



**Septembre 2012 – Mai 2018**

**Rapport de vulgarisation  
(Version Française)**



**CONTACT : Sébastien Clément ([sebastien.a.clement@alstomgroup.com](mailto:sebastien.a.clement@alstomgroup.com))**

**WEBSITE : <https://www.alstom.com/fr/projet-life-re-use>**



## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUME</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>1. INTRODUCTION</b> .....  | <b>4</b>  |
| LE DÉFI ENVIRONNEMENTAL ABORDÉ PAR LE PROJET.....                     | 4         |
| LE PROJET RE-USE : OBJECTIFS ET RÉSULTATS ATTENDUS.....               | 5         |
| PARTENAIRES DU PROJET .....   | 6         |
| <b>2. LA TECHNOLOGIE HESOP</b> .....                                  | <b>7</b>  |
| <b>3. PRINCIPAUX RÉSULTATS DU PROJET</b> .....                        | <b>8</b>  |
| <b>4. AVANTAGES DU PROJET À LONG TERME ET PROCHAINES ÉTAPES</b> ..... | <b>11</b> |
| BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX .....                                      | 11        |
| PROCHAINES ETAPES .....   | 11        |



## Résumé

Le projet RE-USE, cofinancé par le programme LIFE+ de l'UE, a été lancé en février 2013 par Alstom Transport S.A. (France), Azienda Trasporti Milanese Spa (Italie), Alstom Belgium Transport S.A. (Belgique), Alstom Ferroviaria SpA (Italie). Les objectifs généraux de ce projet étaient de:

- Démontrer, dans des conditions de services commerciaux, l'efficacité de la technologie Hesop 1500V pour récupérer efficacement l'énergie de freinage et réduire d'au moins 15% la consommation d'énergie ;
- Diffuser efficacement les résultats du projet pour une plus large diffusion de la technologie Hesop et adapter la réglementation aux innovations technologiques ;
- Réduire au maximum l'empreinte environnementale du projet, notamment en respectant les règles d'éco-conception.

Après avoir réalisé des études préliminaires permettant de valider les objectifs du projet, les partenaires ont commencé le développement et la production des prototypes du Hesop 1500V. Les prototypes ont été validés après des essais de type intensifs jusqu'à 12MW. Pour mesurer l'impact environnemental des prototypes, une analyse du cycle de vie (ACV) complète a également été réalisée.

Les prototypes ont ensuite été expédiés à Milan et mis en œuvre à la sous-station Rogoredo (ligne 3 du métro milanais). Après une mise en service réussie et des séances d'essais nocturnes, une phase d'essai en service commercial a été réalisée d'octobre 2017 à juillet 2018. Pendant cette phase, les économies d'énergie réalisées grâce au prototype Hesop ont été mesurées en permanence. Après 10 mois d'essais, les économies d'énergie réelles réalisées ont atteint 22% de la consommation d'énergie de la sous-station, soit bien au-delà des objectifs initiaux. Les prototypes continueront à fonctionner jusqu'à fin 2018 avant d'être démontés.

Sur la base de ces résultats très prometteurs, Alstom continuera évidemment à promouvoir la technologie Hesop auprès des opérateurs ferroviaires.

Le premier chapitre de ce rapport présente les défis environnementaux relevés par le projet RE-USE, ainsi que ses principaux objectifs et la description des partenaires du projet. Le deuxième chapitre résume les résultats et les réalisations du projet. Le dernier chapitre est consacré aux avantages environnementaux du projet et aux prochaines étapes du produit.



## 1. Introduction

### *Le défi environnemental abordé par le projet*

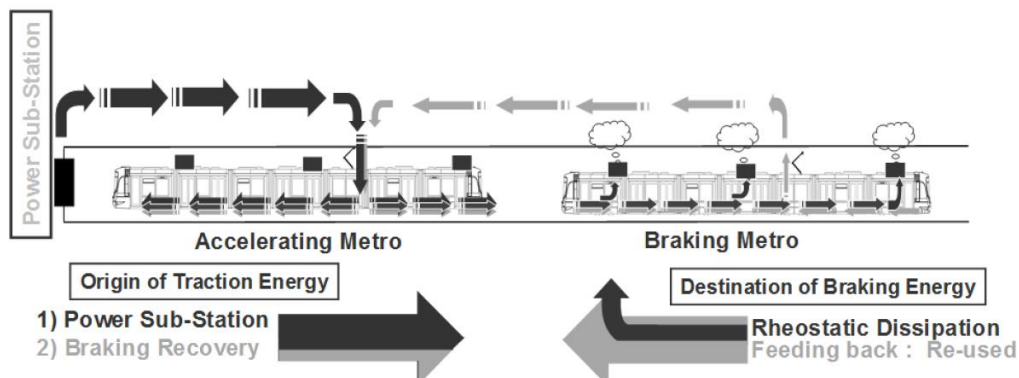
Dans le secteur des transports, le secteur ferroviaire est le plus respectueux de l'environnement. Cependant, des améliorations sont possibles et peuvent avoir un impact important sur la politique environnementale européenne.

Les principaux objectifs de la politique ferroviaire en Europe à l'horizon 2020 sont nombreux :

- Pour que le rail atteigne une part de marché de 10 % du trafic de passagers dans l'UE sans impact négatif sur l'environnement. (Basé sur les statistiques Eurostat/UIC) ;
- Un triplement de la productivité (Stratégie UIC) ;
- Élimination des accidents mortels évitables au sein du système ferroviaire européen;
- Un gain d'efficacité énergétique de 50 % sur le cycle de vie des véhicules ou des produits ;
- Une réduction de 50 % de la production de polluants au cours du cycle de vie des produits et services de l'industrie ferroviaire ;
- Une augmentation de la capacité du réseau pour tenir compte des projections de trafic indiquées ci-dessus.

En outre, le secteur ferroviaire européen soutient fermement l'avis émis par le Parlement européen le 6 juillet 2010 pour décarboniser le transport par tous les moyens disponibles - y compris l'internalisation des coûts externes pour tous les modes de transport, et le doublement du transport ferroviaire de passagers d'ici 2020.

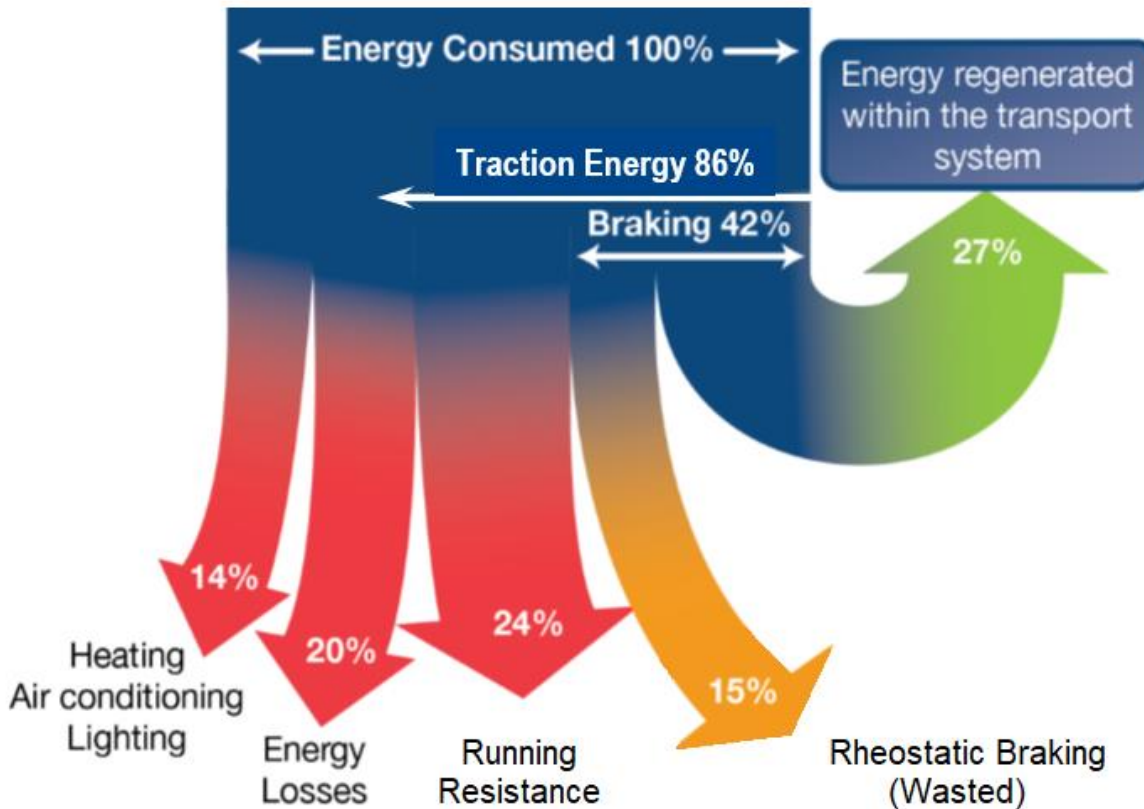
Depuis longtemps, la récupération de l'énergie de freinage est considérée comme l'un des moyens les plus prometteurs pour augmenter l'efficacité énergétique des systèmes ferroviaires urbains et ainsi réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de ce mode de transport. Aujourd'hui, les trains modernes sont équipés d'un freinage dynamique à récupération. Ainsi, lorsqu'un train freine, une partie de l'énergie récupérée est réutilisée par un autre train qui accélère, comme illustré ci-dessous. La partie de l'énergie de freinage non réutilisée par d'autres trains en accélération est dissipée dans des résistances prévues à cet effet.



La puissance de freinage nette dépend du réseau et de ses caractéristiques : consommation par kilomètre, distance entre trains et entre les arrêts. Sur la base des chiffres de plusieurs réseaux denses, l'énergie de freinage représente environ 42 % de l'énergie fournie au système, mais entre 40 et 60 % est récupérée. Ainsi, en raison de leurs caractéristiques de fonctionnement (courte distance entre les stations, vitesse élevée, accélération et décélération), un réseau métropolitain et suburbain a une grande puissance de freinage nette et puisque qu'une fraction est récupérée,



il présente un potentiel élevé en termes de réduction de CO<sub>2</sub> si la partie "brûlée" de l'énergie de freinage peut être récupérée. Le consortium a décidé de démontrer la réduction de l'impact environnemental que le transport ferroviaire public peut atteindre grâce à la technologie innovante HESOP utilisée dans le cadre du projet.



### **Le projet RE-USE : Objectifs et résultats attendus**

Le projet RE-USE vise à démontrer et à valider, en termes d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, une nouvelle technologie innovante d'Alstom appelée Hesop. Avec cette nouvelle technologie, la partie de l'énergie de freinage habituellement brûlée dans les résistances ne sera pas gaspillée mais renvoyée dans le réseau, ce qui entraînera une réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub>. La validation et la quantification de la réduction de l'impact sur l'environnement seront réalisées par une démonstration "grandeur nature" sur une ligne de métro de Milan lors de l'exploitation commerciale.

Pour ce faire, le projet RE-USE s'appuyait sur les 3 objectifs principaux suivants :

1. Le premier objectif est de réduire davantage l'impact environnemental (empreinte CO<sub>2</sub> de l'exploitation) du secteur ferroviaire, en particulier les transports publics dans les zones urbaines. Le projet quantifiera le gain d'énergie et donc la réduction de CO<sub>2</sub> permise par la nouvelle sous-station réversible sur la base de la régénération complète de l'énergie de freinage des trains. Le projet RE-USE vise à démontrer que la technologie Hesop peut aider le secteur des transports à réduire sa consommation d'énergie et donc ses émissions de CO<sub>2</sub>. Les objectifs quantitatifs sont fixés à 15%, ce qui devrait représenter 3 500 tonnes de CO<sub>2</sub> évitées par an, rien que pour la ligne choisie du métro de Milan.



2. Le deuxième objectif vise à répandre les résultats pour une large diffusion de la technologie.

L'un des objectifs du projet RE-USE, à travers une quantification précise de la réduction de l'impact environnemental du transport ferroviaire, était de démontrer que les systèmes urbains équipés de la technologie Hesop, permettant d'alimenter le réseau de la partie de l'énergie de freinage des trains de métro habituellement brûlés dans des résistances, peuvent être appliqués universellement à tous les systèmes ferroviaires à courant continu.

3. Le dernier objectif sera de maintenir l'empreinte environnementale du projet aussi faible que possible.

La technologie a suivi les règles de conception ECO établies par Alstom pour être en parfaite adéquation avec les solutions favorisant le développement durable dans le secteur ferroviaire. La conception et la fabrication de la sous-station Hesop auront un impact minimum sur l'environnement, car le processus suivi prend en compte tous les aspects de l'éco-conception, du recyclage et de l'utilisation des produits chimiques. La conception de la solution respectera les critères environnementaux et de développement durable qui doivent être respectés pour obtenir le label environnemental ISO 14021/14025.

### Partenaires du projet

#### ALSTOM Transport SA

Saint-Ouen (FR)

*Coordinating Beneficiary*



#### ALSTOM Ferroviaria SpA

Milano (IT)

*Associated Beneficiary*



#### ALSTOM Belgium Transport SA

Charleroi (BE)

*Associated Beneficiary*



#### Azienda Trasporti Milanesi SpA

Milano (IT)

*Associated Beneficiary*

| Bénéficiaire                                    | Expertise principale  | Rôles dans le projet   |
|---|---|--|
| Alstom Transport S.A.<br>(Coordinateur)<br>(FR) | Systèmes ferroviaires<br>et sous-stations<br>électrique.                  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Coordinateur du projet</li><li>• Participation à toutes les phases du projet depuis les premières simulations de puissance de la technologie Hesop jusqu'aux essais du prototype sur la ligne 3 du métro de Milan</li><li>• Actions de communication</li></ul>   |
| Alstom Ferroviaria S.p.A.<br>(IT)               | Systèmes de<br>commande et de<br>contrôle de la<br>circulation des trains | <ul style="list-style-type: none"><li>• Soutien d'Alstom FR dans ses activités et sa relation avec ATM</li><li>• Achat d'équipements de puissance pour l'interfaçage du prototype avec la sous-station existante.</li><li>• Responsable de l'installation sur site du prototype</li><li>• Supervision de l'essai du prototype sur place</li><li>• Activités de dissémination</li></ul> |
| Azienda Trasporti<br>Milanesi S.p.A<br>(IT)     | Opérateur ferroviaire   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Mise à disposition de son infrastructure pour l'installation du prototype à l'intérieur de la sous-station existante.</li><li>• Supervision de l'installation du site</li><li>• Participation aux essais sur site</li><li>• Actions de communication</li></ul>   |
| Alstom Transport<br>Belgium<br>(BE)             | Développement,<br>fabrication et test du<br>prototype                     | <ul style="list-style-type: none"><li>• Conception et développement du convertisseur</li><li>• Assemblage du prototype</li><li>• Test du prototype</li></ul>   |



## 2. La technologie Hesop

### Qu'est-ce que la technologie Hesop?

Hesop est une sous-station réversible avancée avec un seul convertisseur, à la fois redresseur et onduleur. Les principaux avantages de cette technologie sont qu'elle :

- Capture plus de 99% de l'énergie récupérable en freinage ;
- Fournit une régulation dynamique de la tension pour optimiser l'utilisation de l'énergie en traction.



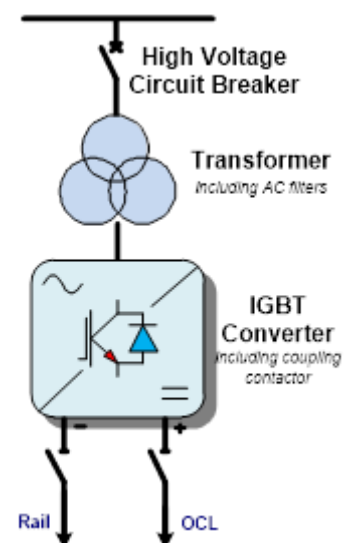
Cette technologie entraîne donc de nombreux avantages pour l'environnement :

- Moins d'énergie consommée : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- Moins de dissipation de chaleur dans le tunnel ;
- Meilleure qualité de l'air dans le tunnel.

### Quel est l'architecture d'Hesop ?

La solution Hesop 1500 VDC intègre les équipements suivants :

- 1 transformateur de traction pour adapter la tension d'entrée,
- 1 filtre AC pour lisser les harmoniques et contrôler le facteur de puissance,
- 1 convertisseur incluant un pont redresseur / onduleur contrôlé par IGBT,
- 1 Inductance DC.

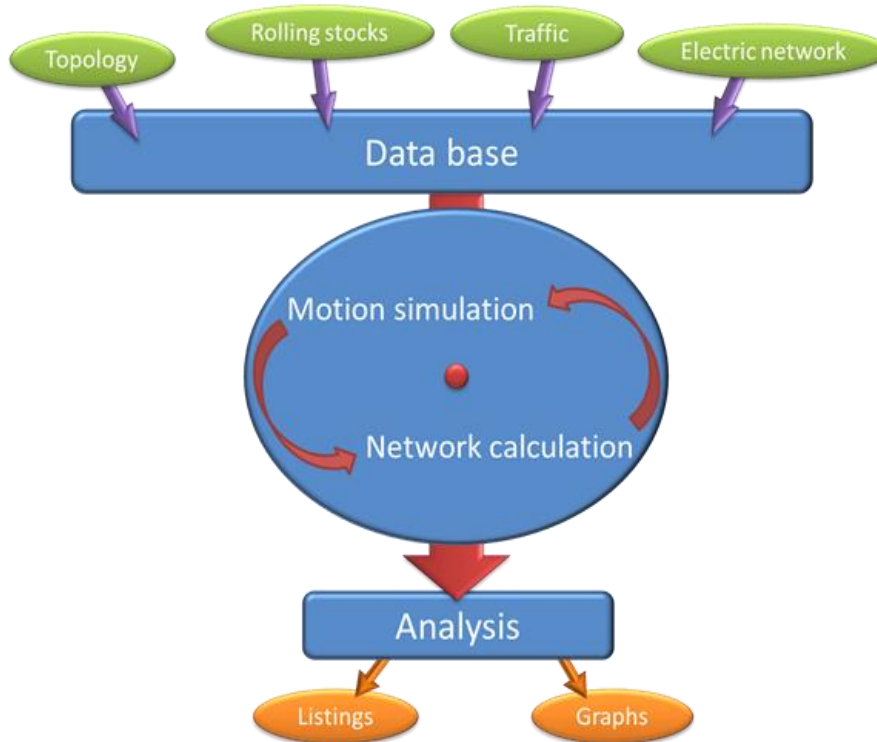




### 3. Principaux résultats du projet

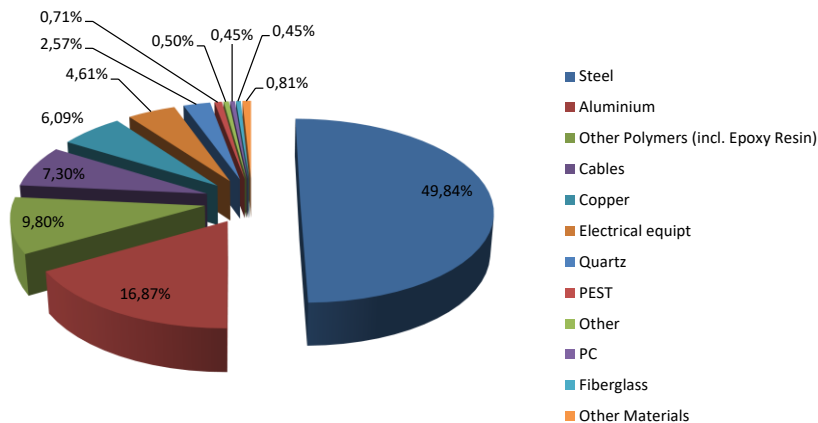
Tout d'abord, des études préliminaires ont été réalisées avec les objectifs de :

- Simuler la ligne de métro pour définir une ligne de base et estimer les économies potentielles réalisables ;



- Définir les exigences de la sous-station Hesop en termes de fonctionnalité, de capacité d'exploitation, de contraintes environnementales et de normalisation, de fabrication et de validation en usine ;

Au cours de cette phase, les règles d'éco-conception ont été étudiées et tous les composants (voir ci-dessous) sont conformes à la réglementation actuelle sur les substances dangereuses.

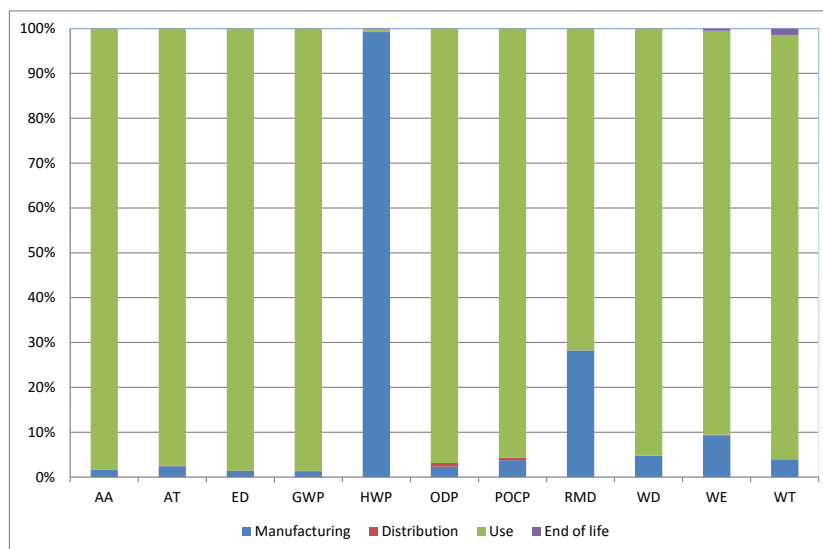






De plus, l'analyse du cycle de vie (ACV) a été réalisée pour déterminer l'impact de la production du produit et du canal de distribution (transport des composants et matériaux jusqu'à l'usine de Charleroi, transport du prototype jusqu'au site d'essai à Milan, utilisation du prototype pendant toute sa période de fonctionnement (35ans) ainsi que sa fin de vie).

L'impact environnemental le plus important (pour 10 des 11 indicateurs du tableau ci-dessous) est généré pendant la phase d'utilisation du prototype (énergie consommée par la sous-station). Il convient également d'ajouter que l'étape de fabrication est la deuxième contributrice à cet impact dû à utilisation des matières premières et la production de déchets dangereux.



Au cours de la phase suivante du projet, les prototypes du convertisseur et du transformateur ont été développés, ainsi que tous les équipements auxiliaires nécessaires. Avant l'installation des prototypes dans la sous-station Rogoredo de la ligne 3 du métro de Milan, des essais de réception en usine (FAT) et des essais de type ont été effectués pour les deux prototypes (voir ci-dessous le convertisseur Hesop) :

- Sur le site d'Alstom à Charleroi pour des essais jusqu'à 6 MW ;
- Sur le site de GE Belfort pour des essais jusqu'à 12 MW.



Une fois les essais en usine validés, les prototypes ont été expédiés à Milan pour être implémentés dans la sous-station. Après plusieurs séances d'essais nocturnes réussies des prototypes, une phase d'essai en service commercial a été lancée en octobre 2017 jusqu'en juillet 2018.

Pendant la phase d'essai du projet, l'énergie récupérée ou "économisée" grâce à la technologie Hesop a fait l'objet d'un suivi rigoureux sur la ligne 3 du métro de Milan. Les résultats ont été très positifs : plus de 479 MWh d'énergie ont été économisés au cours de la période considérée, soit jusqu'à 22,15 % de l'énergie de traction consommée par la sous-station d'ATM.

Chaque jour, Hesop 1500V permettait de récupérer plus de 2MWh au poste d'ATM.

Avec une intensité carbone moyenne de l'électricité de 358 gCO<sub>2</sub>eq/kWh en Italie, Hesop a permis de réduire de 171 tonnes les émissions de CO<sub>2</sub> sur la période d'essai.

| MONTH        | ENERGY CONSUMPTION (kWh) | ENERGY RECOVERY (kWh) | RATE (%)      | CO2 EMISSION REDUCTION (t) |
|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------|----------------------------|
| October 17   | 372,274                  | 69733                 | 18,73%        | 25                         |
| November 17  | 292,224                  | 60642                 | 20,75%        | 22                         |
| December 17  | 161,418                  | 45057                 | 27,91%        | 16                         |
| January 18   | 88,912                   | 31176                 | 35,06%        | 11                         |
| February 18  | 416,899                  | 71451                 | 17,14%        | 26                         |
| March 18     | 323,406                  | 74013                 | 22,89%        | 26                         |
| April 18     | 140,393                  | 53862                 | 38,37%        | 19                         |
| May 18       | 83,826                   | 17039                 | 20,33%        | 6                          |
| June 18      | 86,201                   | 12183                 | 14,13%        | 4                          |
| July 18      | 196,273                  | 43703                 | 22,27%        | 16                         |
| <b>TOTAL</b> | <b>2161826</b>           | <b>478859</b>         | <b>22,15%</b> | <b>171</b>                 |

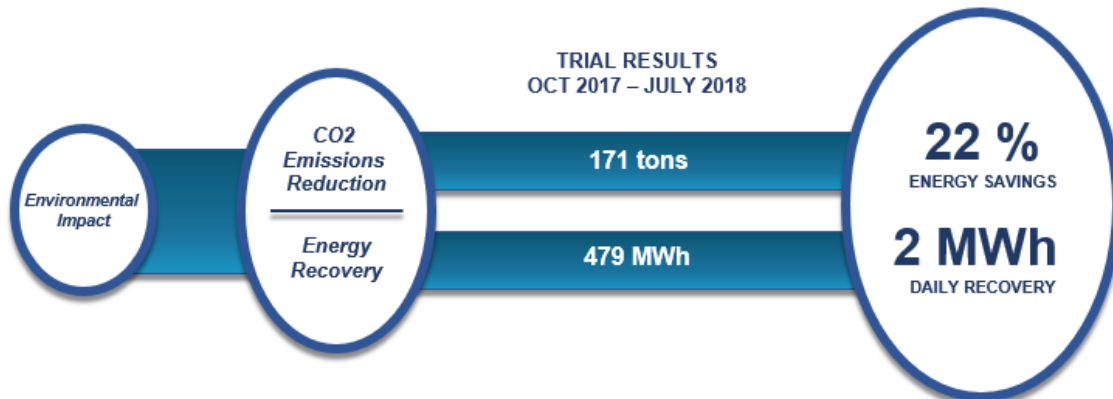
Les résultats des essais ont dépassé les objectifs de 15 % d'économies d'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> fixés au début du projet. C'est très encourageant car cela démontre les avantages de la technologie Hesop pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux ferroviaires en courant continu et réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.



## 4. Avantages du projet à long terme et prochaines étapes

### *Bénéfices environnementaux*

Les bénéfices environnementaux obtenus pendant la phase d'essai sont mis en évidence dans le tableau ci-dessous et ont largement dépassé les objectifs initiaux du projet, avec plus de 22% d'économies d'énergie à la sous-station Rogoredo et plus de 2MWh de récupération quotidienne.



Outre les avantages environnementaux susmentionnés, il est important d'ajouter que les avantages techniques de la technologie Hesop permettent également de réduire le nombre de sous-stations à installer pour un système ferroviaire, rendant la technologie pleinement viable d'un point de vue économique.

### *Prochaines étapes*

La sous-station réversible avancée Hesop est désormais disponible pour les réseaux de traction en courant continu de 600V à 1500V et de 900kW à 4MW (urbains et périurbains).

Avant le projet Hesop 1500V sur la ligne 3 du métro de Milan, la technologie Hesop a été mise en œuvre sur la ligne Victoria du métro de Londres. Ce Hesop 600V 1MW est entré en service en mars 2015 et fonctionne comme un onduleur. Cette unité permet de récupérer plus de 800 kWh par jour, soit l'équivalent de l'énergie nécessaire pour alimenter 2 stations de taille moyenne. Depuis le début du projet, Hesop a été installé par d'autres réseaux de transport dans le monde entier, tant pour le métro que pour le tramway :

- En Australie où 13 Hesop (9 Hesop 750V 1,2MW et 4 Hesop 750V 2MW) sont testés sur le Sydney Light Rail ;
- Au Panama où 8 Hesop 1500V 4MW sont en cours d'implantation sur la ligne 2 du métro de Panama City ;
- En Arabie Saoudite où 70 Hesop 750V 1,2MW sont installés sur les lignes 4, 5 et 6 du métro de Riyadh ;
- A Dubaï où 15 Hesop 750V 2MW sont en cours d'installation pour l'amélioration et l'extension des lignes de métro existantes pour l'exposition universelle prévue en 2020.