

MIG SOLAIRE 2019

MAËLLE BARONNET, NATHAN BERTHO, PHILOMÈNE BLOT, JÉRÉMY COSTANZO, THOMAS DUBARD,
PIERRE FRODE DE LA FORET, TRISTAN GAUDRON, JULIETTE GERBAUX,
ALLYRIANE JOUSSE DELLA GUISTINA, VINCENT LANNELONGUE, ELIE SAMAKH-LESEC,
ROMAIN SEAILLES, HUGO TERRASON, ARTHUR WIENHOLD

INTRODUCTION

L'heure du numérique conduit à une accélération de la mondialisation et transforme les modes de livraison de marchandises dont la logistique urbaine est devenue un élément crucial. Cette dernière apparaît maintenant comme un service indispensable aux acteurs économiques des zones urbaines : commerçants, enseignes sans magasins, ainsi que les consommateurs. Toutefois, les problèmes de congestion des centres-villes, de nuisances sonores et d'émissions de polluants amènent légitimement à questionner les solutions traditionnelles de livraison par camion ou autre engin thermique. Repenser la logistique urbaine française, en la rendant plus fluide, plus propre et locale, est l'impératif que nous nous sommes fixé. Pour ce faire, notre réflexion s'est portée sur une modernisation et une responsabilisation de la logistique du dernier kilomètre, dernier maillon du transport, qui se doit d'être pensée en accord avec les contraintes de la ville et de la transition énergétique et écologique. Densifier le maillage urbain pour la livraison du dernier kilomètre devient capital. Notre MIG cherche à s'inscrire à la fois dans la stratégie "France Logistique 2025" et dans les objectifs de développement durable posés par l'ONU pour l'horizon 2030.

Notre étude se porte donc sur le déploiement d'un réseau de triporteurs (ou vélo cargo) à assistance électrique pour cette logistique urbaine du dernier kilomètre. Afin de réduire encore l'empreinte environnementale de ces nouveaux services de logistique, nous avons de plus conduit une étude sur l'intérêt et la faisabilité de les coupler avec de la production électro-solaire locale par des systèmes photovoltaïques. Ces deux études conjointes ont été menées pour la ville de Nice, dont l'hyper-centre cloisonné, dense et ramassé et l'importante ressource solaire disponible se prêtent particulièrement. Cette solution du triporteur électrique est motivée par un travail bibliographique préliminaire (Annexe 1), et par des expériences concluantes avec celle des Triporteurs de l'Ouest notamment. Mais ces exemples se heurtent encore à des obstacles. La plupart des solutions qui existent actuellement ne prennent

pas en compte l'origine de l'électricité, et ne gère pas bien la gestion des flux plus nombreux d'une flotte de triporteurs. En s'attaquant aux freins que rencontraient jusque-là de telles structures de transport dans leur implantation, nous avons décidé d'organiser notre travail en plusieurs projets que nous avons menés de front lors de notre MIG, et qui sont détaillés dans les articles suivants. La logique générale de notre démarche, faisant intervenir tous ces projets parallèles est retranscrite dans le présent article.

Le travail de notre MIG s'est donc réparti entre un groupe informatique, auteur de l'article Optimisation et répartition des tournées, un groupe sur l'énergie solaire, auteur de l'article Approvisionnement énergétique, un groupe ayant travaillé sur les ELP, auteur de Réflexion sur l'insertion d'un Emplacement Logistique de Proximité dans le tissu urbain, un groupe penché sur l'intégration de la durabilité de la solution triporteur, auteur de Étude de la durabilité du triporteur, et un groupe dont le travail s'est axé sur une expérimentation des solutions développées auteur de l'article Le CADAM, lieu d'expérimentation d'une logistique assurée par triporteurs. Les références à ces articles se situent à la fin de ce préambule.

CONTEXTE DU PROJET

Le but de notre MIG est de proposer une solution aux problèmes de livraison du dernier kilomètre en incluant une dimension durable à cette solution. Nous avons commencé par rencontrer une entreprise qui propose une solution à ce problème de logistique : les Triporteurs de l'Ouest. Ils sont implantés dans plusieurs villes comme Nantes, Bordeaux ou Rennes. C'est dans cette dernière ville que nous les avons rencontrés : ils y possèdent deux emplacements de logistique de proximité (ELP) : un petit très proche du centre-ville et l'autre plus grand, légèrement excentré. Ces lieux leur servent d'entrepôts au cœur de la ville. Ils s'y font livrer les colis et les palettes par camions, puis, à l'aide d'une flotte de triporteurs complétée de quelques

véhicules électriques ou GNV, ils livrent ces marchandises dans le centre-ville. Cette solution est beaucoup plus durable que la livraison classique en camion qui pollue, crée de la congestion, de la nuisance sonore, et participe globalement à un stress ambiant en ville [Article durabilité]. Cependant, dans le cas de l'entreprise Les Triporteurs de l'Ouest, l'électricité utilisée pour recharger les batteries est celle du réseau ; son empreinte environnementale est donc celle du mix énergétique français. L'idée du MIG est de proposer une intégration de l'énergie photovoltaïque dans cette solution. Notre étude s'est centrée sur la ville de Nice qui a l'avantage d'être une ville qui, on l'a vu sur le terrain, a besoin de solutions logistique, et qui en plus se situe dans une région largement ensoleillée.

APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE

Tout d'abord, il a été fondamental d'acquérir des connaissances techniques solides sur le fonctionnement, l'utilisation et le coût des panneaux photovoltaïques : nous avons donc réalisé une étude bibliographique technique sur les panneaux PV [Article approvisionnement énergétique : sections 1 et 2]. Les données dont nous disposons par ailleurs sur l'irradiation solaire au sol dans la ville de Nice nous ont permis d'estimer leur rentabilité, et de conclure que cette énergie a un coût financier comparable, voire inférieur, à celle proposé par le réseau ENEDIS et a un impact moindre sur l'environnement. La première idée que nous avons eue pour alimenter nos triporteurs à l'énergie solaire a été de placer les panneaux sur leurs toits (PV embarqué). Pour cela nous avons mis en place une modélisation physique d'un trajet en triporteur [Article approvisionnement énergétique : section 3], afin de pouvoir estimer facilement le coût énergétique de trajets types dans la ville de Nice d'un triporteur. En nous basant sur ces résultats, ainsi que sur les données historiques d'irradiation solaire au sol, nous avons mis en évidence que cette solution est finalement peu satisfaisante avec seulement entre 5 et 30% de l'énergie dépensée fournie par les panneaux en moyenne suivant la date, l'heure et la météo [Article approvisionnement énergétique : section 4]. De plus, elle était déjà mise en question par le fait que dans le cas des Triporteurs de l'Ouest, l'autonomie en terme du nombre de colis à livrer d'un triporteur était inférieure à son autonomie énergétique. Nous ne n'avons donc pas retenu l'option d'embarquer le PV sur les triporteurs dans la suite de notre étude.

ELP

Il nous est alors apparu clairement que l'utilisation du PV pouvait s'envisager sur les surfaces de toits des ELP. Ceux-ci étant par ailleurs indispensables dans la mécanique de livraison par triporteur en ville, un de nos objectifs était de les intégrer dans la ville de Nice, d'un point de vue d'emplacement et de logistique par une approche paysagiste [Article ELP : section 2.1]. Deux lieux se sont alors distingués dans nos recherches : l'esplanade Kennedy [Article ELP : section 3.1.1] et la gare Thiers [Article ELP : section 3.1.2]. De plus, les ordres de grandeur des énergies et des puissances disponibles grâce à de telles surfaces PV [Article ELP : section 2.2] nous ont permis d'étendre le rôle des ELP et d'en faire des pôles de distribution énergétique multimodaux s'inscrivant dans un service public pour, par exemple, avec la mise en place de service de recharge de vélos ou de voitures électriques.

CONCRÉTISATION

Optimisation des tournées

Simultanément, les données statistiques recueillies sur Nice nous ont permis d'estimer que, pour satisfaire le besoin actuel de livraisons quotidiennes (plusieurs milliers, à des commerçants et à des particuliers), un ou deux ELP et surtout une flotte de plusieurs dizaines de triporteurs étaient nécessaires. Un nouveau problème de logistique se pose alors : comment optimiser les tournées des triporteurs ? Nous avons traité la question en trois étapes. D'abord, nous avons extrait les données cartographiques de la ville sous forme d'un graphe facilement exploitable par nos programmes d'optimisation [Article optimisation : sections 2.2 et 3]. Ensuite, il s'agissait de trouver les livraisons optimales en termes énergétiques et temporels. Nous avons ainsi implémenté deux algorithmes, celui proposé par Clarke et Wright¹ (1964) [Article optimisation : section 4.1] et l'autre générique [Article optimisation : section 4.2], afin de comparer leurs résultats et leurs efficacités respectives. Une fois ceux-ci obtenus, il nous a fallu les afficher sur une carte [Article optimisation : section 5]. On obtient ainsi un programme théoriquement applicable à n'importe quelle ville pour peu que l'on dispose des données cartographiques nécessaires.

CADAM

En parallèle des travaux précédents, nous avons rencontré des représentants du département des

1. Clarke, G, J. W. Wright, 1964. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12(4), p. 568–581, DOI 10.1287/opre.12.4.568.

Alpes-Maritimes, avec notamment Mme Laurence DALSTEIN-RICHIER, chargée de mission Environnement au Conseil général des Alpes-Maritimes et responsable du suivi de son Plan Climat, Air, Energie. Ceux-ci ont été très intéressés par notre projet et sont prêts à envisager la mise en place de triporteurs de livraison sur le site du CADAM (centre d'administration du département des Alpes Maritimes). Ce lieu, en dépit de sa taille modeste de l'ordre de 13 ha, est le théâtre de nombreux flux de courriers administratifs inter-bâtiments et d'objets encombrants lors de fréquents déménagements de bureaux [Article CADAM : section 1]. Nous avons donc étudié ses besoins en matière de livraison, et proposé une transition à la fois souple mais concrète en trois temps vers une mobilité sur le site reposant sur des triporteurs alimentés à 100 % par des systèmes PV. Cette étude a pour objectif d'être applicable dans d'autres situations. La première phase [Article CADAM : section 2] est basée sur le volontariat et l'utilisation de l'ombrière solaire de parking au Sud du site du CADAM. La deuxième [Article CADAM : section 3.1] vise à remplacer tous les véhicules livrant du courrier par des triporteurs et à installer nos propres infrastructures solaires et la troisième [Article CADAM : section 3.2] a pour ambition de remplacer tous les véhicules thermiques par des triporteurs adaptés. Nous avons communiqué un rapport aux représentants du CADAM et nous avons bonne espoir que le projet va aboutir. En effet, cette expérimentation est une aubaine : elle permettrait au CADAM d'être une vitrine de notre projet, lui donnant ainsi les moyens de s'étendre dans des villes du département des Alpes-Maritimes, tout en étant un lieu d'expérimentation et d'amélioration de la solution que nous proposons.

CONCLUSION

Nous avons abordé ce projet avec un objectif bien précis. Le constat était sombre : les mécanismes mis en jeu dans la logistique du dernier km dans la ville de Nice généraient de fortes nuisances environnementales, sonores, et plus généralement, dégradait la qualité de vie des citoyens. Des solutions reposant sur la livraison en triporteur à assistance électrique sont envisageables pour pallier certains de ces problèmes avaient déjà été mises en place avec succès dans d'autres villes, mais elles n'intégraient pas totalement la problématique environnementale ainsi qu'une démarche de développement durable. Notre projet consistait à l'origine donc à introduire ces composantes dans ces nouvelles logistiques grâce à l'énergie photovoltaïque. Comme nous l'avons montré au travers de nos recherches bibliographiques et à des analyses de cycle de vie, c'est en ef-

fet une source d'énergie dont les impacts environnementaux sont moindres comparés à l'actuel mix énergétique mondial et même français, et qui en plus présente peu ou pas de nuisances directes dans la ville. Les rencontres avec des professionnels de la logistique ainsi que des visites sur le terrain nous ont permis d'appréhender les réalités du problème, et de dépasser le simple cadre technique. La démarche pour arriver à la solution devait donc être transverse et allier des approches techniques, paysagistes, durables et environnementales. En englobant toutes ces composantes dans notre travail, nous sommes parvenus à des résultats qui dépassent nos attentes concernant le problème initialement posé. D'abord la livraison de marchandises dans Nice par triporteurs alimentés au solaire est largement envisageable d'un point de vue technique, et cela résout bon nombre de problèmes constatés sur place liés à la livraison par camionnettes (congestions, manque de places de livraisons, bruit,...). Nous avons implémenté un programme qui optimise les tournées de livraison et assure ainsi la fluidité de l'ensemble, programme qui est théoriquement exploitable dans n'importe quelle ville sous réserve de données cartographiques suffisantes. Mais surtout, nous ne nous sommes pas contentés d'intégrer nos emplacements logistiques de proximité (ELP) dans le tissu urbain : ces derniers permettront de le transformer et d'améliorer les conditions de vie des habitants tout en servant nos objectifs environnementaux. De par leurs emplacements et les services de recharge électrique au public qu'ils proposeront, ils contribueront en effet à instaurer la mobilité électrique durable en ville, la protégeant d'un trafic routier nocif. Ils permettront également de mettre en scène l'énergie photovoltaïque, l'introduisant dans l'environnement urbain des habitants de Nice. Car, en effet, le succès de ces transformations repose sur un changement global des mentalités. Mais notre rencontre avec les représentants du département des Alpes Maritimes, et leur volonté de mettre en place diligemment un système de livraison par triporteurs solaires dans leur centre administratif (CADAM) près de Nice nous laisse confiants quant au potentiel de notre vision : nous leur avons envoyé un document détaillant les modalités de cette dernière dans le cas précis de ce lieu de taille très réduite par rapport à Nice. Nous comptons donc sur leur intérêt et leur motivation pour transformer le CADAM en un véritable lieu d'expérimentation technique du projet et surtout en une formidable vitrine à l'échelle de la région afin d'inciter d'autres acteurs à considérer l'intérêt des transformations que nous souhaitons promouvoir .

Ce MIG nous aura donc appris bon nombre de nouveaux concepts, techniques et perspectives et de nou-

velles manières de considérer des problèmes complexes et transverses. On en retiendra surtout que, au-delà d'un aspect énergétique purement quantitatif, la transition environnementale doit être vue comme une occasion de transformer et d'améliorer nos lieux et conditions de vie. Elle n'est pas synonyme de disparitions, mais de mutations. Elle n'est pas synonyme de privation, mais de responsabilisation. Nous remercions particulièrement nos encadrants qui nous ont apporté énormément de connaissances et de nouveaux points de vue et raisonnements, et qui nous ont ainsi permis de produire une solution que nous jugeons prometteuse à un problème particulièrement complexe et actuel.

ARTICLES

- Article durabilité
- Article approvisionnement énergétique et son annexe
- Article ELP
- Article optimisation des tournées
- Article CADAM
- Annexe 1 : bibliographie

Étude de la durabilité du triporteur

GROUPE DURABILITÉ

Mines ParisTech - PSL University

Abstract. Cet article vise à intégrer au projet une étude des aspects durables du triporteur. Dans un contexte urbain dense, diverses problématiques urbaines sont causées par une mauvaise gestion de la livraison du dernier kilomètre, issue de modes de transport thermique provoquant une congestion urbaine, pollution de l'air et sonore. Nous avons donc envisagé une logistique basée sur des modes de transport doux, afin de se substituer aux camions et camionnettes de livraison. De ce fait, nous avons étudié la pertinence de la solution de livraison du dernier kilomètre par triporteurs. Après avoir identifié les acteurs interagissant avec les triporteurs, nous nous sommes intéressés à leurs interactions potentielles autour des triporteurs, qu'elles soient bénéfiques ou conflictuelles, qu'elles fassent entrer deux acteurs en dialogue ou qu'elles en réunissent plusieurs autour d'un but commun. Nous nous sommes ensuite intéressés aux exigences que les différents acteurs peuvent avoir afin de garantir le bon fonctionnement des triporteurs dans le respect des acteurs. Enfin, nous comparons les impacts de la livraison par triporteurs et ceux de la livraison par camions, afin d'appuyer notre choix d'alternative.

1 IDENTIFICATION DES ACTEURS ET DE LEURS INTERACTIONS

[Masterson(2017)!0]

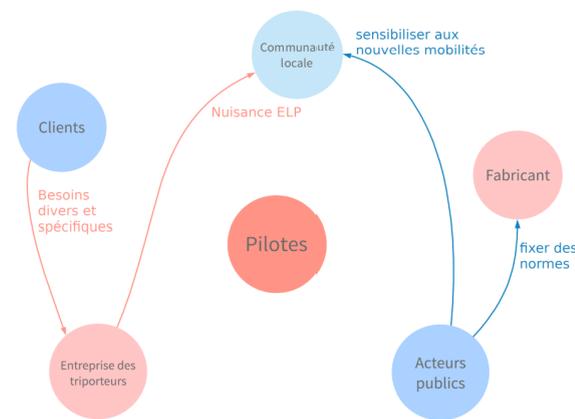


FIGURE 1 – Interactions entre les acteurs - 1

Tout d'abord, il faut identifier les acteurs. Les premiers qui viennent à l'esprit sont les usagers directs des triporteurs, donc leurs pilotes. Puis, ces pilotes sont acteurs d'une entreprise et ils vont les utiliser pour livrer des clients. Pour obtenir les triporteurs et le matériel de maintenance, ou directement la maintenance, l'entreprise va s'adresser aux fabricants de triporteurs. De plus, lors de leurs trajets en ville, les triporteurs vont rencontrer la communauté locale, qu'ils doivent respecter. Finalement, toutes ces interactions se font

sous la tutelle de l'État. On peut également évoquer les transporteurs, qui grâce à la livraison du dernier kilomètre assurée par les triporteurs et les ELP ne sont plus sources de problème dans le milieu urbain.

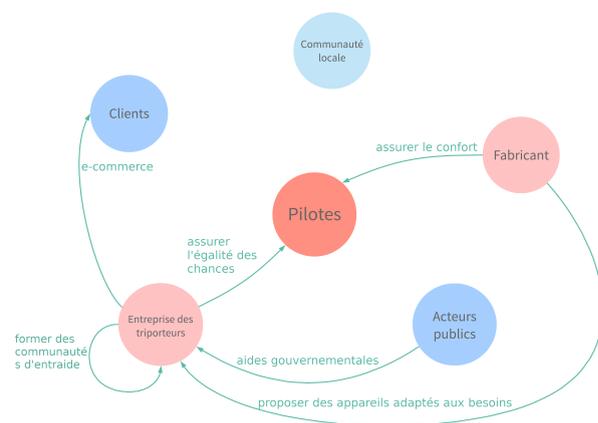


FIGURE 2 – Interactions entre les acteurs - 2

Lors de la fabrication du triporteur, le fabricant doit garder en tête que son produit doit à la fois assurer le confort du pilote et répondre aux besoins techniques des entreprises de transport, tout en se conformant aux normes fixées par l'État. Pour assurer le développement d'une logistique avec des triporteurs, l'entreprise va avoir besoin d'un cadre légal dans lequel évoluer, mais aussi d'une aide financière de l'État ou logistique et technique d'autres entreprises dans des associations. De plus, ce cadre légal va également influencer son rap-

port aux employés, ici les pilotes, car il va la contraindre à garantir pour eux l'égalité des chances, en plus d'un travail non pénible et d'un statut social acceptable. En effet, du fait de l'uberisation, certains pilotes de triporteurs sont auto-entrepreneurs et travaillent dans des conditions déplorables : ils n'ont pas un emploi stable, comme ils sont payés par livraisons et ils ont à charge le triporteur, sa maintenance, la sécurité de conduite et l'assurance.

L'entreprise va alors prendre en compte les besoins spécifiques de ses clients afin d'assurer leur livraison, besoins qu'elle peut récupérer via une interface en ligne dans le cadre de l'e-commerce. En effet, l'e-commerce est en plein essor en France, avec une croissance stable avec par exemple 13,4% en 2018, pour arriver à un total de 92,6 milliards d'euros dépensés en ligne en France en 2018. [e-commerce et vente à distance()!0]

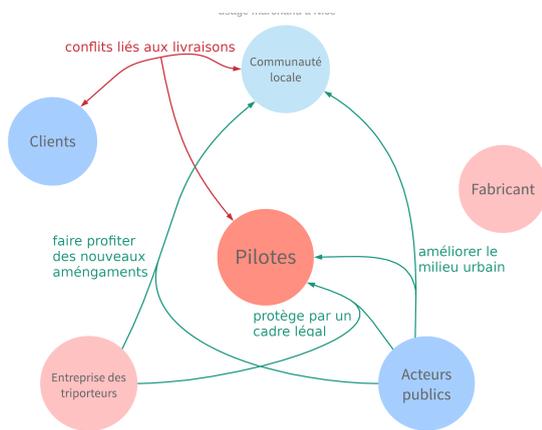


FIGURE 3 – Interactions entre les acteurs - 3

Les pilotes doivent pouvoir exercer leur métier dans le plus grand confort possible. Ainsi, ils doivent pouvoir bénéficier d'un cadre légal mis en place conjointement par l'entreprise et l'État. De plus, leur conduite doit également être confortable. En dehors du confort même du vélo, il faut que la conduite en ville ne soit ni stressante ni dangereuse. Cela suppose la mise en place d'infrastructures routières adaptées, non seulement des pistes cyclables, mais également des emplacements de parking.

Finalement, il ne faut pas laisser de côté la communauté locale qui va influencer l'environnement du triporteur. Ainsi, la livraison des ELP en camion ne doit pas les gêner, d'autant plus que ceux-ci sont supposés être situés près du centre-ville. De plus, les nouveaux aménagements routiers doivent aussi leur servir, puisqu'on ne peut réserver une grande part de l'espace public à des usages privés. De ce fait, la réduction des

voies pour voitures doit s'accompagner de campagnes de sensibilisation aux mobilités par vélos et triporteurs, menées par l'État avec le support d'entreprises ayant déjà mis en place ce genre de solutions.

2 BESOINS DES PILOTES

- **Confort de conduite** : Assistance électrique dès le démarrage, aménagements urbains (sécurisant la conduite, facilitant le garage, ...);
- **Aide gouvernementale** : aide économique, aide à la logistique par des spécialistes pour quitter le thermique, cadre légal, sensibilisation, ...;
- **Maintenance** : garanties, ateliers dédiés et proches, réparation rapide (usage nécessaire car outil de travail), pas trop fréquent, pas trop cher;
- **Autonomie**;
- **Capacité de transport** : volume de transport suffisant, charge utile suffisante;
- **Taille** : capacité à entrer dans des ruelles étroites, virages et garage faciles;
- **Alimentation** : temps de charge réduit, panneaux solaires rechargeant lors de la conduite, recyclage de l'énergie de freinage;
- **Optimisation de la logistique** : plateforme en ligne pour recevoir les commandes et souhaits des clients (heure de livraison, surgelé, ...), logiciel optimisant les circuits de livraison;

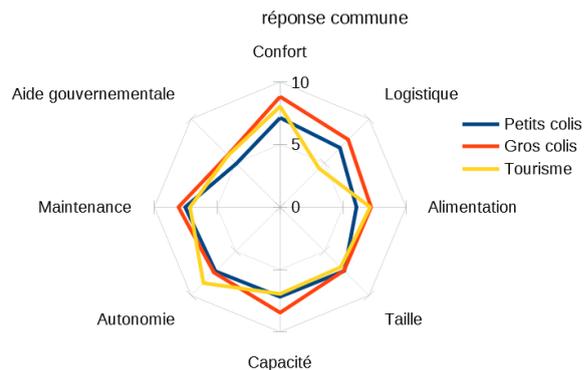


FIGURE 4 – Besoin des pilotes

Nous avons fait une enquête auprès des élèves, après lecture de documentation sur le sujet leur permettant une certaine expertise, ainsi qu'à l'entreprise 'Les Triporteurs de l'Ouest', afin d'identifier l'importance relative des différents besoins des pilotes de triporteurs, en fonction des types de triporteurs.

On remarque en première approche qu'il se dégage un 'package de base' du triporteur sur les critères de la maintenance, du confort de conduite, de l'alimenta-

tion et de la taille, ainsi que pour les aides gouvernementales qui semblent délaissées. Cela pourrait être dû au fait que les aides étant presque inexistantes, on aurait du mal à envisager une implication directe de l'État. L'alimentation est importante afin d'assurer une charge rapide des triporteurs. La maintenance doit être facile, aussi peu fréquente que possible et gérée par des professionnels si possible. Le confort de conduite et la taille sont également nécessaires afin de limiter la pénibilité du pédalage du triporteur pour les pilotes.

On constate un grand écart pour l'importance de la logistique. En effet, tandis que la livraison a un grand besoin de logistique afin d'optimiser leurs tournées, ce qui n'est pas le cas des triporteurs de tourisme, qui se baladent dans la ville, en ramassant des touristes ou habitants au cours de leur parcours. Pour l'autonomie, elle est de ce fait plus importante pour les triporteurs de tourisme, qui ne peuvent se permettre de rentrer régulièrement se recharger et doivent parcourir de grandes distances. Finalement, la capacité est au contraire primordiale pour les triporteurs de livraison et annexe pour les triporteurs de tourisme. Dans l'idéal, un triporteur de tourisme transporte jusqu'à deux personnes, alors que les triporteurs livrant des palettes peuvent transporter des charges jusqu'à 300kg.

3 IDENTIFICATION DES EXIGENCES TECHNIQUES ET DU CADRE DE VIE ENCADRANT L USAGE DU TRIPORTEUR

3.1 Les critères de dimensionnement

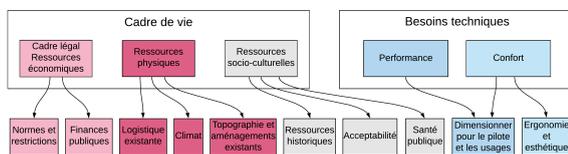


FIGURE 5 – Exigences des acteurs

On peut regrouper les exigences de tous les acteurs en deux catégories : d'un côté le confort de conduite et les performances techniques que l'on peut regrouper dans les besoins techniques ; d'un autre côté le cadre de vie qui regroupe le cadre légal, les ressources physiques et socio-culturelles.

L'État est responsable du cadre légal et des ressources économiques, ainsi que des ressources physiques via des aménagements routiers. Les fabricants sont responsables du confort de conduite et d'assurer les performances demandées par l'entreprise. Finalement,

les autres exigences sont relatives à l'environnement dans lequel le triporteur va évoluer.

3.2 Les solutions préexistantes ou à développer

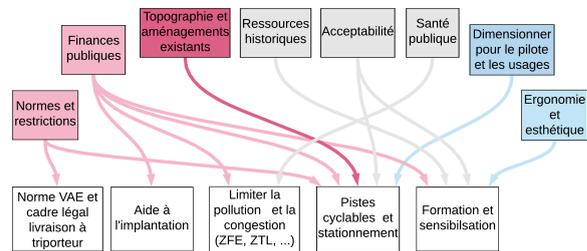


FIGURE 6 – Solutions non traitées

Certaines solutions existaient déjà, c'est pourquoi nous ne les avons pas traitées directement. Ainsi, l'État a par exemple la norme VAE pour encadrer l'usage des vélos à assistance électrique, catégorie dans laquelle tombent les triporteurs en deçà d'une certaine motorisation, mais il n'existe pas de cadre légal pour la livraison à triporteurs. [France-Economie()!0] De ce fait, la société 'Les Triporteurs de l'Ouest' a dû en quelque sorte créer le sien. En plus des normes techniques, des mesures en faveur des mobilités par vélo sont prises par les acteurs publics, comme la création de zones réservées aux transports doux (ZFE, ZTL, ZCR, ...), ainsi que l'aménagement de nouvelles pistes cyclables comme on a pu le constater à Nice. En plus de ces mesures physiques, il semble nécessaire de mettre en place des soutiens, d'une part à la logistique et financiers pour aider et inciter les entreprises à passer à ce genre de mobilités, mais également des campagnes de sensibilisation pour répandre leur usage même au sein du public.

3.3 Les solutions traitées

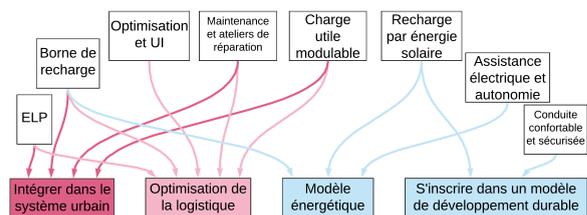


FIGURE 7 – Solutions traitées

Les solutions que nous avons traitées se regroupent en quatre catégories : intégration au système urbain, op-

timisation de la logistique, modèle énergétique et modèle de développement durable.

Pour améliorer les livraisons, nous avons dû réfléchir à la meilleure articulation possible d'un système mêlant ELP, espaces de recharge et espaces de maintenance au sein du tissu urbain niçois, tout en respectant les espaces déjà présents. La ressource solaire offre un cadre favorable pour alimenter des solutions de déplacement électriques, en les alimentant par des solutions à faible impact environnemental comme les panneaux solaires. La topographie du milieu, le stockage des triporteurs, leur autonomie, les aménagements ci-dessus et l'ensoleillement ont ensuite été pris en compte afin d'optimiser informatiquement les livraisons par triporteurs. De plus, avec plus de temps, nous aurions pu concevoir une interface utilisateur pour l'algorithme d'optimisation des livraisons, afin d'y répertorier les besoins spécifiques des clients et des transporteurs.

4 EN QUOI LE TRIPORTEUR EST UNE MOBILITÉ PLUS DURABLE ?

Finalement, en croisant des données issues d'une multitude de sources, nous avons pu tenter de comparer les livraisons par triporteurs aux livraisons par camionnettes thermiques sur des aspects financiers, environnementaux, sociaux et techniques. [Saenz et al.(2016)Saenz, Figliozzi, and Faulin!0]

	Camionnettes	Triporteurs
<i>Aspects financiers</i>		
Prix à l'achat	25000-50000€ (camionnette) Env.90000€ (camion)	1000-4000€ (petite contenance) 4000-10000€(grosse contenance)
Prix des infrastructures	Déjà existante	Env.80000€/km de piste cyclable
Prix au km (que énergie)	0,084-0,154€/km (camionnette) 0,28-0,56€/km (camion)	0,000355€/km
Maintenance	2000-5000€/an (camion)	100-1000€/an]
Taxes/aides gouvernementales	Taxe TICPE: -44,19 centimes/L gazole et -61,42 pour l'essence + <100€/t de CO ₂	Bonus écologique pour un VAE : +200€ Aide financière de l'ADEME

Les camions semblent bénéficier de meilleures capacités de stockage, de vitesses supérieures et d'infrastructures routières déjà existantes. De plus, les entreprises sont réticentes à changer de véhicules, car cela leur demanderait un investissement. Mais il n'en est rien, puisque les triporteurs sont bien moins chers, autant à l'achat que pour la maintenance et peuvent efficacement remplacer les camions. [Nocerino et al.(2016)Nocerino, Colorni, Lia, and Luè!0] De plus, ils sont moins impactés par les taxes gouvernementales et au contraire reçoivent des aides gouvernementales,

bien que faibles. A cela s'ajoute les limitations géographiques imposées aux camions par des décisions politiques récentes. Ainsi, la création de ZFE (Zone à Faibles Emissions) ou de ZTL (Zone à Traffic Limité) se popularise dans les grandes métropoles françaises, zones où les mobilités thermiques sont interdites, ou tolérées moyennant paiement ou restrictions horaires. Ce genre de politique vise notamment à réduire la pollution de l'air en milieu urbain, dans la continuité d'autres normes comme les vignettes Crit'Air, pouvant amener à l'interdiction de circulation des véhicules les plus polluants en cas de pic de pollution. Néanmoins, ils souffrent de l'absence de pistes cyclables en certains endroits qui les forcent à utiliser les routes, qui sont notamment dangereuses pour les vélos.

De plus, les camions augmentent les pollutions de tout type en ville. Lorsqu'ils se garent en double-file à Paris, une camionnette fait perdre environ 44,07s aux automobilistes et un camion 141,24s. [Beziat(2017)!0] Ainsi, même à l'arrêt ils continuent à polluer. A cela s'ajoutent leurs pollutions sonores et par GES et particules fines. Au contraire, les triporteurs sont moins gênants par leur taille et n'émettent pas.

<i>Aspects environnementaux</i>		
Pollution CO ₂ FR matériaux-US fabrication + recyclage-US tank-to-wheel/batterie-US well-to-tank-US	150 gCO ₂ / km 3,995 kg CO ₂ /kg véhicule 1,247 kg CO ₂ / kg véhicule 6,00kg CO ₂ e/ L 1,349kg CO ₂ e/ L	0,6 gCO ₂ /km (RTE, France 2018) 4,108 kg CO ₂ /kg véhicule 1,247 kg CO ₂ / kg véhicule 3,93 kg CO ₂ e/ kg batterie 0,923kg CO ₂ e/ kWh
Pollution sonore	73-78dB (camionnette) 80-85dB (camion)	«silencieux!»
<i>Aspects sociaux</i>		
Statut légal	Poids lourd Routier	VAE
Salaire minimum	1521€ débutant	?
Gêne dans le milieu urbain	Double file sur la route	Garé sur le trottoir
<i>Aspects techniques</i>		
Puissance	100kW (camionnette)	250W
Consommation énergétique	6-11L/100km (camionnette) 20-40L/100km(camion)	Env. 10Wh/km
Charge utile	3t (camionnette) <26t (camion)	80-300kg
Autonomie	700-1000km(camion)	40km
Taille(LxI)	5mx2m (camionnette) 10-20mx2,5m (camion)	2-3mx0,8-1,2m
Vitesse maximale	Légal: < 90km/h	Légal: < 25km/h

Finalement, cette transition semble en accord avec des politiques gouvernementales ce genre d'initiative, comme le plan France Logistique 2025, qui vise entre autres à moderniser et améliorer la logistique en France en l'utilisant entre autres comme un moyen pour amener des problématiques de transition énergétique dans les villes. De plus, des experts en logistique faisant par-

tie de ce plan pourraient potentiellement conseiller les entreprises afin d'assurer leur transition énergétique par ce changement de logistique. [France-Ecologie()!0]

5 CONCLUSION

Notre projet de transition énergétique de la livraison du dernier kilomètre a essayé de s'insérer au mieux dans les objectifs du développement durable donnés par les Nations Unies. En effet, dans notre étude des besoins des pilotes de triporteur, nous avons pris en compte leur bien-être par une conduite non pénible et sécurisée (objectif 3), la nécessité d'assurer l'égalité des chances par un choix adapté des colis que l'on peut demander aux pilotes de transporter (objectif 5), ainsi que la nécessité d'éviter les conditions de travail déplorables issues de l'uberisation (objectif 8). Ces triporteurs à assistance électrique, rechargés aux stations grâce à l'énergie solaire permettent d'assurer la transition énergétique vers des sources d'énergie et des moyens de transport plus respectueux de l'environnement (objectifs 7, 11 et 13). [dpicampaigns()!0]

L'arrivée de la livraison du dernier kilomètre par triporteurs, avec la nécessité de la construction d'ELP, peut alors avoir un bilan positif pour la communauté locale, sous réserve qu'elle puisse profiter des nouvelles infrastructures et de ce service de livraison. Par une coopération des acteurs publics et privés, la modification de l'environnement urbain peut alors s'accompagner d'un changement de mentalités des communautés et entreprises locales, qui pourraient alors prendre exemple sur cette possibilité de transition énergétique. De ce fait, notre projet pilote au CADAM a pour vocation de motiver d'autres communes des Alpes-Maritimes à adopter la livraison par triporteurs, afin d'ensuite inciter les entreprises de livraison à faire de même. Ce projet est réaliste compte tenu des avantages des livraisons par triporteurs par rapport aux livraisons par camion, qui s'accroît avec la mise en place de nouvelles politiques urbaines durables.

Références

- [Beziat(2017)] Adrien Beziat. *Approche des liens entre transport de marchandises en ville, formes urbaines et congestion : Le cas de l'Île-de-France*. PhD thesis, Université Paris-Est, Paris, France, June 2017. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01757032>.
- [dpicampaigns()] dpicampaigns. About the sustainable development goals. URL <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- [e-commerce et vente à distance()] Fédération e-commerce et vente à distance. Les chiffres clés 2019. URL https://www.fevad.com/wp-content/uploads/2019/06/Chiffres-Cles-2019_BasDef-1.pdf.
- [France-Ecologie()] France-Ecologie. France logistique 2025. URL <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/france-logistique-2025>.
- [France-Economie()] France-Economie. Bicyclette et vélo à assistance électrique (VAE) : conseils pour un achat en toute sécurité | économie.gouv.fr. URL <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/Bicyclette-velo-assistance-electrique-vae>.
- [Masterson(2017)] Ali Masterson. *Sustainable Urban Transportation : Examining Cargo Bike Use in Seattle*. Thesis, University of Washington, Washington, June 2017. URL <https://digital.lib.washington.edu/443/researchworks/handle/1773/40719>.
- [Nocerino et al.(2016)] Nocerino, Colomi, Lia, and Luè] Roberto Nocerino, Alberto Colomi, Federico Lia, and Alessandro Luè. E-bikes and E-scooters for Smart Logistics : Environmental and Economic Sustainability in Pro-E-bike Italian Pilots. *Transportation Research Procedia*, 14 :2362–2371, 2016. ISSN 23521465. doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.267. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516302733>.
- [Saenz et al.(2016)] Saenz, Figliozzi, and Faulin] Jesus Saenz, Miguel Figliozzi, and Javier Faulin. Assessment of the Carbon Footprint Reductions of Tricycle Logistics Services. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2570(1) :48–56, January 2016. ISSN 0361-1981, 2169-4052. doi : 10.3141/2570-06. URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2570-06>.

Approvisionnement énergétique

1 PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE ET COÛT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Le principal objectif, ici, est de déterminer la production électrique et le coût des installations solaires qui peuvent être envisagées au cours du projet, ainsi que leur rentabilité.

Dans ce but, nous nous intéressons à 2 paramètres essentiels : l'énergie électrique effectivement produite sur la durée de temps considérée et le coût de celle-ci.

Avec ces deux paramètres, on évalue le coût d'une installation avec le LCOE (Levelized Cost of Energy) qui correspond au prix complet de la production d'énergie d'un système sur sa durée de vie.

$$LCOE = \frac{I}{E_{PV}} \quad (1)$$

- E_{PV} : Énergie totale produite sur la durée considérée
- I : Coût total de l'installation sur la durée considérée : inclut l'investissement, le coût de la dette, un facteur d'actualisation, la maintenance et le démantèlement.

Nous choisirons arbitrairement dans la suite de cette partie de considérer les énergies produites sur 20 ans, intervalle de temps qui correspond à la durée de vie minimum des panneaux (les contrats d'obligation d'achat de l'énergie photovoltaïque par EDF, avant la récente réforme législative, étaient valides sur cette durée).

1.1 Production énergétique d'une installation photovoltaïque

1.1.1 Expression générale de la production

La production énergétique d'une installation dépend de nombreux facteurs. Elle dépend bien évidemment de la surface installée et du rayonnement solaire reçu mais aussi du type de panneaux utilisés, de leurs orientations, de la température ou encore de l'âge de l'installation.

On peut exprimer la production d'une installation photovoltaïque :

$$E_{PV} = r \times PR \times S \times E_{solaire} \quad (2)$$

- E_{PV} : Énergie produite par le panneau (Wh)

- $E_{solaire}$: Irradiation solaire dans le plan des panneaux ($Wh.m^{-2}$) que l'on considère constante à l'échelle des systèmes photovoltaïques considérés, de l'ordre de quelques centaines de m^2 , en supposant l'absence d'ombrage (autre que celui dû à des nuages éventuels).

- r : Rendement du panneau solaire considérée

- S : Surface de l'installation (m^2)

- PR : facteur de perte

Pour simplifier l'étude, nous divisons le rendement en deux parties : le rendement r du panneau en lui-même et un facteur de pertes PR qui a pour but de prendre en compte les autres facteurs influençant le rendement du panneau.

On donne généralement au facteur PR la valeur de 0.8 qui semble être une valeur typique conservative pour estimer la production électrique d'un système PV. Ce facteur prend en compte notamment la température ainsi que d'autres paramètres techniques fins et difficilement identifiables pouvant faire diminuer la production du panneau. Cependant, nous nous sommes tout de même penchés sur l'influence de ces paramètres sur le rendement :

⇒ L'augmentation de la température diminue le rendement selon une diminution de 0,5% environ par degré supplémentaire.

⇒ L'effet de l'orientation du panneau dépend de la position géographique du lieu. Dans la région de Nice, l'inclinaison 35 °sud permet de maximiser l'irradiation solaire annuelle dans le plan des panneaux. On détaillera plus en détail nos considérations sur l'orientation des panneaux en annexe.

Le terme r du rendement lui va prendre en compte par exemple le type de panneau solaire.

Il existe trois types de panneaux solaires : le monocristallin (Silicium pur), le polycristallin (Éclats de Silicium) et l'amorphe. Le monocristallin présente le meilleur rendement mais est également le plus coûteux. Le polycristallin est généralement utilisé pour les grosses installations car il présente le meilleur rapport rendement/prix.

D'après les constructeurs, le rendement de ces panneaux est d'environ 20%.

Par ailleurs, la durée d'utilisation de l'installation diminue également le rendement de manière linéaire : au bout de 20 ans, l'installation n'est plus qu'à 85% de sa production maximale initiale. On pourrait donc rajouter un terme pour affiner le rendement selon l'âge du panneau.

$$r = r_0 \times \left(1 - \frac{0.25}{20} \times a\right) \quad (3)$$

— r_0 : Rendement initial

— a : Âge de l'installation

1.1.2 Expression de la production selon la puissance installée de l'installation

Si l'étude précédente est intéressante afin de savoir ce qui entre en jeu dans l'efficacité de l'installation photovoltaïque, il n'est pas forcément nécessaire de considérer tous ces paramètres pour calculer la production énergétique. En effet, on utilise généralement la puissance installée pour caractériser une installation.

La puissance installée exprimée en "Watt-crête" est une valeur conventionnelle, elle correspond à la production énergétique d'une installation dans des conditions normalisées "idéales" :

- Un ensoleillement de 1000 W/m^2
- Une température ambiante de 25°C
- Eclairage solaire normal au plan du panneau
- Une absence d'ombrage

On a donc :

$$P_c = r \times P_0 \quad (4)$$

Ainsi, grâce à la puissance installée, on peut simplifier l'expression de l'énergie :

$$E_{PV} = \frac{P_c}{P_0} \times E_{\text{solaire}} \times PR \times \left(1 - \frac{0.25}{20} \times a\right) \quad (5)$$

— P_c : Puissance installée de l'installation

— P_0 : Irradiation solaire

Dans la région de Nice, des statistiques sur les panneaux montrent que, pour un éclairage P_0 solaire de 1000 W.m^{-2} , un m^2 de panneaux correspondent à une puissance installée de 190 Wc. Nous supposons dans la suite de cette étude que le rapport $\frac{P_c}{P_0}$ est constant, et vaut $0.19.S$ avec S la surface de panneaux.

En faisant des approximations numériques sur chacun des paramètres, nous constatons que l'influence du temps est moindre sur la puissance produite. On s'autorisera donc à la négliger, quitte à l'inclure dans le facteur de perte. On obtient alors la loi semi-numérique linéaire qui relie l'énergie produite par le panneau à la surface de panneau et à l'éclairement solaire. Notons que cette formule peut aussi être écrite en terme de puissances de façon identique.

$$E_{PV} = 0.19 \times 0.8 \times S \times E_{\text{solaire}} \quad (6)$$

2 ESTIMATION DU COÛT DUNE INSTALLATION

Le coût d'une installation peut varier assez fortement selon les composants utilisés ou la taille de l'installation.

Les composants à prendre en compte sont les modules photovoltaïques, les câbles ou les onduleurs dans le cas où on se raccorde au réseau (Nécessité de convertir le courant continue en alternatif). En outre, chaque composant a une durée de vie limitée et selon la durée d'exploitation de l'installation il faudra les remplacer. Par exemple, l'onduleur, qui représente environ 25% du coût de l'installation, a une durée de vie de 20 ans environ et doit être changé à terme.

Au final, en prenant tout en compte, pour des particuliers on peut compter entre 2€ et 4€ par Wc installés. Cependant, pour de grosses installations de plus de 1000m^2 , le prix est en fait plus faible et on se situe plutôt entre 1.5€/Wc et 2€/Wc.

Avec la surface de l'installation, on peut ainsi estimer le coût de celle ci :

$$I = 190 \times S \times 1.5 \quad (7)$$

En approximant le vieillissement de manière linéaire :

$$I = 190 \times S \times 1,5 \times \left(1 + \frac{0.5}{20} \times a\right) \quad (8)$$

Pour avoir une estimation du LCOE, on a donc besoin de données sur l'irradiation solaire dans la région de Nice.

Pour ce faire, nous récupérons tout d'abord des images satellites de Copernicus (satellite européen d'observation de la Terre), plus précisément du satellite Eumet-Sat qui sont prises toutes les 15 minutes depuis 2004. En fonction de la couleur des nuages, on peut en déduire l'épaisseur optique des nuages donc leur transparence au rayonnement solaire et ensuite l'irradiation qui arrive au sol. Cette irradiation est divisée en irradiation directe et en irradiation diffuse (qui est réfléctée

par le sol, les bâtiments et les nuages) à l'aide de formules empiriques. Dans un deuxième temps, à l'aide de cartes topographiques à différentes échelles, on calcule pour chaque point son horizon c'est-à-dire la portion de ce qu'il « voit » qui est du ciel et quelle portion est du sol/bâtiment. Nous obtenons finalement pour des

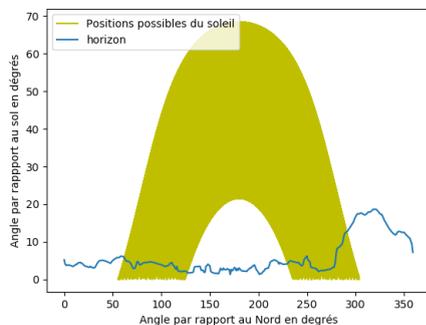


FIGURE 1 – Horizon d'un point en fonction de son angle au Nord, sans ombrage

points de la carte que nous demandons l'irradiation solaire dans le plan horizontal en $Wh.m^{-2}$ toutes les minutes ce qui, sous réserve d'une hypothèse d'uniformité sur la minute écoulée, donne la puissance instantanée au sol à tout instant. Grâce à ces données, il nous est possible d'estimer l'énergie surfacique totale produite par des panneaux PV produite sur 20 ans en prenant en compte le vieillissement. **Dès lors, il nous est possible de calculer le LCOE des panneaux PV dans la région de Nice**, qui s'élève à $0.325€ kWh^{-1}$ contre $0.11€ kWh^{-1}$ pour l'énergie nucléaire en France d'après les chiffres 2017 de l'UCL : on a une énergie plus chère sur le papier mais il faut noter que le rapport 0.19 est obtenu pour de petites surfaces de panneaux et qu'il augmente pour de plus grandes installations.

Concernant l'empreinte carbone de l'énergie solaire, les travaux de thèse de Romain Besseau (2019) montrent que l'équivalent carbone de l'énergie PV est environ de $22g.CO_2eq.kWh^{-1}$ (si la totalité de la production est valorisée) contre 400 pour le mix énergétique européen. On a donc une énergie beaucoup plus durable au niveau de l'émission de gaz à effet de serre.

3 MODÉLISATION DE LA DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE D'UN TRAJET EN TRIPORTEUR

L'objectif de cette modélisation est de, pour un trajet donné, calculer la dépense énergétique de la batterie du triporteur ainsi que la puissance maximale mise en jeu. On en profitera pour calculer le temps de trajet.

Cette modélisation d'abord physique puis mise en algorithmes servira deux buts : d'abord, ses résultats permettront d'élire des solutions techniques pour les triporteurs et leur rechargement, et ensuite, l'écriture informatique associée s'inscrira dans un programme plus globale d'optimisation des livraisons dans la suite du projet.

Le travail commence par la segmentation du trajet en segments de pente constante. On pourra adapter la longueur de ses derniers afin de se rapprocher au maximum de cette hypothèse. Puis, en nous appuyant principalement sur le théorème de la puissance mécanique, nous obtenons les résultats voulus sur chaque segment. On prendra aussi en compte les arrêts éventuels du triporteur pour se rapprocher au maximum des conditions de circulation, d'où une modélisation du démarrage également. Notons que le triporteur peut être chargé de marchandises d'un poids allant jusqu'à 300 kg, les approximations numériques tiennent donc compte d'un tel chargement potentiel.

3.1 Hypothèses

3.1.1 Démarrage

Nous modélisons le démarrage comme une succession de deux phases d'accélération afin d'atteindre une vitesse limite fixée à l'avance (nous y reviendrons). Le premier coup de pédale dure $0.5 s$ et permet de passer de 0 à $1 m.s^{-1}$ ($a_{dem} = 2m.s^{-2}$). Puis, la deuxième phase se poursuit jusqu'à atteindre la vitesse limite, à une accélération a_{suite} fixée empiriquement de $1.33 m.s^{-2}$.

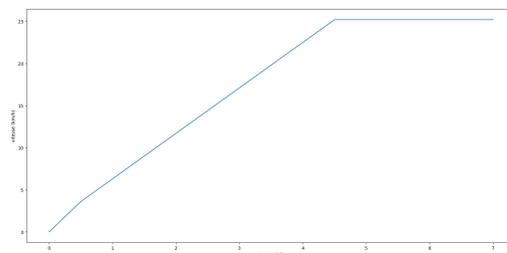


FIGURE 2 – Evolution de la vitesse en fonction du temps durant la phase d'accélération

On négligera tout phénomène dissipatif autre que la force de gravité durant l'accélération afin alléger des formules déjà lourdes par endroits : au vu des faibles vitesses mises en jeu, ce surcroît de précision ne change pas au premier ordre les résultats.

3.1.2 Régime établi

En régime établi, nous considérons que le triporteur va à une vitesse v qui dépend de l'endroit où l'on circule. Par exemple, dans le vieux Nice sur des routes pavées, étroites, et piétonnes, on peut considérer que le triporteur n'ira pas à plus de 10 km/h. De même, sur une piste cyclable, il évoluera plutôt aux alentours de 25km/h. Cette vitesse limite reste cependant une variable et les algorithmes s'attacheront à la maximiser dans les limites de la puissance du moteur, de l'énergie de la batterie, et des conditions de circulation.

Nous prenons alors en compte en premier lieu la force de trainée liée à la résistance de l'air :

$$F_t = 0.5.A.\rho.v^2 \quad (9)$$

A : surface de référence (par défaut estimée à 1 m^2)
 $\rho \simeq 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$ la densité de l'air

Nous prenons également en compte le frottement de roulement qui, pour une pente d'angle θ vaut :

$$F_r = m.g.crr.\cos(\theta) \quad (10)$$

m : masse du triporteur
 $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ la pesanteur terrestre
 $crr \simeq 0.00962$ le coefficient de frottement de roulement (valeur empirique)

Nous noterons dans la suite P_u la puissance fournie par l'utilisateur : nous reviendrons plus loin sur les questions de confort et d'effort quotidien admissible qui nous ont permis de l'estimer.

Notons la présence d'un rapport de réduction r , variant généralement de 2 à 3 sur la plupart des vélos, entre le pédalier et la roue, qui diminue de manière conséquente la puissance à délivrer par le moteur et l'utilisateur $P = P_m + P_u$ **au niveau du pédalier** pour faire avancer le vélo. Enfin, au vu des vitesses qui ne dépassent pas à priori 25 km/h, et qui peuvent descendre jusqu'à moins de 10 km/h en ville, on considère ici que le freinage est instantané, c'est à dire qu'il n'y a pas de phase de décélération (proche du ressenti sur un vélo à ces vitesses).

Cette dernière approximation ne permet en réalité pas tant de diminuer la lourdeur des formules que de limiter le nombre de disjonctions de cas possibles dans un trajet avec beaucoup d'arrêts dont la fréquence est imprévisible, afin que ces calculs puissent être mis en place relativement simplement de manière informatique.

3.2 Calculs de l'énergie dépensée ainsi que de la puissance maximale mise en jeu durant un trajet

3.2.1 Régime établi

Nous nous plaçons donc sur un segment de pente θ . La puissance à fournir au niveau de la roue est égale à la somme des puissances des forces de pesanteur, de trainée et de frottement de roulement. D'où,

$$P_m = \frac{0.5.A.\rho.v^3 + m.g.(\sin(\theta) + crr.\cos(\theta)).v}{r} - P_u \quad (11)$$

Cette puissance est une constante du temps. En notant t_v la durée du régime établi, on a l'énergie consommée par la batterie :

$$E = \left(\frac{0.5.A.\rho.v^3 + m.g.(\sin(\theta) + crr.\cos(\theta)).v}{r} - P_u \right).t_v \quad (12)$$

Notons que dans cette modélisation, nous avons considéré qu'il n'y avait pas de système de récupération d'énergie en descente : l'utilisateur n'aura qu'à stopper de pédaler et si nécessaire freiner : on considère alors que P et E sont nuls.

3.2.2 Accélération

Les formules liées à la phase d'accélération peuvent être plus lourdes car, notamment dans le centre ville, les arrêts peuvent être fréquents et il n'est absolument pas garanti que l'on arrive en régime établi dans la modélisation qu'on s'est fixé.

Introduisons quelques notations :

- t_{dem} la durée de la phase 1 de démarrage
- t_{suite} la durée de la phase 2 de démarrage
- d_{dem} et d_{suite} les distances associées à ces deux phases

Dans le cas où la phase de démarrage se déroule complètement :

$$t_{dem} = 0.5 \text{ s} \quad (13)$$

$$t_{suite} = \frac{v - 1}{a_{suite}} (\text{m.s}^{-1}) \quad (14)$$

$$d_{dem} = 0.25 (\text{m}) \quad (15)$$

La puissance mise en jeu dans la phase 1 est nécessairement plus importante que celle dans la phase 2 puisque rien ne change exceptée l'accélération a_{suite} qui est inférieure à a_{dem} . On a donc la puissance maximale mise en jeu durant la phase de démarrage :

$$P_d = \frac{0.5.m.(a_{dem}.t_{dem})^2 + m.g.d_{dem}.\sin(\theta)}{r.t_{dem}} - P_u \quad (16)$$

On obtient également l'énergie prise **sur la batterie** au démarrage :

$$E_d = \frac{0.5.m.v^2 + m.g.(d_{dem} + d_{suite}).\sin(\theta)}{r} - P_u.(t_{dem} + t_{suite}) \quad (17)$$

Dans le cas maintenant où l'on est obligé de s'arrêter pendant la phase d'accélération au bout d'un temps t_{stop} . Deux cas se distinguent :

Si t_{stop} coupe la phase 2 d'accélération (le plus probable), la puissance maximale demandée au moteur sera celle de la phase 1 pour les raisons évoquées ci-dessus, qui ne change pas par rapport au cas où on arrive au régime établi. Seule l'énergie dépensée par la batterie change :

$$E_d = \frac{0.5.m.(1+a_{suite}.t_{stop})^2 + m.g.(d_{dem} + 0.5.a_{suite}.t_{suite}^2).\sin(\theta)}{r} - P_u.t_{stop}$$

Avec $t_{suite} = t_{stop} - t_{dem}$

Enfin, on peut théoriquement s'arrêter pendant la phase 1 d'accélération ($t_{stop} < 0.5s$), ce qui est physiquement peu réaliste puisque ce n'est que le premier coup de pédale mais informatiquement on est obligé pour la stabilité du programme de considérer tous les cas. La puissance maximale ne change alors pas et l'énergie dépensée est donnée par :

$$E_d = \frac{0.5.m.(a_{dem}.t_{stop})^2 + m.g.(0.5.a_{dem}.t_{stop}^2).\sin(\theta)}{r} - P_u.t_{stop} \quad (18)$$

3.3 Conclusions

Nous avons donc mis en place un modèle permettant de calculer l'énergie dépensée par un triporteur sur un trajet, ainsi que la faisabilité en terme de puissance de ce dernier, en prenant en paramètre un maximum de variables du problème. **Premiers résultats ?**

4 APPLICATIONS

Dans cette partie, nous allons utiliser la modélisation mise en place ainsi que les connaissances établies sur les panneaux solaire pour répondre à l'une des questions techniques que nous nous sommes posées : l'alimentation électrique du triporteur par un panneau solaire directement posé dessus est-elle possible ?

4.1 Cadre des calculs

- Modélisation du triporteur définie précédemment
- Pondération de chacun des trajets :
 - 1 : trajet à vide dans la vieille ville sans pente
 - 2 : trajet à vide sur la promenade sans pente
 - 3 : trajet chargé dans la vieille ville sans pente

4 : trajet chargé sur la promenade sans pente, 5,6,7,8 correspondent aux mêmes situations avec la pente de p%

Installation solaire embarquée :

panneau d'un mètre carré toujours considéré à l'horizontale.

Rendement du panneau de 0.15 et prise en compte de phénomènes supplémentaires (température variable par exemple) avec un facteur 0.8

- Trajet réalisé avec une exposition au soleil de 60% (donc 40% du temps de trajet à l'ombre)

— A NOTER :

l'énergie demandé par le triporteur correspond à l'énergie que la batterie aurait à fournir en plus du pilote, le pourcentage fourni par les résultats suivant est donc le pourcentage d'énergie que la batterie doit fournir qui est compensé par l'apport solaire.

4.2 Ensoleillement type à Nice

Valeurs d'ensoleillement sur un point de la coulée verte à Nice (aucun ombrage), chaque couleur correspond à un mois de l'année

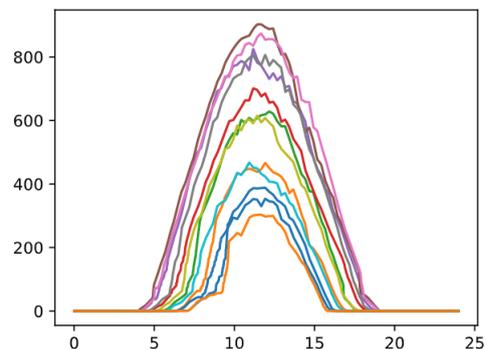


FIGURE 3 – Valeurs d'ensoleillement en Watts par mètre carré en fonction des heures de la journée sur un point de la coulée verte à Nice (aucun ombrage), chaque couleur correspond à un mois de l'année

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W/m ²	900	865	815	792	687	620	605	455	455	387	350	300

FIGURE 4 – Valeurs typiques d'ensoleillement enregistrées à Nice coulée verte au midi solaire (11h en hiver, 13h en été et 12h en moyenne)

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W/m ²	645	595	595	505	415	350	350	237	132	95	87	80

FIGURE 5 – Valeurs typiques d’ensoleillement enregistrées à Nice coulée verte le matin ou l’après-midi (8h le matin ou 15h30 l’après-midi)

4.3 Efficacité du solaire pour des trajets types à Nice

4.3.1 Trajets considérés à Nice

- **Trajet type Touristique** Trajet réalisé à faible vitesse 50% du temps avec 90% du temps chargé (passagers par exemple) avec une pente à 3,5% 30% du temps de trajet. Trajet total de 10km avec 50 arrêts
- **Trajet type Livraison (pente défavorable)** Aller-Retour depuis l’entrepôt avec une pente à 3.5% sur 21.4% du trajet lors de l’aller donc chargé à plein. Haute vitesse tout le long, 3km de trajet aller-retour parsemé de 12 arrêts
- **Trajet type Livraison pente favorable** Exactement le même trajet que précédemment mais la pente se trouve au retour donc sans chargement en plus du triporteur et du pilote cette fois ci

4.3.2 Résultats

Pourcentage d’énergie compensé par l’apport solaire	Moyenne sur l’année	Écart-type des mois
Cas Touristique au midi solaire	21%	2,5%
Cas d’une Livraison (pente défavorable) au midi solaire	33%	3,9%
Cas d’une Livraison (pente favorable) au midi solaire	18%	5,5%
Cas Touristique le matin	17%	2,7%
Cas d’une Livraison (pente défavorable) le matin	27%	4,5%
Cas d’une livraison (pente favorable) le matin	10%	5,0%

FIGURE 6 – Compensation de l’énergie dépensée par l’installation solaire embarquée sur le triporteur

4.4 Influence des paramètres

4.4.1 Influence de la pente

Au vu des résultats précédents, on remarque que la pente semble être de loin un des paramètres les plus influents sur la capacité de l’installation solaire à compenser les dépenses de la batterie lors d’un trajet.

- **Légende Rouge** : Trajet à plein (400kg), **Vert** : Trajet mixte (à moitié à plein et à moitié à vide), **Bleu** : Trajet à vide (150kg)
- **Trajet type utilisé ici** : 300m avec 3 arrêts et une vitesse de pointe de 25km/h, moyennée sur l’année

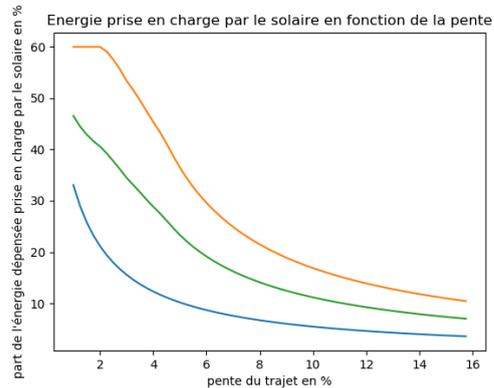


FIGURE 7 – Influence de la pente en moyenne sur l’année au midi solaire selon différents chargements

‘Cas pour le midi solaire
Cas pour le matin

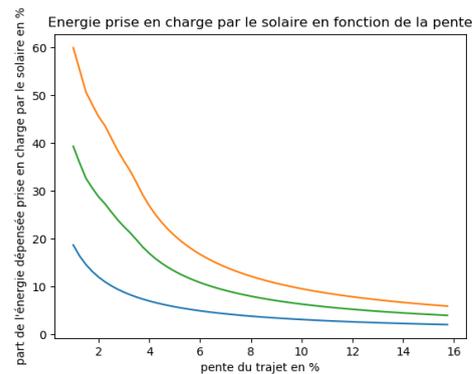


FIGURE 8 – Influence de la pente en moyenne sur l’année le matin selon différents chargements

4.4.2 Influence des autres paramètres

influence de la masse Pour un rapport de masse de 2.7, le Rapport des pourcentages varie de 2.7 à 4 selon les pentes ainsi la dépendance en la masse est proche d’une relation de proportionnalité.

Influence du nombre d’arrêts entre 3 et 9 arrêts sur un court trajet, on remarque un rapport des pourcentages de 1.1 sans pente et 1.6 avec une pente. Ainsi sur du plat le nombre d’arrêts importe très peu et il commence à prendre de l’importance pour un trajet en pente (difficulté des démarrages en côte)

Influence de la vitesse La vitesse influe de manière considérable notamment à cause de la force de traînée.

Ainsi, pour une pente à 3.5% lorsque la vitesse passe de 2.7 à 4 m/s, le pourcentage pris en charge par le solaire baisse de 25 à 14%

4.5 Affinement des résultats

La pente et le pourcentage de temps de trajet passé au soleil sont possibles à estimer à l'aide d'un algorithme exploitant l'ensoleillement de chaque point de la ville à hauteur des route de même que l'altitude de ces points. Nous n'avons pas pu réaliser ce travail à cause du temps nécessaire trop grand pour réaliser tous les calculs (365 jours par an, moyenné sur plusieurs années pour avoir du sens avec une précision au mètre carré et à la minute) mais aussi le manque de temps dans la création des algorithmes d'exploitation de ces données. Néanmoins tous les outils étaient disponible pour continuer ce travail. La vitesse moyenne reste difficile à estimer précisément (fatigue, embouteillages) de même que le nombre d'arrêts (heureusement son influence est minime). Le rapport de transmission moyen étant lié à la vitesse il est lui aussi évidemment difficile à estimer.

ANNEXE

Analyse de l'inclinaison du panneau

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer l'effet de l'orientation de nos panneaux sur leur rendement afin de maximiser la production d'électricité.

Le projet étant localisé à Nice, située dans l'hémisphère Nord, le panneau est orienté au sud dans le but de maximiser le rayonnement reçu (on prend l'azimut correspondant à la position du panneau égal à π). On étudie donc juste l'influence de l'inclinaison ici.

1 Étude théorique de l'influence de l'inclinaison

On peut chercher à exprimer la puissance solaire réellement reçue par le panneau en fonction de son inclinaison et des rayonnements extérieurs.

Pour cela on divise le rayonnement reçu par le panneau en plusieurs catégories :

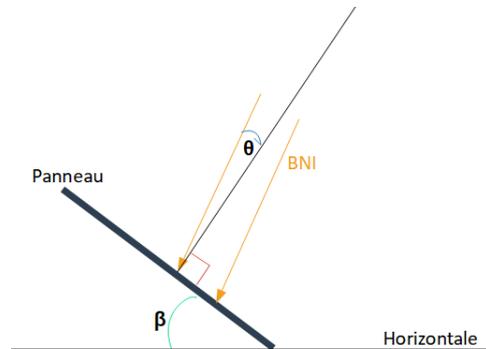
- Le rayonnement direct normal (BNI) : rayonnement solaire arrivant directement sur le panneau incliné (projection sur sa normale)
- Le rayonnement direct horizontal (BHI) : rayonnement solaire arrivant directement sur un plan à l'horizontal
- Le rayonnement diffus horizontal (DHI) : rayonnement réfléchi globalement par l'environnement arrivant sur un plan à l'horizontal

La somme de ces deux rayonnements donne alors le rayonnement horizontal global : $GHI = BHI + DHI$

Avec les hypothèses de rayonnements homogènes, isotropes et lambertiens, on exprime alors le rayonnement total reçu par le panneau incliné GTI en projetant sur sa surface :

$$GTI(\beta) = BNI \cos(\theta) + DHI \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + A \times GHI \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$$

- A : albédo de la surface (0.15 en moyenne)
- β : Inclinaison du panneau par rapport au sol



- θ : Angle d'incidence, entre la normale au panneau et le rayonnement incident

Sachant que l'angle d'incidence s'exprime lui-même en fonction de l'élévation solaire γ_S et de l'azimut solaire α_S .

On définit : $\theta_S = \pi - \gamma_S$

On a :
 $\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\theta_S) + \sin(\beta) \sin(\theta_S) \cos(\alpha - \alpha_S)$

Où α est l'azimut du panneau pris égal à π (orientation plein sud).

2 Évaluation de l'angle d'inclinaison optimal

Pour évaluer l'angle optimal, on applique les formules obtenues ci-dessus aux données d'irradiation d'un site donné.

Les données exploitées donnent l'énergie solaire reçue et l'angle d'élévation du soleil chaque minute sur le site du Cadam près de Nice pendant l'année 2005.

2.1 Éclairage annuel selon différentes inclinaisons

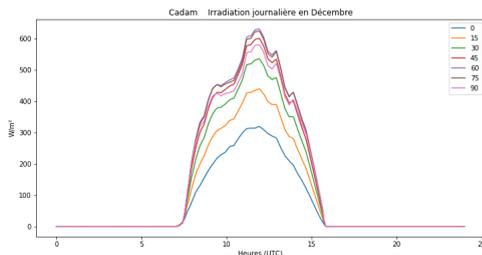
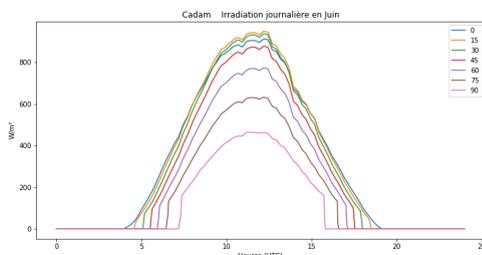
On observe d'abord l'allure de l'ensoleillement du lieu sur l'année pour différents angles.

Cf figure [Irradiation annuelle selon les angles]

Analyse

Les périodes de l'année les plus ensoleillées varient selon les angles : la puissance solaire reçue par le panneau n'est pas maximale au même moment de l'année selon les angles. Par exemple on voit une allure "inversée" pour 0 et 90 : juin est le mois le plus ensoleillé pour 0 mais est, au contraire, le moins ensoleillé pour 90. Cela s'explique par le fait que la hauteur du soleil n'est pas la même au cours de l'année : Le soleil est plus "haut" dans le ciel en été qu'en hiver dans l'hémisphère nord (Le maximum est atteint en juin pour un minimum en décembre). En effet, dans ce cas, un panneau horizontal favorise plutôt le mois de juin tandis qu'un panneau vertical favorisera celui de décembre.

On retrouve ainsi ce phénomène sur les courbes représentant l'irradiation d'un jour typique du mois de juin et du mois de décembre :



On voit que l'ensoleillement est minimal pour l'angle nul en décembre et pour 90° en juin. L'angle nul est d'ailleurs dans les 3 angles apportant le meilleur ensoleillement de juin.

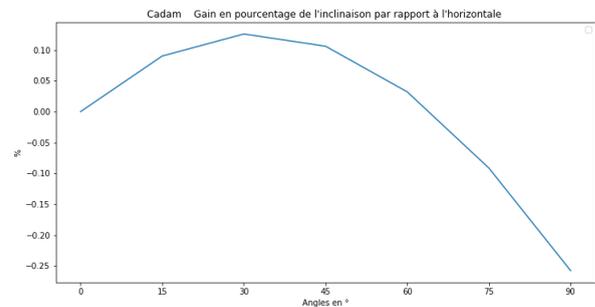
Conclusion pratique

L'angle à privilégier peut varier selon la période de l'année que l'on veut favoriser.

2.2 Éclairage annuel selon différentes inclinaisons

On cherche à trouver l'angle pour lequel l'énergie solaire totale reçue sur l'année est maximale.

Ainsi, ici, on ne cherche pas à favoriser une période par rapport à une autre mais à trouver l'angle qui permet la



meilleure production d'énergie globale sur l'année.

La figure suivante affiche le gain permis par chaque angle et défini comme la différence relative avec le cas horizontal : $Gain = \frac{E_0 - E_\alpha}{E_0}$

- E_0 : Energie solaire reçue par un panneau horizontal sur l'année
- E_α : Energie solaire reçue par un panneau incliné d'un angle α sur l'année

On observe que l'inclinaison apportant le meilleur ensoleillement sur l'année est donc a priori de 30° environ. On a alors un gain d'un peu plus de 10% par rapport à un positionnement à plat des panneaux.

Réflexion sur l'insertion d'un Emplacement Logistique de Proximité dans le tissu urbain

GROUPES PAYSAGISME ET ENERGIE

Abstract. Depuis quelques années, la ville de Nice s'inscrit dans une politique de réaménagement de son territoire et lance des projets de rénovation urbaine ayant pour objectifs principaux l'amélioration des espaces urbains, ainsi que le développement des équipements publics. Notre démarche est de présenter la problématique de l'aménagement d'un Emplacement Logistique de Proximité (ELP) alimenté par l'énergie solaire au sein d'un tissu urbain. Du choix du lieu à la viabilité énergétique de l'ELP, en passant par l'analyse de la morphologie urbaine et de la multifonctionnalité, tout autant de critères nous ont permis de construire notre étude.

1 INTRODUCTION

L'enjeu du projet est important. Depuis une dizaine d'années, le milieu urbain est en pleine transition. De nombreux projets de travaux de valorisation et d'aménagements des territoires sont en cours. Les entrepôts sont bien trop souvent associés à des espaces désuets et vétustes que l'on cherche à cacher. La production d'énergie a subi le même sort. Depuis la fin du XIXe siècle, et le début de la ville verticale, la production d'électricité et de gaz n'est plus montrée aux citoyens. Apporter un nouveau regard sur ces composantes essentielles au fonctionnement de notre société est ainsi au fondement de notre étude. En abordant une approche paysagiste, qui nous amène à composer avec l'existant, mêlée à une étude de la viabilité économique et énergétique du projet, nous avons cherché à présenter un modèle d'Emplacement Logistique de Proximité qui s'inscrit dans une politique de ville moderne où le regard sur la production d'énergie a de nouveau sa place dans l'espace urbain.

2 MÉTHODES ET APPROCHE

2.1 Méthode paysagiste

Afin de mieux argumenter notre projet d'insertion des ELP dans le tissu urbain niçois, nous avons dû définir la notion de paysage et le métier de paysagiste. Le paysage désigne une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations. Le paysage est donc un concept complexe qui révèle à la fois d'une subjectivité personnelle et d'une sensibilité collective, un imaginaire commun. C'est la découverte de la notion de paysage et du regard de ses

professionnels qui nous ont permis de déchiffrer le paysage urbain de Nice. En nous basant sur les approches paysagères et urbanistiques, nous avons développé une grille de lecture du territoire articulée autour de critères physiques (tels que la topographie et les conditions climatiques du milieu), de critères socio-culturels (prenant en compte le passif du lieu), et de critères politiques et économiques (en choisissant des lieux financièrement exploitables). Nous avons aussi réalisé des études de terrain afin de nous imprégner du paysage urbain. Ces critères nous ont permis d'élire des emplacements privilégiés pour nos ELP. Il ne faut pas perdre de vue le facteur temps. La ville évolue en fonction des trouvailles et avancées technologiques. Aujourd'hui, il faut penser une évolution de la ville à travers les transitions de mobilités, énergétiques, écologiques, et sociétales. Toutefois la question de la perception est centrale. Le choix d'une centralisation et d'une délocalisation de la production d'énergie a fait que l'énergie n'est plus visible dans le milieu urbain. L'opportunité de mettre des ELP dans le milieu urbain nous offre la possibilité de donner à voir et de mettre en scène cette production d'énergie. Nous avons été confrontés à des lieux délaissés, valorisables ; notre objectif est de faire évoluer notre regard du paysage par le levier de l'énergie et grâce au potentiel de ces lieux. Nous avons opté pour une conception multifonctionnelle des ELP, pouvant satisfaire leur fonction première de lieu de stockage et livraison, mais aussi pouvant bénéficier à la population niçoise par d'autres usages.

2.2 Approche énergétique

Il nous a également paru légitime de nous demander si le projet d'un ELP était viable d'un point de vue éner-

gétique. Pour cela, nous nous sommes intéressés à la quantité d'énergie qui peut être produite par un ELP recouvert de panneaux. Nous avons donc tissé le lien entre technique pure et paysagisme.

Pour cela, nous avons testé différents scénarios d'ELP possibles en faisant varier comme facteurs la surface de panneaux solaires disponibles et le nombre de triporteurs mis en place sur le site. Concernant la surface de panneaux solaires, nous avons fait les calculs avec les surfaces de 2500/5000/10000 m². Au niveau du nombre de triporteurs, sur la base des données des triporteurs de l'Ouest, nous avons examiné les cas 0,15 et 30 triporteurs. Nous avons pour ce faire implémenté un programme qui calcule en fonction du nombre de triporteurs et de la surface de panneaux solaires dont dispose l'ELP, la quantité d'énergie restante par jour en moyenne selon le mois. La quantité d'énergie restante correspond à la différence entre la quantité d'énergie récupérable au cours d'une journée et la quantité d'énergie consommée par un parc de 15 triporteurs utilisant 2 batteries par jour ; le témoignage des triporteurs de l'ouest nous a appris que chaque triporteur avait besoin d'une telle quantité d'énergie par jour et, une batterie de triporteur utilisé pour les livraison se chargeant en 3h) 107W, cela revient en fait à bloquer de la puissance en permanence pour toute la flotte de triporteurs: la batterie de l'après midi charge le matin et inversement.. Pour renvoyer ces données, l'algorithme utilise les données d'ensoleillement minute par minute du site de l'esplanade Kennedy à Nice évoquées dans la première partie de l'article Energie. Une approche en puissances instantanées viendra affiner nos conclusions sur le potentiel énergétique de ces lieux de stockage de colis qui sont devenus des lieux de production.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Insertion des ELP dans le tissu urbain

A partir d'une analyse des transports et des flux logistiques du territoire métropolitain de Nice (autoroutes, aéroport, lieux logistiques en périphérie), nous avons appréhendé la logistique niçoise. Notre démarche nous a conduit à élire deux emplacements en particulier : l'un proche de la Gare de Nice-Thiers (ancien terminal de fret ferroviaire), l'autre nommé Esplanade Kennedy (terrain plat souvent utilisé comme parking sur la Coulée Verte). Ces lieux sont stratégiquement situés à l'interface entre plusieurs échelles de mobilité. Ils sont proches du centre-ville, point d'intérêt de la livraison urbaine, valorisables, et idéalement ensoleillés. Nous allons présenter notre analyse et modèle d'ELP résultant pour chacun de ces deux lieux indépendamment.

Dans notre démarche, nous avons commencé par convoquer le passif du lieu. L'étude de celui-ci en 1946, époque à laquelle le Paillon n'est pas encore recouvert, met en évidence l'articulation de différentes zones urbaines autour du fleuve. Le fleuve constituait un point de rendez-vous aux multiples usages, ce qui a pu être en parti conservé et que nous voulons retrouver pleinement.

3.1.1 Esplanade Kennedy

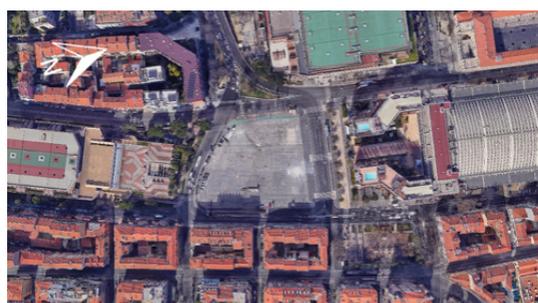


Figure 1: Vue aérienne de l'esplanade Kennedy

L'Esplanade Kennedy est un espace bétonné vide de 8000 m² situé dans la partie nord de la Coulée Verte. La Coulée Verte (ou promenade du Paillon) étant un espace vert aménagé tout au long de l'ancien cours à ciel ouvert du Paillon, fleuve qui traverse du Nord au Sud la ville de Nice.



- Grands équipements et industrie
- Zone pavillonnaire
- Habitats collectifs

Figure 2: Partition urbaine en 1946

L'esplanade sert principalement de parking d'appoint mais peut aussi accueillir des évènements tels que le cirque d'hiver de Nice. Le potentiel d'un tel espace vide mais multifonctionnel est donc important. Dans notre démarche, nous avons commencé par convoquer le passif du lieu. L'étude de celui-ci en 1946 (**Figure 2**), époque à laquelle le Paillon n'est pas encore recouvert, met en évidence l'articulation de différentes zones urbaines autour du fleuve. Le fleuve constituait un point de rendez-vous aux multiples usages, ce qui a pu être en parti conservé et que nous voulons retrouver pleinement.



- Axes routiers
- Voie ferroviaire
- Tramway
- Pistes cyclables

Figure 3: Réseau des mobilités aujourd'hui

Avec le recouvrement du Paillon, le développement et la pénétration de différentes mobilités urbaines dans le centre de Nice sont permis (**Figure 3**). Les mobilités dures (en particulier l'automobile) façonnent l'espace, et viennent donner au site sa fonction principalement rattachée au tout-voiture, à savoir de parking : il s'agit d'un délaissé-routier auquel on a donné l'une des seules fonctions qu'il pouvait occuper. De nouveaux grands équipements (sportifs et événementiels) sont ensuite construits et inscrivent le lieu dans cette dynamique (**Figure 4**).

L'étude suivante a visé à appréhender les politiques urbaines contemporaines de la ville de Nice (**Figure 5**). Celles-ci sont principalement orientées vers un développement des trames verte et bleue, projet national français depuis 2007 visant une restauration écologi-



Figure 4: Grands équipements

que du territoire français, ici concrétisé par une revalorisation du cours du Paillon (jeux d'eau, fontaines) et une végétalisation du centre-ville niçois. Cette politique vise, depuis 2011, à redonner l'espace aux piétons et aux mobilités douces (cyclistes, tramway) en lieu et place des mobilités plus agressives (voitures, trains).

Ces études couplées montrent l'histoire du lieu et son évolution. Elles mettent en lumière comment l'esplanade est aujourd'hui devenu le symbole d'un urbanisme vieillissant, et l'intérêt à repenser le lieu comme un prolongement de la nouvelle Coulée Verte. L'esplanade peut retrouver son rôle originel, multifonctionnel et tourné vers les citoyens.

La localisation stratégique du lieu est un véritable atout à mettre en forme pour construire un ELP viable, l'orienter dans les politiques actuelles, et profiter de ce tremplin vers la compréhension des énergies renouvelables.

Pour penser l'agencement du centre de stockage et sa multifonctionnalité, nous avons dû étudier de plus près les grands principes de composition du quartier (**Figure 6**). Ainsi il apparaît que la sortie d'autoroute à l'Ouest constitue une entrée agressive de la logique de mobilité dans le Centre-ville, tandis que le Sud et l'Est sont davantage pensés dans la logique urbaine (résidentielle). Ceci invite à imaginer le bâtiment comme une articulation, transformant la mobilité dure en mobilité douce ; d'un côté il accueille le flux routier, assurant les flux de marchandises entrant. Il est aussi pensé comme « stoppant » le flux grâce à un recouvrement partiel de la route qui longe le bâtiment, véritable effet tampon. La construction d'un parking côté ouest peut permettre



Figure 5: Principaux axes verts et bleus

de conserver la fonction première de l'esplanade. De l'autre côté, à l'Est, l'ELP assurerait une continuité protectrice avec le milieu résidentiel et piéton. Ce second aspect se concrétise par le départ des triporteurs de livraison, par un espace aéré, végétalisé, piétonnisé, ou assurant des services extérieurs à la livraison (rechargement de véhicules électriques, voitures, vélos), choisis au bénéfice des usagers niçois. La trame de la coulée verte invite à penser la mobilité douce et l'espace piétonnisé dans un axe nord-sud.

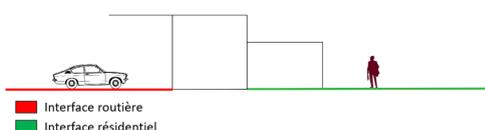


Figure 6: Coupe des grands principes de composition



Figure 7: Vue aérienne du projet

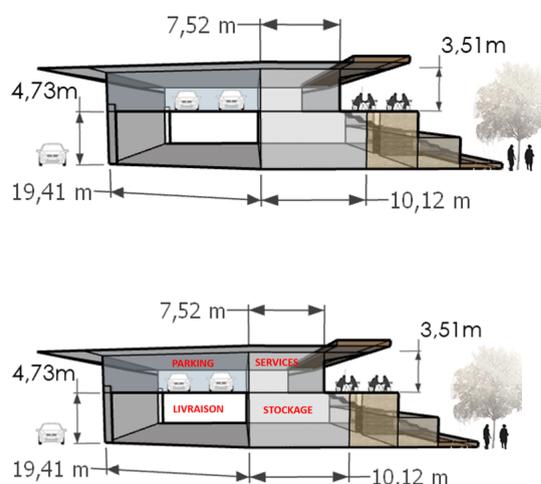


Figure 8: Coupe détaillée

Notre démarche a permis d'aboutir à un bâtiment sur plusieurs étages (relativement bas) inscrit dans le bâti actuel et permettant une logistique réaliste (Figure 7 et Figure 8). Il présente une surface de panneaux solaires de $2500 m^2$. Dans une optique de mise en scène de l'énergie, une promenade en belvédère est créée sur le toit permettant de contempler l'espace végétalisé à l'Est, ainsi que les panneaux solaires qui laissent à voir cette production.

3.1.2 La gare de Nice-Thiers

Basculons maintenant vers un autre site, celui de la Gare de Nice Thiers, à la périphérie du centre-ville côtier. Une gare comprend diverses installations qui ont une double fonction : permettre la montée ou la descente des voyageurs, le changement de train, ou le chargement et le déchargement des marchandises. Par sa définition et son utilisation, la gare est une plateforme multimodale, un espace de connexion et une interface entre les flux. Afin d'implanter un ELP dans cet environnement, nous avons choisi de nous doter d'une posture paysagiste qui nous a amenée à composer avec l'existant. De 2013 à 2017, le site de la Gare a subi une vaste opération d'urbanisme afin d'améliorer son inclusion dans le milieu urbain, notamment avec une restructuration du parvis maintenant entièrement piétonnisé. Il vient donc d'être redessiné et recomposé. Ce lieu ainsi comporte une grande synergie que nous souhaitons développer. Les équipements de mobilité sont un atout pour consolider la jonction et l'articulation entre les différents modes de transport et leurs échelles. Ainsi, réutiliser et affiner, pour la logistique du dernier kilomètre,

le potentiel des grands équipements déjà existants constitue notre stratégie.



Figure 9: Grands équipements autour du site de la Gare Nice Thiers

Une partie de l'espace de notre étude a été revalorisée lors des grands travaux d'aménagement (Figure 9) mais en analysant les alentours, nous avons découvert un site en friche : un ancien hangar. Ce terrain a déjà été composé pour une utilisation de flux de marchandises et son potentiel en réserve est énorme : parking, arrivée de trains, arrivée de camions, fret ferroviaire, pistes cyclables, entrepôt déserté, absence d'ombrage. Comprendre cet espace a permis de découvrir cet emplacement inoccupé et à fort potentiel, qui pour nous est une très belle opportunité de reconvoquer son usage par l'histoire du lieu avec des techniques nouvelles. En s'inscrivant dans une démarche paysagiste, nous allons dans la suite définir les prises sur lesquelles notre projet va se fonder et chercher à utiliser l'énergie dans le but de remettre ce lieu en fonction.

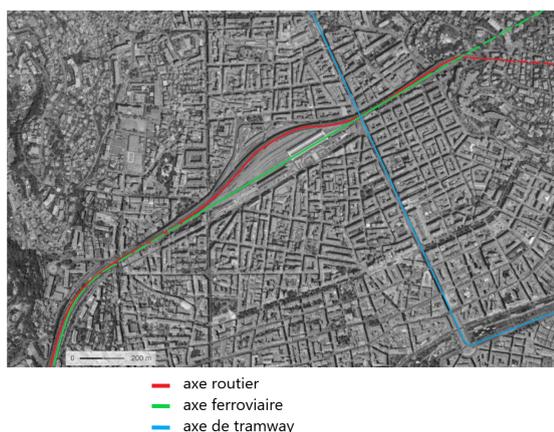


Figure 10: Axes principaux de mobilité

Ce site a été composé pour et par la mobilité (Figure 10). Deux échelles de transport communiquent : une de traverse, qui correspond aux mobilités départementales routières et ferroviaires, et une locale, qui correspond aux mobilités urbaines intérieures. Ce complexe autour de la Gare constitue ainsi la lisière (un espace de transition très riche) entre une logique de mobilité et une logique urbaine. Il est une porte d'entrée dans la ville, une entrée dans un milieu de vie et le premier aperçu de la ville par les voyageurs adeptes du train et de la voiture.

Nous avons fondé la réflexion de l'aménagement de l'ELP sur l'étude des grands principes de composition du quartier de la Gare Nice Thiers (Figure 11). Cette zone est aménagée de façon à protéger l'espace urbain de l'espace de « mobilités dures » (trains, autoroutes), grâce à des constructions au rôle de « tampon ». Ainsi, les aménagements en périphérie des grands axes de mobilités sont pensés de la même façon. Ils permettent d'opérer une transition douce et protectrice entre les milieux dits ferroviaires et urbains. Pour se placer dans la continuité du lieu, nous nous sommes inspirés et avons pris pour exemple le principe selon lequel un bâtiment sépare l'espace piéton du milieu ferroviaire qui est ombragé par un toit arqué. Nous avons donc ainsi tiré un enseignement de cet agencement ce qui nous a permis de conceptualiser un principe de composition que nous allons pouvoir souligner grâce au biais de l'énergie.

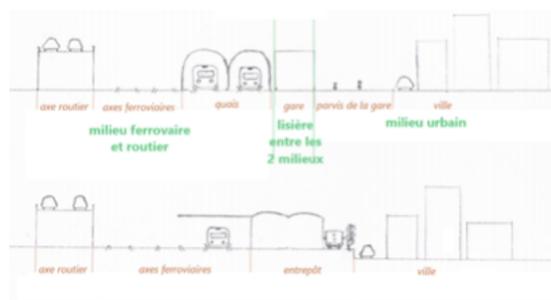


Figure 11: Coupes : grands principes de composition

À des fins énergétiques et dans le but d'ancrer notre ELP dans l'existant, un parvis de panneaux photovoltaïques suspendu au-dessus des rails et une plateforme prolongée sur le parking actuel pour respecter l'optique de tampon ont été conçus comme réponse au problème (Figure 12). Le parking sera couvert d'une ombrière en PV et un système de récupération d'eau pourra être mis en place afin d'alimenter le parterre qui compose la suite de notre site. En effet, l'axe piéton est séparé de l'entrepôt et du parking par un mur laissant présa-

ger un jardin en son côté intérieur. En s'inspirant de cet imaginaire commun, nous avons cherché à magnifier ce mur de pierres de taille par un cortège floristique et une palette végétale variée. Celui-ci deviendra le support d'un sol retrouvé offrant une grande tranchée végétalisée. On travaillera ce sol afin de composer avec différentes strates de végétalisation : ensemble herbacé, strates arbustive et arborée.



Figure 12: Croquis du projet d'ELP à la Gare Nice Thiers

Nous inscrivons ainsi toujours notre composition dans cet objectif de transition douce entre le dur et l'urbain.

3.1.3 Étude énergétique

Première approche et ordres de grandeurs

Nous utilisons l'algorithme mentionné dans la partie 2 afin de calculer l'énergie disponible pour une utilisation autre que la recharge de batteries de triporteurs. La notation avec le signe "/" dans la première colonne correspond au scénario d'ELP considéré. Par exemple, 2500/15 correspond à une surface de panneaux solaires de $2500 m^2$ et à un parc de 15 triporteurs, dans le cas de l'emplacement de l'esplanade Kennedy (l'irradiation solaire est cependant presque la même sur l'autre emplacement).

Comme stipulé précédemment, le cas de l'esplanade Kennedy telqu'on l'a finalement envisagé correspond au scénario $2500 m^2$ de surface de panneaux solaires et 15 triporteurs. Dans ce cadre là, les résultats montrent que l'énergie restante par jour en moyenne sur toute l'année sera de 1318 kWh.

En se basant sur des ordres de grandeurs usuels, cette énergie permettrait par jour de recharger 32 Renault Zoé ou 13310 vélos.

Il apparaît donc comme premier résultat que l'esplanade Kennedy peut bien remplir plusieurs foncti-

Energie restante moyenne par jour(kWh)	
2500/0	1438
2500/15	1318
2500/30	1299
5000/0	2675
5000/15	2655
5000/30	2634
10000/0	5350
10000/15	5330
10000/30	5311

Figure 13

onnalités en garantissant par exemple un parc de 15 triporteurs et en assurant également la recharge d'un certain nombre de vélos et de véhicules électriques.

Toutefois, un problème transparait à la lueur des résultats au mois par mois de l'algorithme utilisé. En effet, une étude plus précise du scénario 2500/0 montre que 7 mois auront une énergie moyenne restante inférieure à la moyenne annuelle. Ce phénomène est dû aux variations saisonnières d'ensoleillement dont les panneaux solaires sont nécessairement très dépendants. Ainsi, à supposer que nous souhaitons le même fonctionnement toute l'année basé sur l'énergie restante moyenne annuelle par jour, l'esplanade Kennedy ne pourrait pas fonctionner sans un raccordement au réseau lui permettant de combler un manque d'énergie lors des mois d'hiver par exemple.

Affinement des résultats: calculs des puissances instantanées

Les données sur l'irradiation solaire au sol nous permettent, comme vu dans la première partie de l'article Energie, d'avoir accès à la puissance instantanée disponible dans le plan des panneaux.

Nous constatons un motif commun dans le déroulement de la journée mais que les écarts types saisonniers sont très grands. Cependant, en terme de puissance, **il est toujours possible, sauf si la saison et la météo sont conjointement très défavorables, de recharger deux batteries par jour pour les triporteurs, une le matin et une l'après midi.** Dans le cas des chutes de puissance qui peuvent malgré tout advenir, il faut tout de même raccorder l'ELP au réseau afin d'assurer la

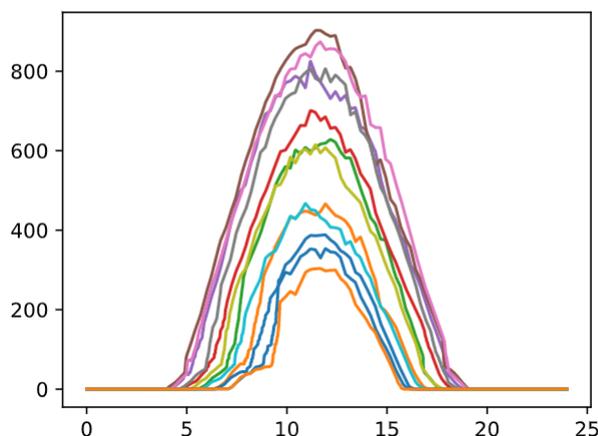


Figure 14: Irradiation solaire en $W.m^{-2}$ au sol à Nice suivant les heures de la journée, chaque couleur correspond à un mois différent, en prenant la moyenne de toutes les journées de chaque mois.

perennité des livraisons.

En revanche, concernant la satisfaction de la demande public, de fortes disparités apparaissent.

D'abord au niveau des heures où de la puissance: entre mai et juillet, on est à la puissance pour charger plusieurs Renault Zoe en chargement rapide (22 kW) et des vélos à partir de 8h30 et jusqu'à 17h40. En hiver en revanche (en décembre par exemple), la fenêtre où l'on a ces ordres de grandeur de puissance est plus réduite, de 11h45 à 15h20. Rappelons d'ailleurs, comme cela est mentionné dans l'article énergie, que ces données statistiques prennent en compte les épisodes météo défavorables à la production d'énergie solaire en particulier en automne et en hiver.

N'étant pas satisfaits d'un service rendu qui paraît assez fluctuant, nous mettons en place un système qui repose d'abord sur la base de données statistiques puis, à terme sur le terrain d'instruments de mesure du rayonnement solaire de type pyranomètre. En utilisant dans ce dernier cas une hypothèse de conservation du rapport entre la puissance produite par le panneau et celle du soleil, ce système "connait" donc l'ensoleillement probable de la journée. Puis, nous avons implémenté un programme qui vise à satisfaire l'objectif ambitieux de proposer un système de recharge d'appareils électriques de type voiture, vélo ou téléphone, interactif. L'utilisateur arrive avec un appareil dont il veut recharger une certaine portion de la batterie (avec conversion en km correspondants possible pour une Zoe par exemple), et qu'il est près

à laisser une certaine durée sur place. L'algorithme optimise alors la distribution globale de puissance afin que les demandes soient au maximum satisfaites, et trouve les meilleurs compromis sinon. Notons d'ailleurs qu'on peut imaginer pousser le processus plus loin en **délocalisant le stockage**: imaginons qu'un homme laisse sa voiture charger le peu de batterie qu'il a utilisé pendant qu'il va au cinéma: il serait logique, en conservant une marge de sécurité, de puiser dans la batterie de sa voiture pour recharger d'autres véhicules plus urgents, et à la recharger après. On a alors créé un véritable pôle multimodal et interactif qui, au-delà simplement de stocker des marchandises et recharger des triporteurs, met en scène énergie solaire et rend véritablement un service public.

En conclusion, nous pouvons affirmer que le projet d'un ELP place Kennedy est énergiquement viable. Cependant, notre étude montre également qu'un raccordement de l'ELP au réseau est indispensable pour pallier le manque d'énergie lors de journées faiblement ensoleillées, et qu'un système de stockage indépendant du réseau (qui joue en réalité ce rôle) afin d'envisager une auto-consommation à terme de la station est possible. Des solutions qui ne font pas appel à des batteries, et donc à des terres rares, existent mais sont encore marginales.

Optimisation et répartition des tournées

Resumé. L'organisation des tournées est une tâche difficile à accomplir pour une entreprise de livraison qui vient de s'implanter dans une nouvelle ville. Nous avons donc voulu développer un outil informatique pour que cela soit plus efficace.

Abstract. During this project, we worked on optimizing the logistics for the delivery of packages to clients. Indeed, it is a way to use less energy, and therefore reduce the ecological impact of delivery. Optimizing deliveries also allows us to use less delivery tricycles, which saves money, resources, energy, and reduces traffic jam, therefore CO2 emissions.

1 PRÉSENTATION DU PROBLÈME : CADRE, OBJECTIFS, CONTRAINTES

1.1 Cadre du problème

Nous disposons :

- **De données Open Street Map**, qui vont être utilisées par tous nos algorithmes pour trouver les chemins que les triporteurs vont emprunter.
- **De clients**, chacun étant modélisé par une position géographique, et deux dates entre lesquelles il veut être livré.
- **D'ELPs (emplacements de logistique de proximité)**, modélisés par des positions géographiques.
- **De triporteurs**, qui ont chacun une charge utile (la masse maximale de colis qu'il peut transporter), d'une batterie, qui a une certaine charge (en Wh), et des caractéristiques qui vont nous permettre de calculer l'énergie qu'ils dépensent pour faire un trajet, à savoir : sa masse totale, la puissance de son moteur, la puissance de sa batterie, et sa surface de trainée.

1.2 Objectif et contraintes

Il s'agit de créer des tournées : qui sont des listes de clients à livrer dans l'ordre. Il faut ensuite les assigner à un ELP et un triporteur de cet ELP. On va ensuite minimiser une pondération de l'énergie et du temps pour les tournées. Mais il y a des contraintes à respecter. En effet :

- Chaque triporteur ne peut pas porter plus de colis que sa charge utile maximale.

- La batterie du triporteur doit avoir assez d'énergie pour réaliser la tournée.
- Tous les clients doivent être livrés dans un intervalle de temps imparti.
- Les trajets de la tournée doivent être réalisables par le triporteur, donc ne doivent pas faire appel à une puissance moteur trop importante, et le livreur fournit une puissance maximale.

Ce problème s'inscrit dans une classe de problèmes plus générale, le CVRP : Capacited vehicle routing problem. Nous avons donc récupéré

1.3 Démarche adoptée pour la résolution de ce problème

Nous avons récupéré des données cartographiques, que nous avons converti en graphe, utilisable par un algorithme d'optimisation pour pouvoir créer des tournées qui minimisent l'énergie totale dépensée par les triporteurs, ainsi que le temps mis pour effectuer la tournée.

2 GESTION DES DONNÉES

2.1 Gérer les différents types de coordonnées

2.1.1 Les différents types de coordonnées

Entre les différentes sources de données que nous utilisons et les applications que nous en faisons, il nous a fallu jongler entre différents types de coordonnées.

- **EPSG:4326** (latitude/longitude "réelle") :

Cette projection (**Figure1**) assimile la terre à un ellipsoïde de révolution autour de l'axe nord-sud,

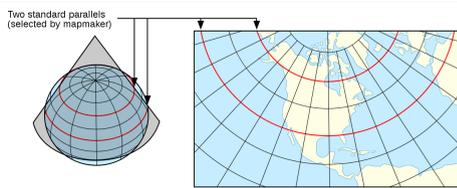


Figure 1

elle est utilisée très couramment car assez précise et universelle.

- **EPSG:2154** (Lambert/France) : Cette méthode permet d'avoir une projection



Figure 2

plane de la carte assez précise et rapide à calculer dans un secteur aux alentours de la France (Figure2).

- **EPSG:3857** Pseudo-Mercator (Web Mercator) : Cette projection est utilisée dans beaucoup d'applications car bien que peu fidèle proche des pôles, elle allège les calculs tout en restant universelle (contrairement à la précédente).

2.1.2 OpenStreetMap

- **Tiles Slippy map**
Le format slippy map est utilisé pour des applications cartographiques sur le web. Les images ("tiles") sont numérotés en fonction de leur position (en EPSG:4326) et d'un zoom. En effet pour un triplet (latitude ϕ en degré, longitude λ en degré, zoom z), la page : <https://a.tile.openstreetmap.org/xtile/ytile/zoom.png> renvoie une tile dont les coordonnées du point en bas à droite sont régies par cette équation:

$$\begin{aligned} \text{xtile} &= \lfloor \frac{(\lambda+180)}{360} * 2^z \rfloor \\ \text{ytile} &= \lfloor \frac{1}{2} * \log(\tan(\text{rad}(\lambda)) + \frac{1}{\cos(\text{rad}(\lambda))}) \rfloor \end{aligned}$$

- **Données** : Les données fournies par OpenStreet-Map sont au format EPSG:4326 (Figure 1)
- **Architecture**; Nous récupérons donc les don-

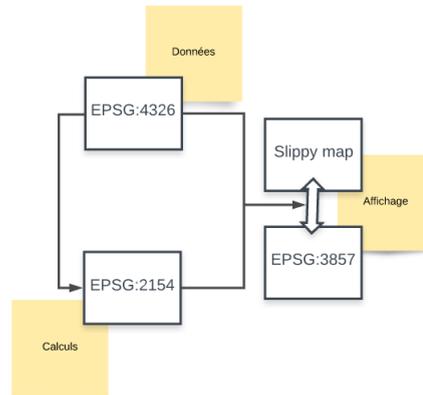


Figure 3

nées au format EPSG:4326 que nous transformons à l'aide du module transform de pyproj en EPSG:2154 à partir duquel nous effectuons les calculs. Nous gérons enfin la cohérence entre nos objets et les images fournies par OpenStreetMap lors de l'affichage en utilisant le format Slippy Map (Figure3).

2.2 Extraction des données cartographiques

Dans le but d'optimiser le trajet d'un triporteur muni de panneaux solaires, nous avons besoin d'une carte des routes avec pour chaque point son altitude et le rayonnement solaire qu'il reçoit. La solution de mettre des panneaux solaires sur les toits des triporteurs n'a pas été retenue dans le cadre du MIG, mais a été explorée et l'optimisation aurait été très similaire avec cet apport d'énergie supplémentaire.

Dans un premier temps, nous avons voulu créer une carte des routes pouvant être empruntées par les triporteurs. Nous avons choisi de la représenter sous forme d'un graphe où les sommets seraient les intersections entre les différentes rues et les arrêtes les rues. Nous avons utilisé la base de données d'Open Street Map pour cela. Sur OSM, les routes sont des Way caractérisés par un identifiant, le type de route (highway), le sens (oneway : sens unique ou double sens) et les identifiants des nœuds (node) qui composent la route. Ensuite pour chaque nœud, nous disposons de son identifiant et de

ses coordonnées (lat/long en ESPG 4326 ou WGS 84). Qgis nous a permis de charger les données OSM sur la surface qui nous intéressait et nous avons exporté dans un fichier CSV les identifiants OSM des ways. Le module python osmapi permet à partir d'un identifiant de way de récupérer le type de route. On a choisi de ne garder que les routes qui sont dans l'ensemble { 'footway', 'living_street', 'pedestrian', 'primary', 'residential', 'secondary', 'service', 'tertiary', 'unclassified' }.

Ensuite, toujours avec osmapi, on peut récupérer les coordonnées des noeuds qui composent la route. On crée ainsi une liste de coordonnées indexées par 0, 1, 2... et en parallèle une liste d'adjacence de ces points (c'est-à-dire que le ième élément de cette liste donne les index des points auquel le point i est relié).

Dans un deuxième temps, on a choisi de calculer les altitudes et les irradiances seulement aux noeuds qui composent le graphe des routes car OSM fournit une quantité importante de points (près de 8000), qui sont assez rapprochés (il y en a beaucoup plus qu'à chaque intersection de rue). Le calcul de l'altitude a été fait à l'aide des données IGN et le calcul de l'irradiation a été fourni par Benoit Gschwind. Les limites de cette modélisation sont que les points ne sont pas également répartis et que le calcul des altitudes et d'ensoleillement peut être faussé par des ponts qui se situent au-dessus des routes.

3 Des données traitées de la carte au graphe

Après le traitement des données d'altitude et de routing des cartes via QGIS, on se doit de traiter les données numériques pour en faire un graphe reliant les différents points de livraison par des chemins auxquels on peut affecter un poids (que l'on calcule en fonction de ces données). On doit donc également déterminer le meilleur chemin pour relier chaque couple de points à livrer. Enfin, on doit calculer le poids à affecter à l'arête reliant ce couple. C'est la raison de l'implémentation de maptograph.

3.1 Représentation de la carte

Pour pouvoir récupérer et traiter des données géographiques, on créé la classe Point qui possède 4 attributs : latitude, longitude, abscisse et ordonnée. Elle permet de jongler entre les différentes formes de caractérisation d'un point sur la carte; la caractérisation en abscisse/ordonnée permet de calculer par exemple, la distance euclidienne entre deux points. La carte obtenue par le travail effectué précédemment (cf 2.2) est discrétisée : on a un ensemble fini de points sur les routes de la carte. Ils forment un réseau- très complexe,

certes, mais discret - de couples (latitude, longitude) qui caractérisent la carte de la ville étudiée.



Chacun de ces couples (point1, point2) de points peut être ou non relié directement par une route allant de point1 vers point2. On modélise donc ces données sous la forme d'un dictionnaire de liste sous la forme
 $\{(lat, lon) : [(lat1, lon1), (lat2, lon2)],$
 $(lat', lon') : [(lat'1, lat'2)]\}$

Ici, le point (lat, lon) est relié directement aux points (lat1, lon1) et (lat2, lon2).

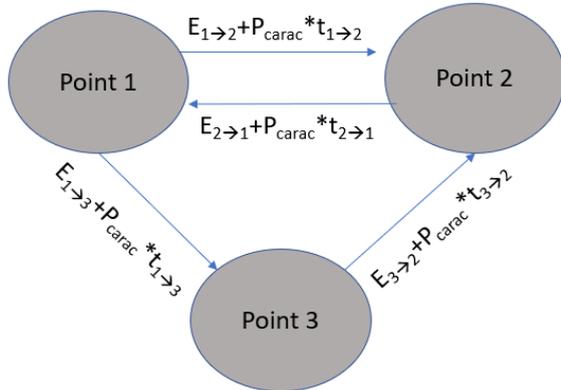
On transforme enfin chacun de ces couples (latitude, longitude) en Point(latitude, longitude) et on nomme le dictionnaire obtenu `coor_points`.

3.2 Cheminement interne de maptograph

3.2.1 Grosgraphe, création et attribution des points

On construit un graphe préliminaire qu'on appellera grosgraphe. Ce graphe relie entre eux chacun des points reliés directement par des arêtes, dont le poids est une pondération entre le temps et l'énergie nécessaire pour aller du premier point au second. À cet effet, nous avons implémenté un programme qui repose sur la modélisation physique des trajets en triporteur [Cf article approvisionnement énergétique]. Il segmente le chemin, et étudie sa faisabilité en comparant la puissance maximale qui va être demandée au moteur pour faire avancer le triporteur, et la puissance maximale de celui-ci : si le trajet est faisable, il calcule l'énergie dépensée par la batterie et le temps du trajet. Pour éviter de bloquer trop de trajets, on fait un compromis entre la puissance (voire les pics de puissance) que l'on peut demander à l'usager pour soulager le moteur, le temps pendant lequel on la demande et la vitesse à laquelle le triporteur doit aller, puisque sa diminution entraîne aussi une baisse de la puissance nécessaire.

Ci-dessous est schématisé le graphe produit.



3.2.2 Détermination de l'énergie nécessaire et du chemin à parcourir entre chaque arrêt

On cherche alors à déterminer le chemin le plus court entre chacun des points de grosgraphe, et non plus seulement entre les points reliés directement. C'est dans ce but qu'intervient le module networkx, qui permet d'implémenter un algorithme de Dijkstra renvoyant le plus court chemin entre deux points ainsi que le poids qui lui correspond. Pour cela, on doit au préalable convertir notre graphe en graphe Networkx. Cet algorithme, implémenté en C++ permet une rapidité d'exécution que ne permettait pas l'algorithme que nous avons nous même implémenté en Python.

3.2.3 Traitement pour rendre exploitable les données des lieux de livraison

Pour pouvoir utiliser dans le programme final les données des lieux de livraison, on doit approximer chacun de ces emplacements, qui sont des instances de la classe Point en arrivant dans le programme, par le point de la carte discrétisée qui est le plus proche. On implémente dans ce but une simple fonction de minimisation : approx, qui prend en entrée coor_points (explicité plus haut), et la liste de lieux de livraison. Grâce à l'algorithme de calcul de plus court-chemin, et à cet algorithme d'approximation, on a enfin tous les outils nécessaires pour créer notre fonction graph, qui sera par la suite appelée dans la boucle du programme d'affichage.

3.2.4 Génération du graphe à traiter par la boucle d'affichage

Pour générer le graphe de sortie, on crée un programme qui prend en entrée la liste des lieux de livraison, coor_points, ainsi que les données cartographiques et les caractéristiques techniques (des triporteurs et du livreur).

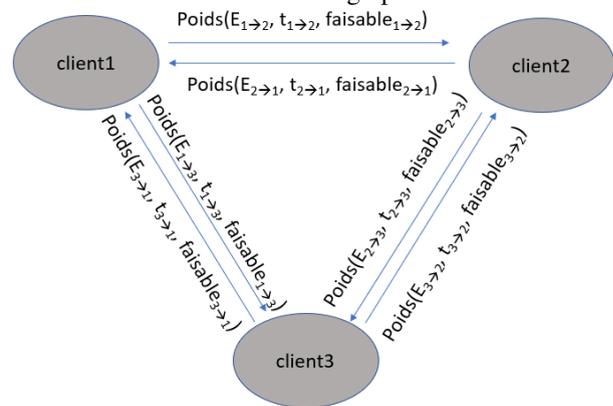
On commence par récupérer grosgraphe puis par approximer la liste des lieux de livraison par les points de la carte. L'intérêt de la manoeuvre est que l'on pourra ainsi assimiler chacun de ces points de livraison à un élément de grosgraphe. On crée ainsi le graphe final dont les sommets sont les clients, et qui est complet.

Pour chacun des clients on calcule l'énergie pour aller de ce client à chacun des autres clients par méthode de dijkstra. On définit un poids, caractérisé par :

- le temps nécessaire pour aller du départ à l'arrivée,
- l'énergie nécessaire
- la faisabilité du trajet qui est un booléen dépendant de la puissance maximale à fournir par le livreur (et donc des pentes, du chargement, etc...).

Pour que le traitement de ces données dans le calcul du poids soit le plus clair possible, on crée une classe Poids, dont les attributs ne seront ni plus ni moins que les 3 paramètres définis précédemment. On affecte alors à graphe[client1][client2] l'instance de Poids ayant les 3 attributs correspondant au chemin entre client1 et client2. Ce graphe sera utilisé dans la partie 4.

Ci dessous on a schématisé graphe :



3.3 Inscription dans la suite du cheminement du programme principal

Comme expliqué précédemment, on renvoie un graphe complet liant chacun des clients avec des arêtes portant des instances de la classe Poids. Cependant, il est

nécessaire également que le programme principal récupère le chemin à parcourir entre chaque couple de clients, sous la forme de la liste de points de la carte par lesquels on passe pour parcourir ce chemin. Pour cela, on peut directement utiliser la fonction de plus courts chemins implémentée dans mapprograph (notre programme).

Faute de pouvoir géolocaliser les triporteurs dans la ville, on a également décidé d'approximer le point auquel est chacun des triporteurs en temps réel grâce aux estimations de temps nécessaire pour relier chacun des points de la carte. On implémente alors une fonction trouvpont permettant d'approximer le point auquel le triporteur se trouve en prenant en entrée le point de départ, l'arrivée, et les caractéristiques techniques. Grâce à cette fonction, on peut afficher en temps réel les trajectoires de chacun des triporteurs, avec une résolution correspondant à la discrétisation de la carte en amont de notre programme (voir Partie 5).

3.4 Analyse de la complexité

On note c le nombre de clients, n le nombre de points de la carte étudiée.

La création de grosgraphe a une complexité en $O(n)$; en effet, grosgraphe est loin d'être complet, et le nombre de voisins directs à un sommet est en $O(1)$: il s'agit des points qui lui sont adjacents sur la carte. La création du graphe networkx est également en $O(n)$, et l'algorithme de plus court-chemin qui le suit est en $O(n * \log(n))$, donc notre implémentation de l'algorithme de Dijkstra est en $O(n * \log(n))$. Cet algorithme est appelé autant de fois qu'on a de sommets sur le graphe final : en effet, il permet d'obtenir le plus court chemin entre un point de départ et chacun des autres points du graphe (et non pas un seul). De ce fait, on obtient une complexité dans l'algorithme final en $O(c * n * \log(n))$. Ce qui pèse le plus sur le temps d'exécution de l'algorithme, c'est la qualité du quadrillage cartographique nécessaire à une description fidèle du réseau routier, et donc n le nombre de points initiaux qui constitueront les sommets du graphe grosgraphe.

4 PRÉSENTATION ET COMPARAISON DES ALGORITHMES DE RÉOLUTION DU CVRP

L'algorithme que nous avons implémenté dans cette partie, et adapté à notre problème particulier utilise les données cartographiques que nous avons converti pour résoudre le problème présenté en partie 1.

4.1 Algorithme de Clarke et Wright

4.1.1 Entrées et sorties

Cet algorithme calcule des listes de liste de clients (des tournées), qu'il assigne à des triporteurs.

Pour cela, il faut lui fournir : une liste de triporteurs, une liste de clients, un ELP, et des conditions que les tournées doivent satisfaire (voir 1.1). Ces conditions sont représentées par une fonction booléenne contrainte qui prend en argument une liste de clients (une tournée).

4.1.2 Principe de l'algorithme

Cet algorithme est une heuristique : on ne trouve pas une solution exacte au problème, mais celui-ci a l'avantage d'être assez rapide.

En effet, ce problème est une extension du TSP (traveling salesman problem, ou problème du voyageur de commerce en français), dont il est difficile, voire impossible d'obtenir une solution exacte au-delà de 10 points, car la complexité est exponentielle en le nombre de points.

Nous allons illustrer cet algorithme avec n clients :

$$c_i | i \in [1, n]$$

et un ELP, qui sont tous des points pris aléatoirement dans $[0,1]^2$.

On note d la distance euclidienne.

Au début de l'algorithme, il y a n tournées : chacune part de l'ELP, pour aller au client et revenir directement (**figure 4**).

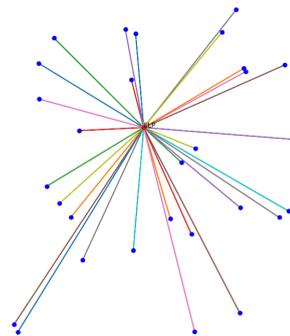


Figure 4 – Etat des tournées au début de l'algorithme, il y a 30 clients

On va alors vouloir fusionner des tournées en essayant de minimiser la distance parcourue par l'ensemble des triporteurs, tout en respectant les contraintes (on aurait sinon une tournée unique).

La fusion fonctionne ainsi : si une tournée (notée 2) commence par le client j et une tournée finit par le client i (notée 1), si $i \neq j$, la tournée fusionnée de la

tournée 1 et 2 est celle qui commence par les clients de la tournée 1 puis ceux de la tournée 2 (toute tournée commence et finit par l'ELP). Pour effectuer des fusions intéressantes, on calcule la matrice S :

$$\forall (i, j) \in [1, n]^2, s_{i,j} = d(c_i, ELP) + d(ELP, c_j) - d(c_i, c_j)$$

Cette matrice représente en fait le gain sur la somme des distances de toutes les tournées si on fusionne une tournée commençant par le client j et celle finissant par le client i .

Voici deux tournées non fusionnées et leur coût :

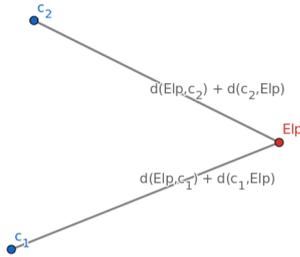


Figure 5 – Coût de deux tournées non fusionnées

La fusion 1,2 correspond alors à :

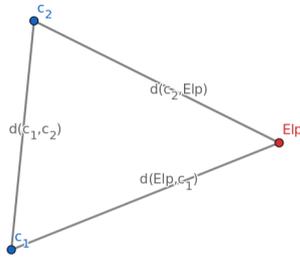


Figure 6 – Fusion des deux tournées

Le gain est donc bien

$$s_{1,2} = d(c_1, ELP) + d(ELP, c_2) - d(c_i, c_j)$$

On crée alors la liste

$$\{s_{i,j}, |i \in [1, n], j \in [1, n] \setminus \{i\}\}$$

que l'on trie par ordre décroissant. Les fusions les plus intéressantes (de gain le plus élevé) seront alors au début de la liste. On va alors parcourir cette liste dans l'ordre en effectuant toutes les fusions que l'on peut en partant du principe qu'une fusion (i, j) est possible si :

- $i \neq j$

- À ce stade de l'algorithme, il existe une tournée qui commence par c_j et une tournée qui finit par c_i
- la tournée fusionnée respecte les contraintes imposées par la fonction contrainte

On obtient alors des tournées que l'on peut assigner aux triporteurs.

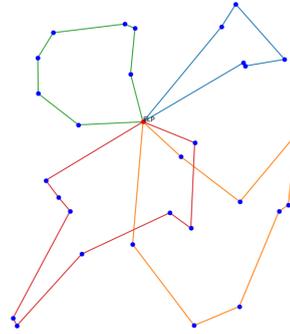


Figure 7 – Résultat de l'algorithme, en utilisant la distance euclidienne, et comme contrainte que la distance totale d'une tournée doit être inférieure à 3

4.1.3 Complexité de l'algorithme

c est le nombre de clients.

Créer la matrice S se fait en c^2 opérations élémentaires. La trier se fait en $O(c^2 \ln c)$ comparaisons.

Quand on parcourt la liste triée, pour chaque (i, j) , il faut fusionner les deux tournées (si elles existent), car on veut voir si la tournée fusionnée vérifie les conditions imposées. Ce test se fait en temps constant, mais la fusion est en $O(k)$ où k est le maximum du nombre de clients de la première tournée et du nombre de clients de la deuxième tournée, dans le pire des cas.

Notre implémentation utilise deux dictionnaires, pour stocker la tournée commençant par le client i , et celle finissant par le client j , pour $i, j \in [1, n]^2$ si celle-ci existe. Ainsi, vérifier s'il existe une tournée commençant par i , et une tournée finissant par j se fait en temps logarithmique du nombre de tournées, donc logarithmique du nombre de clients au maximum.

La pire situation est celle où une tournée absorbe toutes les autres, car alors à chaque étape de fusion, une tournée de nombre de clients maximal est impliquée.

Donc l'étape de fusion est en

$$O((\ln c) \sum_{k=1}^c k) = O(c^2 \ln(c))$$

Ainsi, la complexité de cet algorithme est $O(c^2 \ln c)$.

4.1.4 Analyse du programme

On peut s'intéresser à différentes statistiques pour ce programme : par exemple le temps de calcul (**Figure 8**), et le nombre de tournées créées pour une contrainte donnée (**Figure 9**). On pourrait aussi voir comment le résultat de l'algorithme varie en fonction de la fonction contrainte que l'on utilise, mais cela est d'intérêt limité puisqu'elle ne sera pas modifiée en pratique.

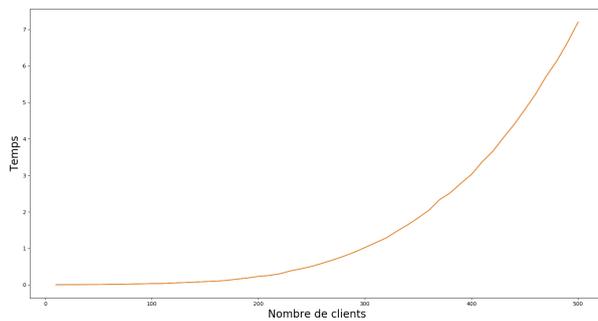


Figure 8 – Temps de calcul



Figure 9 – Nombre de tournées

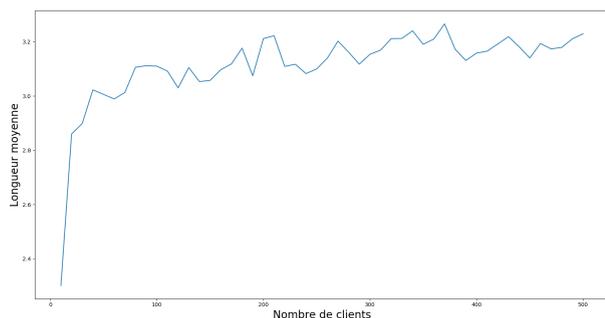


Figure 10 – Longueur moyenne des tournées

On peut aussi regarder la longueur moyenne des

tournées, qui est la longueur totale divisée par le nombre de tournées (**Figure 10**)

Dans l'idéal, la longueur moyenne devrait être proche de 4, qui est la contrainte imposée, on ne voudrait pas en effet envoyer des triporteurs presque vides en tournée, pour tenter de minimiser la dépense énergétique. Tous ces tests ont été réalisés avec des échantillons aléatoires de clients dans $[0, 1]^2$, et un ELP au centre : en $(0.5, 0.5)$.

4.2 Algorithme génétique

4.2.1 Introduction à l'algorithmie génétique

Le problème de tournées de véhicules (aussi appelé VRP pour Vehicle Routing Problem), comme la plupart des problèmes NP-complet, est difficile à résoudre pour des instances de grande taille de façon optimale. On se contente alors de trouver des solutions de "bonne qualité". Bien que de nombreuses métaheuristiques ont été appliquées à ce problème, (comme l'algorithme présenté en partie 4.1) une autre solution consiste à utiliser un algorithme génétique.

Un algorithme génétique est un algorithme permettant de trouver une solution approchée à un problème d'optimisation. Son nom lui vient de son principe sensiblement proche de la biologie. Les propositions de solutions aux problèmes sont appelées individus. Un nombre N d'individus composant alors une génération sont créés de manière aléatoire. Ils sont alors triés par une fonction *fitness* attribuant une note : une performance à chaque solution.

Vient alors l'étape de sélection : une proportion arbitraire des solutions est gardée, et la probabilité que chaque individu soit sélectionné est d'autant plus grande que sa performance est bonne. Les individus non sélectionnés sont éliminés. Ainsi, même les plus mauvaises solutions ont malgré tout une chance de survivre (par analogie avec la diversité génétique) ce qui permet d'explorer plus de possibilités et d'espérer converger vers un minimum global.

Puis, les solutions sélectionnées sont réparties par couple pour se reproduire. De nouveaux individus sont créés à partir de deux individus parents en prenant des caractéristiques chez l'un et chez l'autre.

Pour finir, une étape de mutation aléatoire intervient. Certaines solutions prises au hasard vont être aléatoirement modifiées, toujours par analogie avec la mutation aléatoire des gènes en biologie.

Le nouvel ensemble de solution ainsi créé compose une nouvelle génération. Ce processus d'évolution générationnel est réitéré un nombre arbitraire de fois : les solutions se mettent alors à converger vers un minimum

local (que l'on espère tant que possible être global) de la fonction de *fitness*.

4.2.2 Application au VRP

Dans notre cas, un individu est une proposition de parcours pour notre flotte de triporteurs afin de livrer l'ensemble des clients. Une caractéristique intrinsèque à chaque solution est qu'il est indispensable de passer par chaque client une seule et unique fois, et que chaque triporteur doit commencer et terminer par l'ELP. Le choix a été fait de représenter une solution par une liste de liste de clients à visiter. Le nombre de listes dans la liste principale est le nombre de triporteurs effectifs, et chaque sous liste contient dans l'ordre le trajet à effectuer pour chaque triporteur (les numéros sont les noms donnés aux clients lors des tests).

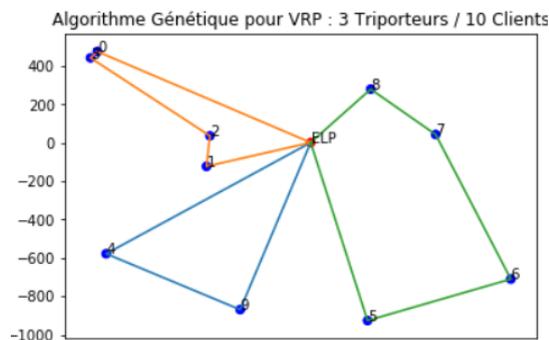


Figure 11 – Représentation de $[[ELP, 4, 9, ELP], [ELP, 1, 2, 3, 0, ELP], [ELP, 5, 6, 7, 8, ELP]]$

4.3 Evaluation des tournées

La première étape est d'implémenter la fonction *fitness* permettant d'évaluer la qualité d'une solution. Nous disposons pour cela d'un graphe fourni nous donnant le coût entre chaque client (coût qui peut être un compromis entre énergie à utiliser, temps du trajet, distance à parcourir, etc...). Il semble assez naturel de calculer l'apport de chaque triporteur en effectuant la somme des coûts de chaque trajet que celui-ci doit effectuer. Reste ensuite à combiner les notes de chaque triporteur ensemble.

Une première idée naïve serait de prendre pour évaluation de l'individu la somme des coûts de chaque triporteur.

$$S = \sum_{i=1}^{N_{\text{triporteurs}}} \text{cout}_i$$

Mais cette solution amène le résultat suivant :

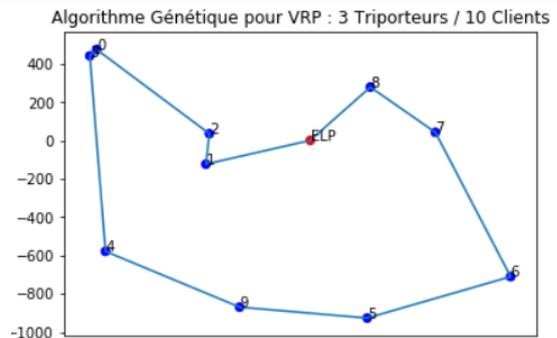


Figure 12 – Représentation de $[[ELP, 8, 7, 6, 5, 9, 4, 3, 0, 2, 1, ELP]]$

En effet, rajouter un triporteur nous ajoute un aller-retour supplémentaire à faire. Ainsi, par inégalité triangulaire, il est mathématiquement plus intéressant d'utiliser le moins de triporteurs possible, et donc comme le montre l'algorithme de n'utiliser qu'un triporteur.

Une seconde solution intuitive est d'effectuer la mission le plus « rapidement » possible. Il suffit pour cela de minimiser le temps du plus long parcours.

$$S = \max_{1 \leq i \leq N_{\text{triporteurs}}} \text{cout}_i$$

Mais cette nouvelle idée mène à la situation suivante :

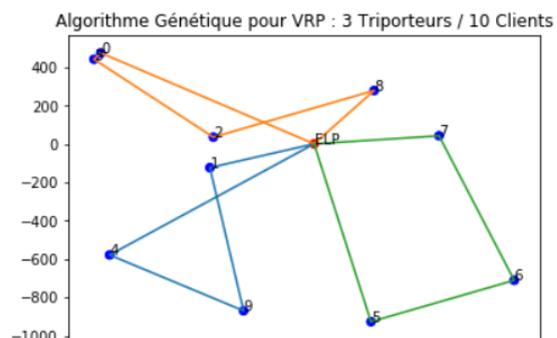


Figure 13 – Représentation de $[[ELP, 4, 9, 1, ELP], [ELP, 0, 3, 2, 8, ELP], [ELP, 5, 6, 7, ELP]]$

Seul le plus long chemin est alors optimisé, les autres n'ayant aucun impact sur la note de l'individu. Cette fonction d'évaluation n'est donc pas viable.

Finalement, l'idée retenue fut d'utiliser la somme des carrés de coût de chaque triporteur.

$$S = \sum_{i=1}^{N_{\text{triporteurs}}} \text{cout}_i^2$$

Ainsi, comme $a^2 + b^2 \leq (a + b)^2$ pour a et b positifs, il est toujours plus rentable d'essayer de bien répartir la distribution entre les différents triporteurs afin de minimiser S . Pour des questions d'homogénéité, il peut être plus pertinent de regarder $S = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{tripteurs}}} \text{costs}_i^2}$, mais la fonction racine étant croissante, cela ne change rien au résultat.

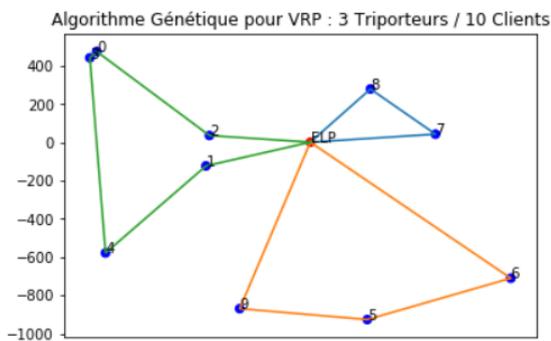


Figure 14 – Représentation de $[[ELP, 8, 7, ELP], [ELP, 6, 5, 9, ELP], [ELP, 1, 4, 3, 0, 2, ELP]]$

4.3.1 Reproduction et mutation

Le second problème est de faire se reproduire deux solutions. Comment extraire de chacune sa force pour que le mélange de chacune puisse donner une solution les dépassant ? La seule solution que nous avons retenue ici est simplement de créer une solution en prenant des chemins chez l'un et l'autre de ses parents, puis en rectifiant les anomalies : les clients oubliés sont placés aléatoirement et l'on supprime au hasard un des chemins pour les clients desservis deux fois.

Finalement, l'opération de mutation se fait naturellement en échangeant un client de place au sein de la répartition. Le nombre de mutation est élevé au début du processus afin de garantir la diversité génétique.

4.3.2 Performance et conclusion

Après des tests à plus grande échelle, il se trouve que l'algorithme, pour un problème à échelle réelle (c'est à dire pour une centaine de clients et une dizaine de triporteurs) parvient à trouver une solution convenable dans un temps proche de 8h.

Il vient donc naturellement que ce problème ne semble pas applicable pour un projet à taille réelle. Une transposition de ce code python vers un langage compilé comme le c++ a été tentée, mais face à l'effort à fournir par rapport à la qualité des solutions de

l'algorithme de Clarke et Wright, la transposition a été interrompue.

4.4 Comparaison des deux algorithmes

L'implémentation de l'algorithme de Clarke et Wright calcule des tournées à partir de clients et de triporteurs en respectant des contraintes, puis affecte une partie de ces tournées aux triporteurs. Il peut y avoir des clients qui ne seront pas livrés directement, mais l'algorithme actualise la liste des clients, et sera appelé quand des triporteurs seront disponibles.

L'algorithme génétique, en revanche, prend un nombre fixe de triporteurs et crée une répartition adaptée à cette flotte. Il faudrait alors filtrer les clients avant d'appeler cet algorithme pour être sûr que les tournées soient faisables.

Sachant que son exécution est très longue, il a été décidé de ne pas conserver l'approche génétique dans la version finale du projet.

4.5 Utilisation de l'algorithme 2-opt pour réduire la taille des tournées

L'algorithme 2-opt est un algorithme d'optimisation pour le problème du voyageur de commerce (TSP : traveling salesman problem). Celui-ci "décroise" les solutions.

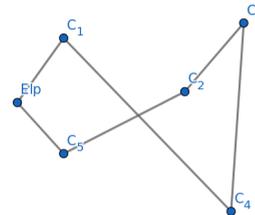


Figure 15 – Tournée croisée

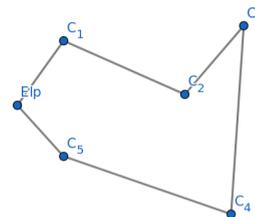


Figure 16 – Tournée décroisée

En effet, par inégalité triangulaire, la distance du chemin effectué sur la Figure 16 est plus petite que celle de la Figure 15.

4.6 Généralisation à plusieurs ELPs

Il se peut qu'on ait plusieurs ELPs.

La solution retenue est alors de répartir les clients aux ELPs en affectant chaque client à l'ELP qui est le plus proche de lui.

On va donc partitionner le plan comme schématisé sur la **Figure 17**.

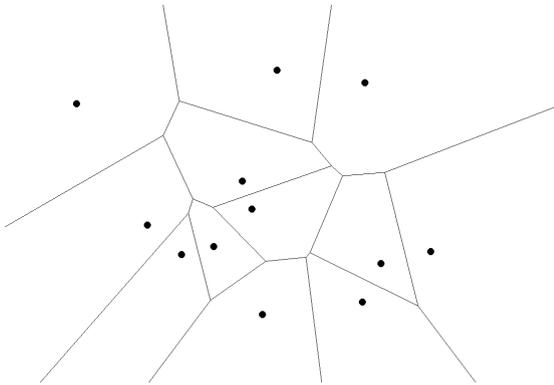


Figure 17 – Séparation des zones couvertes par les ELPs.

Il suffit pour cela de parcourir la liste de clients, et de choisir l'ELP le plus proche, cela se fait donc en $O(c * k)$ opérations où c est le nombre de clients et k le nombre d'ELPs.

Il suffit ensuite d'appliquer un des algorithmes d'optimisation vus dans cet article (partie 4) pour répartir les tournées.

On obtient alors une répartition des tournées illustrée sur la **Figure 18**.

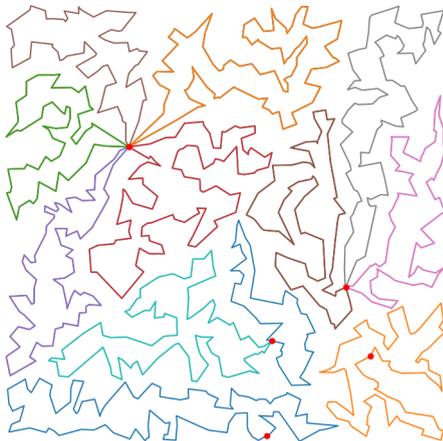


Figure 18 – Répartition des tournées avec 1000 clients et 5 ELPs en utilisant une distance euclidienne.

5 RÉSULTAT : APPLICATION PRODUITE ET EFFICACITÉ

5.1 Affichage final



Figure 19

La sortie de l'algorithme (**Figure 19**) est une animation matplotlib sur laquelle on voit la position des triporteurs évoluer en temps réel sur la carte, comme s'ils suivaient exactement l'itinéraire prévu. L'image ci-dessus (**Figure 16**) en est un exemple, les triporteurs sont représentés par des disques de couleurs différentes, l'ELP par une croix et les clients par des carrés rouges. Ce n'est qu'une situation théorique mais elle permet de visualiser le résultat de notre travail. Une gestion en direct des trajets réels pourrait être envisagée en intégrant par exemple les données gps des positions des triporteurs en temps réel.

5.2 Efficacité

En pratique le temps de calcul des plus courts chemins est le facteur limitant. En effet, même si notre solution est une fonction linéaire du nombre de clients, la constante de temps est très grande en raison du grand nombre de points initiaux considérés (20 minutes de calcul pour seulement 10 clients). On pourrait le réduire en supprimant intelligemment des points qui ne sont pas cruciaux sur la carte obtenue depuis OpenStreetmap.

Le CADAM, lieu d'expérimentation d'une logistique assurée par triporteurs

Mines ParisTech - Université PSL

Remerciements.

Avant de commencer, nous tenons à remercier l'ensemble des équipes travaillant au CADAM avec qui nous avons eu l'occasion d'échanger, et plus particulièrement Laurence Dalstein-Richier, Tony Piton et Laurent Lavoine pour nous avoir fait visiter le CADAM, pour l'opportunité qu'ils nous ont offerte avec ce projet, et surtout pour tout le temps qu'ils nous ont consacré à répondre à nos questions en vue de ce premier rapport.

Abstract. Face aux contraintes que rencontre la logistique urbaine, la création d'un réseau de triporteurs dédié aux livraisons du dernier kilomètre est une solution en plein essor. Toutefois l'envergure et la complexité d'un tel projet pour la Nice nous pousse à proposer un réseau de triporteurs au sein d'un cadre plus restreint, ainsi réalisable à court terme. Ainsi nous nous intéresserons à la transition énergétique des mobilités sur le site du CADAM. Notre stratégie, décomposée en trois temps distincts, vise à introduire le triporteur électrique comme un renouveau des mobilités internes d'une part, mais cherche aussi à installer des infrastructures de production d'énergie solaire pour alimenter ces nouvelles solutions logistiques.

1 INTRODUCTION

Il est difficilement envisageable de vouloir implémenter directement un réseau de triporteurs pour assurer la logistique urbaine du dernier kilomètre dans la ville de Nice. En effet, bien qu'ayant étudié les retours sur les différentes implémentations de triporteurs à travers le monde, discuté avec des acteurs majeurs de la logistique de différents centres villes de France et travaillé intensément sur le sujet, les risques financiers associés à un tel projet et le fait que nous n'ayons pas pratiquement expérimenté cette situation dans un cas simple constituent un frein à son implémentation globale dans Nice. C'est après une rencontre avec différents représentants du département et de la préfecture des Alpes Maritimes que notre intérêt s'est porté sur le site du Centre Administratif des Alpes Maritimes (désigné par la suite par son acronyme CADAM) afin de mener une expérimentation locale de cette solution. Les flux existants entre les différents services de ce véritable coeur administratif du département, sont à l'origine d'une très forte logistique interne nécessaire pour la gestion du courrier, des colis, des déménagements. Contrairement à une ville, dont les flux sont de nature changeante, influencés par un très grand nombre d'acteurs, dépendants de nombreuses contraintes extérieures, le CADAM gère des échanges clairement définis, s'effectuant avec régularité, au sein d'un espace limité et entre seulement quelques acteurs.

Ainsi c'est face à l'intérêt du CADAM pour effectuer sa transition écologique et énergétique et face à la relative simplicité logistique du site que nous avons décidé d'en faire un point de départ de notre projet, lieu d'expérimentation pratique d'un réseau de triporteurs pour assurer la logistique du dernier kilomètre.

Plus généralement, notre étude ambitionne de proposer un modèle général pour le déploiement d'un réseau de triporteurs au sein d'un cadre logistique restreint. De plus, le déploiement d'un réseau de triporteurs à assistance électrique sur le site du CADAM est une solution qui doit être concrétisable. Ainsi, il est essentiel de ne pas simplement présenter le fonctionnement d'un réseau de triporteurs au CADAM, mais bien de présenter une stratégie de transition où la systématisation des triporteurs tout comme les investissements et infrastructures à mettre en place se font progressivement, afin de limiter les risques matériels et financiers, mais aussi d'être en phase avec les mentalités des employés. Nous avons décidé d'articuler notre stratégie de transition en trois phases. La première phase a pour ambition de proposer une expérimentation de l'utilisation de triporteurs, venant se greffer directement aux infrastructures et modes d'organisation qui existent déjà au sein du site. L'implémentation doit pouvoir se faire rapidement et être facilement acceptée à la fois par l'administration du CADAM et ses agents.

La seconde phase, plus ambitieuse et visant à

développer des infrastructures dédiées aux triporteurs et à élargir leur usage, devra s'appuyer sur les retours d'expérience apportés par la première phase afin de légitimer les investissements plus conséquents ainsi que les modifications d'organisation de la logistique du CADAM qu'elle nécessite. La troisième phase constitue l'aboutissement de la politique des mobilités douces au sein du CADAM : systématisation de l'usage du triporteur pour toutes les mobilités thermiques internes logistiques d'une part, mais aussi le déploiement d'un système solaire pour subvenir aux besoins électriques de l'ensemble des solutions nouvelles de déplacement.

1.1 CADAM : logiques et enjeux du site

Situé en périphérie de Nice, le Centre Administratif Départemental des Alpes Maritimes, ou CADAM, regroupe une dizaine de bâtiments de la préfecture, du conseil départemental et des archives et s'étale sur une surface de plus de 10 hectares. Plus de 4000 fonctionnaires qui viennent travailler chaque jour au CADAM, répartis dans différents services et bâtiments, qui échangent et circulent au cours de la journée. Ces fonctionnaires sont amenés à envoyer des documents à leurs collègues, parfois à déménager pour changer de bâtiment.



Figure 1 – Plan du CADAM

C'est aussi 900 000 plis qui arrivent tous les ans au bâtiment Audibergue, centre de tri du courrier, et autant qui sont expédiés vers l'extérieur. Tout ce courrier reçu est trié et redistribué vers les autres bâtiments, où du courrier devant être expédié attend. Près de 5 000 lettres transitent tous les jours par le service courrier, maillon essentiel du bon fonctionnement du CADAM. Ce déplacement massif d'information est aujourd'hui assuré par une équipe d'huissiers qui, à pied ou en voiture, se déplace sur tout le centre pour livrer et expédier, jusqu'au sein des services administratifs. Remarquons que, malgré la numérisation d'une partie croissante de

ces plis, le support papier reste indispensable au fonctionnement administratif. Il faut ajouter à cela une équipe de 4 personnes, équipée de 2 camions, chargée des déménagements au sein du site.

1.2 Un site qui s'inscrit dans une transition durable

Néanmoins, dans une logique durable du transport, le système logistique employé au CADAM pose un réel problème, notamment au niveau des émissions de polluants pointées du doigt par Laurence Dalstein-Richier, chargée de mission Environnement au cabinet du président du conseil départemental. Les distances parcourues n'excédant pas le kilomètre, une refonte du système de livraison et d'expédition est à considérer.

Déjà vitrine de la modernisation énergétique, avec l'installation d'une ombrière solaire sur son parking en juillet dernier, ainsi que la mise en place d'un parc de Renault Zoé électriques il y a 2 mois, le CADAM souhaite aller plus loin dans son renouveau, et rester un modèle pour le département des Alpes-Maritimes. Ainsi, notre projet s'inscrit à la fois dans la stratégie "France Logistique 2025" [1] et dans une démarche de durabilité [2], notamment dans le respect des objectifs de développement durable posés par l'ONU pour l'horizon 2030 [3].



Figure 2 – Ombrière solaire sur le parking Sud du CADAM, installée en juillet 2019



Figure 3 – Parc de Renault Zoé, installé en septembre 2019

L'étude que nous avons menée et proposée au CADAM a donc pour but d'imaginer la transition des mobilités internes du centre, vers des transports plus durables.

1.3 Le triporteur, une solution adaptée

L'enjeu majeur de notre travail a été de concevoir une transition qui réinvente les modes de transports des processus logistiques, sans pour autant mettre en péril la logistique actuelle, sans laquelle le CADAM ne peut fonctionner. La solution proposée a dû être pensée peu contraignante pour les usagers, et facile à mettre en oeuvre. Dans ce contexte de modernisation, nous nous sommes penchés sur l'alternative du triporteur à assistance électrique, rechargé à l'énergie solaire. Ce genre de triporteurs existe déjà, même si la composante solaire n'est pas encore intégrée, et est une solution de plus en plus adoptée pour résoudre les problématiques de livraison du dernier kilomètre, dans les villes de Milan [3] et Seattle [4] [5] entre autres. Plusieurs études comparatives ont pu être menées, entre la solution actuelle de livraison par camion et celle par triporteur assurant les derniers kilomètres urbains [6], et soulignent des points positifs venant appuyer notre étude. L'entreprise de livraison UPS a d'ailleurs déjà des triporteurs électriques dans sa flotte aux Etats-Unis et serait en phase de test en Europe. Nous avons aussi pu étudier le cas des Triporteurs de l'Ouest, où Fabrice Marteaux, fondateur de cette entreprise d'origine rennaise, a remplacé les camions et camionnettes de livraison dans le centre-ville par des triporteurs électriques.



Figure 4 – Expérimentation de la solution triporteur par UPS

Le triporteur possède plusieurs avantages qui font de lui un engin adapté à la demande de livraison interne du CADAM. D'une part, sa maniabilité et facilité d'usage en font un mode de transport accessible à tous, sans besoin de permis ou de formation excessive. Il passe à peu près partout où un vélo passerait, et peut par conséquent mieux se garer qu'une voiture, et éviter une congestion parfois gênante au sein d'un centre assez urbanisé. Du fait de son assistance électrique, il ne nécessite pas de prédispositions particulière au trans-

port de charges lourdes, et est pensé pour offrir un confort maximal à son utilisateur. D'autre part, l'évaluation préliminaire des besoins logistiques du CADAM que nous avons pu effectuer, grâce à l'aide précieuse de certains responsables du lieu, a montré que les distances parcourues pouvaient largement être couvertes par triporteur électrique classique, et que les charges diverses à transporter n'étaient pas un problème pour la large gamme de triporteurs existant sur le marché. La topographie n'est pas un problème non plus, les pentes étant parfaitement abordables en triporteur.

Le triporteur, étant à assistance électrique uniquement, est un moyen de réduire les émissions directes de gaz à effet de serre et de microparticules. Mais pour aller plus loin dans la démarche durable, nous proposons également l'étude d'une solution énergétique solaire pour la recharge des triporteurs.

Notre stratégie se développe en trois temps, à court, moyen et long terme.

2 PREMIÈRE PHASE DE TRANSITION

2.1 Déroulement

Cette première étape de notre stratégie cherche à pouvoir s'appliquer à court terme. C'est pourquoi nous avons cherché à proposer des solutions proche de celles existant déjà, ne nécessitant que peu d'investissements ou d'infrastructures.

C'est pour cela que nous proposons une implantation des triporteurs exclusivement réservés à la livraison du courrier. Ils seraient mis à disposition des huissiers en parallèle des véhicules thermiques actuels, et utilisés sur la base du volontariat. L'implantation serait précédée d'un questionnaire visant à cerner plus précisément les attentes des usagers potentiels et leur motivation quant à l'emploi des triporteurs. Une formation sur l'utilisation de ces derniers serait aussi proposée, comme cela avait été fait lors de l'installation du parc de Renault Zoé, pour faciliter le plus possible la prise en main. Plusieurs constats viennent faciliter la mise en place de triporteurs sur le site : les infrastructures routières sont déjà adaptées à la circulation des triporteurs sur le site, et la présence de prises non-utilisées sur l'ombrière solaire nous offre une solution de recharge solaire déjà existante. Les batteries de ces triporteurs seraient donc rechargées directement sur l'ombrière, dans un placard à batteries prévu à cet effet.

Nous nous sommes ensuite penchés sur les aspects pratiques tels que le stockage, la maintenance et le choix du modèle de triporteur à acheter. Après une étude de marché, le modèle Yokler U de la marque Yokler nous a paru le plus adapté au projet.



Figure 5 – Bac de transport du courrier de type R28



Figure 6 – Modèle de triporteur Yokler U

Combinant une grande capacité de charge dans son coffre arrière et un confort assuré par son pare-brise offrant une protection contre la pluie, il est de plus fabriqué en France par une entreprise française. Son coffre est particulièrement adapté aux boîtes de transport de courrier : jusqu'à 48 bacs de type R28 dans son coffre arrière. Nous avons de plus évalué les besoins énergétiques de ces engins afin de valider, en se basant sur des données d'ensoleillement du CADAM, la solution de recharge grâce à l'ombrière solaire. Plusieurs solutions de stockage existent déjà sur le site, comme par exemple les parkings souterrains, et notamment celui situé juste en dessous du bâtiment du service courrier. Pour ce qui est de la maintenance, une formation serait proposée aux techniciens du site sur les spécificités des triporteurs. Ces véhicules sont très proches du vélo pour ce qui est de leur fonctionnement mécanique, ainsi la formation concernerait plus la partie électrique. En considérant tous les éléments mentionnés, nous avons pu établir un bilan financier garantissant des coûts initiaux inférieurs à 20 000 HT.

Cette première approche reste peu coûteuse et relativement simple à mettre en oeuvre et s'inscrit dans la stratégie de transition douce des mobilités du CADAM.

2.2 Retour sur expérience

Après la première implantation des triporteurs, il sera nécessaire d'avoir un retour sur expérience de la part des utilisateurs, c'est-à-dire principalement les huissiers, mais aussi d'autres employés du CADAM

Estimation des coûts HT pour la première phase de transition

Articles	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Achats matériels			
Yokler U Standard	2.00	6990.00 €	13980.00 €
Power Pack (nécessaire pour les charges à convoyer)	2.00	590.00 €	1180.00 €
Protection pluie	2.00	550.00 €	1100.00 €
Batterie supplémentaire	2.00	590.00 €	1180.00 €
Livraison	2.00	350.00 €	700.00 €
Coûts autres			
Formation	1.00	1000.00 €	1000.00 €
Sous-total	11.00		19140.00 €
Total			19140.00 €

Figure 7 – Estimation du bilan financier de l'investissement initial pour la 1ère phase de transition au CADAM

qui auront été en contact avec les triporteurs. Cela permettra d'évaluer la pertinence du projet et de dégager les problèmes qui auraient pu ne pas être pris en compte, des potentiels axes d'amélioration et les points appréciés sur lesquels communiquer pour systématiser l'utilisation de ces engins.

3 LE FUTUR DES MOBILITÉS AU CADAM

3.1 2ème phase

Après avoir établi les bases concrètes d'une stratégie pouvant être mise en oeuvre dans un futur proche, nous nous sommes penchés sur des solutions plus approfondies, et plus complètes. Dans l'optique de poursuivre la transition énergétique et écologique du CADAM, il est nécessaire de considérer l'origine de l'électricité consommée par les triporteurs.

En effet, dans la stratégie à court terme présentée plus tôt, nous proposons de récupérer une fraction de l'énergie produite par l'ombrière solaire. Mais aujourd'hui, cette énergie est utilisée par les bâtiments du CADAM, l'utiliser revient donc à augmenter la consommation d'électricité "classique" du CADAM. Ainsi, pour inscrire réellement le projet dans une logique durable, nous nous sommes penchés sur l'installation d'infrastructures solaires dédiées à la recharge des triporteurs : toute nouvelle consommation électrique doit être compensée par des énergies renouvelables. Nous pourrions ainsi nous appuyer sur des études énergétiques et des calculs sur la production de panneaux photovoltaïques [7] pour dimensionner nos bornes de recharge solaires. Il faudra bien sûr penser toute le travail qui découle de ces installations, l'installation en tant que telle mais aussi la maintenance et le nettoyage entre autres. Plusieurs espaces ont déjà été identifiés

dans le CADAM pour de nouvelles infrastructures solaires. La proximité de l'aéroport et le risque de réflexion de la lumière solaire devront être pris en compte dans la conception des panneaux, notamment dans leur inclinaison et leur positionnement.



Figure 8 – Emplacements potentiels pour créer des infrastructures solaires

De plus, toujours dans une optique de réduction des polluants sur le site, nous proposons d'expérimenter l'utilisation de triporteurs pour effectuer des déménagements. La stratégie que nous avons imaginé ressemble typiquement à notre approche à court terme pour le transport du courrier en triporteurs : pour que la transition s'effectue doucement, une phase de test est nécessaire. De plus, en se basant sur l'étude de marché évoquée plus tôt, nous avons ciblé des triporteurs plus adaptés aux déménagements, notamment les modèles Tender 1500 de la marque Urban Arrow. Ces engins sont plus adaptés au transport d'objets volumineux et plus lourds, mais ne sont pas couverts contrairement aux triporteurs du service courrier. Il existe néanmoins des solutions pour couvrir ces triporteurs à considérer.



Figure 9 – Modèle de triporteur Urban Arrow Tender 1500 Pick-up

Enfin, remplacer l'intégralité de la flotte thermique des huissiers par des triporteurs à assistance électrique s'inscrit dans la continuité logique de notre projet. Pour effectuer cette transition totale des véhicules de transport du courrier, un bilan logistique plus précis paraît nécessaire, afin d'estimer le nombre de triporteurs nécessaires. Il faut de plus conserver de quoi gérer les cas moins fréquents. En cas de charges lourdes à transporter ou de distances plus grandes à parcourir, notamment pour aller dans les bâtiments à l'extérieur de

l'enceinte du CADAM, les huissiers pourront se reposer sur l'usage de la Kangoo électrique déjà présente sur le site, et pourquoi pas des Renault Zoé.

Cette phase serait, tout comme la première, suivie d'un retour d'expérience des personnes concernées par les changements.

3.2 3ème phase

Cette 3ème phase, bien plus ambitieuse, a pour but de substituer un maximum des mobilités thermiques au sein du CADAM par des mobilités électriques, et ce pour l'ensemble des transports effectués en interne du site. Le remplacement peut-être envisagé par des triporteurs, mais aussi par des véhicules électriques comme les Kangoo déjà présentes sur le site. Pour arriver à remplir un tel objectif, toutes les mobilités doivent être considérées, quantifiées et remises en question. Cela inclut le transport de documents aux archives, le nettoyage, la maintenance, ou encore les véhicules de jardinage employés : il faut étudier toutes les possibilités et évaluer la pertinence de la solution triporteur dans chacun des cas. Encore une fois, pour que cette solution reste la plus durable possible et énergétiquement intéressante, il faut compenser chaque installation de véhicule électrique par une augmentation de la production électrique issue de panneau photovoltaïques sur place. De plus, le site du CADAM s'est déjà positionné par le passé comme un acteur de la production d'électricité par panneaux solaires photovoltaïques via l'installation d'une ombrière solaire sur le site. Cette ombrière solaire permet de produire 5% de l'électricité consommée par le CADAM. Lorsqu'on considère le mix électrique français, on arrive pour le CADAM à environ 23.5% d'électricité issues des énergies renouvelables ce qui correspond seulement aux 25% d'électricité renouvelable produite localement du Green Deal du département des Alpes-Maritimes pour 2020. Il est donc tout à fait envisageable de continuer à faire du CADAM un lieu précurseur des objectifs régionaux et nationaux de la production d'électricité renouvelable et particulièrement celle issue de panneaux solaires photovoltaïques via l'aménagement de nouvelles zones de production, notamment via l'installation de nouvelles ombrières. Pour cela, une évaluation des espaces de production potentiels doit être menée : parkings, toits de bâtiments en considération des problèmes de prise au vent, d'éventuels reflets dans un espace aérien fréquenté et de maintenance. Nous avons eu l'occasion lors de nos déplacements sur le site, et à l'aide de vue aériennes de repérer plusieurs espaces intéressants pour y installer des panneaux solaires photovoltaïques : le parking à l'ouest du bâtiment Audiber-

gue, le parking au nord du bâtiment Cheiron ainsi que le toit du parking de la préfecture. Ces différents espaces représentent une surface totale de plus de $5000m^2$. De simples estimations, en considérant que les conditions de production de l'ombrière solaire déjà installée se répètent à ces différents endroits nous présagent une production totale de 1,1MWc contre 249kWc aujourd'hui. Cela permettrait d'alimenter très largement l'ensemble des mobilités électriques nouvellement installées. Cette troisième phase de transition est bien celle d'un CADAM le plus durable possible, en terme de mobilités.

4 CONCLUSION

Ainsi, cet article présente une stratégie à adopter afin de mener une expérimentation de l'usage de triporteurs à assistance électrique sur le site du CADAM. En proposant un plan de transition énergétique des mobilités du CADAM, il ambitionne de pouvoir à terme totalement repenser le transport sur le site, substituant l'ensemble des mobilités thermiques par des mobilités électriques, principalement des triporteurs. De plus, la durabilité de la solution proposée repose sur la prise en compte de la problématique de compensation de la dépense électrique, via une croissance des installations en panneaux solaires photovoltaïques. Cette stratégie de transition est pensée en 3 temps, afin de pouvoir être installée quasi-immédiatement, sans investissement massif, ni déploiement d'infrastructures et pour pouvoir être progressivement acceptée par les individus.

De plus, ce projet constitue une étape essentielle pour le déploiement d'un réseau de logistique urbaine assuré par des triporteurs au sein de la ville de Nice. Le projet pour le site du CADAM constitue en effet une véritable expérimentation à part entière de la solution des triporteurs à électricité solaire, dans un cadre simplifié ne nécessitant ni techniques d'optimisation ni aménagements urbanistiques. Des enseignements devront être tirés des réactions suscitées par cette expérimentation : comprendre comment les acteurs publics réagissent face à des demandes de financement pour des mobilités nouvelles et observer l'acceptation des triporteurs par ses utilisateurs. Si ce projet est adopté par le Département des Alpes-Maritimes, sa potentielle réussite pourrait constituer une véritable vitrine des réseaux logistiques de triporteurs en France.

5 BIBLIOGRAPHIE

[1] Macron, E., Royal, S., & Vidalies A. (2016). France Logistique 2025.

[2] Article "Durabilité du triporteur"

[3] Nocerino, R., Colorni, A., Lia, F., & Lue, A. (2016). E-bikes and E-scooters for Smart Logistics : Environmental and Economic Sustainability in Pro-E-bike Italian Pilots. *Transportation Research Procedia*, 14, 2362-2371.

[4] Paudel, A., Kreutzmann, P. (2015). Design and performance analysis of a hybrid solar tricycle for a sustainable local commute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 437-482

[5] Materson, A. (2017). Sustainable Urban Transportation : Examining Cargo Bike Use in Seattle (University of Washington).

[6] 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(1), 11.

[6] Article "Approvisionnement énergétique"

Bibliographie MIG SOLAIRE 2019

L'heure du numérique conduit à une accélération de la mondialisation et transforme les modes de livraison de marchandises dont la logistique urbaine est devenue un élément crucial. Cette dernière apparaît maintenant comme un service indispensable aux acteurs économiques des zones urbaines : commerçants, enseignes sans magasins [1] ainsi que les consommateurs. Toutefois, les problématiques de congestion des centres-villes, de nuisances sonores et d'émissions de polluants amènent légitimement à questionner les solutions traditionnelles de livraison par camion ou autre engin thermique. Améliorer la logistique urbaine française, en la rendant plus fluide, plus propre et locale sont les impératifs de notre projet, qui cherche à s'inscrire à la fois dans la stratégie "France Logistique 2025" [2] et dans les objectifs de développement durable posés par l'ONU pour l'horizon 2030.

Notre projet propose une modernisation et une responsabilisation de la logistique du dernier kilomètre, dernier maillon du transport, qui se doit d'être pensé en accord avec les contraintes de la ville et de la transition énergétique et écologique. Ainsi, densifier le maillage urbain pour la livraison du dernier kilomètre devient capital : cela doit même devenir un métier à part entière. Notre réflexion s'est portée sur l'implantation d'emplacements logistiques de proximité (ELP) [1], petits hubs de fret approvisionnés par systèmes de transport traditionnels, desquels partirait une flotte de triporteurs pour assurer les livraisons à domicile. Mais aussi sur l'utilisation d'une énergie propre, quasi-exclusivement issue de panneaux solaires. Notre démarche souhaite une hybridation des ELP à la fois : carrefour de livraison, zones de production d'énergie solaire et gares multimodales s'inscrivant dans le tissu urbain.

Motivés par les expériences concluantes à Milan [3], Seattle [4] [5] et Rennes, avec les Triporteurs de l'Ouest, de déploiement d'une flotte de triporteurs, servant de véhicules de livraison du dernier kilomètre, nous avons étudié l'implantation de cette solution de mobilité électrique. Des études comparatives [6] ont pu être menées, entre la solution actuelle de livraison par camion et celle par triporteur assurant les derniers kilomètres urbains. Il s'en dégage assez vite des points positifs venant appuyer notre démarche. La réduction des émissions de polluants est réelle [3], la diminution de gaz à effet de serre allant de 51 à 72% [7], selon les scénarios.

De plus, les triporteurs possèdent une mobilité bien plus grande que les véhicules de livraison traditionnels, celle-ci venant d'une part de leur taille réduite et d'autre part de leur statut légal de vélos à assistance électrique leur permettant d'accéder aux voies cyclables [8]. Cet accès est un avantage de taille pour échapper au trafic et ne pas aggraver la congestion déjà existante : le triporteur possède cette adaptabilité face aux situations urbaines qui fait défaut aux voitures et camions. La possibilité en outre de se garer sur les trottoirs règle le problème des stationnements gênants ou chronophages [4]. En ajoutant à cela la suppression des bruits de camion et la sécurité accrue des piétons, cette solution améliore le bien-être de la population.

Notre étude se porte sur le déploiement d'un réseau de triporteurs électrique dans la ville de Nice dont l'hypercentre cloisonné, dense et ramassé s'y prête particulièrement [4].

Notre projet s'attaque aux freins que rencontraient jusque-là de telles structures de transport dans leur implantation [9]. Le manque d'autonomie des triporteurs est compensé par le déploiement d'un réseau de bornes de recharge, la gestion des trajets de la flotte et la prise en compte de la topologie du terrain [3] sont assurées par un outil d'optimisation informatique [10]. L'ajout d'une composante photovoltaïque sélectionnée en adéquation avec nos besoins [11] [12], dans l'alimentation de nos bornes de recharge [9] inscrit notre projet dans une logique écologique et durable.

Bien qu'ambitieux, c'est la réussite de l'entreprise rennaise "les Triporteurs de l'Ouest", et l'espoir d'investissements des collectivités publique, qui nous poussent à espérer que ce projet, durable et compétitif pour la ville de Nice saura y impacter les mobilités urbaines tout en s'intégrant dans le tissu urbain.

– **Références** :

- [1] Durand, B., Gonzales-Féliu, J., & Henriot, F. (2015). La logistique urbaine, facteur clé de développement du B to C. Analyse critique de l'article paru en 2010. *Logistique & Management, Taylor & Francis*, 23, 51- 66. <https://doi.org/10.1080/12507970.2015.11758622>
- [2] Macron, E., Royal, S., & Vidalies A. (2016). France Logistique 2025. Consulté à l'adresse https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/DPFranceLogistique2025_240316.pdf
- [3] Nocerino, R., Colorni, A., Lia, F., & Luè, A. (2016). E-bikes and E-scooters for Smart Logistics : Environmental and Economic Sustainability in Pro-E-bike Italian Pilots. *Transportation Research Procedia*, 14, 2362- 2371. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.267>
- [4] 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(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0349-5>
- [5] Materson, A. (2017). Sustainable Urban Transportation : Examining Cargo Bike Use in Seattle (University of Washington). Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/1773/40719>
- [6] Paudel, A., Kreutzmann, P. (2015). Design and performance analysis of a hybrid solar tricycle for a sustainable local commute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 437-482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.078>
- [7] Saenz, J., Figliozzi, M., & Faulin, J. (2016). Assessment of the Carbon Footprint Reductions of Tricycle Logistics Services. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2570(1), 48- 56. <https://doi.org/10.3141/2570-06>
- [8] Directive 2002/24/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 mars 2002. , Pub. L. No. 32002L0024 (2002).
- [9] 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>
- [10] Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345- 358. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
- [11] Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2018). Solar cell efficiency tables (version 51). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(1), 3- 12. <https://doi.org/10.1002/pip.2978>
- [12] Bhuiyan, Md. F., Uddin, M. R., Tasneem, Z., & Salim, K. M. (2018). Feasibility Study of a Partially Solar Powered Electrical Tricycle in Ambient Condition of Bangladesh. *2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT)*, 495- 499. <https://doi.org/10.1109/CEEICT.2018.8628101>