

# Transition énergétique dans la zone industrialo-portuaire du Havre : Faisabilité technico-économique

Abdelaziz Benantar<sup>1,2</sup>, Mohamed Yassine Samiri<sup>1,3</sup>  
Dalila Boudebous<sup>1</sup>, Jaouad Boukachour<sup>1</sup>, Rachid Ouafi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Normandie Univ, UNIHAVRE, 76600 Le Havre, France

<sup>2</sup> Department of Operational Research, USTHB University, 16111 Bab-Ezzouar, Algeria

<sup>3</sup> Cadi Ayyad University, Marrakech, Maroc

{abdealziz.benantar, jaouad.boukachour, dalila.boudebous}@univ-lehavre.fr,  
rouafi@usthb.dz, medsamiri@gmail.com

**Mots-clés :** *Logistique portuaire, Véhicules électriques, Problème de recharge, Heuristiques, Programmation dynamique.*

Dans le cadre de sa politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le Grand Port Maritime du Havre a lancé, courant 2016, une étude de faisabilité qui concerne la logistique du dernier kilomètre. Plus précisément, il s'agit d'optimiser l'utilisation de véhicules électriques pour le transfert de conteneurs dans la zone industrialo-portuaire du Havre.

Notre contribution, porte principalement sur le problème de dimensionnement des infrastructures (prototypages de batterie et puissance de recharge). Elle concerne la mise en œuvre des conditions d'une transition des véhicules thermiques vers des véhicules électriques. Cette transition se traduit par (1) le choix de la technologie et le mode de recharge des batteries de véhicules électriques, (2) l'allocation optimale d'infrastructure des véhicules électriques, compte tenu de la technique adoptée et des contraintes techniques et pratiques de la traction portuaire et (3) l'optimisation de ces itinéraires en fonction de la nouvelle source d'énergie.

Nous avons proposé une modélisation mathématique du problème de dimensionnement des infrastructures en tenant compte des contraintes technico-économiques telles que le nombre de stations, l'état de charge et le temps de recharge de la batterie, la consommation énergétique ainsi que les coûts d'installation. Voici le modèle :

$$\begin{cases}
 \text{Minimiser } [C_{Bat}^T + C_{Tra}^T + C_{Sta}^T + C_{Ene}^T] \dots\dots\dots (1) \\
 \text{Sous} \\
 CAP_{Bat} \geq \frac{P_i}{2}, \forall i \dots\dots\dots (2) \\
 0.2 \times CAP_{Bat} \leq E_i^{bat} \leq 0.8 \times CAP_{Bat}, \forall i \dots\dots\dots (3) \\
 E_0^{Bat} = 0.8 \times CAP_{Bat} \dots\dots\dots (4) \\
 E_i^{Bat} + y_i \times E_i^c \geq E_{ij}, \forall (i, j) \dots\dots\dots (5) \\
 E_i^c = P_i \times \min(t_i^{\max}, \frac{0.8CAP_{Bat} - E_i^{Bat}}{P_i}), \forall i \dots\dots\dots (6) \\
 P_i^{\max} \geq P_i \geq \frac{\sum_i \sum_j E_{ij} - P_0 \times \sum_H t_0^{\max}}{\sum_H t_i^{\max}}, \forall i \dots\dots\dots (7) \\
 \frac{0.8CAP_{Bat} - E_i^{Bat}}{P_i} \leq t_i \leq t_i^{\max}, \forall i \dots\dots\dots (8) \\
 \sum t_i \leq H - \sum t_{ij}, \forall i \dots\dots\dots (9)
 \end{cases}$$

L'objectif (1) consiste à minimiser les coûts d'exploitation et d'investissement. Il s'agit des coûts liés à la batterie ( $C_{Bat}^T$ ), le véhicule ( $C_{Tra}^T$ ), la station ( $C_{Sta}^T$ ) et l'énergie ( $C_{Ene}^T$ ). La contrainte (2) assure que la capacité de la batterie doit être deux fois plus grande que la puissance de la station de recharge. Les contraintes (3)-(4) gèrent l'état de charge de la batterie. En effet, l'état de charge de la batterie doit être borné entre 20% et 80% de sa capacité. Ainsi, l'état de charge initial au départ de la mission journalière est égal à 80% de la capacité totale. La contrainte (5) impose que la quantité d'énergie complémentaire qu'il faut absorber de la station de recharge doit répondre au besoin énergétique du trajet. Ce dernier est décrit par la contrainte (6). La contrainte (7) répartie les différentes puissances selon les sites. Cette contrainte technique est dû essentiellement au fait que certains sites doivent être dotés par des puissances de recharge relativement faibles. Les contraintes (8)-(9) garanties que le temps maximum alloué à la recharge de la batterie doit être respecté.

La résolution de ce modèle comporte deux phases : l'optimisation et la simulation. Nous avons proposé un algorithme hybride qui combine des heuristiques, basées sur la cartographie et les courbes de consommation énergétique instantanée, avec la programmation dynamique. L'algorithme a été intégré dans l'outil de simulation *Anylogic* afin d'une part, de décrire le comportement du véhicule électrique, et d'autre part, de valider les résultats de l'optimisation comme le montre la figure suivante :

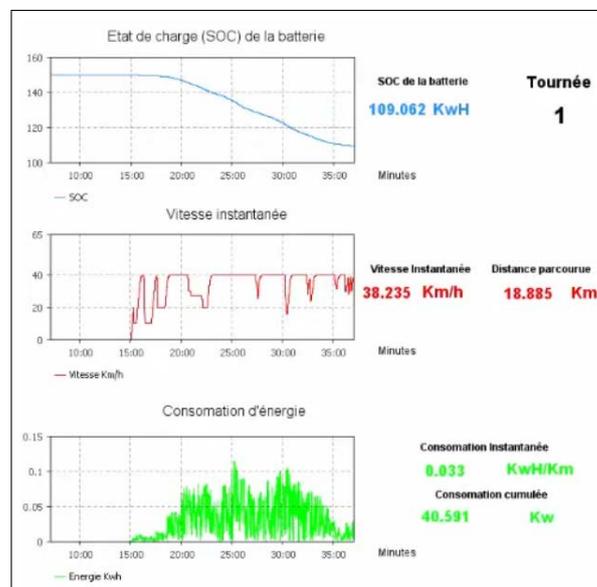


FIG. 1 – Résultats de la simulation.

Enfin, pour une meilleure maîtrise de la transition énergétique en termes de coûts, nous avons proposé un modèle mathématique et avons développé une recherche tabou, comme métaheuristique, pour la résolution du problème de tournées actuelles avec des véhicules thermiques [5]. La mise en œuvre de notre recherche tabou se caractérise principalement par :

- La génération de la solution initiale : Les heuristiques de Solomon [4] et Clarke & Wright [2] ont été modifiées de manière à ce qu'elles soient adaptées à notre problématique.
- La génération du voisinage : Une approche probabiliste, basée sur la statistique de Kolmogorov-Smirnov [1], est intégrée dans l'application des opérateurs classiques.

Quant à la partie électrique, les résultats obtenus à ce stade du projet sont validés sous certaines hypothèses techniques et pratiques. Nous avons déterminé la capacité minimale de la batterie, les puissances minimales des stations de recharge et avons calculé les différents coûts fixes et variables.

## Références

- [1] Benantar, A., Ouafi, R., & Boukachour, J. A petrol station replenishment problem : new variant and formulation. *Logistic Research*, 9 : 6, 2016.

- [2] Clarke, C.G., Wright, J. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568–581, 1964.
- [3] Jabali, O., Pelletier, S., Laporte, G., & Veneroni, M. Goods distribution with electric vehicles : Battery Degradation and behaviour modeling. *CIRRELT-2015-43*, 2015.
- [4] Solomon, M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254–265, 1987.
- [5] Tasan, A.S., and Gen, M. A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers and Industrial Engineering*, 63(3) :755–761, 2012.