens et aux assurances sont en augmentation dans les deux cas. Les comparaisons des sommes des coûts totaux du VUL et des drones sont présentées dans l'annexe 7 pour plus de détails.



(a) - Détail des coûts relatifs au VUL thermique en fonction du scénario



(b) - Détail des coûts relatifs au VUL électrique en fonction du scénario



(c) - Détail des coûts relatifs au drone en fonction du scénario

Les colonnes du "VRPD - 2 drones" présentent les coûts pour les 2 drones

Figure 10 - Comparaison des composantes des coûts liés au VUL thermique (a), électrique (b) et au drone (c)

5.2. Les méthodes d'évaluation environnementale

Dans l'objectif de mesurer et de comparer l'impact de l'utilisation de drones pour la livraison du dernier kilomètre, nous nous penchons dans cette section sur les différentes méthodes existantes permettant de quantifier les impacts environnementaux des différents modes de livraison. Une fois les différentes méthodes décrites, nous sélectionnons celle qui est la plus en accord avec ce que nous voulons mesurer.

5.2.1. Bilan Carbone

Le Bilan Carbone est un outil mis en place et géré par l'Association pour la transition Bas Carbone (ABC), autrefois appelée Association Bilan Carbone (Association pour la transition Bas Carbone, 2022). Il a été créé en 2004 par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME, 2022) et l'Association des Professionnels en Conseil Climat Énergie et Environnement (APCC, 2022). Ces deux entités ont formé l'ABC en 2011 pour promouvoir davantage la méthode du Bilan Carbone.

La méthodologie du Bilan Carbone offre aux particuliers et aux entreprises des outils et des méthodes leur permettant de comptabiliser la quantité d'émission de gaz à effet de serre (GES) qu'ils émettent chaque année à travers l'ensemble de leurs activités. Le Bilan Carbone permet de déterminer quels postes sont les plus polluants dans une organisation et offre par la suite des solutions ainsi qu'un plan d'action pour réduire de manière efficace l'impact environnemental de l'organisation (Association pour la transition Bas Carbone, 2022).

Le Bilan Carbone s'articule en deux phases distinctes : le calcul des émissions et la prise d'actions correctives. Dans un premier temps, l'entreprise va calculer ses émissions de gaz à effet de serre à l'aide d'outils proposés par le Bilan Carbone. La comptabilisation de ces émissions est faite à l'aide de trois catégories appelées scope 1, 2 et 3 (ADEME, 2022).

- Les émissions directes, de Scope 1, sont celles provenant des actifs détenus et contrôlés par l'entreprise.
- Les émissions indirectes de Scope 2, ou émissions d'électricité proviennent de la production et de la distribution de l'électricité, de la chaleur et de la vapeur achetées par l'entreprise.
- Les émissions indirectes de scope 3, ou émissions de la chaîne d'approvisionnement regroupent le reste des émissions de la chaîne d'approvisionnement. Elle comptabilise les émissions des marchandises achetées aux fournisseurs.

Dans un deuxième temps, le Bilan Carbone accompagne les entreprises dans l'élaboration d'un plan d'action basé sur les priorités de l'entreprise. En plus du plan d'action et de la stratégie énergétique que peut mettre en place la méthodologie du Bilan Carbone, celle-ci met également en lumière les vulnérabilités et la dépendance de l'entité analysée en ce qui concerne les énergies et les potentielles futures variations en termes de coûts.

5.2.2. Cadre GLEC

Cette seconde méthode permet elle aussi de quantifier l'ensemble des émissions générées par les activités logistiques liées aux opérations et à la chaîne d'approvisionnement d'une société. Introduite par le Conseil mondial des émissions logistiques (GLEC), cette méthode offre un ensemble de pratiques et de conseils pour aider les entreprises à évaluer leur émission de gaz à effet de serre (Smart Freight Center, s. d.).

Comme pour le Bilan Carbone, la classification en trois scopes s'applique également au cadre GLEC. De plus, pour prendre en compte au mieux l'impact de la consommation de carburant, le cadre GLEC

comptabilise ces émissions à l'aide d'une analyse "well-to-wheel" (WTW). Grâce à cette analyse, la globalité du cycle de vie du carburant est prise en considération pour déterminer la quantité de CO₂ réellement émise par l'utilisation de carburant. Cette analyse comporte deux parties distinctes (Greene & Lewis, 2019).

Émissions "well-to-tank" (WTT)

Cette première partie comprend les émissions produites par les premières opérations permettant, à terme, d'utiliser l'énergie. Les émissions ainsi comptabilisées proviennent de l'extraction, du traitement, du stockage, mais également de la livraison de l'énergie à sa destination finale, avant d'être utilisée par une entreprise.

Émissions "tank-to-wheels" (TTW)

Cette seconde étape intervient dans la continuité de la première et reprend ainsi les émissions produites lors de la combustion de carburant liée aux opérations principales de l'entreprise, celles liées au Scope 1 défini précédemment. Cette étape ne concerne donc pas les véhicules électriques qui ne produisent pas d'émissions lors de leur fonctionnement (Greene & Lewis, 2019).

L'analyse se clôture par l'addition des émissions obtenues après le calcul du WTT et du TTW et qui représente les émissions produites par le cycle de vie complet du carburant (WTW) (figure 11).

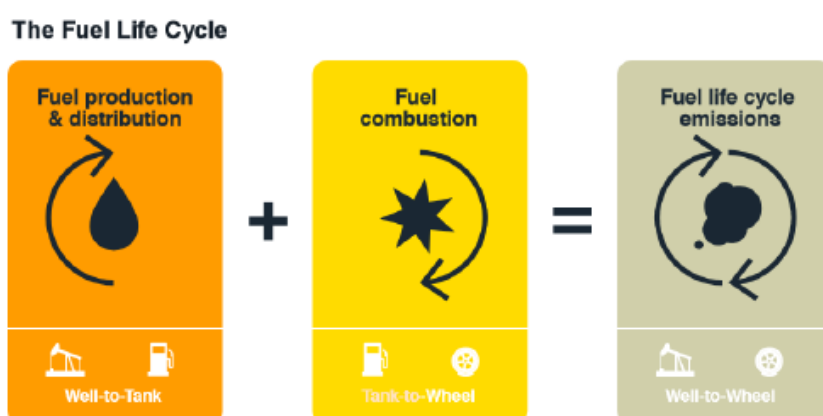


Figure 11 - Cycle de vie du carburant (WTW) (Greene & Lewis, 2019)

Les résultats obtenus suite au cadre GLEC sont ensuite repris dans un rapport respectant un certain nombre de standards et de protocoles.

5.2.3. GHG protocol Product Standard

Depuis 1998, le principal objectif du protocole Greenhouse Gas (GHG) est de créer un système de comptabilisation des GES internationalement accepté ainsi que de développer des méthodes et des outils pour aider les entreprises à adopter ce système. De plus, son adoption permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le monde (Greenhouse Gas Protocol, s. d.). Le "Greenhouse Gas Protocol Product Standard" est une méthode de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre émis par un produit ou un service durant l'ensemble de sa durée de vie.

Comme pour les précédentes méthodes, plusieurs étapes sont nécessaires pour mener à bien cette analyse :

- définir les objectifs ;
- collecter les données ;
- calculer les émissions de CO₂ ;
- interpréter les résultats.

5.2.4. Analyse du cycle de vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un concept défini comme le processus d'évaluation des effets et impacts qu'un produit a sur l'environnement tout au long de son cycle de vie (European Environment Agency, 2022). Cette méthode est définie par la norme et les standards internationaux ISO 14040:2006 et 14044, qui en donnent une définition de son usage : "L'ACV traite les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebut." (*ISO 14040:2006 : Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, 2006)

Les 5 étapes du cycle de vie d'un produit peuvent ainsi être énumérées comme suit :

- l'extraction des matières premières ;
- la transformation et la fabrication ;
- le transport, qui peut intervenir entre plusieurs étapes de ce cycle ;
- l'utilisation ;
- le traitement des déchets.

De plus, l'ACV est une méthode permettant :

- de comparer deux ou plusieurs produits ;
- d'identifier les opportunités environnementales en améliorant certaines étapes du cycle de vie des produits ;
- de mettre en évidence les indicateurs environnementaux pertinents pour l'analyse ;
- d'assister la prise de décision en identifiant les étapes du cycle de vie du produit qui ont le plus d'impact ;
- de développer une stratégie marketing plus environnementale.

Selon la norme ISO 14040:2006, l'ACV d'un produit ou d'un service se divise en quatre phases (*ISO 14040:2006 : Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, 2006).

Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette phase permet de déterminer les raisons principales de l'étude et ses objectifs en spécifiant les sujets importants ainsi qu'en déterminant le niveau de précision souhaité durant l'analyse. Le périmètre (durée, limite géographique, etc.) est également fixé durant cette première étape. Plus généralement, les règles et les hypothèses sont décrites telles que les unités choisies ou encore les conventions choisies pour effectuer les conversions nécessaires.

Inventaire du cycle de vie (ICV)

La seconde phase est une étape d'analyse qui demande dans un premier temps de décrire le plus précisément possible les matériaux, les activités et les flux qui entrent en jeu dans la production et l'utilisation du produit analysé. Il s'agit de dresser l'inventaire des données d'entrée et de sortie nécessaires pour mener à bien l'analyse souhaitée. Ces données peuvent provenir de deux sources différentes :

- Les données “du terrain” provenant de la production, de la distribution ou encore des déchets générés lors de la fabrication du produit analysé. Elles sont spécifiques à la situation étudiée et récoltées en interne et auprès des fournisseurs.
- Les données génériques qui peuvent être récupérées sur les sites publics ou privés offrant des banques de données sur la production d'énergie et sur les émissions produites.

Les résultats de cette étude déterminent quelles ressources sont utilisées à quelle étape du cycle de vie du produit ainsi que les émissions générées à chaque étape. Ces résultats sont le point de départ de la phase suivante : l'évaluation des impacts.

Il est à noter que ces deux premières phases se suffisent à elles-mêmes pour certaines analyses. En effet, après avoir récolté l'ensemble des données sur les émissions, il est déjà possible d'établir des comparatifs entre des produits et d'obtenir une vue globale sur les émissions du cycle de vie d'un produit. Dans ce cas, l'analyse est qualifiée d'étude d'inventaire du cycle de vie.

Évaluation des impacts du cycle de vie

Vient alors la phase d'évaluation des impacts du cycle de vie qui a pour objectif de déterminer plus précisément les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des émissions déterminées lors de la phase précédente. Cette phase comporte trois étapes obligatoires et trois autres optionnelles (ISO 14040:2006 : *Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, 2006).

Sélection des indicateurs et des modèles

La première étape consiste en la sélection des catégories d'impacts qui présentent un intérêt dans l'étude ainsi que les différents indicateurs et modèles qui seront utilisés pour établir ces impacts. Ces catégories peuvent être les émissions de gaz à effet de serre, l'acidification des sols ou encore l'usage de l'eau et des terres.

Classification

Ensuite, l'ensemble des données récoltées lors de la seconde phase est attribué aux différentes catégories sélectionnées lors de l'étape précédente.

Caractérisation

Une fois les émissions et les divers flux classés dans les catégories, la caractérisation va permettre de quantifier uniformément ceux-ci à l'aide de facteur de caractérisation, ou facteur d'équivalence. Au sein de chaque catégorie, les données sont donc converties vers une unité commune permettant de mesurer l'impact de chacun des résultats. Pour donner un exemple, l'unité commune pour la catégorie du réchauffement climatique est l'équivalent CO₂.

Normalisation

Cette première étape facultative permet d'exprimer les résultats obtenus dans les différentes catégories avec une unique et même valeur de référence, permettant ainsi une meilleure comparaison des catégories entre elles.

Groupement

Le groupement assigne simplement certaines catégories d'impacts dans des ensembles qui présentent des similarités qualitatives. Ces ensembles sont définis de manières subjectives et ne sont pas toujours identiques d'une étude à une autre.

Pondération

Dernière étape facultative et la plus subjective, celle-ci permet d'exprimer l'ensemble des résultats en effectuant la somme de ceux-ci et en appliquant à chacune des catégories un facteur de pondération spécifique représentant l'importance qu'elle a du point de vue des objectifs de l'étude. Cette étape est déconseillée par la norme ISO 14044 puisqu'elle ne permet pas d'obtenir une valeur unique et fiable pour comparer les analyses et les produits entre eux (Rebitzer, 2004).

Interprétation du cycle de vie

Cette dernière phase conclut l'ACV en présentant les résultats obtenus dans les phases précédentes. Elle fait office de conclusion donnant lieu à des recommandations et des prises de décisions par rapport aux objectifs définis dans la première phase. C'est également lors de l'interprétation que les limites et la qualité de l'étude sont formulées.

5.3. Impacts environnementaux

Après cette courte revue des méthodes existantes pour évaluer les impacts environnementaux d'une activité, d'un produit ou d'un service, nous devons sélectionner la méthode la plus appropriée aux objectifs recherchés dans ce mémoire.

Pour évaluer et comparer les impacts de l'utilisation de drones de livraison dans la logistique du dernier kilomètre, nous utiliserons une méthode qui se focalise sur un produit plutôt que sur l'ensemble d'une organisation. C'est pourquoi, même si les quatre méthodes introduites peuvent être utilisées, nous choisissons l'analyse du cycle de vie d'un produit pour analyser l'impact des VUL et des drones dans les livraisons du dernier kilomètre.

5.3.1. Analyse du cycle de vie

Pour analyser les cycles de vie des VUL et des drones que nous considérons dans ce mémoire, nous devons tout d'abord définir les objectifs ainsi que les frontières de notre étude.

5.3.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Dans un premier temps, nous fixons les objectifs poursuivis par cette étude. À travers cette analyse du cycle de vie du VUL et du drone, nous souhaitons déterminer l'impact environnemental de l'utilisation du drone dans la logistique du dernier kilomètre. Pour ce faire, nous devons calculer l'impact du VUL résultant d'une situation standard, ici le VRP, et ensuite, l'impact résultant de l'utilisation d'un VUL et d'un ou plusieurs drones pour effectuer les livraisons, ici le VRPD avec un ou deux drones. Pour permettre une comparaison efficace, nous choisissons comme unité les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) que nous exprimons avec l'unité d'équivalent en émission CO₂ (CO₂e). Cette unité permet d'exprimer l'ensemble des différentes émissions de gaz à effet de serre sous une même unité. Les émissions sont calculées suivant les trois principales étapes du cycle de vie des véhicules, à savoir l'extraction de matières premières et la production, l'utilisation du véhicule et

enfin le recyclage. Le transport du véhicule entre son lieu de production et son lieu d'utilisation n'est pas pris en compte dans cette étude et est considéré comme négligeable.

Ensuite, pour mener à bien cette analyse, il nous faut définir le cadre et les hypothèses qui délimitent notre étude. Comme pour le calcul du coût de revient des livraisons, nous considérons trois scénarios spécifiques : le VRP standard, le VRPD avec un drone et enfin, le VRPD avec deux drones. Ces cas proviennent de l'étude menée par Tamke et Buscher (2021) dont l'objectif initial est d'optimiser les coûts de livraison avec l'ajout de drones pour le dernier kilomètre. Le but n'est donc pas de réduire les impacts environnementaux grâce à l'utilisation de drones, mais bien de quantifier les écarts d'émissions CO₂e lors de l'utilisation de ceux-ci dans un contexte d'optimisation de coûts. Dès lors, nous gardons les mêmes données et hypothèses que nous avons formulées dans le chapitre 5.1.3.

Cependant, pour déterminer les émissions CO₂e relatives aux diverses étapes, il est nécessaire d'ajouter certaines précisions. Par exemple, la production des batteries et des drones s'effectue en Chine dans une usine d'une capacité de production de 2 GWh par an et ces batteries sont des lithium-fer-phosphate, similaires aux lithium-ion polymères utilisées (Albouzeet & Kasbari, 2020). Ensuite, nous basons également notre étude sur le mix énergétique européen tant au niveau de l'électricité que pour le carburant. En effet, en fonction des régions, les composants pour la production d'énergie peuvent varier fortement, et donc, les émissions relatives à la consommation d'énergie varient elles aussi grandement. Le mix énergétique européen permet donc d'obtenir une valeur moyenne pour nos calculs.

5.3.3. Inventaire du cycle de vie (ICV)

Dans cette seconde étape, nous réalisons l'inventaire des émissions produites lors des différentes étapes du cycle de vie des véhicules. Dans un premier temps, nous présentons les émissions relatives au VUL thermique et électrique, puis celles relatives à la production et l'utilisation de drones. Ensuite, nous appliquons les données répertoriées aux trois scénarios étudiés pour permettre de déterminer les émissions totales d'une tournée de livraison, mais aussi les émissions produites pour la livraison d'un unique colis.

5.3.3.1. VUL thermique

Production

L'extraction des matières premières et la production du véhicule représentent les premières émissions à prendre en considération dans le cycle de vie d'un VUL. En moyenne, on estime ces émissions à 5,5 tonnes d'équivalents CO₂ par tonne de véhicules produite (ADEME, s. d.). Dans notre cas, le VUL est caractérisé par un poids à vide de 2,2 tonnes, avec pour MMA 3,5 tonnes. Le tableau 13, provenant de l'ADEME (ADEME, s. d.), résume ces informations et le total des émissions liées à la production du véhicule est donc de 12,1 tCO₂e, soit 40,3 gCO₂e/km.

Désignation OEE 2012	PTAC en tonne	Capacité de chargement en tonne	Durée de vie en km	Poids à vide en tonne	Fabrication en CO ₂ e	Fabrication gCO ₂ e/km
PTAC 3,5 tonnes	3,5 t	1,3 t	300 000 km	2,2 t	12,1 tCO ₂ e	40,3 gCO ₂ e/km
PTAC 3,5 tonnes	3,5 t	1,3 t	300 000 km	2,2 t	12,1 tCO ₂ e	40,3 gCO ₂ e/km

Tableau 13 - Émissions CO₂e liées à la fabrication d'un VUL (ADEME, s. d.)

Utilisation

Ensuite, la consommation de carburant est à prendre en compte. Deux émissions sont à distinguer : les émissions WTT et les émissions TTW. D'après l'étude de Rolim et al. (2012), les émissions WTT sont de 24 gCO₂e par kilomètre. Ensuite, nous retrouvons l'information nécessaire pour déterminer les émissions TTW dans la fiche technique du VUL. En effet, la combustion du carburant du véhicule, qui consomme 9,6L/100 km, émet donc 254 gCO₂e par kilomètre parcouru. Les émissions WTW sont donc de 278 gCO₂e/km.

5.3.3.2. VUL électrique

Production

Le VUL électrique a la particularité de fonctionner à l'aide d'une batterie, souvent sujette à controverse sur le plan écologique. Les données recueillies distinguent donc les émissions liées à la production du véhicule (hors batterie) d'une part, et les émissions liées à la fabrication de la batterie d'autre part. Le comparatif des émissions CO₂ réalisé par l'agence Carbone 4 que nous retrouvons dans la figure 12 nous apporte les données suivantes : les émissions liées à la fabrication d'un VUL électrique (hors batterie) sont de 39 gCO₂e/km pour une durée de vie de 200.000 km (Amant & Meunier, 2020). Ce qui correspond à un total de 7,8 tCO₂e pour sa fabrication, soit 26 gCO₂e/km pour un VUL parcourant 300.000 km.

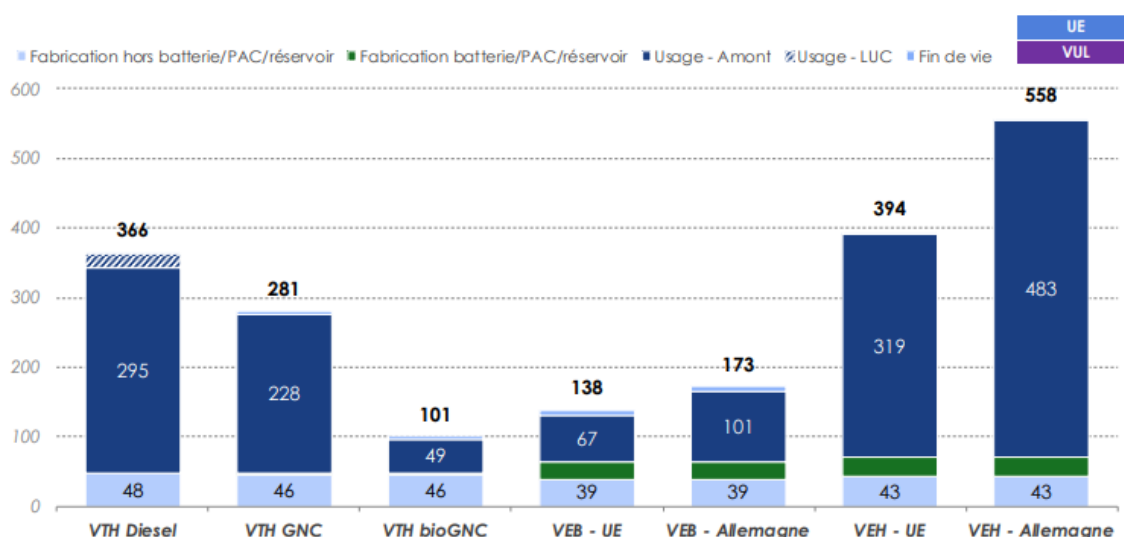


Figure 12 - Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un VUL vendu en 2020 en Europe (gCO₂e/km) - VTH = véhicule thermique ; VEB = Véhicule à Batteries (Amant & Meunier, 2020)

Ensuite, les émissions liées à la fabrication de la batterie sont également données dans la figure 12 et sont de 25 gCO₂e/km (200.000 km) pour un total de 5 tCO₂e. Pour une batterie de 50 kWh, cela correspond à une émission de 100 kgCO₂e/kWh. À titre de comparaison, l'étude de Romare et Dahllöf (2017) sur les émissions liées au cycle de vie des batteries lithium-ion recense les différents ouvrages abordant ce sujet. Les auteurs (Romare & Dahllöf, 2017) concluent que la production d'une telle batterie génère en moyenne 150 à 200 kgCO₂e/kWh. Cependant, ils démontrent également que 62% de ces émissions dépendent de la provenance de la production d'électricité. Hors, comme le montre le tableau 14, les émissions dues à la production d'électricité varient énormément en fonction des régions considérées (Romare & Dahllöf, 2017). En Europe, la moyenne des émissions est de 229 gCO₂e/kWh (European Environment Agency, 2022). Dès lors, si nous considérons la valeur de référence (107 kgCO₂e/kWh) ainsi que les autres données, il est possible de déterminer, par

extrapolation, que la production d'une batterie émet en moyenne 35 kgCO₂e/kWh en Europe pour la partie fabrication (62% du total). Enfin, si nous rajoutons le 38% du total inchangé, nous obtenons la valeur de 100 kgCO₂e/kWh qui corrèle parfaitement à la valeur présentée dans l'étude de Carbone 4 (Amant & Meunier, 2020).

Electricity mix	g CO ₂ -eq/kWh el	kg CO ₂ -eq/kWh battery from electricity	% of Ellingsen manufacturing	% of Ellingsen total*
Sweden	50	7	7%	42%
Brazil	300	46	43%	65%
Ellingsen ref		107	100%	100%
USA	700	112	105%	103%
China	1000	159	149%	130%
Poland	1050	169	159%	136%
India	1400	226	212%	170%

Tableau 14 - Partie des émissions liées à la fabrication d'une batterie en fonction du pays (Romare & Dahllöf, 2017)

Les modèles de VUL que nous considérons possèdent une batterie d'en moyenne 80,5 kWh. Leur production émet donc 8,05 tCO₂e, soit 26,83 gCO₂e/km.

Utilisation

Lors de leur utilisation, les VUL électriques ont l'avantage de n'émettre aucun rejet CO₂. La valeur des émissions TTW est donc nulle. Par contre, il faut tenir compte de la production de cette énergie dans les émissions WTT. Cette donnée est fournie par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) et est de 229 gCO₂e par kWh produit (European Environment Agency, 2022). Étant donné que la batterie du VUL est de 80,5 kWh, les émissions liées à un cycle de rechargement permettant de parcourir 266 km sont de 18,43 kgCO₂e, soit 69,29 gCO₂e/km.

Recyclage

La fin de vie du véhicule, et plus particulièrement celle de la batterie alimentant le VUL, doit également être considérée dans nos calculs. En effet, les composants de ces batteries sont tout aussi polluants que recherchés. C'est pourquoi le recyclage est une étape nécessaire. Dans l'étude des impacts environnementaux des batteries lithium-ion effectuée par Romare et Dahllöf (2017), les auteurs discernent deux principales méthodes permettant ce recyclage : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie. Cependant, ils précisent que seule la pyrométallurgie est utilisée de manière commerciale étant donné que l'hydrométallurgie est au stade de prototype pour le recyclage des batteries en Europe (Romare & Dahllöf, 2017). Après un ensemble de comparaison se basant sur la littérature existante, ils concluent que le recyclage d'une batterie par pyrométallurgie émet plus de CO₂e qu'il n'en épargne. Les émissions liées au recyclage sont de 15 kgCO₂e par kWh, soit 4,025 gCO₂e/km pour le cas étudié.

5.3.3.3. Drone

Les émissions de CO₂e ont été étudiées dans quelques articles comme ceux présentés dans le chapitre 4.4. Cependant, les émissions liées à la fabrication des drones et des batteries sont souvent négligées.

Production

Comme pour le VUL électrique, nous distinguons les émissions provenant de la fabrication du drone (hors batterie) de celles liées à la production des batteries. Pour déterminer celles-ci, nous nous basons sur l'étude de faisabilité du projet SHERPA, supervisée entre autres par l'Agence de la transition écologique (Albouzeet & Kasbari, 2020). L'objectif de ce projet est de répondre aux questions relatives à l'environnement dans le cadre d'une livraison par drone en expérimentant ces livraisons dans des conditions similaires aux solutions industrielles proposées (Albouzeet & Kasbari, 2020). Cette étude, sous-traitée au cabinet Carbone 4, obtient les valeurs suivantes :

- la production d'un drone émet 42,8 kgCO₂e au total ;
- la production d'une batterie de 0,1778 kWh produit 17,9 kgCO₂e au total.

Dans nos scénarios, nous considérons une batterie d'une capacité de 0,9768 kWh. Nous ajustons donc les émissions liées à la production d'une batterie en conséquence. La fabrication d'une batterie de 0,996 kWh émettra dès lors 98,34 kgCO₂e, ce qui correspond au coefficient de conversion défini pour la batterie des VUL électriques. Cette seconde émission sera cependant comptabilisée dans l'étape "Utilisation" en raison de l'usure rapide de ces batteries.

Utilisation

À l'instar du VUL électrique, l'unique émission de CO₂e provenant de l'utilisation d'un drone est due à la production d'électricité nécessaire pour recharger la batterie. Cette valeur est fixée à 229 gCO₂e par kWh (European Environment Agency, 2022). Chaque cycle de rechargement est donc responsable de l'émission de 223,68 gCO₂e.

De plus, les batteries alimentant les drones sont limitées à une durée de vie moyenne de 400 cycles. Plusieurs remplacements de batteries sont donc nécessaires durant la durée de vie du drone, augmentant ainsi son impact environnemental. Les émissions supplémentaires à prendre en compte pour l'usure des batteries sont de 245,85 gCO₂e par cycle de rechargement.

Recyclage

Ensuite, le recyclage des batteries est lui aussi à prendre en considération. Avec des émissions de 15 kgCO₂e/kWh (Romare & Dahllöf, 2017), une batterie de drones émettra 14,652 kgCO₂e lors de son recyclage. Ce qui correspond à 36,63 gCO₂e par cycle de rechargement.

5.3.4. Évaluation des impacts

Maintenant que les émissions de CO₂e des différentes étapes sont répertoriées, nous pouvons les appliquer aux trois scénarios.

5.3.4.1. Scénario 1 : VRP standard sans drone

Emissions CO ₂ e pour le VRP			
Titre		VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario 1			
Nombre de localisations		50 clients	
Distance parcourue		213,63 km	
Emissions			
Matières premières & production	Véhicule	40,3 gCO ₂ e/km	26 gCO ₂ e/km
	Batterie	/	26,83 gCO ₂ e/km
Utilisation	WTT	24 gCO ₂ e/km	69,29 gCO ₂ e/km
	TTW	254 gCO ₂ e/km	/
Recyclage		/	36,63 gCO ₂ e/km
Résultats			
Emissions par kilomètre		318,3 gCO ₂ e/km	158,75 gCO ₂ e/km
Emissions totales des livraisons		67 998,43 gCO ₂ e	33 913,76 kgCO ₂ e
Emissions par colis		1 359,97 gCO ₂ e/colis	678,28 gCO ₂ e/colis

Tableau 15 - Émissions CO₂e pour le VRP

Le tableau 15 nous présente les différentes émissions pour effectuer la livraison des colis avec un VUL uniquement (VRP). Nous constatons facilement l'important écart entre les émissions du VUL thermique et électrique. En effet, le VUL thermique émet deux fois plus de CO₂e à chaque colis livré. Cependant, cette situation est calculée pour une durée de vie de 300.000 km pour chaque VUL. Lors de leur production, le VUL électrique émet 31,09% de CO₂e de plus que le modèle thermique, mais cette différence est compensée par les émissions liées au carburant sur le long terme. Ainsi, il faut que le VUL électrique parcoure approximativement 23.000 km pour devenir plus efficace en termes d'émissions CO₂e que le modèle thermique.

5.3.4.2. Scénario 2 : VRPD avec un drone

Le second scénario étudie les impacts de la livraison de colis avec l'utilisation d'un VUL et d'un drone qui collaborent pour clôturer une tournée. Les résultats des calculs relatifs à ce scénario sont présentés dans le tableau 16. Les émissions par kilomètre liées au VUL ne varient pas et seuls la distance parcourue et le nombre de localisations visitées modifient les résultats de ce véhicule. Bien que le total des émissions du VUL pour la tournée diminue, les émissions par colis sont, elles, en augmentation par rapport au VRP standard (12,3% en moyenne). L'ajout du drone rend donc le tour de la camionnette moins efficace en termes d'émissions CO₂e mais permet cependant au drone d'effectuer un certain nombre de livraisons.

Le drone, dont la durée de vie est fixée à trois ans dans nos scénarios, apparaît comme une solution peu émettrice de CO₂e. En effet, chaque colis livré n'est responsable que de l'émission de 205,46 gCO₂e, ce qui correspond seulement à 13,45% et 26,97% respectivement des émissions par colis du VUL thermique et électrique. Cependant, c'est la collaboration des deux véhicules qui doit être évaluée. Dans ce contexte, le VRPD avec un drone émet respectivement 8,11 et 4,93% de CO₂e par colis de moins qu'un VUL thermique et électrique pour le VRP.

Emissions CO ₂ e pour le VRPD avec un drone		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario 2 : VUL		
Nombre de localisations	39,5 clients	
Distance parcourue	189,52 km	
Emissions VUL		
Emissions par kilomètre	318,3 gCO ₂ e/km	158,75 gCO ₂ e/km
Emissions totales des livraisons	60 324,22 gCO ₂ e	30 086,3 gCO ₂ e
Emissions par colis	1 527,20 gCO ₂ e/colis	761,68 gCO ₂ e/colis
Données du scénario 2 : drone		
Nombre de localisations	10,5 clients	
Distance parcourue	50,03 km/jour (30 018 km sur 3 ans)	
Nombre de cycles	4,12 cycles	
Emissions drone		
Matières premières & production	Véhicule	1,43 gCO ₂ e/km
Utilisation	Batterie	20,25 gCO ₂ e/km
	WTT	18,42 gCO ₂ e/km
	TTW	/
Recyclage	3,02 gCO ₂ e/km	
Résultats drone		
Emissions par kilomètre	43,12 gCO ₂ e/km	
Emissions totales des livraisons	2 157,30 gCO ₂ e	
Emissions par colis	205,46 gCO ₂ e/colis	
Total émissions scénario 2		
Emissions totales des livraisons	62 481,52 gCO ₂ e	32 243,6 gCO ₂ e
Emissions par colis	1 249.63 gCO ₂ e/colis	644.87 gCO ₂ e/colis

Tableau 16 - Émissions CO₂e pour le VRPD avec un drone

5.3.4.3. Scénario 3 : VRPD avec deux drones

Le dernier scénario étudie les émissions liées à la livraison de colis avec l'utilisation d'un VUL et de deux drones. Les résultats des calculs relatifs à ce scénario sont présentés dans le tableau 17. Comme pour le second scénario, seuls la distance parcourue et le nombre de localisations visitées modifient les résultats du VUL. Encore une fois, le total des émissions du VUL pour la tournée diminue, mais les émissions par colis sont toujours en augmentation par rapport au VRP standard ainsi que par rapport au VRPD avec un drone. Ces augmentations sont de 22,5% en comparaison avec le VRP standard et de 9,1% en comparaison avec le VRPD avec un drone. L'ajout du second drone détériore donc davantage l'efficacité du parcours du VUL, mais moins que l'ajout du premier drone.

En ce qui concerne les émissions liées aux drones, chaque colis livré n'est responsable que de l'émission de 224,84 gCO₂e, ce qui correspond seulement à 18,82 et 35,44% respectivement des émissions par colis du VUL thermique et électrique. Cependant, nous constatons néanmoins que ces émissions augmentent de 9,43% par rapport au VRPD avec un seul drone. L'ajout du second drone permet donc d'accroître le nombre de colis livrés par drone avec ses faibles émissions, mais diminue légèrement l'efficacité des drones en termes de CO₂e émis par colis.

Enfin, les résultats globaux de la collaboration du VUL avec deux drones montrent que l'ajout du second drone ne permet pas d'obtenir une optimisation des émissions aussi importante que lors de l'ajout du premier drone comme dans le second scénario. En effet, le VRPD avec deux drones émet respectivement 13,82 et 6,90% de CO₂e par colis de moins qu'un VUL thermique et électrique pour le VRP. Si l'on compare avec le second scénario, les économies d'émissions sont de 4,58 et 1,64% de

CO₂e par colis. Le VRPD avec deux drones reste néanmoins le plus efficace en termes d'émissions CO₂e par colis.

Emissions CO ₂ e pour le VRPD avec deux drones		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario 3 : VUL		
Nombre de localisations	33,7 clients	
Distance parcourue	176,18 km	
Emissions VUL		
Emissions par kilomètre	318,3 gCO ₂ e/km	158,75 gCO ₂ e/km
Emissions totales des livraisons	56 078,10 gCO ₂ e	28 059,06 gCO ₂ e
Emissions par colis	1 664,04 gCO ₂ e/colis	832,61 gCO ₂ e/colis
Données du scénario 3 : drone		
Nombre de localisations	16,3 clients	
Distance parcourue	86,66 km/jour (51 996 km sur 3 ans)	
Nombre de cycles	6,96 cycles	
Emissions drone		
Matières premières & production	Véhicule	1,63 gCO ₂ e/km
Utilisation	Batterie	19,75 gCO ₂ e/km
	WTT	17,97 gCO ₂ e/km
	TTW	/
Recyclage	2,94 gCO ₂ e/km	
Résultats drone		
Emissions par kilomètre	42,29 gCO ₂ e/km	
Emissions totales des livraisons	3 664,85 gCO ₂ e	
Emissions par colis	224,84 gCO ₂ e/colis	
Total émissions scénario 3		
Emissions totales des livraisons	59 742,95 gCO ₂ e	31 723,91 gCO ₂ e
Emissions par colis	1 194,86 gCO ₂ e/colis	634,47 gCO ₂ e/colis

Tableau 17 - Émissions CO₂e pour le VRPD avec deux drones

Le graphique suivant (figure 13) résume les différentes émissions CO₂e résultant de la livraison d'un colis pour les trois scénarios envisagés.

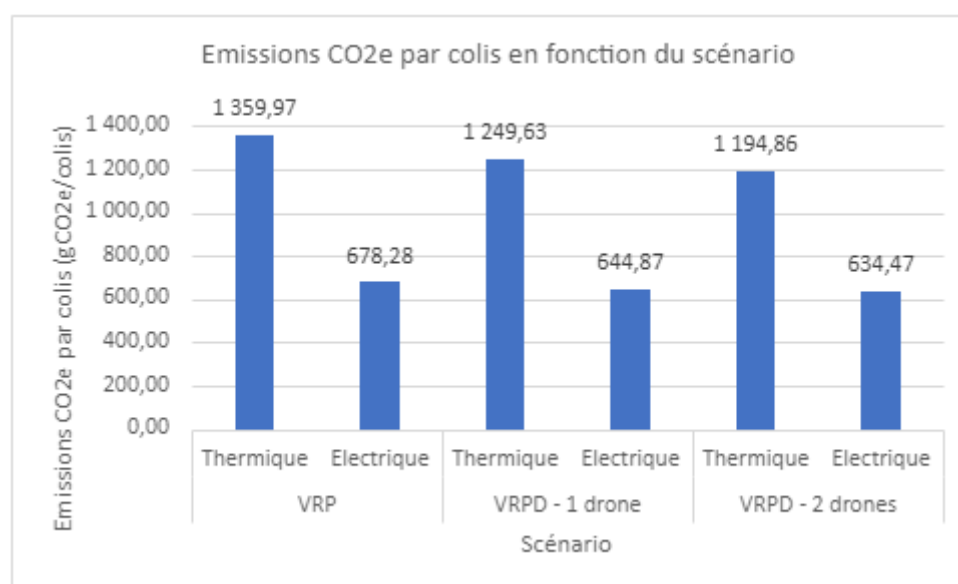


Figure 13 - Comparaison des émissions CO₂e par colis des trois scénarios

5.4. Comparaison des résultats

Les différents impacts mesurés dans les sections précédentes, nous sommes maintenant en mesure de comparer les impacts en termes de coûts et d'environnement liés à l'introduction d'un ou de deux drones pour effectuer les livraisons du dernier kilomètre. Pour ce faire, nous comparons dans un premier temps les trois scénarios dans le cadre de l'utilisation d'un VUL thermique. Ensuite, nous comparons les mêmes scénarios dans le cadre de l'utilisation d'un VUL électrique cette fois-ci. Enfin, de manière plus globale, nous observons les différences entre le VRP et le VRPD avec un ou deux drones. Ces comparaisons sont présentées dans la figure 14.

Premièrement, pour le cas du VUL thermique, nous constatons que l'ajout d'un puis de deux drones pour effectuer les livraisons entraîne une réduction globale des émissions CO₂e. En effet, l'utilisation d'électricité à la place du carburant fossile permet de réduire ces émissions. Cependant, même si l'ajout du premier drone optimise également les coûts de livraison par colis, l'ajout du second drone, lui, annule cette réduction. Le scénario du VRPD avec deux drones permet donc de réduire davantage les émissions CO₂e au détriment de la rentabilité en termes de coûts. Cette augmentation est due au prix d'achat des drones que nous avons fixé à 5.000 € dans nos scénarios. Prochainement, les entreprises chargées de la fabrication de ces drones prévoient de réduire ce prix à 3.000 ou 2.000 € (Capital, 2017; Raptopoulos, 2013). Dans cette optique, l'ajout du second drone n'augmente plus que négligeablement les frais de livraison, ce qui permettrait d'optimiser à la fois les coûts et les émissions CO₂e des livraisons avec un VUL thermique en collaboration avec des drones.

Ensuite, pour les scénarios utilisant un VUL électrique, nous observons également une réduction des émissions CO₂e lors de l'ajout des drones. Cependant, cette optimisation est dérisoire en comparaison de celle obtenue avec un VUL thermique. En effet, lorsque les émissions par colis chutent de 110 gCO₂e pour le modèle thermique, celles-ci ne diminuent que de 33 gCO₂e par colis lors de l'ajout d'un drone avec le VUL électrique. La réduction des émissions CO₂e est donc limitée dans ce contexte. En ce qui concerne les impacts en termes de coûts, les scénarios avec un VUL électrique suivent la même tendance que ceux avec le modèle thermique : une optimisation lors de l'ajout du premier drone et une augmentation des coûts lors de l'ajout du second drone pour revenir à peu près au coût de revient par colis sans drone. Dès lors, l'introduction des drones dans la logistique du dernier kilomètre en collaboration avec un VUL électrique n'optimise que très peu les impacts économiques et environnementaux.

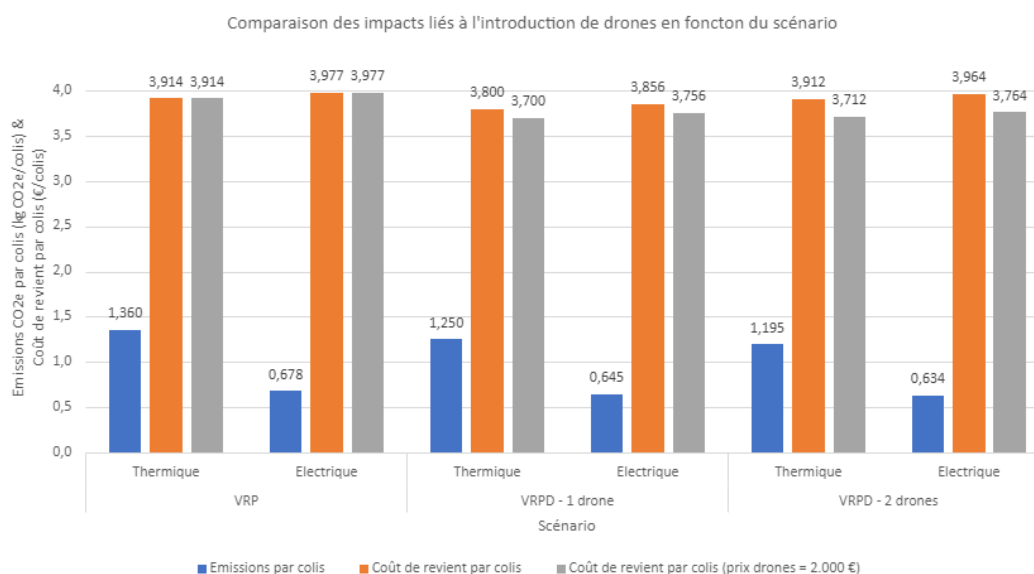


Figure 14 - Comparaison des émissions CO₂e et des coûts de revient par colis des trois scénarios

Enfin, si nous comparons globalement le VRP avec les deux VRPD, nous pouvons conclure que l'ajout d'un ou de deux drones pour effectuer la livraison de colis avec un VUL permet à la fois une réduction des émissions CO₂e et une réduction des coûts de livraison. Dans le cas d'un prix du drone trop élevé, la réduction des émissions CO₂e fait face à l'augmentation des coûts de livraison à partir du second drone introduit dans le système.

5.5. Limites de la recherche

Dans ce mémoire, nous nous basons sur une série de concepts ainsi que sur une revue de littérature pour délimiter les frontières de notre travail.

D'abord, la première limite se situe au niveau de cette revue de littérature. Celle-ci étant vaste et continuellement alimentée sur les sujets que nous abordons dans ce travail, la sélection des articles n'a pas la prétention d'être exhaustive. Dès lors, certaines informations n'ont potentiellement pas été détectées lors de cette revue. Les articles nous ont également orientés vers le concept du VUL collaborant avec des drones. Cependant, les livraisons indépendantes par drone sont elles aussi mises en pratique et une étude similaire sur ce concept pourrait faire l'objet d'un travail ultérieur.

Ensuite, pour permettre l'évaluation des coûts et des émissions CO₂e, nous nous basons sur le modèle de Tamke et Buscher (2021) qui, en plus de respecter les contraintes souhaitées, nous apporte les informations nécessaires pour la suite des calculs. Cependant, considérer cet unique cas ne nous permet pas de formuler des conclusions générales : notre vision est donc restreinte. De plus, étant donné que les modèles de drones de livraison ne sont, pour la plupart, que des prototypes (P. Cassan, communication personnelle, 02 août 2022), la recherche des données relatives à cette nouvelle technologie est fastidieuse. Dès lors, de nombreuses hypothèses ont dû être formulées dans le cadre de la réalisation de ce mémoire. Aussi bien dans la littérature que sur le terrain, les informations sur les drones de livraison sont hasardeuses ou difficilement accessibles. Lorsque les drones seront plus largement implémentés, il sera probablement possible d'obtenir des informations plus pertinentes pour l'évaluation de ses impacts.

Enfin, il est à noter que les résultats obtenus ne prennent pas en compte la potentielle réduction du nombre de véhicules utilitaires nécessaires dans une flotte si nous considérons les livraisons à large échelle. En effet, les drones s'occupant d'une partie conséquente des livraisons, ceux-ci peuvent remplacer complètement une partie des VUL habituellement utilisés pour livrer les colis, réduisant ainsi davantage les coûts et les émissions CO₂e. Cette hypothèse est tout de même discutable étant donné que les drones peuvent être dans l'incapacité d'effectuer leurs vols lors de mauvaises conditions météorologiques, laissant les entreprises de livraison dans l'embarras. Le choix de se priver complètement de ces VUL n'est donc pas si simple. Cette problématique pourrait elle aussi faire l'objet d'une étude ultérieure.

6. Conclusions

Ces dernières années, une effervescence générale se manifeste autour des drones dans le cadre de la logistique du dernier kilomètre. Ces livraisons, qui représentent la partie la plus coûteuse dans la logistique d'un produit et qui sont responsables d'importantes émissions CO₂, font constamment l'objet de recherches et d'innovations dans le but de les améliorer. L'introduction des drones pour livrer certains clients permettrait de livrer les colis en moins de 30 minutes, mais également de réduire les coûts et les émissions CO₂ qui en découlent. Toujours au stade de prototypes, il est difficile d'affirmer ces hypothèses et c'est pourquoi ce mémoire étudie les impacts des drones de livraison en termes de coûts et d'environnement.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une revue de littérature sur l'introduction des drones dans la logistique du dernier kilomètre. Généreusement alimentée ces derniers temps, celle-ci nous apprend que plusieurs concepts sont envisageables : le "parallel drone scheduling travelling salesman problem" (PDSTSP) dans lequel les drones livrent les colis au départ d'un dépôt exclusivement, et le "flying sidekick travelling salesman problem" (FSTSP) dans lequel un camion et un ou plusieurs drones collaborent pour effectuer des livraisons. Les résultats obtenus à travers les différentes expérimentations montrent que ces deux concepts permettent de réduire le temps de livraison ainsi que les coûts opérationnels. Cette optimisation, qui peut atteindre jusqu'à 30% de réduction des coûts, varie toutefois en fonction des modèles proposés. En ce qui concerne les impacts environnementaux, la revue de littérature fait part de conclusions plus nuancées. En effet, dans le cadre d'un PDSTSP, la réduction des émissions CO₂ est dépendante du mix énergétique utilisé pour produire l'électricité, ne permettant ainsi une optimisation que lorsqu'ils remplacent des véhicules thermiques. D'un autre côté, Chiang et al. (2019) présente des réductions des émissions CO₂e d'en moyenne 20% dans le cadre d'un FSTSP.

Le nombre d'articles sur le FSTSP étant plus conséquent, nous avons décidé de nous baser sur ce concept pour notre étude comparative. Plus précisément, nous basons nos calculs sur les résultats de Tamke et Buscher (2021). Pour notre analyse, nous effectuons l'inventaire des coûts et des émissions CO₂e résultant de l'utilisation d'un VUL thermique, d'un VUL électrique et d'un drone. Ces données sont ensuite appliquées à trois scénarios : le VRP standard, le VRPD avec un drone et le VRP avec deux drones.

Les résultats montrent que le VRPD avec un drone permet de réduire le coût de revient par colis de 3% en moyenne alors que le VRPD avec deux drones ne présente presque aucune amélioration en comparaison avec le VRP standard. En cause : le prix d'achat des drones trop élevés. L'optimisation des coûts liés à l'introduction de drones dans la logistique du dernier kilomètre est donc dépendante du coût de fabrication de ces drones.

Ensuite, au niveau des résultats des impacts environnementaux, les deux VRPD offrent une réduction des émissions CO₂e. Avec une réduction de 8,5% suite à l'ajout d'un premier drone, et 4,4% après l'ajout du second, le VRPD avec un VUL thermique bénéficie le plus de cette collaboration. En effet, le cas avec un VUL électrique n'obtient que 5,5 et 1,5% de réduction lors de l'ajout de drones. Ces résultats dépendent également des émissions CO₂e relatives à la production de l'électricité utilisée, cette valeur varie entre 0 et 1,1 kgCO₂e en moyenne en Europe.

Pour conclure, les impacts en termes de coûts et d'environnement des drones de livraison sont globalement positifs. Les optimisations obtenues sont néanmoins dépendantes de la durée de vie des véhicules, du coût d'acquisition de cette nouvelle technologie ainsi que de la région dans laquelle ils sont déployés.

Annexes

Annexe 1 - Résultats des expérimentations de Tamke et Buscher (2021)

Annexe 2 - Coûts du VRP standard

Annexe 3 - Coûts du VRPD avec un drone (VUL)

Annexe 4 - Coûts du VRPD avec un drone (drone)

Annexe 5 - Coûts du VRPD avec deux drones (VUL)

Annexe 6 - Coûts du VRPD avec deux drones (drone)

Annexe 7 - Comparaison des coûts totaux du VUL et des drones en fonction du scénario

Annexe 8 - Liste des figures

Annexe 9 - Liste des tableaux

Annexe 1 - Résultats des expérimentations de Tamke et Buscher (2021)

$ C $	Instance	$ \bar{C} $	$ W $	Truck		Costs [\$]		
				Time [min]	Dist [km]	Wages	Fuel	Total
30	SF_30_1	22	5789	290.03	153.15	96.69	24.50	121.19
	SF_30_2	18	1393	330.72	187.26	110.25	29.96	140.21
	SF_30_3	19	1466	315.10	178.29	105.04	28.53	133.57
	SF_30_4	23	1236	337.82	184.52	112.61	29.52	142.14
	SF_30_5	21	1938	327.00	190.07	109.01	30.41	139.42
	SF_30_6	18	1588	324.42	183.67	108.15	29.39	137.54
	SF_30_7	20	2714	306.67	176.89	102.23	28.30	130.53
	SF_30_8	18	3901	281.42	163.23	93.81	26.12	119.93
	SF_30_9	20	4023	280.03	158.53	93.35	25.37	118.72
	SF_30_10	19	1594	343.77	200.57	114.60	32.09	146.69
Avg		19.8	2564.2	313.70	177.62	104.57	28.42	132.99
40	SF_40_1	26	7012	351.95	193.77	117.33	31.00	148.33
	SF_40_2	29	6291	351.08	184.20	117.04	29.47	146.51
	SF_40_3	25	6055	359.02	199.14	119.68	31.86	151.54
	SF_40_4	28	8452	337.88	171.67	112.64	27.47	140.10
	SF_40_5	26	5026	363.95	197.57	121.33	31.61	152.94
	SF_40_6	25	4796	375.78	202.95	125.27	32.47	157.74
	SF_40_7	22	5642	370.98	190.17	123.67	30.43	154.10
	SF_40_8	29	7113	367.85	187.38	122.63	29.98	152.61
	SF_40_9	37	7139	377.13	203.96	125.72	32.63	158.35
	SF_40_10	27	5144	358.42	186.91	119.48	29.91	149.39
Avg		27.4	6267.0	361.40	191.77	120.48	30.68	151.16
50	SF_50_1	29	9792	407.40	211.05	135.81	33.77	169.58
	SF_50_2	41	10169	455.78	230.59	151.94	36.89	188.83
	SF_50_3	33	11278	412.35	213.13	137.46	34.10	171.56
	SF_50_4	33	10573	416.78	213.74	138.94	34.20	173.14
	SF_50_5	34	16652	414.42	213.56	138.15	34.17	172.32
	SF_50_6	36	18007	401.65	205.79	133.89	32.93	166.82
	SF_50_7	31	7793	453.87	229.16	151.30	36.67	187.97
	SF_50_8	29	9707	406.98	212.18	135.67	33.95	169.62
	SF_50_9	31	19755	406.72	199.94	135.58	31.99	167.57
	SF_50_10	36	15933	419.12	207.15	139.72	33.14	172.86
Avg		33.3	12965.9	419.51	213.63	139.85	34.18	174.03

Informations détaillées sur les résultats du VRP sans drone (Tamke & Buscher, 2021)

Annexe 1 (suite) - Résultats des expérimentations de Tamke et Buscher (2021)

C	Instance	Truck		Drone			Costs [\$]				ΔTO [%]		
		Time [min]	Dist [km]	#OP	Dist [km]	#CC	Wages	Fuel	Power	Total	Wages	Fuel	Total
30	SF_30_1	254.97	145.46	6.00	32.72	2.70	85.00	23.27	0.24	108.51	-12.09	-5.02	-10.46
	SF_30_2	285.51	168.06	6.00	37.31	2.97	95.18	26.89	0.26	122.33	-13.67	-10.25	-12.75
	SF_30_3	278.23	167.54	5.00	32.58	2.58	92.75	26.81	0.23	119.78	-11.70	-6.03	-10.32
	SF_30_4	288.59	159.08	5.00	43.41	3.37	96.20	25.45	0.30	121.95	-14.57	-13.79	-14.20
	SF_30_5	274.23	159.48	6.00	36.31	3.04	91.42	25.52	0.27	117.20	-16.14	-16.08	-15.94
	SF_30_6	279.59	163.71	6.00	39.93	3.12	93.20	26.19	0.27	119.67	-13.82	-10.89	-12.99
	SF_30_7	261.63	161.68	7.00	41.20	3.15	87.22	25.87	0.28	113.36	-14.68	-8.59	-13.15
	SF_30_8	243.97	146.39	6.00	29.32	2.32	81.33	23.42	0.20	104.96	-13.30	-10.34	-12.48
	SF_30_9	240.87	149.09	6.00	34.41	2.71	80.30	23.86	0.24	104.39	-13.98	-5.95	-12.07
	SF_30_10	299.70	187.15	6.00	44.30	3.28	99.91	29.94	0.29	130.14	-12.82	-6.70	-11.28
Avg		270.73	160.76	5.90	37.15	2.92	90.25	25.72	0.26	116.23	-13.68	-9.36	-12.56
40	SF_40_1	301.64	167.78	9.00	42.17	3.54	100.56	26.84	0.31	127.71	-14.29	-13.42	-13.90
	SF_40_2	300.20	164.11	8.00	42.09	3.46	100.07	26.26	0.30	126.63	-14.50	-10.89	-13.57
	SF_40_3	310.97	176.87	7.00	39.47	2.97	103.67	28.30	0.26	132.23	-13.38	-11.17	-12.74
	SF_40_4	280.11	153.82	8.00	39.60	3.40	93.38	24.61	0.30	118.29	-17.10	-10.41	-15.57
	SF_40_5	298.85	170.02	8.00	41.18	3.33	99.62	27.20	0.29	127.12	-17.89	-13.95	-16.88
	SF_40_6	307.60	172.33	7.00	46.97	3.67	102.54	27.57	0.32	130.44	-18.14	-15.09	-17.31
	SF_40_7	316.63	175.07	7.00	49.53	3.83	105.55	28.01	0.34	133.90	-14.65	-7.95	-13.11
	SF_40_8	301.53	169.67	9.00	46.79	3.64	100.52	27.15	0.32	127.99	-18.03	-9.44	-16.13
	SF_40_9	315.48	179.51	8.00	44.42	3.49	105.17	28.72	0.31	134.20	-16.35	-11.98	-15.25
	SF_40_10	309.85	171.45	9.00	44.56	3.43	103.29	27.43	0.30	131.02	-13.55	-8.29	-12.30
Avg		304.29	170.06	8.00	43.68	3.48	101.44	27.21	0.31	128.95	-15.79	-11.26	-14.68
50	SF_50_1	356.03	197.39	10.00	49.44	4.15	118.68	31.58	0.36	150.63	-12.61	-6.49	-11.17
	SF_50_2	367.72	191.66	9.00	53.40	4.18	122.58	30.67	0.37	153.62	-19.32	-16.86	-18.65
	SF_50_3	348.02	182.93	11.00	52.00	4.24	116.01	29.27	0.37	145.66	-15.60	-14.16	-15.10
	SF_50_4	356.84	192.77	11.00	53.63	4.31	118.95	30.84	0.38	150.18	-14.39	-9.82	-13.26
	SF_50_5	348.54	184.23	10.00	49.66	3.99	116.19	29.48	0.35	146.02	-15.90	-13.73	-15.26
	SF_50_6	349.67	187.73	10.00	46.47	3.86	116.56	30.04	0.34	146.94	-12.94	-8.78	-11.92
	SF_50_7	383.20	208.28	11.00	53.96	4.41	127.74	33.33	0.39	161.46	-15.57	-9.11	-14.10
	SF_50_8	336.55	186.18	10.00	49.22	4.30	112.19	29.79	0.38	142.36	-17.31	-12.25	-16.07
	SF_50_9	333.30	176.90	11.00	45.44	3.82	111.11	28.30	0.34	139.75	-18.05	-11.53	-16.60
	SF_50_10	347.95	187.16	12.00	47.09	3.91	115.99	29.95	0.34	146.28	-16.98	-9.63	-15.38
Avg		352.78	189.52	10.50	50.03	4.12	117.60	30.33	0.36	148.29	-15.87	-11.24	-14.75

Informations détaillées sur les résultats du VRPD avec un drone (Tamke & Buscher, 2021)

Annexe 1 (suite) - Résultats des expérimentations de Tamke et Buscher (2021)

C	Instance	Truck		Drone			Costs [\$]				ΔTO [%]		
		Time [min]	Dist [km]	#OP	Dist [km]	#CC	Wages	Fuel	Power	Total	Wages	Fuel	Total
30	SF_30_1	245.28	139.65	5.00	29.18	2.36	81.77	22.34	0.42	104.53	-15.43	-8.82	-13.75
	SF_30_2	266.55	160.80	4.50	31.24	2.42	88.86	25.73	0.43	115.01	-19.40	-14.12	-17.97
	SF_30_3	259.20	150.09	4.50	35.85	2.73	86.41	24.01	0.48	110.90	-17.74	-15.84	-16.97
	SF_30_4	256.93	150.56	4.50	32.89	2.73	85.65	24.09	0.48	110.22	-23.94	-18.39	-22.46
	SF_30_5	251.92	154.17	4.50	32.37	2.52	83.98	24.67	0.44	109.09	-22.96	-18.88	-21.75
	SF_30_6	254.83	160.57	5.50	37.92	2.89	84.95	25.69	0.51	111.15	-21.45	-12.59	-19.19
	SF_30_7	240.90	155.17	5.00	32.22	2.44	80.31	24.83	0.43	105.56	-21.44	-12.26	-19.13
	SF_30_8	224.10	143.60	5.50	28.71	2.25	74.71	22.98	0.40	98.08	-20.36	-12.02	-18.22
	SF_30_9	226.10	144.94	5.50	28.53	2.25	75.37	23.19	0.40	98.96	-19.26	-8.59	-16.64
	SF_30_10	278.35	173.06	4.50	34.70	2.62	92.79	27.69	0.46	120.94	-19.03	-13.71	-17.55
Avg		250.42	153.26	4.90	32.36	2.52	83.48	24.52	0.45	108.44	-20.10	-13.52	-18.36
40	SF_40_1	279.58	158.84	6.50	38.19	3.04	93.20	25.42	0.53	119.15	-20.57	-18.00	-19.67
	SF_40_2	273.50	161.93	8.00	37.25	3.11	91.18	25.91	0.55	117.63	-22.10	-12.08	-19.71
	SF_40_3	285.22	170.34	6.00	29.94	2.40	95.08	27.25	0.42	122.76	-20.55	-14.47	-18.99
	SF_40_4	257.80	140.10	6.00	34.85	2.70	85.94	22.42	0.47	108.83	-23.70	-18.38	-22.32
	SF_40_5	269.82	162.64	6.50	36.70	2.91	89.95	26.02	0.51	116.48	-25.86	-17.68	-23.84
	SF_40_6	279.72	164.11	6.00	39.21	3.06	93.25	26.26	0.54	120.04	-25.56	-19.13	-23.90
	SF_40_7	292.78	165.86	6.50	39.65	3.17	97.60	26.54	0.56	124.70	-21.08	-12.78	-19.08
	SF_40_8	276.57	160.56	7.00	39.34	3.05	92.20	25.69	0.54	118.42	-24.92	-14.51	-22.53
	SF_40_9	282.51	166.69	7.00	39.64	3.20	94.18	26.67	0.56	121.41	-25.09	-18.27	-23.33
	SF_40_10	277.64	158.55	6.50	37.88	2.93	92.56	25.37	0.52	118.44	-22.53	-15.18	-20.72
Avg		277.51	160.96	6.60	37.27	2.96	92.51	25.76	0.52	118.79	-23.20	-16.05	-21.41
50	SF_50_1	317.33	172.32	6.50	41.43	3.16	105.78	27.57	0.55	133.91	-22.11	-18.36	-21.03
	SF_50_2	338.44	185.44	8.00	45.45	3.53	112.82	29.67	0.62	143.11	-24.98	-20.20	-23.70
	SF_50_3	320.17	171.51	9.00	46.13	3.71	106.73	27.44	0.65	134.83	-23.74	-19.93	-22.61
	SF_50_3	324.07	177.92	7.50	44.85	3.60	108.03	28.47	0.63	137.13	-22.25	-16.75	-20.80
	SF_50_5	319.27	174.94	8.00	39.97	3.23	106.43	27.99	0.57	134.99	-22.96	-18.09	-21.66
	SF_50_6	313.15	179.69	8.50	40.57	3.26	104.39	28.75	0.57	133.71	-22.03	-12.69	-19.85
	SF_50_7	352.63	198.73	8.50	45.71	3.66	117.55	31.80	0.64	149.99	-22.31	-13.28	-20.21
	SF_50_8	307.89	171.80	8.50	44.53	3.66	102.64	27.49	0.64	130.77	-24.35	-19.03	-22.90
	SF_50_9	304.77	159.27	8.00	42.20	3.47	101.60	25.48	0.61	127.69	-25.06	-20.35	-23.80
	SF_50_10	319.18	170.19	9.00	42.41	3.49	106.40	27.23	0.61	134.24	-23.85	-17.83	-22.34
Avg		321.69	176.18	8.15	43.33	3.48	107.24	28.19	0.61	136.04	-23.36	-17.65	-21.89

Informations détaillées sur les résultats du VRP sans drone (Tamke & Buscher, 2021)

Annexe 2 - Coûts du VRP standard

Coûts du VRP standard		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario 1		
Nombre de localisations	50 clients	
Distance parcourue	213,63 km	
Durée	419,51 min = 6,9918 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 213,63 km = 42 726 km/an	
Rémunération		
Coût salarial	16,0745 €/h	
Coût total	6,9918 * 16,0745 = 112,3897 €	
Coût des rémunérations	112,3897 / 213,63 = 0,5261 €/km	
Amortissement du véhicule		
Amortissement véhicule (300,000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Entretien		
Coût entretien par kilomètre	0,0858 €/km	
Coût par kilomètre des pneus	0,0101 €/km	
Coût des entretiens	0,0858 + 0,0091 = 0,0959 €/km	
Assurance		
Coût assurance annuelle	1 200,00 €	
Taxe annuelle de circulation	148,76 €	
Coût assurances & taxes	(1 200 + 148,76) / 42 726 = 0,0316 €/km	
Carburant		
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultats		
Coût total par kilomètre	0,5261 + 0,1183 + 0,0959 + 0,0316 + 0,1441 = 0,9160 €/km	0,5261 + 0,2333 + 0,0959 + 0,0316 + 0,0438 = 0,9307 €/km
Coût total des livraisons	0,916 * 213,63 = 195,6851 €	0,9307 * 213,63 = 198,8254 €
Coût de revient par colis	195,6851 / 50 = 3,9137 €/colis	195,6851 / 50 = 3,9765 €/colis

Annexe 3 - Coûts du VRPD avec un drone (VUL)

Coûts du VRPD avec un drone (VUL)		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario		
Nombre de localisations	50 - 10,5 = 39,5 clients	
Distance parcourue	189,52 km	
Durée	352,78 - 10,50 = 342,28 = 5,7047 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 189,52 km = 37 904,00 km/an	
Rémunération		
Coût salarial	16,0745 €/h	
Coût total	5,7047 * 16,0745 = 91,7002 €	
Coût des rémunérations	91,7002 / 189,52 = 0,4839 €/km	
Amortissement du véhicule		
Amortissement véhicule (300,000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Entretien		
Coût des entretiens	0,0858 + 0,0091 = 0,0959 €/km	
Assurance		
Coût assurances & taxes	(1 200 + 148,76) / 37 904,00 = 0,0356 €/km	
Carburant		
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultat		
Coût total par kilomètre	04839 + 0,1183 + 0,0959 + 0,0356 + 0,1441 = 0,8778 €/km	0,4839 + 0,2333 + 0,0959 + 0,0356 + 0,0438 = 0,8925 €/km
Coût total des livraisons	0,8778 * 189,52 = 166,3606 €	0,8925 * 189,52 = 169,1466 €
Coût de revient par colis	195,6851 / 39,5 = 4,2117 €/colis	169,1466 / 39,5 = 4,2822 €/colis

Annexe 4 - Coûts du VRPD avec un drone (drone)

Coûts du VRPD avec un drone (drone)	
Données du scénario 2	
<i>Nombre de localisations</i>	10,5 clients
<i>Distance parcourue</i>	50,03 km
<i>Durée</i>	10,5 min = 0,175 h
<i>Kilométrage annuel (estimation)</i>	200 jours * 50,03 km = 10 006 km/an
<i>Nombre de cycles (batterie)</i>	4,12 cycles
<i>Nombre de kilomètre par cycle</i>	12,1432 km/cycle
Rémunération	
<i>Coût salarial</i>	16,0745 €/h
<i>Coût total</i>	0,175 * 16,0745 = 2,8130 €
<i>Coût des rémunérations</i>	2,8130 / 50,03 = 0,0562 €/km
Amortissement du drone	
<i>Amortissement véhicule (3 ans)</i>	10 000 / 30 018 = 0,3331 €/km
Entretien	
<i>Remplacement batterie/amortissement</i>	1,6121 €/cycle
<i>Coût remplacement batterie par km</i>	1,6121 / 12,1432 = 0,1309 €/km
<i>Coût entretien divers</i>	300 / 10 006 = 0,0300 €/km
Assurance & Logiciel	
<i>Coût assurance</i>	350 €
<i>Coût logiciel</i>	420 €
<i>Coût assurances & taxes</i>	770 / 10 006 = 0,0770 €/km
Carburant / Electricité	
<i>Coût par cycle</i>	0,1411 €/cycle
<i>Coût total</i>	0,1411 * 4,12 = 0,5813 €
<i>Coût du carburant / énergie</i>	0,5813 / 50,03 = 0,0116 €/km
Résultat	
<i>Coût total par kilomètre</i>	0,0562 + 0,3331 + 0,1309 + 0,0300 + 0,0770 + 0,0116 = 0,6388 €/km
<i>Coût total des livraisons</i>	0,6388 * 50,03 = 31,9592 €
<i>Coût de revient par colis</i>	31,9592 / 10,5 = 3,0438 €/colis

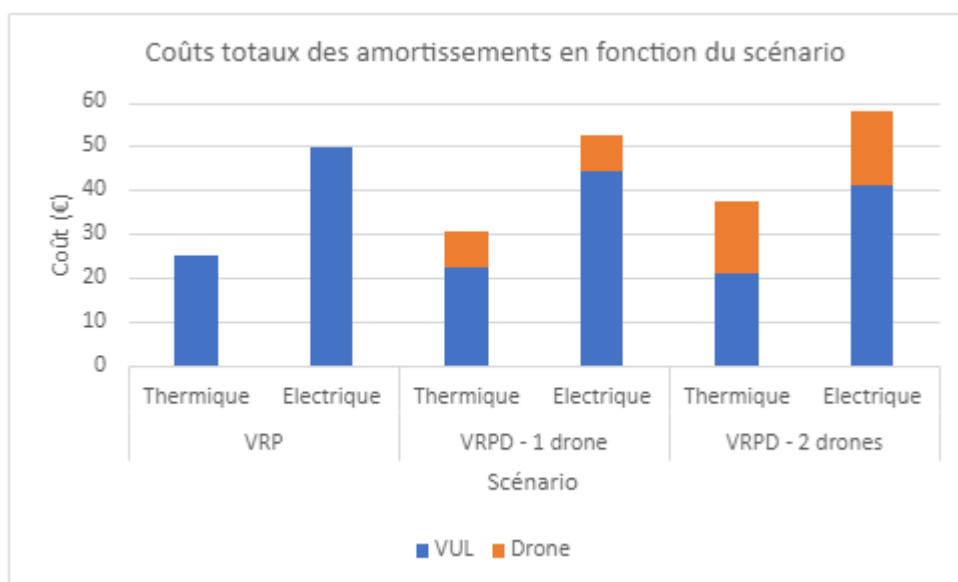
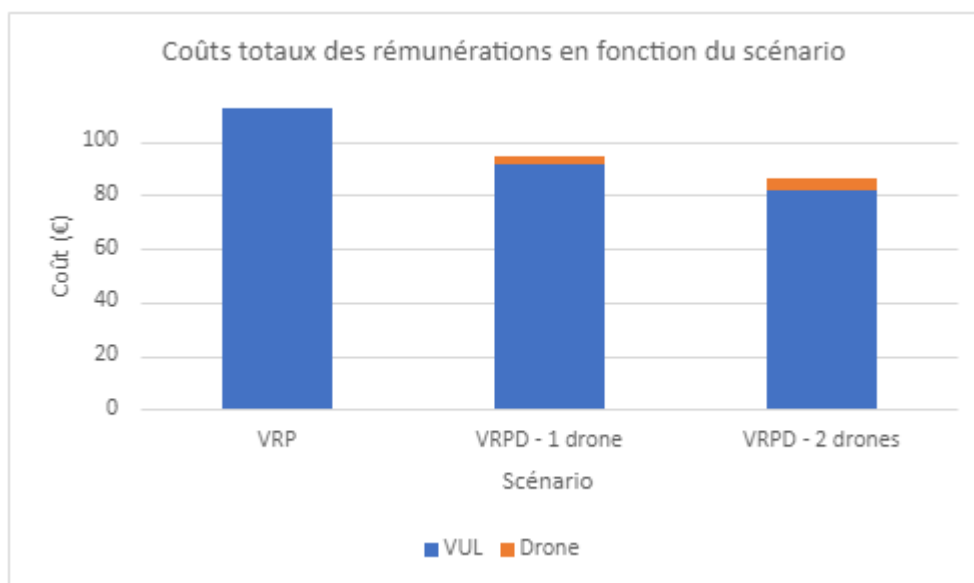
Annexe 5 - Coûts du VRPD avec deux drones (VUL)

Coûts du VRPD avec deux drones (VUL)		
Titre	VUL thermique	VUL électrique
Données du scénario 3		
Nombre de localisations	50 - (8,15 * 2) = 33,7 clients	
Distance parcourue	176,18 km	
Durée	321,69 - 16,3 = 305,39 min = 5,0898 h	
Kilométrage annuel (estimation)	200 jours * 176,18 km = 35 236,00 km/an	
Rémunération		
Coût salarial	16,0745 €/h	
Coût total	5,0898 * 16,0745 = 81,8160 €	
Coût des rémunérations	81,8160 / 176,18 = 0,4644 €/km	
Amortissement du véhicule		
Amortissement véhicule (300,000 km)	0,1183 €/km	0,2333 €/km
Entretien		
Coût des entretiens	0,0858 + 0,0091 = 0,0959 €/km	
Assurance		
Coût assurances & taxes	(1 200 + 148,76) / 35 236,00 = 0,0383 €/km	
Carburant		
Coût du carburant / énergie	0,1441 €/km	0,0438 €/km
Résultat		
Coût total par kilomètre	0,4644 + 0,1183 + 0,0959 + 0,0383 + 0,1441 = 0,8610 €/km	0,4644 + 0,2333 + 0,0959 + 0,0383 + 0,0438 = 0,8757 €/km
Coût total des livraisons	0,8610 * 176,18 = 151,6910 €	0,8757 * 176,18 = 154,2808 €
Coût de revient par colis	151,3610 / 33,7 = 4,4914 €/colis	154,2808 / 33,7 = 4,5781 €/colis

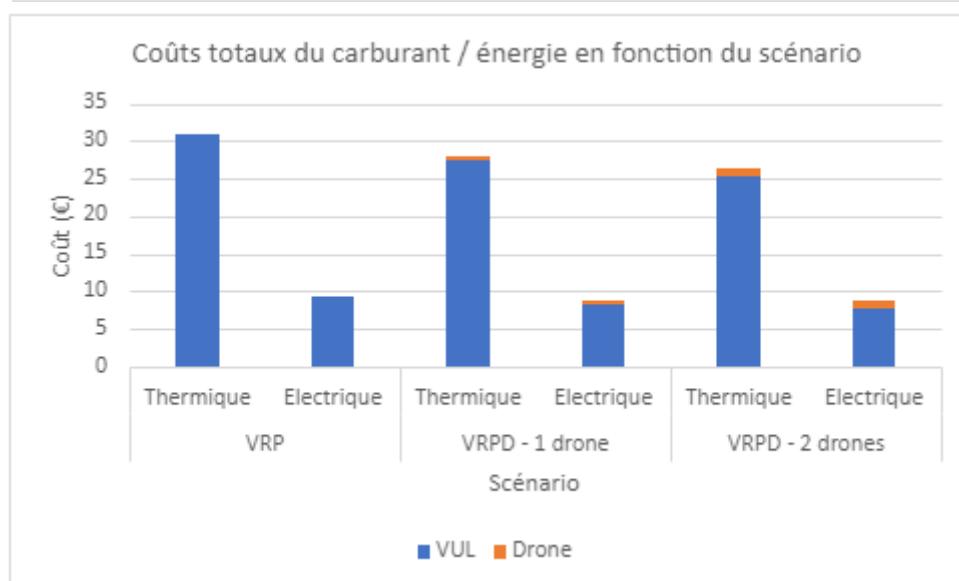
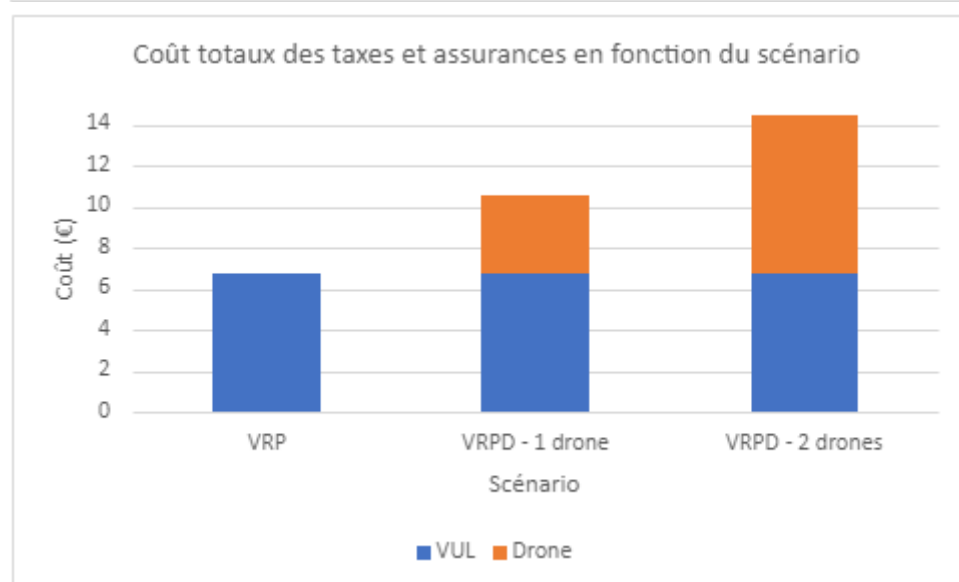
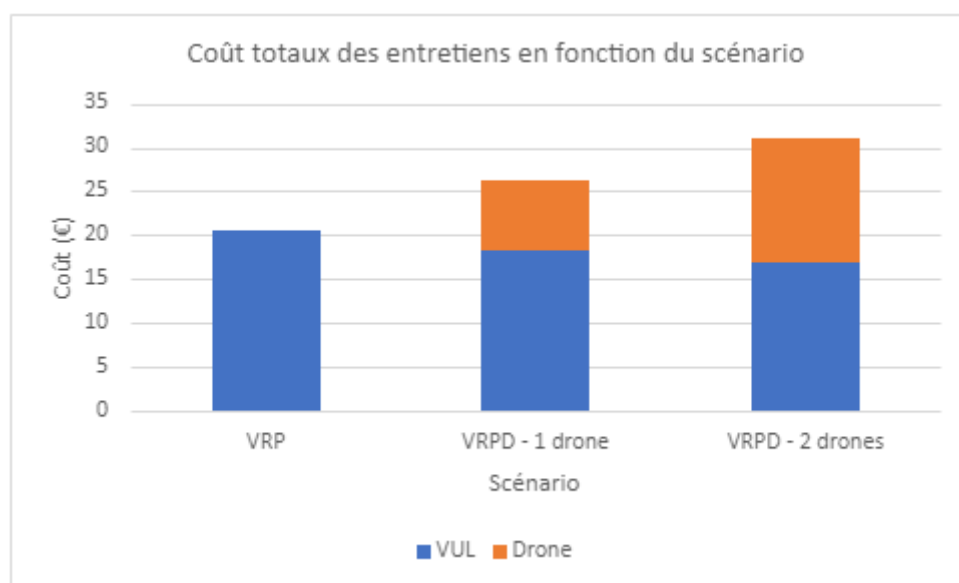
Annexe 6 - Coûts du VRPD avec deux drones (drone)

Coûts du VRPD avec deux drones (drone)	
Données du scénario 3	
<i>Nombre de localisations</i>	16,3 clients
<i>Distance parcourue</i>	86,66 km
<i>Durée</i>	16,3 min = 0,2717 h
<i>Kilométrage annuel (estimation)</i>	200 jours * 86,66 km = 17 332 km/an
<i>Nombre de cycles (batterie)</i>	6,96 cycles
<i>Nombre de kilomètre par cycle</i>	12,4511 km/cycle
Rémunération	
<i>Coût salarial</i>	16,0745 €/h
<i>Coût total</i>	0,2717 * 16,0745 = 4,3674 €
<i>Coût des rémunérations</i>	4,3674 / 86,66 = 0,0504 €/km
Amortissement du drone	
<i>Amortissement véhicule (3 ans)</i>	10 000 / 51 996 = 0,1923 €/km
Entretien	
<i>Remplacement batterie/amortissement</i>	1,6121 €/cycle
<i>Coût remplacement batterie par km</i>	1,6121 / 12,4511 = 0,1295 €/km
<i>Coût entretien divers</i>	600 / 17 332 = 0,0346 €/km
Assurance & Logiciel	
<i>Coût assurance</i>	700 €
<i>Coût logiciel</i>	840 €
<i>Coût assurances & taxes</i>	1 540 / 17 332 = 0,0888 €/km
Carburant / Electricité	
<i>Coût par cycle</i>	0,1411 €/cycle
<i>Coût total</i>	0,1411 * 6,96 = 0,9821 €
<i>Coût du carburant / énergie</i>	0,9821 / 86,66 = 0,0113 €/km
Résultat	
<i>Coût total par kilomètre</i>	0,0504 + 0,1923 + 0,1295 + 0,0346 + 0,0888 + 0,0113 = 0,5069 €/km
<i>Coût total des livraisons</i>	0,5069 * 86,66 = 43,9280 €
<i>Coût de revient par colis</i>	43,9280 / 16,3 = 2,6950 €/colis

Annexe 7 - Comparaison des coûts totaux du VUL et des drones en fonction du scénario



Annexe 7 (suite) - Comparaison des coûts totaux du VUL et des drones en fonction du scénario



Annexe 8 - Liste des figures

Figure 1 - Représentation d'un VRP (<i>Vehicle Routing Problem</i> , s. d.)	14
Figure 2 - Comparaison des temps de livraison du PDSTSP et du FSTSP avec une majorité de clients accessibles par drone	17
Figure 3 - Comparaison des temps de livraison du PDSTSP et du FSTSP avec seulement deux clients accessibles par drone	17
Figure 4 - HorseFly Routing Problem : le camion ne livre que deux clients (Carlsson & Song, 2018)	22
Figure 5 - Distribution de toutes les localisations des clients possibles (points) et du dépôt (triangle dans le coin inférieur droit) (Tamke & Buscher, 2021)	24
Figure 6 - Coût de revient par colis en fonction de la durée de vie du VUL	33
Figure 7 - Coût de revient par colis en fonction du prix d'achat du drone (VRPD - 1 drone)	36
Figure 8 - Coût de revient par colis en fonction du prix d'achat du drone (VRPD avec deux drones)	37
Figure 9 - Coût de revient par colis en fonction du scénario et du prix des drones	37
Figure 10 - Comparaison des composantes des coûts liés au VUL thermique (a), électrique (b) et au drone ©	39
Figure 11 - Cycle de vie du carburant (WTW) (Greene & Lewis, 2019)	41
Figure 12 - Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un VUL vendu en 2020 en Europe (gCO ₂ e/km) - VTH = véhicule thermique ; VEB = Véhicule à Batteries (Amant & Meunier, 2020)	46
Figure 13 - Comparaison des émissions CO ₂ e par colis des trois scénarios	51
Figure 14 - Comparaison des émissions CO ₂ e et des coûts de revient par colis des trois scénarios	52

Annexe 9 - Liste des tableaux

Tableau 1 - Résumé des publications liées au drone de livraison	26
Tableau 2 - Coût des rémunérations	28
Tableau 3 - Coût lié à l'amortissement des véhicules	28
Tableau 4 - coût relatif aux pneus	29
Tableau 5 - Coût par kilomètre de l'énergie d'un VUL	30
Tableau 6 - Coût du VRP standard	33
Tableau 7 - Coût d'un VUL pour le VRPD avec un drone	34
Tableau 8 - Coût du drone pour le VRPD avec un drone	35
Tableau 9 - Coût de revient par colis pour le VRPD avec un drone	35
Tableau 10 - Coût d'un VUL pour le VRPD avec deux drones	36
Tableau 11 - Coût des drones pour le VRPD avec deux drones	37
Tableau 12 - Coût de revient par colis pour le VRPD avec deux drones	37
Tableau 13 - Émissions CO ₂ e liées à la fabrication d'un VUL (ADEME, s. d.)	45
Tableau 14 - Partie des émissions liées à la fabrication d'une batterie en fonction du pays (Romare & Dahllöf, 2017)	47
Tableau 15 - Émissions CO ₂ e pour le VRP	49
Tableau 16 - Émissions CO ₂ e pour le VRPD avec un drone	50
Tableau 17 - Émissions CO ₂ e pour le VRPD avec deux drones	51

Bibliographie et références

- Acteos. (2015, novembre 2). *Infographie : Entre économie et écologie, la problématique du dernier kilomètre de livraison*. <https://www.acteos.fr/blog/infographie-problematique-dernier-km/>
- ADEME. (s. d.). *Documentation Base Carbone*. Consulté 11 août 2022, à l'adresse https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?transport_routier_de_marchandi.htm
- ADEME. (2022). *Accueil*. Agence de la transition écologique. <https://www.ademe.fr/>
- Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Science*, 52(4), 965-981. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0791>
- Albouzeet, B., & Kasbari, M. (2020). *Faisabilité de la livraison de colis par drone électrique dans des sites isolés et impact écologique—Projet SHERPA*. La librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/4623-faisabilite-de-la-livraison-de-colis-par-drone-electrique-dans-des-sites-isoles-et-impact-ecologique-projet-sherpa.html>
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K., Nguyen, T., Bektas, T., Bates, O., Friday, A., Wise, S., & Austwick, M. (2017). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas : The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>
- Amant, S., & Meunier, N. (2020). *Comparaison des émissions en cycle de vie, France et Europe*. 52.
- Anderluh, A., Hemmelmayr, V. C., & Nolz, P. C. (2017). Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Central European Journal of Operations Research*, 25(2), 345-376. <https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z>
- APCC. (2022). *Association des Pro. En Conseil Climat, Energie et Environnement (APCC)*. <https://apc-climat.fr/>
- Arnold, F., Cardenas, I., Sörensen, K., & Dewulf, W. (2018). Simulation of B2C e-commerce distribution

- in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0272-6>
- Association pour la transition Bas Carbone. (2022). *Excel ou logiciel, Bilan Carbone ou SM-GES ? Découvrez nos solutions*. ABC. <https://abc-transitionbascarbone.fr/agir/nos-solutions-et-outils/>
- Assurance drone professionnel : Quelles obligations ?* (2016). ASSURANCE DRONE - Récréatif & Professionnel. <https://www.assurance-drone.be/drone-professionnel/>
- Barenco, G. (2018). *Les drones dans le domaine de la logistique*. <https://sonar.ch/global/documents/314777>
- Berg, P. W., Isaacs, S., & Blodgett, K. L. (2016). *Airborne fulfillment center utilizing unmanned aerial vehicles for item delivery* (United States Patent N° US9305280B1). <https://patents.google.com/patent/US9305280B1/en>
- Bonspneus.fr*. (s. d.). Consulté 14 août 2022, à l'adresse <https://www.bonspneus.fr/fr/products/TyreByKey/>
- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts : A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1-58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>
- Camions*. (2022). Belgium.be. https://www.belgium.be/fr/mobilite/vehicules/types_fr/camions
- Capital. (2017, mai 31). *Livraison par drone : La Poste bat Amazon !* <https://www.capital.fr/conso/livraison-par-drone-la-poste-bat-amazon-1230279>
- Carlsson, J. G., & Song, S. (2018). Coordinated Logistics with a Truck and a Drone. *Management Science*, 64(9), 4052-4069. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2824>
- Chang, Y. S., & Lee, H. J. (2018). Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route. *Expert Systems with Applications*, 104, 307-317. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.032>
- Chatting, M. (2018). *A Comparison of Exact and Heuristic Algorithms to Solve the Travelling Salesman*

Problem. 40.

Chiang, W.-C., Li, Y., Shang, J., & Urban, T. L. (2019). Impact of drone delivery on sustainability and cost : Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization. *Applied Energy*, 242, 1164-1175. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.117>

Ćirović, G., Pamučar, D., & Božanić, D. (2014). Green logistic vehicle routing problem : Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4245-4258. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.01.005>

CNN, B. D. G. (2013, décembre 2). *Amazon's drone delivery : How would it work?*
<https://www.cnn.com/2013/12/02/tech/innovation/amazon-drones-questions/index.html>

Compareur assurance auto / mon-auto-assure.com. (s. d.). Consulté 27 juillet 2022, à l'adresse
<https://compareur.mon-auto-assure.com/app/v2/assurance-auto-5e3059a173492/restituti on/v2/1e2c2165-e79e-41bd-a42a-663e9421c617#/>

Cushman & Wakefield. (2019, novembre 20). *Last Link—Quantifying the cost.*
https://issuu.com/cushwake_be/docs/cus42002904_last_link_report_v17

Customized UAV Drone Battery. (s. d.). Grepow. Consulté 14 août 2022, à l'adresse
<https://www.grepow.com/page/uav-battery.html#2>

Demarque, J. (2021, août 13). *La logistique du dernier kilomètre et ses enjeux : Le guide complet.*
Shippr.
<https://shippr.io/blog/la-logistique-du-dernier-kilometre-et-ses-enjeux-le-guide-complet/>

Deutsch, Y., & Golany, B. (2018). A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 251-261.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1395490>

DPD. (2021, juin 9). *DPD UK double sa flotte de véhicules électriques.* DPDgroup.
<https://www.dpd.com/group/fr/news/dpd-doubles-ev-fleet-to-almost-1500-with-uks-first-m axis-e-deliver-electric-van-order/>

DPD. (2022). *La livraison par drone.*

<https://www.dpd.com/fr/fr/expedier-des-colis/nos-services-innovants/livraison-drone/>

Drone Geofencing. (s. d.). *L'offre du logiciel de gestion de drones GESTADRONE, tarifs et fonctionnalités du logiciel*. Consulté 10 août 2022, à l'adresse <https://drone-geofencing.fr/logiciel-de-gestion-de-drones/>

Durée de vie pneu : Lequel a la meilleure longévité ? (s. d.). Tiregom. Consulté 28 juillet 2022, à l'adresse <https://www.tiregom.fr/guide/auto/pneu-voiture/choisir/longevite>

European Environment Agency. (2022a). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation* [Data Visualization]. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-10/#tab-googlechartid_googlechartid_googlechartid_chart_1111

European Environment Agency. (2022b). *Life cycle assessment* [Term]. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/life-cycle-assessment>

Eurostat. (2022). *Electricity price statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics

Faugere, L., & Montreuil, B. (2017, juillet 4). *Hyperconnected Pickup & Delivery Locker Networks*.

French, S. (2021, septembre 2). A2Z's RDSX delivery drone is on sale now (but it won't be cheap). *The Drone Girl*. <https://www.thedronegirl.com/2021/09/02/a2z-rdsx-delivery-drone/>

Geneste, G. (2020, juillet 1). VUL électriques : Tous les modèles du marché. *Transport Info*. <https://www.transportinfo.fr/vul-electriques-tous-les-modeles-du-marche/>

Global retail e-commerce sales growth. (2022). Statista. <https://www.statista.com/statistics/288487/forecast-of-global-b2c-e-commerce-growth/>

Goodchild, A., & Toy, J. (2018). Delivery by drone : An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.017>

- Greene, S., & Lewis, A. (2019). *Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting, version 2.0*.
- Greenhouse Gas Protocol. (s. d.). *We set the standards to measure and manage emissions*. Consulté 15 août 2022, à l'adresse <https://ghgprotocol.org/>
- Gutin, G., & Punnen, A. P. (2006). *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. Springer Science & Business Media.
- Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H. (2018). On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 597-621. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.11.015>
- Ham, A. M. (2018). Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 91, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.025>
- Hexadrone. (s. d.). *Batterie 22000 mAh 44,4 V 25C 12S - TATTU PLUS*. Consulté 14 août 2022, à l'adresse <https://hexadrone.fr/batteries-lithium/2139-batterie-22000-mah-444-v-25c-12s-tattu-plus.html>
- Iddenden, G. (2022, avril 8). Amazon's drone delivery will cost the company \$63 per drop. *Latest Retail Technology News From Across The Globe - Charged*. <https://www.chargedretail.co.uk/2022/04/08/amazon-prime-air-drone-delivery/>
- ISO 14040:2006 : *Analyse du cycle de vie—Principes et cadre*. (2006). Plateforme de consultation en ligne (OBP). <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>
- Iwan, S., Kijewska, K., & Lemke, J. (2016). Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland. *Transportation Research Procedia*, 12, 644-655. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018>
- Kees, J., Marc, R., Jerome, B., Sumit, C., Shannon, W., Lindsey, M., Amol, K., & Yashwardhan, K. (2019). The Last-Mile Delivery Challenge. *Capgemini*.

- <https://www.capgemini.com/insights/research-library/the-last-mile-delivery-challenge/>
- Kirschstein, T. (2020). Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102209. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102209>
- Lammert, M., & Walkowicz, K. (2012). *Thirty-Six Month Evaluation of UPS Diesel Hybrid-Electric Delivery Vans* (NREL/TP-5400-53503, 1039822; p. NREL/TP-5400-53503, 1039822). <https://doi.org/10.2172/1039822>
- Laporte, G., Ropke, S., & Vidal, T. (2014). Chapter 4 : Heuristics for the Vehicle Routing Problem. In *Vehicle Routing* (p. 87-116). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.ch4>
- Lin, C. K. Y. (2011). A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. *Computers & Operations Research*, 38(11), 1596-1609. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.01.021>
- Maxus. (2022). *Deliver9*. <https://www.maxusmotors.be/fr/modeles/deliver9>
- McFarland, M. (2017, février 14). *Amazon's delivery drones may drop packages via parachute*. CNNMoney. <https://money.cnn.com/2017/02/14/technology/amazon-drone-patent/index.html>
- Morganti, E., Seidel, S., Blanquart, C., Dablanc, L., & Lenz, B. (2014). The Impact of E-commerce on Final Deliveries : Alternative Parcel Delivery Services in France and Germany. *Transportation Research Procedia*, 4, 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.014>
- Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem : Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86-109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005>
- Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles : Review and Research Perspectives. *Transportation Science*, 50, 3-22. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0646>

- Ponza, A. (2016). *Optimization of drone-assisted parcel delivery*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24444.56962>
- Raptopoulos, A. (2013). *Andreas Raptopoulos : No roads? There's a drone for that*. TED Talk.
https://www.ted.com/talks/andreas_raptopoulos_no_roads_there_s_a_drone_for_that
- Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment. Part 1 : Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Rolim, C., Gonçalves, G., Farias, T., & Rodrigues, Ó. (2012). Impacts of Electric Vehicle Adoption on Driver Behavior and Environmental Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 706-715. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.788>
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. 58.
- Rose, C. (2013, décembre 1). *Amazon's Jeff Bezos looks to the future*. CBS News.
<https://www.cbsnews.com/news/amazons-jeff-bezos-looks-to-the-future/>
- Schliwa, G., Armitage, R., Aziz, S., Evans, J., & Rhoades, J. (2015). Sustainable city logistics—Making cargo cycles viable for urban freight transport. *Research in Transportation Business & Management*, 15, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.02.001>
- Service public fédéral Emploi, Travail et Concertation sociale. (2022). Accueil.
<https://emploi.belgique.be/fr>
- Sheth, M., Butrina, P., Goodchild, A., & McCormack, E. (2019). Measuring delivery route cost trade-offs between electric-assist cargo bicycles and delivery trucks in dense urban areas. *European Transport Research Review*, 11. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0349-5>
- Smart Freight Center. (s. d.). *What is the GLEC Framework?* Consulté 15 août 2022, à l'adresse
<https://www.smartfreightcentre.org/en/how-to-implement-items/what-is-glec-framework/58/>
- SPW. (s. d.). *Utilitaire-Utilitaire électrique—Le financement de la Wallonie*. Portail Finances. Consulté

28 juillet 2022, à l'adresse

<http://finances.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/finances/home/fiscalite/fiscalite-des-vehicules/utilitaire-utilitaire-electrique.html>

Statbel. (s. d.). *Tarif officiel moyen des produits pétroliers en euros*. Consulté 28 juillet 2022, à l'adresse

<https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?datasource=2cbb788b-2c1b-4499-af1e-2d0c99eea006>

Tamke, F., & Buscher, U. (2021). *The vehicle routing problem with drones and drone speed selection* (arXiv:2111.13050). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.13050>

T-Motor. (2022). *The safer propulsion system*. <https://store.tmotor.com/goods.php?id=476>

Toth, P., & Vigo, D. (2002). 1. An Overview of Vehicle Routing Problems. In *The Vehicle Routing Problem* (p. 1-26). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch1>

Vehicle Routing Problem. (s. d.). Consulté 14 août 2022, à l'adresse <https://neo.lcc.uma.es/vrp/vehicle-routing-problem/>

Wang, X., Poikonen, S., & Golden, B. (2017). The vehicle routing problem with drones : Several worst-case results. *Optimization Letters*, 11(4), 679-697. <https://doi.org/10.1007/s11590-016-1035-3>

Wang, Z., & Sheu, J.-B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005>

Workhorse. (2022). *HorseFly*. <https://workhorse.com/horsefly.html>

Yaddaden, A., Harispe, S., & Vasquez, M. (2021). *Apprentissage par transfert : Du TSP au VRP*. 2.

Executive summary

In recent years, there has been massive interest in drones (UAV) in the context of last mile delivery. These deliveries represent the most expensive part of a product's logistics and are responsible for significant CO₂ emissions. The introduction of drones in logistics would not only make it possible to deliver packages in less than 30 minutes, but also to reduce costs and the resulting CO₂ emissions. Still at the prototype stage, it is difficult to assert these hypotheses and therefore this thesis studies the cost and environmental impacts of delivery drones.

As a first step, we conducted a literature review on the introduction of drones in last mile logistics. We learned that several concepts are conceivable: the "parallel drone scheduling travelling salesman problem" (PDSTSP) in which drones deliver parcels exclusively from a depot, and the "flying sidekick travelling salesman problem" (FSTSP) in which a truck and one or several drones collaborate to make deliveries. The results obtained through the different experiments show that these two concepts allow to reduce the delivery time as well as the operational costs. This optimization, which can reach up to 30% cost reduction, varies however according to the proposed models. As far as environmental impacts are concerned, the literature review shows more nuanced conclusions.

Then we base our calculations on the results of Tamke and Buscher (2021). For our analysis, we conduct an inventory of the costs and CO₂e emissions resulting from the use of a diesel light commercial vehicle (LCV), an electric LCV, and a UAV. These data are then applied to three scenarios: the standard deliveries without drones, the deliveries with one drone (VRPD with one drone) and the deliveries with two drones (VRPD with two drones).

The results show that the VRPD with one drone reduces the cost per package by an average of 3%, while the results for the VRPD with two drones show almost no improvement compared to the standard VRPD. The reason for this is the high purchase price of the drones. The optimization of costs related to the introduction of drones in last mile logistics is therefore dependent on the manufacturing cost of these drones.

Second, in terms of environmental impact results, both VRPDs offer a reduction in CO₂e emissions. With a reduction of 8.5% following the addition of the first drone and 4.4% after the addition of the second, the VRPD with a diesel LCV benefits the most from this collaboration. Indeed, the case with an electric LCV only obtains 5.5 and 1.5% reduction when adding drones. These results also depend on the CO₂e emissions related to the energy mix of electricity production.

To conclude, the cost and environmental impacts of delivery drones are generally positive. The optimizations obtained are nevertheless dependent on the life span of the vehicles, the acquisition cost of this new technology, and the region in which they are deployed.

Keywords = Last mile delivery, drone, cost, environment

Word count = 23.195