



Quel est le vrai coût de l'énergie pour une trottinette partagée?

Fabien Leurent

► To cite this version:

Fabien Leurent. Quel est le vrai coût de l'énergie pour une trottinette partagée?. Rencontres De la Mobilité Intelligente 2022 (congrès ATEC-ITS France), Jan 2022, Montrouge, France. hal-03550045

HAL Id: hal-03550045

<https://hal.science/hal-03550045>

Submitted on 31 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Quel est le vrai coût de l'énergie pour une trottinette partagée?

Résumé

Nous considérons un service de mobilité partagée par trottinettes électriques, en self-service et free-floating, en postulant de plus que les batteries sont amovibles et que la recharge en énergie procède par des tournées de "juicers" pour échanger les batteries. Nous formulons analytiquement le coût de production d'un tel service et nous l'optimisons en jouant sur la production des tournées de recharge, sur la profondeur de décharge et la capacité de la batterie, ainsi que le modèle de trottinette (parcours de vie, taux de consommation). Une étude numérique permet de situer l'ordre de grandeur des différents postes de coût.

Mots-clés : trottinettes partagées ; consommation d'énergie ; batteries amovibles ; tournées de recharge ; cycle de vie ; coût de production ; modèle mathématique

1/ Introduction

Contexte. Depuis 2018, des services de trottinettes électriques partagées en free-floating (sans stations) se sont implantés dans des grandes villes de nombreux pays. Ces services sont offerts par des opérateurs tels que Lime, Tier, Dott etc. Pour un utilisateur, c'est un moyen de transport pratique, qui accélère la marche et amplifie la portée de déplacement, facile à conduire, et qui épargne l'effort physique des modes actifs grâce au moteur électrique qui fournit tout le travail mécanique. Mais le prix d'utilisation est relativement élevé : à Paris les services ont un prix socle (nul pour certains) auquel s'ajoute une part variable proportionnelle au temps passé, à raison de 0.15 ou 0.2 €/min. A disons 12 km/h de vitesse moyenne, il faut 5' pour parcourir 1 km, donc le coût s'élève à 0.75 ou 1 €/km.

Problématique. L'étude rapportée ici s'inscrit dans une recherche pour optimiser le modèle d'affaire d'un tel service : combien coûtent les différentes fonctions du service, entre l'achat des trottinettes et des batteries, l'alimentation en énergie, le processus de recharge sur le terrain, la commercialisation du service, la maintenance, les télécommunications, le prix d'implantation sur le territoire, les coûts fixes d'administration et d'établissement (dépôt-atelier) ?

Nous nous concentrons ici spécialement sur la fonction de recharge. Dans les implémentations initiales du service, le processus consistait à collecter les trottinettes pour les recharger en dehors du terrain. Certains opérateurs confiaient cette tâche à des « jig workers » indépendants rémunérés à 5 € ou même 10\$ par trottinette dans certaines villes américaines. Comme les batteries sont dimensionnées pour contenir environ 0.5 kWh en pleine charge, un tel mode de recharge élève le prix du kWh utile à 10 ou même 20€, soit plus de 50 fois le tarif moyen par unité de consommation pour les particuliers, aux conditions françaises de 2020 !

Objectif. Nous présentons ici un modèle technique et économique d'un service de trottinettes électriques partagées en libre-service, dont les batteries sont amovibles, « swappable », permettant de recharger les véhicules par des tournées ne transportant que des batteries. Ce procédé de batteries amovibles, recommandé par McKinsey en 2019, a été adopté dès 2020 par Lime et Tier,

entre autres (Figure 1). D'autres opérateurs ont avancé des arguments opposés (notamment Dott, cf. Superpedestrian 2020).

Dans notre modèle, nous explicitons les conditions logistiques de la recharge, ainsi que la capacité énergétique de la batterie (BEC : Battery Energy Capacity) et le niveau relatif de décharge, la « profondeur de décharge » (DoD : Depth of Discharge), qui suspend la disponibilité de la trottinette jusqu'au prochain swap de batterie. Nous modélisons mathématiquement la fonction de coût de production et nous formulons analytiquement des conditions d'optimalité pour les variables de décision suivantes : le nombre de recharges par tournée, la capacité énergétique de batterie, la profondeur de décharge, ainsi que les caractéristiques du véhicule (longueur du « parcours de vie », taux de consommation d'énergie).

Il en ressort une stratégie économique d'alimentation en énergie, comprenant la logistique de recharge ainsi que le dimensionnement énergétique de batterie, la profondeur de décharge et la constitution des véhicules. Dans une étude numérique, nous montrons que l'optimisation du service ramène le coût du kWh utile à 1 ou 2 €, soit bien moins que les 10 ou 20 € du procédé initial par collecte du véhicule, tout en restant nettement supérieur au prix « à la prise ».

Structure. La suite du texte est en 4 parties : d'abord la présentation du modèle technique et économique, puis l'optimisation théorique, ensuite l'étude numérique, enfin une conclusion. Une version étendue de l'article est disponible en anglais (Leurent, 2021).

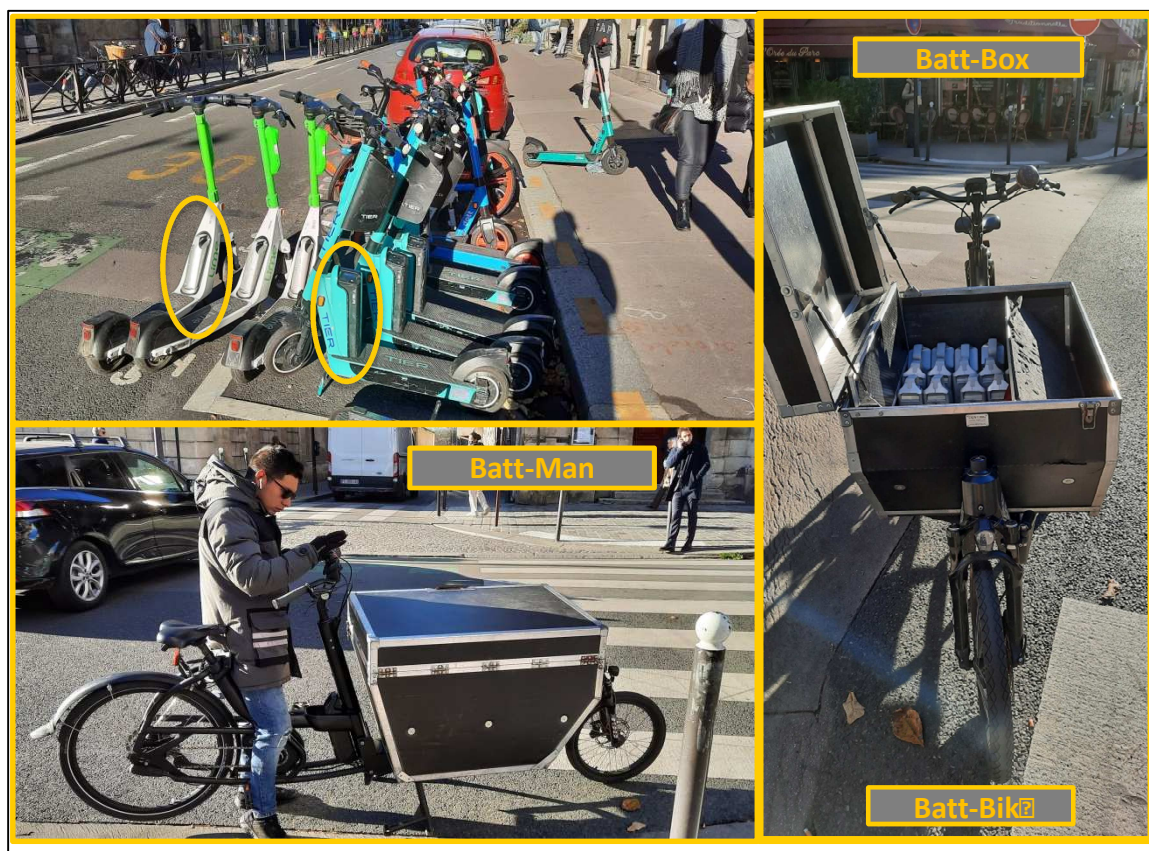


Fig.1 : Trottinettes électriques en libre-service à Paris fin 2021, à batterie amovible ou non. Et la logistique de recharge par cargo e-bike pour le service Lime. (Source : auteur)

2/ Le modèle technique et économique

Le modèle est posé en base journalière. Soit Q le nombre moyen de trajets servis dans la journée, et ℓ_R la longueur parcourue moyenne.

2.1/ Modèle technique

Le trafic commercial journalier du service s'élève à

$$Q_L = Q \cdot \ell_R \quad (1)$$

A raison d'un taux de consommation d'énergie de χ_E par unité de longueur, le flux journalier d'énergie utile s'élève à

$$Q_E = \chi_E \cdot Q_L \quad (2)$$

Notons A la BEC et σ la DoD : par recharge, la quantité d'énergie rechargée est de $A \cdot \sigma$.

Donc le nombre journalier de recharges couvrant la consommation d'énergie est de

$$Q_F = \frac{Q_E}{\sigma \cdot A} \quad (3)$$

Pour la logistique du swapping, nous supposons que chaque tournée comprend un temps fixe t_0 (incluant un temps socle de parcours sur le terrain ainsi que les manipulations de batteries en atelier, le temps de repos du juicer) plus un temps variable à raison de $\dot{t}$ par recharge. En notant n_B le nombre de swaps pour la tournée, le temps moyen de tournée est de

$$T_J = t_0 + n_B \cdot \dot{t} \quad (4)$$

Notons à présent φ_J le nombre de tournées de recharge accomplies dans la journée. Il faut assurer Q_F recharges, donc $\varphi_J \cdot n_B = Q_F$, soit

$$\varphi_J = Q_F / n_B \quad (5)$$

Venons-en au nombre n_J de postes de juicers : en notant H_J la durée utile du service journalier, la durée totale des tournées produites est de $n_J \cdot H_J$, qui équilibre le besoin $\varphi_J \cdot T_J$. Nous en déduisons que $n_J \cdot H_J \cdot n_B = T_J \cdot Q_F$, soit encore

$$n_J = \frac{Q_F \cdot T_J}{n_B \cdot H_J} \quad (6)$$

Nous retenons n_B comme variable de décision pour l'organisation des tournées. Les conditions de tournée influenceront la taille de la flotte des véhicules : en moyenne pendant $H = 24h$, il y a $n_J \cdot H_J / H$ tournées simultanées, chacune traitant n_B véhicules. Durant une tournée, il y a en moyenne $n_B / 2$ trottinettes venant juste d'être rechargées, donc le nombre courant de véhicules insuffisamment chargés (couleur orange) est

$$N' = \frac{1}{2} n_B \cdot n_J \cdot \frac{H_J}{H} = Q_F \frac{T_J}{2H} \quad (7)$$

En notant N le nombre de véhicules utilisables ou utilisés (couleur verte), la flotte implantée sur le terrain est de taille totale

$$\tilde{N} = N + N' \quad (8)$$

Le stock de véhicules est renouvelé progressivement, à raison de f_S véhicules par jour (f pour Flux, S pour e-Scooter). En notant L_S le parcours de vie d'un véhicule (ex. 20 000 km), en raison du trafic journalier Q_L il vient que

$$f_S = \frac{Q_L}{L_S} \quad (9)$$

Quant aux batteries, leur renouvellement relève non pas de la longueur parcourue en cycle de vie mais du nombre de cycles de recharge jusqu'à perte importante de la capacité nominale (i.e. la capacité effective subsidiaire est fortement amoindrie).

Physiquement, ce nombre de cycles utile dépend de la profondeur de décharge : notons-le $R_B(\sigma)$. La fonction R_B dépend de la technologie de batterie – les chimies respectives de l'anode et de la cathode, avec plusieurs variantes pour des batteries Lithium-Ion (LIB). Dans ces conditions, le flux journalier de renouvellement de batteries est de

$$f_B = \frac{Q_F}{R_B(\sigma)} = \frac{Q_E}{A \cdot \sigma \cdot R_B(\sigma)} \quad (10)$$

La figure 2 synthétise graphiquement les éléments et les influences du modèle technique.

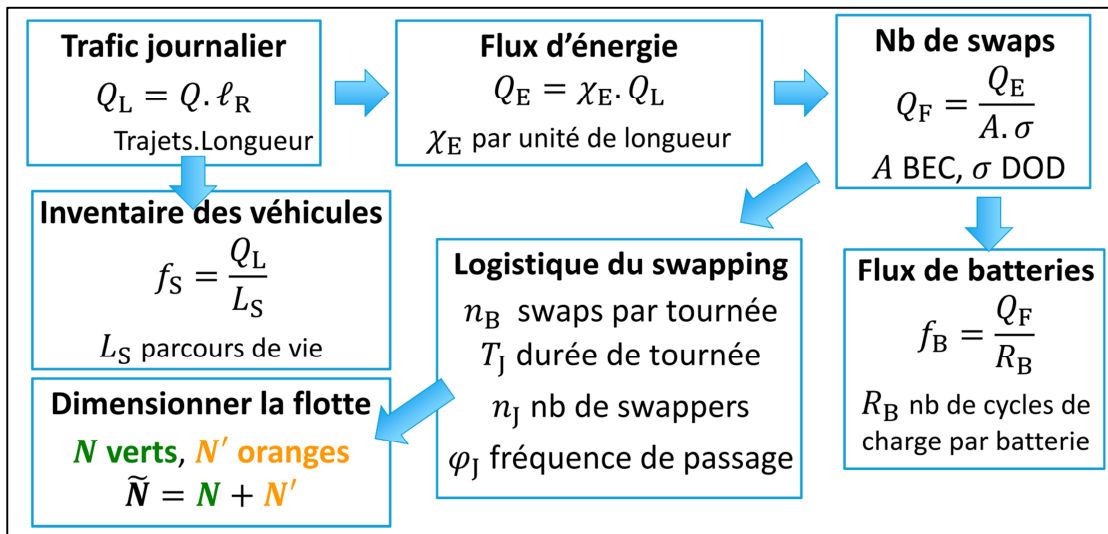


Fig. 2: Synthèse du modèle technique.

2.2/ Modèle économique : coût de production en base journalière

Nous modélisons le coût de production en base journalière en traitant comme des flux tant l'énergie que les matériels roulants, que la fourniture de travail par les agents du juicing.

En notant p_B le prix d'achat d'une batterie, le coût journalier de l'investissement relatif aux batteries est de

$$C_B = p_B \cdot f_B \quad (11)$$

De même, pour des trottinettes acquises au prix unitaire p_S , le coût journalier d'investissement est

$$C_S = p_S \cdot f_S \quad (12)$$

Dans les coûts d'implémentation sur le terrain, il faut compter les frais de télécommunication et aussi la taxe locale spécifique par trottinette. Notant $\tilde{p}$ le coût journalier unitaire, le coût pour la flotte s'élève à

$$C_F = \tilde{p} \cdot \tilde{N} \quad (13)$$

La recharge en énergie au tarif unitaire p_E avec un rendement θ_E coûte $p'_E := p_E/\theta_E$ par unité d'énergie utile. Par jour, le coût en énergie est de

$$C_E = p'_E \cdot Q_E \quad (14)$$

Pour la fonction commerciale, à raison d'un coût unitaire c_u par trajet et du nombre journalier de trajets Q , le coût journalier de fonction s'élève à

$$C_U = c_u \cdot Q \quad (15)$$

Pour la logistique de recharge, notons w_J le coût de revient journalier par poste de juicer. Cela intègre le coût salarial et les charges afférentes, le nombre d'emplois par poste (facteur 3), le coût des véhicules employés. Par jour, le processus de recharge coûte

$$C_J = w_J \cdot n_J \quad (16)$$

En notant C_{DAM} le coût fixe en base journalière du Dépôt, de l'Administration et de la Maintenance, le coût journalier total du service est donc de

$$C_\Sigma := C_{DAM} + C_B + C_S + C_F + C_U + C_E + C_J \quad (17)$$

La stratégie de recharge influence les composantes C_J bien sûr, mais aussi C_B et C_F , ainsi que C_S car p_S dépend de A , et C_E si χ_E dépend du modèle de trottinette, ce qui revient à poser que p_S dépend de χ_E .

Nous postulons enfin les fonctions de prix respectivement des batteries et des trottinettes :

$$p_B = P_B(A) \quad (18a)$$

$$p_S = P_S(L_S, A, \chi_E) \quad (18b)$$

2.3/ Le coût unitaire de recharge

La somme des coûts d'implantation C_F et des coûts logistiques de recharge C_J est

$$C_F + C_J = \tilde{p} \cdot \tilde{N} + w_J \cdot n_J$$

D'après les constitutions de n_J et N' , cette somme satisfait que

$$C_F + C_J - \tilde{p} \cdot N = Q_F \cdot T_J \cdot \left(\frac{\tilde{p}}{2H} + \frac{w_J}{H_J \cdot n_B} \right) \quad (19)$$

Nous y repérons l'influence du nombre journalier de recharges Q_F , et d'un facteur composite qui est le coût unitaire de recharge, notons-le V_J :

$$V_J := T_J \cdot \left(\frac{\tilde{p}}{2H} + \frac{w_J}{H_J \cdot n_B} \right) \quad (20)$$

3/ Optimisation économique

Grâce à la formulation mathématique du modèle technico-économique, nous pouvons rechercher quelles valeurs donner aux variables de décision afin de minimiser le coût de production. En théorie, une telle minimisation se traite de manière analytique en exprimant les conditions d'optimalité du 1^{er} ordre selon les différentes variables de décision.

Nous traitons ainsi notre modèle selon (1) la variable n_B qui est la production par tournée, (2) les variables σ et A qui expriment la stratégie de charge, (3) les variables L_S et χ_E relatives au modèle de véhicule (le corps de trottinette).

3.1/ Optimiser la logistique des tournées

En minimisant la fonction de coût de production selon n_B et en tirant les conséquences, nous obtenons les formules suivantes pour les caractéristiques des tournées :

$$\text{Nombre de swaps par tournée : } n_B^* = \sqrt{\frac{2H w_J t_0}{H_J \bar{p} \dot{t}}} \quad (21a)$$

$$\text{Durée de tournée : } T_J^* = t_0 + \sqrt{\frac{2H w_J}{H_J \bar{p}}} t_0 \dot{t} \quad (21b)$$

$$\text{Nombre de postes de juicers : } n_J^* = Q_F \left(\frac{\dot{t}}{H_J} + \sqrt{\frac{\dot{t} t_0 \bar{p}}{2H H_J w_J}} \right) \quad (21c)$$

$$\text{Coût unitaire de recharge : } V_J^* = \left(\sqrt{\frac{\dot{t} w_J}{H_J}} + \sqrt{\frac{t_0 \bar{p}}{2H}} \right)^2 \quad (21d)$$

Il s'agit là de formules idéales. En pratique, les dispositions concrètes telles que procéder par vélo-cargo ou par fourgonnette, et la capacité de batterie qui détermine la masse, imposent des valeurs moins optimisées. Dans la suite nous continuons de noter V_J plutôt que V_J^* afin de préserver la valeur concrète.

Dans les formules, le paramètre $\dot{t}$ de temps unitaire par swapping englobe un détour spécifique pour accéder à la trottinette concernée, en plus du temps d'extraction de la batterie déchargée et d'insertion de la batterie chargée. Les opérations de dégroupage-groupage ne prennent qu'une poignée de secondes avec la technologie de Lime (figure 3).

Reste à déterminer quel niveau de décharge justifie le swapping et pour quel niveau de batterie. Un examen rapide sur le terrain parisien révèle que le modèle de batterie de l'opérateur Tier a une capacité nominale d'environ 0.7 kWh. Comme le modèle de Lime est 2 ou 3 fois plus réduit en volume, sa capacité nominale n'est que de 0.25 ou 0.35 kWh.



Fig.3 : Batteries des services Lime et Tier à Paris fin 2021. (Source : auteur)

3.2/ Optimiser la stratégie de charge : DoDO et BECO

Acronymes BECO pour Battery Energy Capacity Optimization, et DoDO pour Depth of Discharge Optimization, évidemment.

La relation entre profondeur DoD et le nombre de cycles de recharge est une fonction décroissante, atteignant pour des DoD de 20 à 40% mais baissent à moins de 1000 pour un DoD tendant vers 100%. La figure 4 illustre les fonctions R_B pour deux technologies de batteries LIB, respectivement NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) et LFP (Lithium-Fer-Phosphate) : celle-ci plus durable en nombre de cycles mais dont la capacité d'énergie par unité de masse est plus faible d'un tiers que celle-là, qui est favorisée par les opérateurs et les constructeurs de trottinettes.

Sous les graphes des fonctions R_B sont figurés ceux des fonctions associées $E_B : \sigma \mapsto \sigma \cdot R_B(\sigma)$ qui mesurent le flux d'énergie utile débité par la batterie en cycle de vie par unité de capacité nominale.

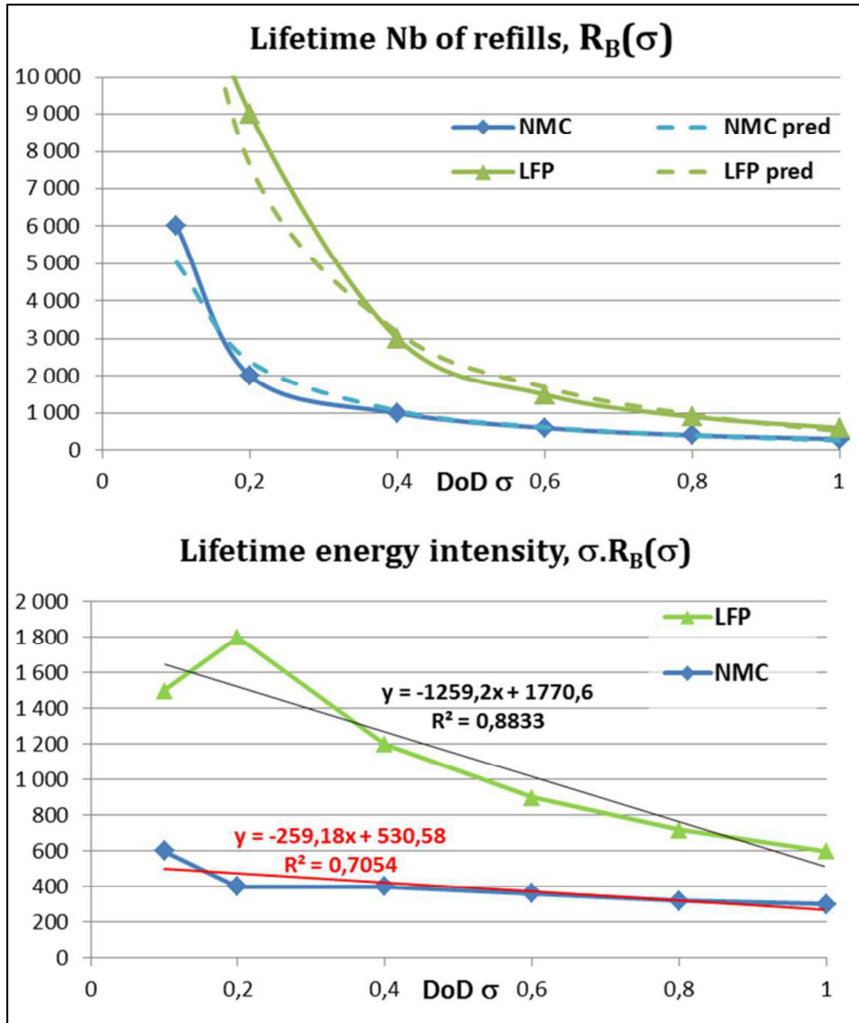


Fig. 4: Lois d'usure et Flux d'énergie en cycle de vie pour 2 chimies de batteries LIB.

Nous avons ajusté E_B par des régressions linéaires, obtenant la spécification fonctionnelle suivante pour une fonction R_B :

$$R_B(\sigma) = E_0 \cdot (\sigma^{-1} - b^{-1}) \quad (22)$$

Spécification par chimie de batterie : le paramètre $b > 1$ assure que $R_B \geq 0$ puisque $\sigma \leq 1$, et le paramètre $E_0 := E_B(0)$ est le maximum d'énergie utile transitant par la batterie durant son cycle de vie, encore par unité de capacité nominale.

Exprimons le coefficient de sensibilité du coût journalier de production au DoD :

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial \sigma} = \frac{Q_E}{A \cdot \sigma^2} \left(-V_J - p_B \frac{R_B + \sigma \dot{R}_B}{R_B^2} \right) \quad (23)$$

Ce coefficient révèle une fonction composite de σ basée sur R_B et sa dérivée $\dot{R}_B$: nous la notons ψ_B :

$$\psi_B(\sigma) := - \frac{R_B + \sigma \dot{R}_B}{R_B^2} \quad (24)$$

Notons $\bar{\sigma}$ la profondeur de décharge maximale envisagée par l'opérateur. Comme pour une voiture électrique, mieux vaut éviter la décharge ultime de la batterie et garder quelques pourcents de charge. Ainsi la minimisation du coût de production selon σ doit respecter la contrainte $\sigma \leq \bar{\sigma}$. C'est pourquoi la condition d'optimalité prend une forme double :

$$\frac{\partial C_{\Sigma}}{\partial \sigma} \leq 0 \text{ et } \frac{\partial C_{\Sigma}}{\partial \sigma} \cdot (\bar{\sigma} - \sigma) = 0$$

ce qui équivaut à

$$\psi_B(\sigma) - \frac{V_J}{p_B} \leq 0 \text{ et } (\psi_B(\sigma) - \frac{V_J}{p_B}) \cdot (\bar{\sigma} - \sigma) = 0$$

Il y a deux cas de figure :

- Décharge « totale » i.e. maximale dans la limite impartie : i.e. $\sigma^* = \bar{\sigma}$ et alors $\psi_B(\bar{\sigma}) \leq \frac{V_J}{p_B}$.
- Décharge « partielle » : $\sigma^* \leq \bar{\sigma}$ et $\psi_B(\sigma^*) = \frac{V_J}{p_B}$.

En notant $\psi_B^{(-1)}$ la fonction réciproque de ψ_B (qui est croissante si E_B est concave), les deux conditions se rassemblent en une formule unique « DODO » comme suit :

$$\sigma^* = \min \left\{ \bar{\sigma}, \psi_B^{(-1)} \left(\frac{V_J}{p_B} \right) \right\} \quad (24)$$

Cette formule met en évidence le rapport entre le coût de swapping unitaire par recharge, V_J , et le prix de batterie p_B .

Pour notre technologie de batterie spécifique (fonction E_B linéaire affine), la fonction réciproque $\psi_B^{(-1)}$ s'exprime comme suit :

$$\psi_B^{(-1)}(y) = \frac{b}{1 + \sqrt{b/(E_0 y)}} \quad (25)$$

Le graphe de cette fonction est représenté en figure 5 pour d'une part la chimie NMC et d'autre part la chimie LFP. Nous constatons une proximité certaine entre les deux fonctions associées aux deux chimies, alors que leurs lois d'usure R_B sont largement différentes. En effet, malgré la différence de niveau, les comportements mathématiques des lois sont similaires.

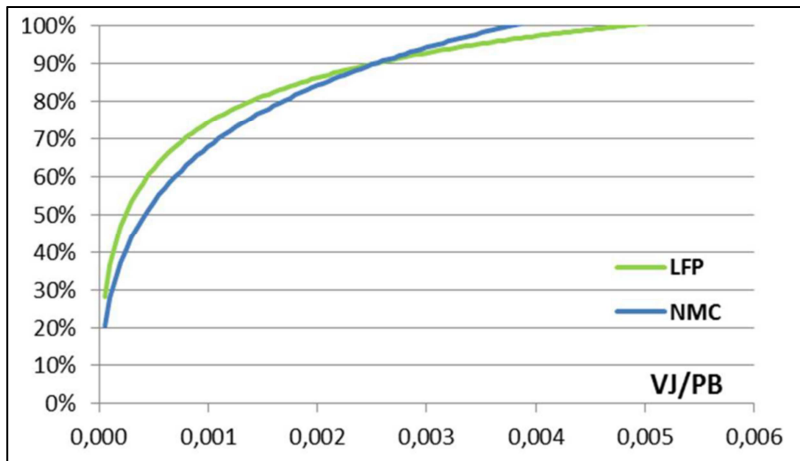


Fig. 5: Graphe des fonctions $\psi_B^{(-1)}$ pour deux chimies de batterie LIB.

La dépendance au rapport V_J/p_B renvoie d'un côté au processus logistique, de l'autre au prix d'achat de la batterie. Nous avons modélisé ce prix en fonction de la capacité énergétique de batterie, la variable A . La sensibilité du coût de production à cette variable s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial A} = -\frac{Q_E}{A^2 \cdot \sigma} \cdot V_J - \frac{Q_E}{A^2 \cdot \sigma R_B} (P_B - A \cdot \dot{P}_B) + f_S \cdot \dot{P}_{S|A} \quad (26)$$

La condition d'optimisation par rapport à A est que $\frac{\partial C_\Sigma}{\partial A} = 0$, ce qui équivaut à

$$A \cdot \frac{\dot{P}_B}{R_B} + \frac{A \cdot \sigma}{\chi_E \cdot L_S} A \cdot \dot{P}_{S|A} = V_J + \frac{P_B}{R_B}$$

Cette formule nous amène à envisager le facteur r_S qui est le nombre de recharges (swap) par véhicule sur son propre cycle de vie :

$$r_S := \frac{\chi_E \cdot L_S}{A \cdot \sigma} \quad (27)$$

En effet c'est la quantité d'énergie utile consommée par le véhicule sur son parcours de vie L_S au taux de consommation χ_E , rapportée à la quantité moyenne par recharge $A \cdot \sigma$.

La condition d'optimalité de BEC, se reformule donc :

$$\frac{\dot{P}_B}{R_B} + \frac{\dot{P}_{S|A}}{r_S} = \frac{1}{A} (V_J + \frac{P_B}{R_B})$$

Autrement dit, le prix marginal de développement de la capacité de batterie, estimé par recharge tant pour la batterie que pour le véhicule, doit être égal à un coût par recharge intégrant la logistique du swap et le prix de batterie amorti sur le nombre de cycles de recharge.

En notant $\varepsilon_{B|A}$ et $\varepsilon_{S|A}$ les élasticités respectives des prix d'une batterie et d'un véhicule à A , nous ré-exprimons la condition d'optimalité comme suit, sous la forme « BECO » :

$$\varepsilon_{B|A} \frac{P_B}{R_B} + \varepsilon_{S|A} \frac{P_S}{r_S} = V_J + \frac{P_B}{R_B} \quad (28)$$

En postulant des fonctions de prix affines :

$$P_B = A \cdot \dot{P}_B \quad (29a)$$

$$P_S = P_{S0} + A \cdot \dot{P}_{S|A} \quad (29b)$$

Alors l'optimisation conjointe de la stratégie de recharge selon DoD et BEC se résout assez simplement. En cas de décharge maximale avec $\sigma^* = \bar{\sigma}$, alors

$$A^* = \sqrt{\frac{\chi_E \cdot L_S}{\bar{\sigma}} \frac{V_J}{\dot{P}_{S|A}}} \quad (30a)$$

Et pour la décharge partielle,

$$A^2 \sigma_A = \chi_E L_S \frac{V_J}{\dot{P}_{S|A}} \quad (30b)$$

En utilisant notre technologie spécifique de batterie, ce problème de point fixe (30b) se ramène à une équation quartique en $\sqrt{A}$, à savoir

$$A^2 = \frac{\chi_E L_S V_J}{b \dot{P}_{S|A}} + \frac{\chi_E L_S}{\dot{P}_{S|A}} \sqrt{\frac{\dot{P}_B V_J}{b E_0}} A \quad (31)$$

Cette équation se résout directement en 3 étapes successives (méthode de Ferrari pour obtenir une équation cubique résolvante, méthode de Viète pour ramener cette cubique à une équation quadratique, solution usuelle de l'équation quadratique).

3.3/ Optimisation du véhicule

De manière similaire, les sensibilités du coût de production aux deux autres variables caractéristiques du véhicule : L_S et χ_E , présentent les coefficients respectifs suivants :

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial L_S} = f_S(\dot{P}_{S|L} - \frac{P_S}{L_S}) \quad (32a)$$

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial \chi_E} = \frac{Q_L}{L_S} \dot{P}_{S|\chi} + \frac{Q_L}{\sigma A} (V_J + \frac{P_B}{R_B}) + p'_E Q_L \quad (32b)$$

Il est facile d'en déduire des conditions d'optimalité pour ces deux facteurs :

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial L_S} = f_S(\dot{P}_{S|L} - \frac{P_S}{L_S}) \quad (33a)$$

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial \chi_E} = \frac{Q_L}{L_S} \dot{P}_{S|\chi} + \frac{Q_L}{\sigma A} (V_J + \frac{P_B}{R_B}) + p'_E Q_L \quad (33b)$$

Au stade actuel, la fonction P_S et son comportement selon A , L_S et χ_E sont surtout notionnels ; rares sont les éléments empiriques à leur égard. Cependant la condition selon χ_E met en exergue un coût d'énergie par unité utile, intégrant le prix effectif à la prise p'_E plus le coût augmenté par recharge, $V_J + P_B/R_B$, évalué par unité d'énergie puisque divisé par $A \cdot \sigma$. Cela nous inspire pour exprimer un coût unitaire total, holistique, pour le service, par unité d'énergie :

$$\hat{p}_E := p'_E + \frac{1}{\sigma A} (V_J + \frac{P_B}{R_B} + \frac{P_S - P_{S0}}{r_S}) \quad (34)$$

Cette notion de coût ajoute au coût à la prise p'_E , la part par unité d'énergie utile et par recharge du coût de la batterie P_B/R_B , et la part homologue du coût du véhicule p_S , $(P_S - P_{S0})/r_S$ – plus précisément, la partie du coût de véhicule spécifiquement imputable à la batterie.

4/ Etude numérique

Nous avons mené une étude numérique des différents aspects modélisés pour le service, en envisageant des intervalles de variations réalistes pour les divers paramètres. Parmi ceux-ci, le moins certain est la sensibilité du prix du véhicule à la capacité de batterie, $\dot{P}_{S|A}$. Empiriquement, il faudrait comparer les trottinettes de Lime à 0.3 kWh de BEC et celles de Tier à 0.7 kWh : si l'on connaissait les prix P'_B « hors autres options » (telles que la boîte à casque de Tier), alors on pourrait estimer

$$\dot{P}_{S|A} = \frac{P'_B^{\text{Tier}} - P'_B^{\text{Lime}}}{0.7 - 0.3} \text{ €/kWh.}$$

Faute d'information spécifique, nous avons mené une analyse paramétrique selon $\dot{P}_{S|A}$ sur une large plage de variations allant de 10 à 1000 €/kWh. A notre avis, les valeurs les plus plausibles se situent entre 200 et 500 €/kWh.

A titre d'illustration, la figure 6 montre la composition du coût holistique par unité d'énergie utile, $\hat{p}_E$. Sur la plage de variations, le coût holistique varie de 1.3 à 3.8 €/kWh, soit de 1 à 3, ce qui est somme toute consistant autour d'une médiane à 2.5 €/kWh.

On se situerait alors très en dessous des valeurs par kWh associées à la recharge par jig worker en fourgonnette, et ce d'autant plus que pour ce mode de recharge le prix associé n'englobe ni l'amortissement de la batterie ni celui du véhicule. En considérant seulement le coût logistique de recharge, selon le modèle il varierait de quelques centimes à 1.3 euro par kWh.

Au sein du coût holistique, le prix à la prise se maintient indépendamment du paramètre $\dot{P}_{S|A}$. Il ne représente que quelques pourcents du total : environ 10% à l'origine, puis une part décroissante puisque le total augmente. Les 90+ % complémentaires se répartissent en trois parts assez équilibrées, entre la logistique de recharge, l'achat de batterie et l'achat du véhicule.

Nous pouvons transposer le coût holistique par unité d'énergie à un prix holistique par unité de longueur parcourue : en tablant sur une consommation de 0.014 kWh/km, la valeur médiane de 2.5 €/kWh se transpose en 0.035 €/km – un coût modique qui paraît très supportable. Et à 5' par km, il en découlerait un prix par unité de temps de 0.007 €/min, moins d'un centime d'euro par minute.

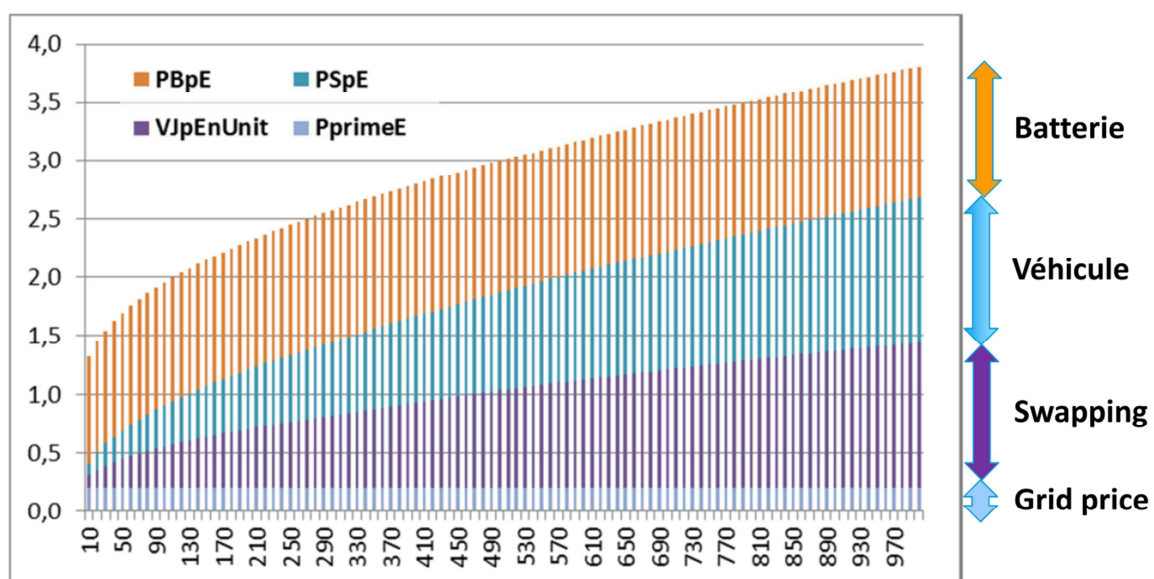


Fig. 6. Coût holistique de l'énergie utile pour un service de trottinettes partagées.

5/ Conclusion

Nous avons étudié un service de trottinettes électriques partagées en construisant un modèle abstrait sous forme mathématique. Ce modèle peut être concrétisé, instancié, en renseignant les valeurs numériques des paramètres. Le modèle « capture » la nature systémique du service : le couplage entre logistique de recharge, stratégie de charge (DoD et BEC), les stratégies d'inventaire tant pour les batteries que pour les véhicules.

Le modèle est de nature technico-économique. Grâce à la forme mathématique, nous avons exploré en théorie les conditions d'optimalité pour minimiser le coût de production en fonction de variables de décision à la disposition de l'opérateur : la production des tournées, la profondeur de décharge, la capacité énergétique de batterie, et autres caractéristiques de véhicule (parcours de vie, taux de consommation d'énergie). Le coût logistique unitaire par recharge tient une place importante, à la charnière entre l'économie des tournées et la gestion patrimoniale des batteries et des trottinettes.

De cette théorisation il ressort une hiérarchisation des variables de décision : la capacité énergétique de batterie et le coût unitaire de recharge sont les plus fondamentales, la profondeur de décharge dépend de leur rapport.

Le modèle de la production du service peut encore être complété : il manque notamment la maintenance des matériels – maintenance ordinaire et maintenance extraordinaire en cas d'accident. En complément le modèle de production, on pourra modéliser un coût de revient par trajet (ou par unité de longueur, ou par unité de temps d'utilisation) et en tirer des repères de tarification. En couplant le tarif et la taille de flotte utile (N) qui détermine la disponibilité du service sur le terrain, nous aurons caractérisé l'économie de l'offre, et nous pourrons la coupler à un modèle de demande. Dans le modèle intégré, le volume d'utilisation sera endogène, nous en tirerons les recettes commerciales et nous pourrons ainsi « boucler » un modèle d'affaire pour le service, comme nous l'avons fait pour un service de navettes partagées (Leurent, 2019, 2020). L'enjeu final est bien de déterminer les conditions techniques, économiques et territoriales pour réussir à offrir des trottinettes électriques partagées à prix vraiment abordable.

6/ Références

Battery University (2019) *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*. 10-07-2019 <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>

Bilboe, Connor (2021). *How green are Europe's scooter startups? From swappable batteries to carbon emissions, here's how Europe's scooter startups compare on sustainability*. 26 Aug. 2021. <https://sifted.eu/articles/electric-scooter-green-comparison-2021/>

Bird (2020) *Understanding the risks of swappable e-scooter batteries*. Authored by Scott Rushforth on 27 November 2020, <https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/112179/swappable-batteries/>

De Bortoli, Anne, and Christoforou, Zoi (2020). *Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris*. Journal of Cleaner Production, Vol. 273, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122898>

Gauquelin, Alexandre (2020) *Jump: the next battery-swap technology?* Published 10 March, 2020. <https://shared-micromobility.com/jump-the-next-battery-swap-technology/>

- Hollingsworth, Joseph, Copeland B. and Johnson J.X. (2019). *Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters*. Environ. Res. Lett. 14, 084031 DOI 10.1088/1748-9326. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2da8/pdf>
- Leurent F. (2019) On a Ring-Shaped Service of Collective Taxis, Part 1: Traffic Physics and Service Quality. hal-02090947. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02090947>
- Leurent, F. (2020) *Vers une mobilité partagée en forme olympique ?* Communication au congrès RDMI 2020, Atelier A3 : Mobilité partagée. Congrès annuel ATEC-ITS : RDMI 2020, Jan 2020, 92120 MONTROUGE, France. Texte <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02461695/> Exposé <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02461701>
- Leurent, F. (2020a) *Towards Shared Mobility Services in Ring Shape*. Chapter in De Lucas, S. (ed), "Transportation Systems for Smart, Sustainable, Inclusive and Secure Cities". DOI: 10.5772/intechopen.94410
- Leurent, F. (2021a) On a Shared Scooter Service with Opportunistic Riding under Ring Shape: the S3 Traffic Model and its Equilibrium. 2021. identifiant : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03213262>
- Leurent, F. (2021b) What is the Value of Swappable Batteries for a Shared e-Scooter Service (S3)? Paper project submitted for publication, 32 pages.
- Lime (2020) *Lime Announces New Paris Swappable Battery Pilot At Station F To Advance Sustainability Of Electric Scooters*. Authored by Matt Wille on 03/01/2021. <https://www.li.me/second-street/lime-announces-new-paris-swappable-battery-pilot-at-station-f-to-advance-sustainability-of-electric-scooters>
- McKinsey (2019) The future of mobility is at our doorstep. McKinsey Compendium 2019/2020, Dec. 2019, 120 pages. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-is-at-our-doorstep#>
- Randall, Chris (2020) Tier & Voi present new electric scooters & MaaS models. Aug 26, 2020. <https://www.electrive.com/2020/08/26/tier-voi-present-new-electric-scooter-lineups/>
- Scammell, Robert (2020) Tier wants riders to swap e-scooter batteries – and it makes perfect sense. Published 07 Sept. 2020. <https://www.verdict.co.uk/tier-escooter-battery/>
- SuperPedestrian (2020) To Swap or Not to Swap », Authored by Paul Steely White in LINK, 30 October 2020, <https://link-city.medium.com/to-swap-or-not-to-swap-8d1dc270407d>
- Urban Mobility Daily (2020) The business of mobility: How we are improving micromobility with swappable batteries. Published on 28 October 2020. <https://urbanmobilitydaily.com/the-business-of-mobility-how-we-are-improving-micromobility-with-swappable-batteries/>
- Voi (2020) The Portable Powerhouse: Why Swappable Batteries Are the Way to Go. 17 Dec. 2020. <https://www.voiscooters.com/blog/why-swappable-batteries-are-the-way-to-go/>

Concernant l'auteur. Fabien LEURENT est professeur de l'Ecole des Ponts ParisTech, directeur de recherche au Laboratoire CIREN⁽¹⁾. Ses recherches concernent la modélisation technique, économique et environnementale des systèmes de mobilité et des systèmes urbains : réseaux routiers et stationnement, réseaux de transport collectif, services de mobilité partagée (taxis, navettes, deux roues...), et des systèmes immobiliers. Les modèles ainsi développés permettent des simulations numériques pour des études de planification, d'exploitation et de conception. Il dirige la chaire « Mobilité territoriale », partenariat entre l'ENPC et IDFM, entre autres projets de recherche en partenariat avec Renault, Vinci, la RATP, la SNCF etc.

¹ Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement