

Investigation concernant le retour sur investissement des systèmes de stockage d'énergie dans le ferroviaire

Martin Cantegrel^{1,2,3}, Stéphane Brisset^{1,2}, Frédéric Gillon^{1,2}, Marc Diguët³, Laurent Nicod³

¹ Université Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

² EC-Lille, L2EP, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France

³ ALSTOM Transport, 50 rue du docteur Guinier, 65601 SEMEAC Cedex

Mots-Clés : *Optimisation multi-objectifs, systèmes de stockage d'énergie, domaine ferroviaire.*

1. Introduction

La prise en compte de la performance énergétique dans la conception des systèmes ferroviaires est une problématique actuelle. Un moyen d'améliorer cette performance énergétique est de mettre en place des systèmes de stockage d'énergie (SSE). Ces systèmes peuvent être embarqués ou en station. Les SSE suivants ont fait l'objet d'expérimentations de la part d'Alstom : batteries, supercapacités et volant d'inertie.

Cette étude est menée dans le cadre du projet OPTimisation de SIMulations pour la conception (OPSIM) du pôle de compétitivité System@tic. L'objectif est de présenter, à travers un exemple, une méthode pour dimensionner des systèmes de stockage d'énergie à partir du cycle de fonctionnement. Le critère de retour sur investissement est investigué. La méthode utilise la programmation linéaire, ainsi qu'une optimisation multi-objectifs.

2. Système de référence

Le système de référence consiste en un tramway unique circulant sur une ligne donnée. La connaissance du parcours et du type précis du tramway permet de calculer la puissance consommée en fonction du temps par ce tramway.

A partir de cette courbe de puissance, il est possible d'estimer l'intérêt de mettre en place un SSE sur ce parcours. Cet intérêt peut s'exprimer comme le rapport de l'énergie consommée dans le cas d'une caténaire non récupérative (cas le plus défavorable), à l'énergie consommée dans le cas d'une caténaire totalement récupérative (cas le plus favorable). Dans ce dernier cas, seules les puissances liées aux efforts résistants, aux pertes et aux auxiliaires sont consommées. L'introduction d'un moyen de stockage suffisamment grand permet, du point de vue de la consommation d'énergie, de se rapprocher du cas d'une caténaire totalement récupérative.

Le tableau 1 présente ces valeurs limites pour l'énergie consommée, pour le cas d'une ligne en région Parisienne sur laquelle circule un tramway équipé d'un SSE (pack de supercapacités). Dans l'hypothèse du tramway unique, la caténaire est effectivement non récupérative, du fait de l'absence de tramway consommateur pour récupérer l'énergie de freinage. Le tableau 1 donne une idée des gains réalisables. La connaissance du coût de l'énergie permet d'exprimer l'économie réalisable en euros.

Pour cet exemple, le problème d'optimisation consistera à trouver les spécifications du stockage, en terme d'énergie utile E_u et de puissance maximale P_{max} , qui réalisent les meilleurs compromis entre le coût de fabrication et l'économie d'énergie. Le SSE actuel sera pris comme référence. Le parcours considéré correspond à la ligne réelle sur laquelle il est testé.

	<i>Caténaire non récupérative</i>	<i>Caténaire récupérative</i>
énergie par parcours [unité relative]	1.50	0.57

3. Modèles dynamique et économique

tableau 1 : Energie consommée

Etant donné un parcours et un tramway, la simulation permet de connaître la puissance totale $P_{tram}(t)$ consommée, dans le temps, par le tramway. Cette puissance sert à assurer la fonction traction/freinage et à alimenter les auxiliaires. Trois sources de puissance permettent d'atteindre cette puissance : la caténaire,

le SSE et les rhéostats. Etant donné que la caténaire n'est pas récupérative, que le rhéostat n'est qu'un consommateur de puissance, que le SSE est limité en puissance et en énergie, on peut énoncer les contraintes du tableau 2, en respectant les conventions de signe suivantes :

$$P_{cat}(t) + P_{sto}(t) + P_{rhéo}(t) = P_{tram}(t)$$

*Bilan des puissance,
conventions de signe.*

	<i>Caténaire</i>	<i>Stockage</i>	<i>Rhéostat</i>
<i>Puissance</i>	$0 < P_{cat}(t)$	$-P_{max} < P_{sto}(t) < P_{max}$	$P_{rhéo}(t) < 0$
<i>Energie</i>	X	$E_{min} < E_{sto}(t) < E_{max}$	X

tableau 2 : Propriétés des sources de puissance

A partir de la courbe de $P_{tram}(t)$, un problème d'optimisation linéaire permet de trouver la courbe de $P_{sto}(t)$ qui minimise l'intégrale de la puissance $P_{cat}(t)$ fournie par la caténaire, en respectant les contraintes du tableau 2. La courbe de $P_{sto}(t)$ obtenue représente ce qu'on peut faire de mieux, avec un stockage donné, dans le but d'économiser l'énergie. Un coût est associé à l'énergie consommée. La méthode décrite peut être appelée plusieurs fois pour évaluer plusieurs solutions de stockage différentes.

Une approche pour proposer des solutions de stockage pertinentes consiste à considérer l'économie d'énergie en relation avec le coût de fabrication du système de stockage. Pour estimer le coût de fabrication de différents systèmes, une interpolation sera réalisée à partir de valeurs connues pour le SSE actuel.

4. Optimisation bi-objectif

Un algorithme d'optimisation bi-objectif est utilisé pour trouver les solutions qui minimisent à la fois le coût de l'énergie consommée et le coût du stockage. Le schéma de cette optimisation est présenté en figure 1. Les solutions optimales, au sens de Pareto, sont présentées en figure 2.

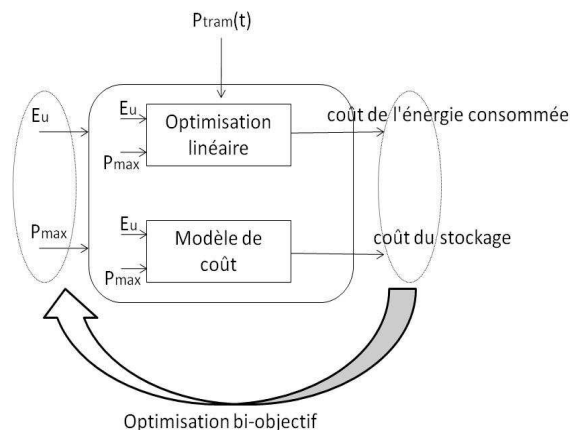


fig 1 : schéma de l'optimisation bi-objectif

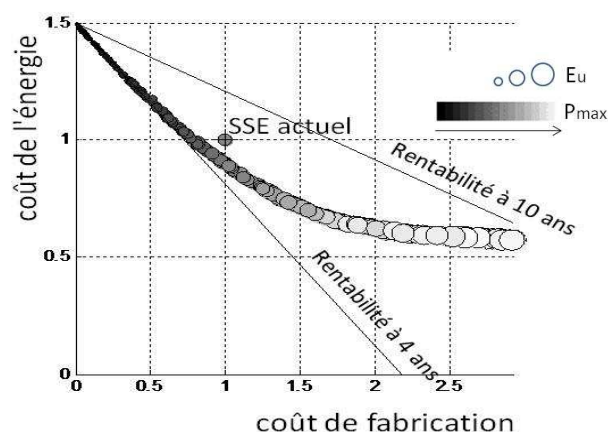


fig 2 : solutions optimales

On vérifie que les valeurs extrêmes du front de Pareto correspondent aux données du tableau 1. L'économie d'énergie permise par le moyen de stockage est cumulative, au fur et à mesure des cycles accomplis par le tramway. La fonction des droites de rentabilité présentée sur le graphe est de distinguer les solutions rentables des solutions non rentables, en liaison avec la durée de vie du stockage. Sur la figure 2 sont visibles les droites de rentabilité pour des durées de vie de 4 ans et 10 ans. Les solutions rentables sont situées sous les droites.

5. Perspectives

Le modèle peut être amélioré par la prise en compte du rendement, l'intégration des limites dues à la commande en temps réel, ou la prise en compte de tous les tramways circulant sur la ligne dans le calcul de la puissance consommée. Ce dernier point permettrait de s'affranchir de l'hypothèse d'une caténaire non récupérative. Concernant les développements futurs, le dimensionnement de systèmes multi-stockages, embarqué et en station, de caractéristiques (énergie, puissance, rendement) pouvant être différentes, semble une application intéressante.