



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement

CITERES

UMR 7324

**Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés**



**université
de TOURS**

Equipe DATE

*Dynamiques et Actions Territoriales
et Environnementales*

Projet de Fin d'Etudes

Transport de marchandises au dernier kilomètre :

Quelle alternative à l'utilisation des véhicules thermiques ?



**CLAUDE Martin
WERMUS Lucas**

2018

**Directeur de recherche
MAIZIA Mindjid**

Transport de marchandises au dernier kilomètre : quelle alternative à l'utilisation des véhicules thermiques ?

Directeur de recherche : MAIZIA Mindjid
Auteurs : CLAUDE Martin & WERMUS Lucas
Année : 2018

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier notre tuteur M. Maizia pour nous avoir proposé ce projet et avoir su nous orienter dans nos recherches et applications techniques.

SOMMAIRE

1. Introduction	2
2. Formulation du problème	3
3. Méthodologie.....	5
4. Résultats	7
1.1. Résultats première approche	7
1.2. Résultats seconde approche.....	9
5. Approfondissement	10
6. Conclusion.....	12
Références bibliographiques	13
Annexes.....	14

Figure 1 : hypothèses de calcul.....	3
Figure 2 : répartition horaire de la fréquentation commerciale en France.....	4
Figure 3 : système logique - 1ère approche	5
Figure 4 : système logique - 2nde approche	6
Figure 5 : autonomie des véhicules électriques grâce à la production PV au long de l'année.....	7
Figure 6 : part des distances journalières pouvant être parcourues grâce à la production PV.....	8
Figure 7 : surface PV nécessaire pour effectuer les tournées journalières au long de l'année.....	9
Figure 8 : surface PV à installer selon certaines périodes de l'année	9
Figure 9 : puissances appelée et injectée sur une journée.....	10
Figure 10 : puissances appelée et injectée et énergie stockée sur une journée	11

1. Introduction

Le transport de marchandises au dernier kilomètre, dernier maillon d'une chaîne logistique complexe, doit évoluer pour faire face à deux facteurs déstabilisants : le changement climatique et la hausse des prix de l'énergie. Pour tenter de rester compétitif et limiter les impacts associés à la livraison de biens de consommations en milieu urbain, on tente de rapprocher au maximum les plateformes logistiques des centres ville, pour se positionner au plus près du consommateur final.

Toutefois le foncier vient à manquer pour en implanter de nouvelles, tandis que les flux de marchandises en ville augmentent fortement, en raison du développement conséquent du e-commerce. Dans la majorité des villes françaises, le fret urbain représente déjà en moyenne 20% du trafic, 30% de l'occupation de la voirie et 30% des émissions de gaz à effet de serre¹.

Des propositions ont déjà été formulées pour tenter de réduire le coût environnemental de la livraison de marchandises au dernier kilomètre, comme l'intégration d'une partie des flux au système de transport en commun (voir article *Transport de marchandises au dernier kilomètre : quelle intégration au système de transport urbain ?* - CLAUDE, WERMUS - 2017). Toutefois aucune alternative n'a été proposée, dans le travail sus-cité, concernant la distance restant à parcourir entre les plateformes logistiques et les stations de transport en commun. Afin de réduire au maximum la pollution liée au transport de marchandises en ville, il est nécessaire de supprimer l'usage de véhicules émetteurs de GES. On peut imaginer la mise en place d'une flotte de véhicules électriques, à partir d'une source d'énergie renouvelable, produite localement au niveau des plateformes logistiques.

L'objet de notre recherche est de modéliser une production d'électricité (via des panneaux photovoltaïques) qui permettrait de charger une flotte de véhicules de livraison 100% électriques venant en remplacement des véhicules thermiques actuels. On fait l'hypothèse qu'en produisant localement de l'électricité pour les véhicules de livraison on leur offre une autonomie suffisante pour pouvoir se passer de véhicules thermiques. Cet article propose deux approches du problème, dont les hypothèses et les protocoles détaillés sont présentés dans la partie méthodologie. Les résultats sont présentés et commentés dans un deuxième temps. Enfin, nous proposons un approfondissement des solutions présentées, exposant la complexité de l'organisation et de la gestion d'une plateforme logistique, pour finalement conclure sur l'intérêt du système proposé ici.

¹ Selon le Centre d'analyse stratégique - voir le rapport « Pour un renouveau de la logistique urbaine ».

2. Formulation du problème

Le but de cette recherche est d'évaluer la faisabilité d'un système de livraison 100% sans Gaz à Effet de Serre (GES). Pour une intégration en milieu urbain, au niveau des plateformes logistiques, nous optons pour une production photovoltaïque. Généralement on ne considère pas une installation photovoltaïque comme indépendante mais comme faisant partie d'un réseau électrique à l'échelle du pays. Ainsi l'intermittence d'une production locale (liée aux cycles jour/nuit et aux conditions météorologiques) est gommée par l'effet de foisonnement de la production à une échelle plus large. Dans notre cas l'unité de production est vue comme un système à part entière et nous cherchons à savoir dans quelle mesure ce système permet d'assurer l'autonomie de nos véhicules électriques. On considère donc également que les véhicules de livraison sont rechargés uniquement par l'électricité produite localement.

Les résultats numériques exposés dans cet article dépendent fortement des données d'entrée utilisées dans les calculs. De manière générale, ces données d'entrée ont toujours été choisies à la borne la plus négative et non à la moyenne. Autrement dit, si l'on prend l'exemple de l'autonomie des batteries des véhicules qui se situe aujourd'hui entre 40 et 100 kWh, l'autonomie la plus faible a été retenue pour les calculs, c'est à dire 40 kWh. De même avec la consommation des véhicules qui a été établie à 200 Wh/km soit la borne la plus élevée. En faisant ce choix on s'assure d'obtenir des résultats théoriques qui seraient au moins égaux, sinon dépassés, si ce système venait à être expérimenté sur le terrain.

Hypothèses de calculs

Caractéristiques	Valeurs	Commentaires
Autonomie kWh	40 kWh	Autonomie généralement comprise entre 40 kWh et 80 kWh
Consommation moyenne	0,2 kWh/km	Conso moyenne normalement comprise entre 80 et 200 Wh/km
Autonomie km	200 km	Equivalence en km
Distance plateforme-station	5 km	Distance moyenne entre plateformes logistiques et stations de transports en commun
Nb aller-retour journaliers	1100	Nombre élevé afin d'observer les effets de foisonnement et de dégager une tendance générale
Parc de véhicules	100	Nombre de véhicules minimum nécessaire pour effectuer l'ensemble des aller-retours.
Temps aller-retour	45 mn	Environ 30min de trajet en milieu urbain + 15 min de charge et décharge à la station

Figure 1 : hypothèses de calcul

Par ailleurs, Les données d'ensoleillement utilisées dans cette recherche pour calculer les productions photovoltaïques sont des données issues des archives ouvertes HAL², et sont des moyennes décennales (moyenne sur 10 jours) rapportées à la journée à Lyon en 1978 (voir Annexes).

² L.M. Schwartz, R. Louat, G. Menguy. Etude du rayonnement solaire global à Lyon et à Mâcon. *Revue de Physique Appliquée*, 1980, 15 (2), pp.103-112.

Enfin, dans l'approfondissement de cette recherche, l'échelle temporelle a été affinée à la journée pour étudier le comportement de la production et de la consommation minute à minute. Ainsi pour distribuer l'ensemble des aller-retours journaliers, nous nous sommes basés sur la répartition horaire de l'activité commerciale en France détaillée sur le graphique ci-dessous. La distribution à la minute s'effectue linéairement. Autrement dit, si entre 6h et 7h doivent s'effectuer 6 courses, un camion partira de la plateforme logistique toutes les 10 minutes (60 min / 6 courses).

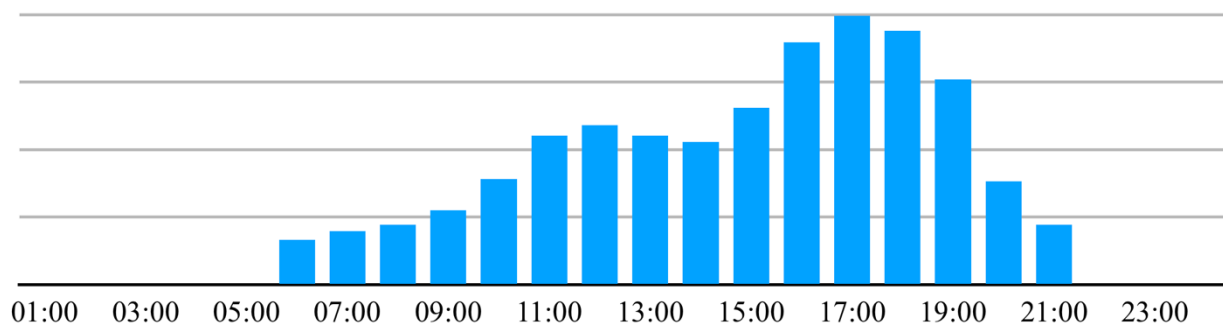


Figure 2 : répartition horaire de la fréquentation commerciale en France

3. Méthodologie

Le problème est abordé par deux éléments d'entrée différents. Il en résulte deux approches inverses, présentées l'une après l'autre dans cet article. Dans la première nous sommes contraints par la place pouvant être attribuée à l'installation photovoltaïque ; les panneaux sont montés sur un préau recouvrant exactement la surface du parking dédié à la flotte de véhicules de livraison. Nous cherchons alors à savoir si dans cette configuration notre production d'électricité est suffisante pour permettre aux véhicules d'effectuer toutes leurs tournées de livraison. Dans la seconde nous avons l'obligation de produire la quantité d'électricité suffisante pour assurer notre service de livraison à tout moment de l'année. Nous cherchons dès lors à connaître la surface de panneaux photovoltaïques à installer pour répondre à cette obligation.

Le premier système part ainsi du principe que l'installation de panneaux photovoltaïques couvrira les places de parking des camions de livraison électriques et uniquement cela. A partir d'un certain nombre de places de parking d'une taille donnée, et donc d'une certaine surface de panneaux photovoltaïques, nous cherchons à connaître l'autonomie fournie à notre flotte à n'importe quel moment de l'année. Ce système logique fournit un ensemble de valeurs d'autonomie pour les véhicules électriques suivant la période de l'année. Comme vu précédemment, nous avons fixé la flotte de véhicules à 100 camions et estimé la taille d'une place de parking à 21 m².

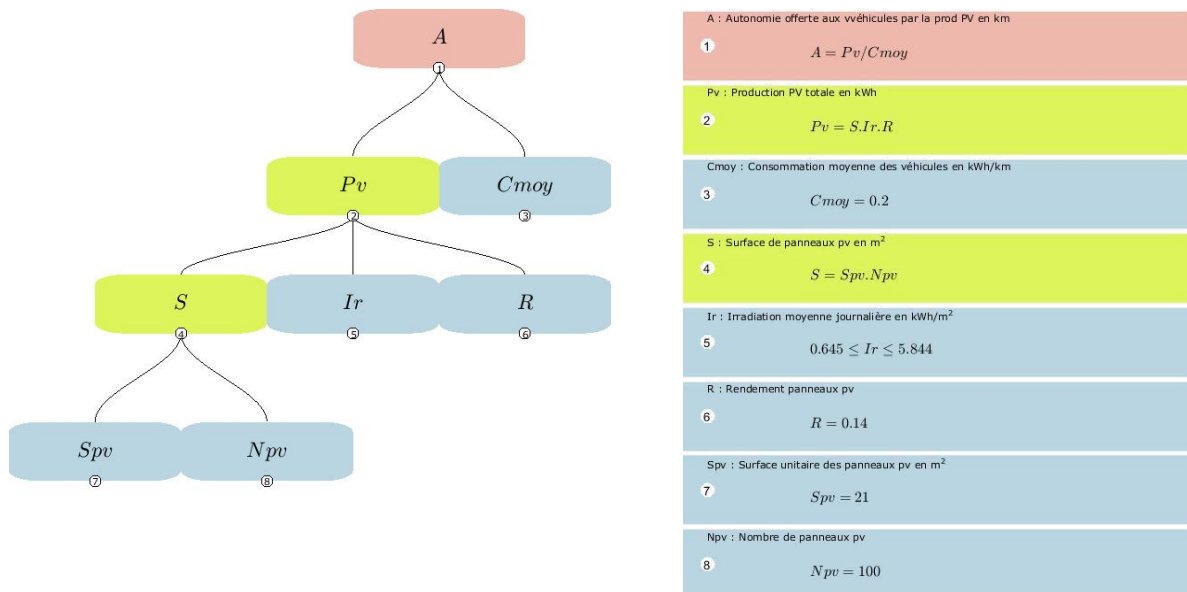


Figure 3 : système logique - 1ère approche

Le second système se base lui sur les données de consommation. À partir d'un certain nombre de courses à effectuer, et donc un certain nombre d'aller-retours à la station de transport la plus proche, nous cherchons à déterminer la surface de panneaux photovoltaïques nécessaire afin de répondre à la consommation à n'importe quel moment de l'année. Ce système logique fournit un ensemble de valeur de surface de panneaux photovoltaïque suivant la période de l'année.

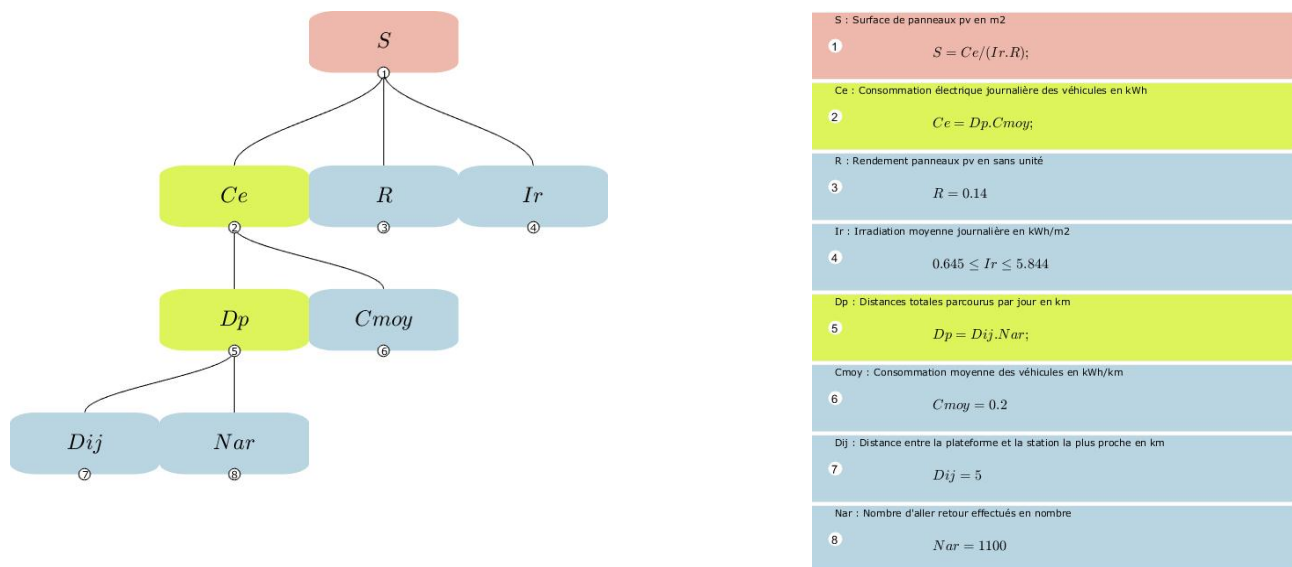


Figure 4 : système logique - 2nde approche

4. Résultats

1.1. Résultats première approche

Grâce au système présenté précédemment nous obtenons le graphique ci-dessous. Il donne les distances que peuvent parcourir les véhicules de livraison grâce à la production de notre installation photovoltaïque, dont la surface totale a été fixée à 2 100 m². Les valeurs obtenues sont des moyennes décadaires des distances quotidiennes pouvant être parcourues. On observe un pic sur les mois d'été, tandis que les valeurs les plus faibles sont réparties sur la période hivernale. De fait, plus le rayonnement solaire atteignant la terre est important, plus nous produisons d'électricité, plus les distances pouvant être parcourues par les véhicules chaque jour sont grandes. Ce graphique suit donc l'allure de l'irradiation solaire à Lyon au cours de l'année. Un maximum est atteint début juin lorsque l'irradiation moyenne journalière grimpe jusqu'à 5 844 Wh/m², ce qui nous permet d'obtenir 8 590 km d'autonomie. La distance journalière à parcourir pour assurer un service de livraison complet ayant été fixée à 11 000 km, on peut d'ores et déjà affirmer que notre système de production ne suffira pas à couvrir nos besoins, à aucun moment de l'année.

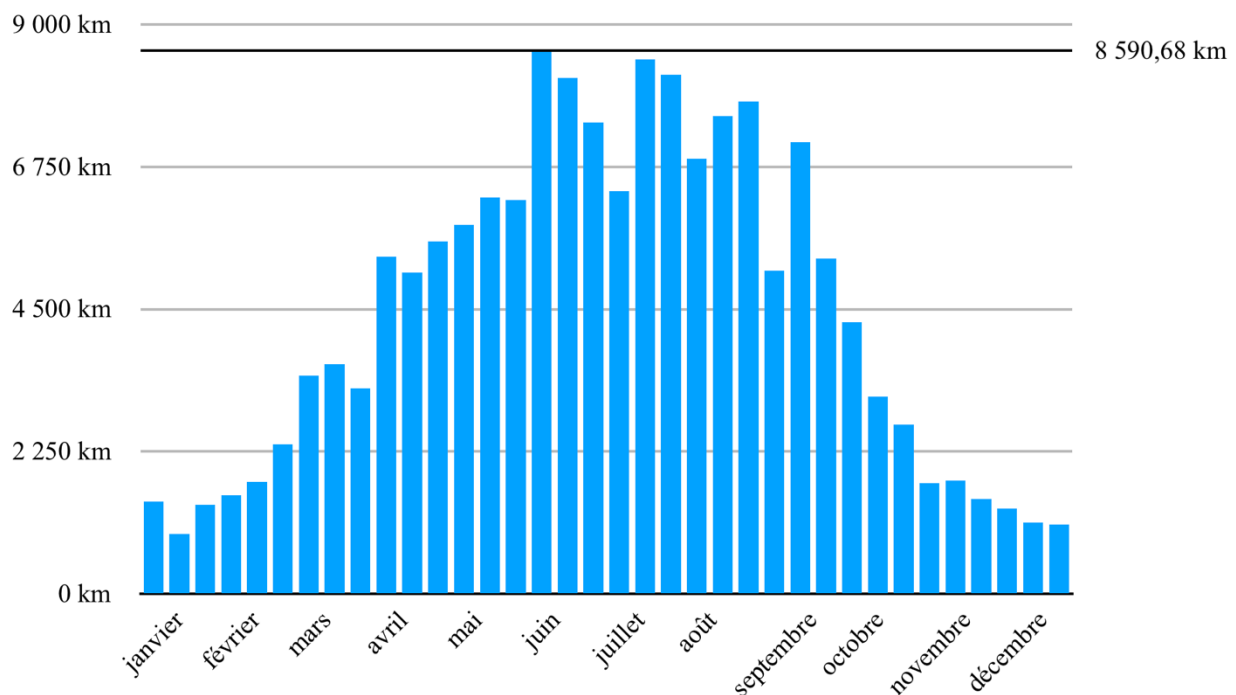


Figure 5 : autonomie des véhicules électriques grâce à la production PV au long de l'année

Ce premier constat étant fait, nous cherchons à savoir dans quelle mesure notre production d'électricité pourrait couvrir la consommation journalière des véhicules. Le graphique ci-dessous permet de visualiser la part des distances pouvant être parcourues grâce à l'électricité produite localement, sur la tournée journalière type prise comme hypothèse. Les valeurs exprimées sont ici encore des moyennes sur 10 jours. Au maxima relevé précédemment, 78% de la tournée pourrait être assurée grâce à l'électricité produite localement. En moyenne sur l'année ce sont 40% des distances que l'on pourrait couvrir ainsi. Et ce chiffre descend à 9% seulement sur la période la moins prolifique de l'année, soit en plein hiver.

Pour nous qui ambitionnons de supprimer l'usage de véhicules à moteur thermiques dans la logistique du dernier kilomètre, ces premiers résultats ne sont pas satisfaisants. Couvrir chaque place de parking par une surface équivalente en panneaux photovoltaïques n'est pas suffisant. Ici c'est bien le rapport surface de panneaux par véhicule de livraison qui pose problème. Pour pouvoir atteindre notre objectif il va donc falloir augmenter ce ratio. C'est l'objet de la deuxième approche, dans laquelle nous inversons le problème. En fixant la production désirée, nous allons pouvoir déterminer le ratio surface de panneaux par véhicule qui nous permettra d'atteindre notre objectif.

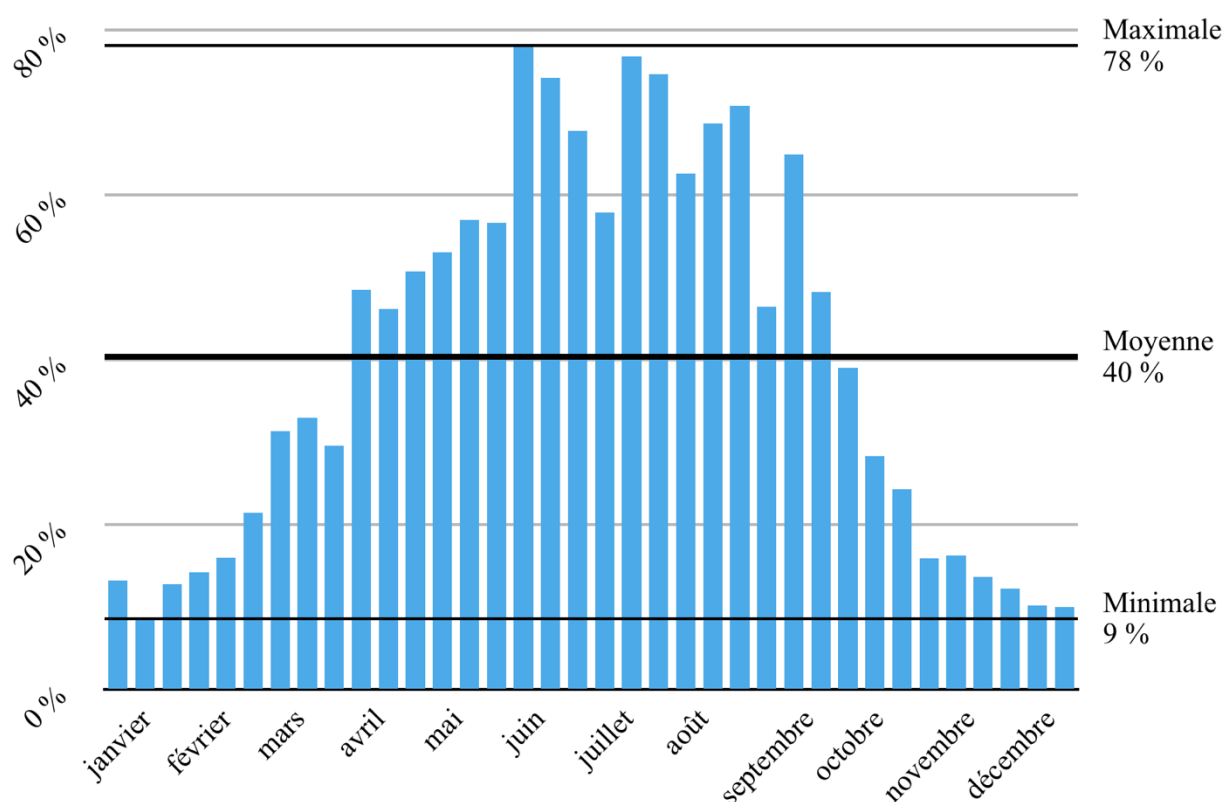


Figure 6 : part des distances journalières pouvant être parcourues grâce à la production PV

1.2. Résultats seconde approche

Le second système expliqué précédemment permet d'obtenir le graphique ci-dessous. Comme on peut s'en douter, les périodes de l'année les moins ensoleillées nécessitent une surface de panneaux photovoltaïques plus importante. Le maximum se situe durant le mois de janvier avec une irradiation moyenne journalière de 645 Wh/m^2 , et qui implique l'installation de $24\,363 \text{ m}^2$ de panneaux pour subvenir aux besoins de nos véhicules électriques. Cela correspond dans notre étude à environ 244 m^2 de panneaux par véhicule, soit plus de 10 fois l'installation du système précédent.

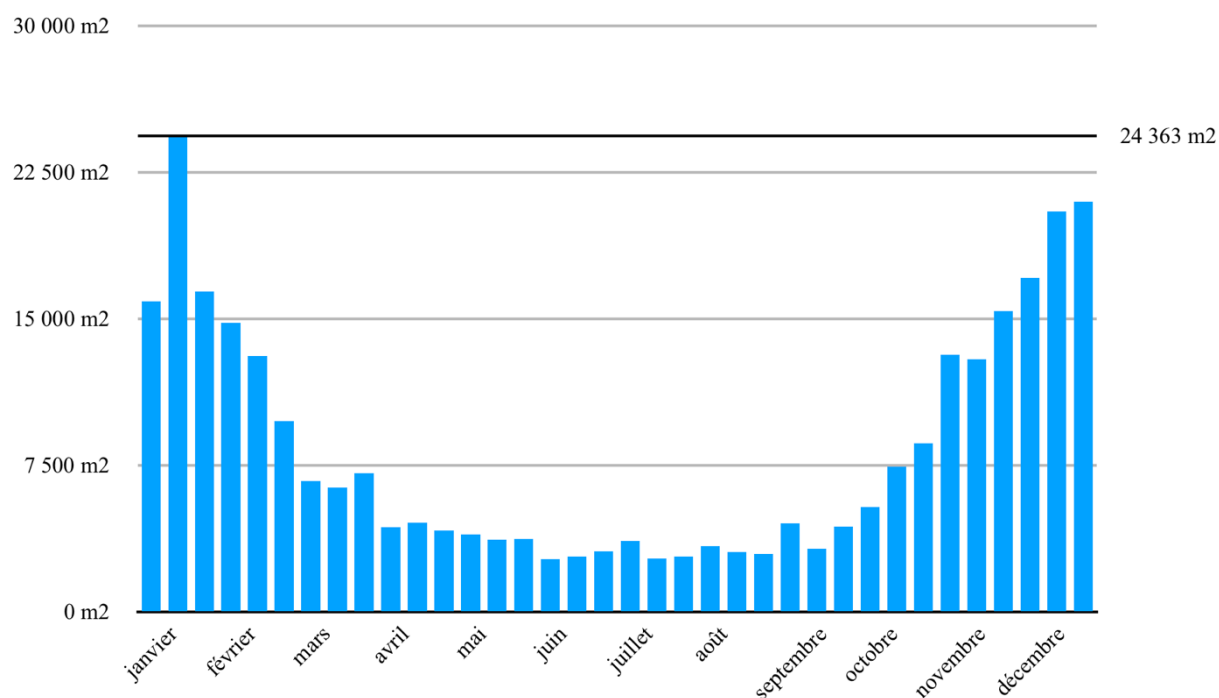


Figure 7 : surface PV nécessaire pour effectuer les tournées journalières au long de l'année

Dans l'approfondissement de cette recherche, nous retiendrons cette valeur de $24\,363 \text{ m}^2$ pour la suite des calculs. Cependant, le choix de la surface à installer à partir de la moyenne des 10 plus mauvais jours de l'année est discutable. Le tableau ci-dessous permet de comparer les surfaces à installer si l'on se base sur la moyenne hivernale ou annuelle. La moyenne annuelle correspond à la surface nécessaire pour équilibrer le bilan production-consommation annuel. La différence est notable, avec quasiment 5 fois moins de surface, on peut produire l'ensemble de nos consommations annuelles. Un bon compromis entre autonomie quasi toute l'année (car une autonomie parfaite est impossible avec une énergie intermittente comme le solaire) et ajustement de la balance production-consommation sur l'année est la moyenne hivernale. En effet, elle permettrait une production relativement ajustée aux consommations en hiver et offrirait un surplus d'énergie en été. La balance énergétique annuelle serait alors excédentaire pour une installation 35% moins importante que pour la décade la plus mauvaise.

	Moyenne année	Moyenne hiver	Jours les plus mauvais
Surface photovoltaïque	5 203 m2	15 894 m2	24 363 m2
Surface Pv/véhicules	52 m2	159 m2	244 m2

Figure 8 : surface PV à installer selon certaines périodes de l'année

5. Approfondissement

Lorsque l'on étudie plus attentivement la répartition de la consommation et de la production d'énergie au cours d'une journée, on observe un décalage entre le pic de production et le pic de consommation. Ce décalage est principalement dû au retour en fin de journée d'un grand nombre de véhicules après le pic de livraison aux alentours de 17h. La journée type prise dans cet approfondissement est une journée hivernale n'appartenant pas à la plus mauvaise décade de l'année.

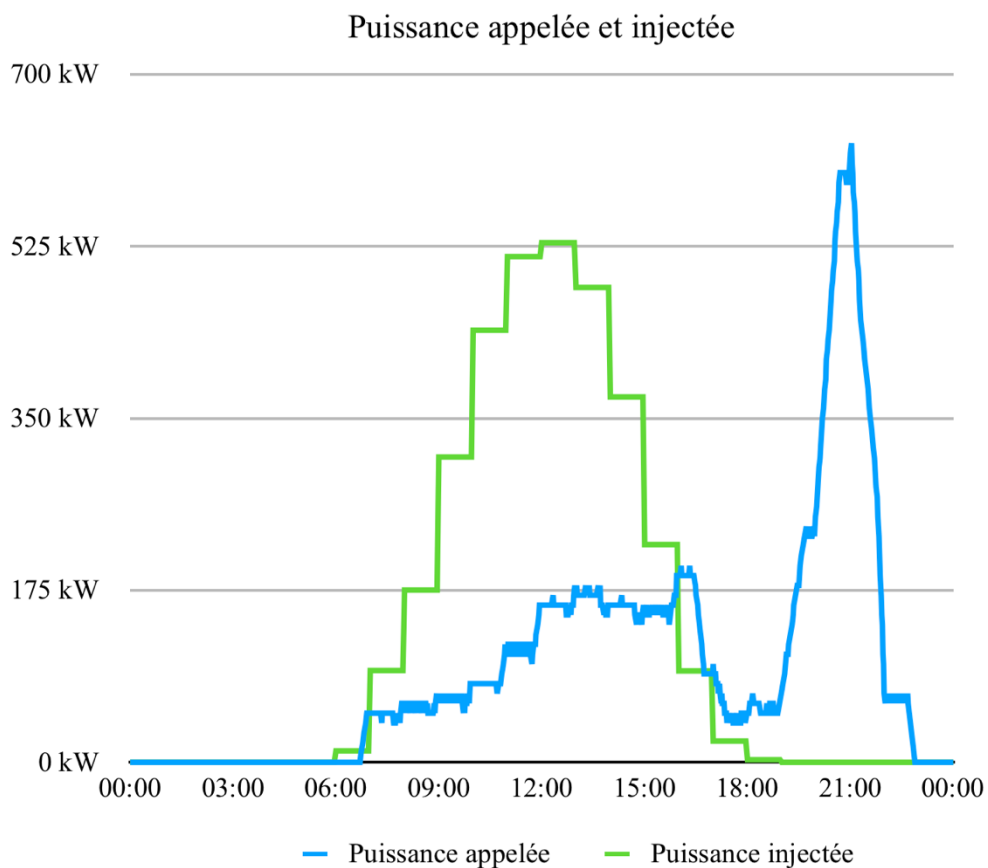


Figure 9 : puissances appelée et injectée sur une journée

Afin de compenser ce décalage et de créer un système qui pourrait théoriquement être 100% autonome, on propose l'installation d'un système de stockage de l'énergie. Cela permettrait ainsi de palier à l'intermittence de l'énergie solaire. Le dimensionnement du stockage proposé ici se base sur la consommation journalière, soit 1100 aller-retours de 5km à une consommation moyenne de 0,2 kWh/km, ce qui donne 2200 kWh consommés par jour. Peut donc être ajoutée sur le graphique la courbe de stockage au cours d'une journée.

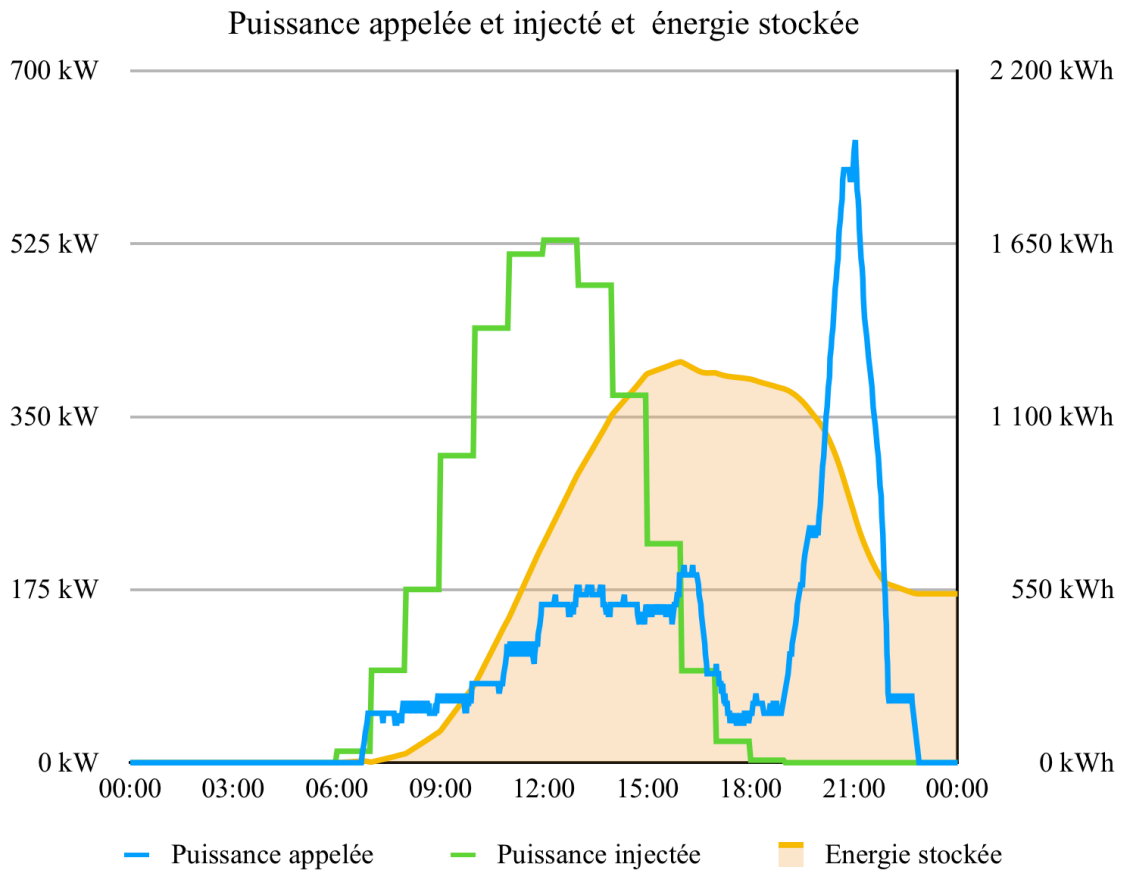


Figure 10 : puissances appelée et injectée et énergie stockée sur une journée

Cependant, intégrer dans la chaîne énergétique un système de stockage induit aussi un coût énergétique. En effet, selon la technologie utilisée les rendements de ces systèmes ne sont pas de 100% mais plus souvent compris entre 60% et 80%. La valeur la plus mauvaise de 60% est retenue ici. Ainsi, les résultats obtenus précédemment devront être réajustés pour produire l'énergie perdue dans ce nouveau système. On passerait ainsi d'une installation de 244 m² par véhicules à quasiment 406 m² par véhicule sur la base des jours les plus mauvais.

6. Conclusion

Repenser le système de livraisons de biens de consommation en ville est une tâche complexe de part le nombre ainsi que la variabilité des paramètres en jeu. L'intégration du transport de marchandises au système de transport urbain est, comme on l'a vu dans le précédent article, un levier de réduction des émissions de GES important. Cependant, il ne permet pas de supprimer totalement l'usage de véhicules thermiques dans la logistique du dernier kilomètre, et de lourds aménagements sont à prévoir avant sa potentielle mise en service.

Remplacer la flotte de véhicules thermiques par une flotte électrique est un autre moyen efficace de diminuer les rejets de GES en ville. En couplant les deux systèmes, l'intégration aux transports en commun et l'utilisation de véhicules électriques, nous serions potentiellement capables d'effectuer l'ensemble des livraisons de marchandises au dernier kilomètre sans émettre de GES. En outre, il est possible à travers l'installation de panneaux photovoltaïques au niveau des plateformes logistiques de créer un système quasiment 100% autonome, alimenté durablement et localement en énergie renouvelable.

Cependant plusieurs obstacles à ce système idéal ressortent. Nous avons vu qu'un système de stockage de l'électricité serait indispensable à notre autonomie, entraînant un coût et une consommation d'espace non négligeables. Mais surtout, la très grande surface de panneaux photovoltaïques par véhicule à installer implique de trouver la surface nécessaire aux abords des plateformes logistiques. A titre de comparaison pour une petite plateforme d'environ 10 véhicules il faudrait environ une vingtaine de bâtiments de 120m² au sol recouverts de panneaux. Par ailleurs, une grande partie de la production estivale ne sera pas utilisée localement. Elle pourra être valorisée en étant injectée dans le réseau national, à condition que notre système y soit relié.

L'intérêt de voir notre système de production comme indépendant du réseau électrique national est donc plutôt théorique, en ce qu'il permet d'affirmer que notre flotte de véhicules utilise uniquement de l'électricité d'origine renouvelable. Dans les faits, un mix autoconsommation et revente à EDF serait probablement une option raisonnable (techniquement et financièrement), permettant de diminuer considérablement les émissions de GES liées à la livraison au dernier kilomètre, sans être confronté aux obstacles sus-cités. Afin de poursuivre ce travail, il serait intéressant d'étudier le surcoût engendré par la recherche d'une autonomie complète, face à une solution plus classique, reliée au réseau national, et dimensionnée pour équilibrer production et consommation sur l'année.

Références bibliographiques

M. Claude, L. Wermus. *Transport de marchandises au dernier kilomètre : quelle intégration au système de transport urbain ?* (Projet de fin d'études en ligne) : Polytech Tours, 2017. Disponible sur : http://www.applis.univ-tours.fr/scd/EPU_DA/LOCAL/2018PFE_S9_Claude_Wermus.pdf

L.M. Schwartz, R. Louat, G. Menguy. Étude du rayonnement solaire global à Lyon et à Mâcon. *Revue de Physique Appliquée*, 1980, 15 (2), pp.103-112. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00244704/document>

Ifp Énergies Nouvelles (consulté le 15/03/2018). Disponible sur : <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite>

Centre d'Analyse Stratégique. *La note d'analyse n°274 : Pour un renouveau de la logistique urbaine*. Paris, 2012. Disponible sur : http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/2012-04-02_-_logistiqueurbaine-na274.pdf

Annexes

Lyon 1978: Moyenne décadaire de l'irradiation quotidienne

Décade du mois	1ère	2nd	3ème
janvier	989 Wh/m2	645 Wh/m2	958 Wh/m2
février	1 063 Wh/m2	1 201 Wh/m2	1 608 Wh/m2
mars	2 345 Wh/m2	2 468 Wh/m2	2 212 Wh/m2
avril	3 626 Wh/m2	3 453 Wh/m2	3 792 Wh/m2
mai	3 970 Wh/m2	4 263 Wh/m2	4 234 Wh/m2
juin	5 844 Wh/m2	5 550 Wh/m2	5 071 Wh/m2
juillet	4 327 Wh/m2	5 744 Wh/m2	5 585 Wh/m2
août	4 681 Wh/m2	5 135 Wh/m2	5 294 Wh/m2
septembre	3 474 Wh/m2	4 855 Wh/m2	3 608 Wh/m2
octobre	2 923 Wh/m2	2 118 Wh/m2	1 822 Wh/m2
novembre	1 193 Wh/m2	1 215 Wh/m2	1 022 Wh/m2
décembre	919 Wh/m2	767 Wh/m2	748 Wh/m2

**Directeur de recherche :
MAIZIA Mindjid**

CLAUDE Martin & WERMUS Lucas
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2017-2018

Transport de marchandises au dernier kilomètre : quelle alternative à l'utilisation des véhicules thermiques ?

Résumé :

L'objet de cet article est de modéliser une production d'électricité (via des panneaux photovoltaïques) qui permettrait de charger une flotte de véhicules de livraison 100% électriques, venant en remplacement des véhicules thermiques actuels. Deux approches inverses sont présentées. Dans la première on fixe la surface de panneaux photovoltaïques et on cherche à savoir quelles distances peuvent être parcourues par les véhicules électriques grâce à ce système. Dans la seconde on fixe les besoins électriques, correspondant à une tournée de livraison type, et on cherche à déterminer les surfaces de panneaux nécessaires pour assurer une telle production tout au long de l'année. On regarde ensuite comment se répartissent sur une journée la production d'électricité et les appels de puissance successifs, correspondant aux recharges des véhicules de livraison. Les différents constats effectués nous permettent de conclure sur la possibilité d'avoir un système de livraison au dernier kilomètre 100% autonome, alimenté localement en énergie renouvelable. On soulève par ailleurs les limites d'un tel concept.

Mots Clés : transports, marchandises, GES, électrique, logistique, fret, urbain