

RÉDUIRE LES PERTES D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ ET LES RÉSEAUX FERROVIAIRES URBAINS

DÉCEMBRE 2022

INTRODUCTION

Les réseaux de distribution et les réseaux ferroviaires urbains européens sont confrontés à des problèmes communs, car ils ont tous deux été développés en tant que réseaux indépendants, en s'appuyant sur la résilience et la robustesse des approvisionnements électriques existants. Cependant, l'arrivée progressive des sources d'énergie renouvelables (SER) a introduit un degré croissant d'incertitude sur la nature des flux d'énergie dans le futur.

L'UITP a participé au projet de recherche "E-LOBSTER" (Electric LOsses Balancing through integrated Storage and power Electronics towards increased synergy between Railways and electricity distribution networks), financé par l'UE et coordonné par RINA. Ce projet visait à mettre au point un système de gestion R+G (Railway to Grid) innovant qui, combiné à une électronique de puissance avancée, serait capable de réduire les pertes d'électricité à la fois dans le réseau de distribution d'électricité et le réseau ferroviaire léger.

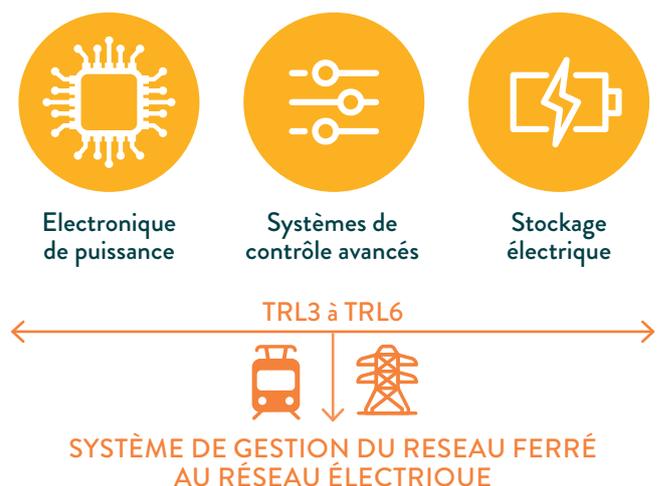
Cette fiche de projet présente les principales réalisations et les solutions innovantes qui en ont découlé. Il donne un aperçu de la méthodologie, des résultats et des principales conclusions du projet E-LOBSTER.

OBJECTIFS DU PROJET

E-LOBSTER avait les objectifs suivants :

- Développer et valider une nouvelle gestion de l'énergie optimisée en temps réel, de type "Railway to Grid/Grid to Railway" (R+G), visant à améliorer l'interaction entre les réseaux de transport et de distribution électrifiés.
- Développer des systèmes de stockage et d'électronique de puissance avancée en tant qu'actifs partagés entre les réseaux de transport et de distribution électrifiés, et permettre une gestion unique de l'énergie entre les deux réseaux
- Démontrer les solutions et technologies innovantes d'E-LOBSTER dans des conditions réelles dans le métro de Madrid au TRL 6, précédé d'une validation au Laboratoire Smart Grid de l'Université de Newcastle.

Image 1. E-LOBSTER concept



Pour atteindre ces objectifs, un consortium de neuf partenaires a été constitué pour participer au projet. Il s'agissait d'opérateurs de transport public, d'équipementiers (OEM), de fournisseurs de technologies et de prestataires de services, ainsi que d'instituts de recherche et d'universités. La liste complète des membres est disponible sur le site E-LOBSTER : <https://www.e-lobster.eu/>.

LES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES INNOVANTES D'E-LOBSTER

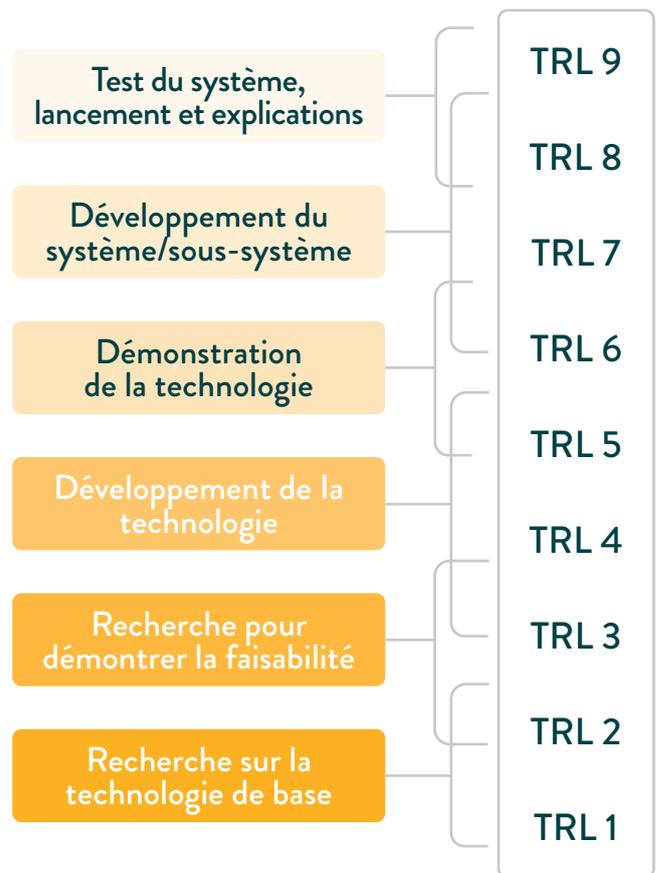
Il est nécessaire, à l'échelle mondiale, d'accroître l'introduction des technologies à faible émission de carbone (TFE). Dans le même temps, il est de plus en plus nécessaire d'offrir aux gens des moyens de transport durables comme les véhicules électriques (VE) et les trains, en particulier dans les centres urbains.

E-LOBSTER propose, pour la première fois, une intégration substantielle de sources renouvelables, des transports routiers et ferroviaires électrifiés avec des technologies avancées d'électronique de puissance et de stockage d'énergie. Celle-ci sera gérée par un système de gestion de contrôle unique (le système de gestion R+G), qui fonctionnera en tenant compte des avantages mutuels du réseau de transport et de distribution, en donnant la priorité à la réduction des pertes de distribution et en permettant la récupération de l'énergie de freinage du train.

L'objectif principal du projet E-LOBSTER était de créer des synergies entre les différents acteurs du secteur de l'énergie. Concrètement, le projet a développé et démontré, dans un environnement pertinent (un véritable métro à Madrid, connecté à un réseau de distribution électrique local) et ce jusqu'au TRL 6, qu'il s'agit d'un système d'interconnexion transport-réseau électrique innovant, économiquement viable et facilement reproductible. Bien géré, il a permis d'établir des synergies entre les réseaux de distribution d'électricité, les réseaux de transport urbain électrifiés (tels que les métros, les tramways et les trains légers) et les stations de recharge pour véhicules électriques.

“ L'objectif principal du projet E-LOBSTER était de créer des synergies entre les différents acteurs du secteur de l'énergie. ”

Image 2. Technology Readiness Levels (TRLs)



Le projet a développé des solutions et des technologies innovantes, qui ont été validées et démontrées en conditions réelles pour :

- L'évaluation de la source des pertes
- La minimisation des pertes d'électricité
- La maximisation de la consommation d'énergies renouvelables grâce au stockage de l'énergie électrique
- La récupération de l'énergie de freinage.

E-LOBSTER s'articule autour des solutions technologiques innovantes suivantes :

- Smart Soft Open Point (sSOP)¹
- Un Système de stockage d'énergie par batteries (SSEB)
- Gestion de l'énergie entre le réseau ferroviaire et l'électrique/entre le réseau électrique et le ferroviaire ("Rail to Grid/Grid to Railway" R+G).

¹ Les Soft Open Points (SOP) sont des dispositifs électroniques d'alimentation placés à des points ouverts sur les réseaux de distribution d'électricité pour fournir un contrôle de puissance flexible au réseau.

SOLUTIONS D'INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Smart Soft Open Point

Un Smart Soft Open Point (sSOP) basé sur des convertisseurs de puissance dos-à-dos (back-to-back) a été développé et validé dans le cadre du projet. Un nouveau sSOP à trois voies a été proposé, pour se connecter au réseau de distribution d'électricité et au système d'électrification ferroviaire (un convertisseur de puissance CC/CA à deux étages avec un lien CC intermédiaire accessible et régulé). Cela permet une gestion unique du flux d'énergie entre la sous-station de traction et le réseau de distribution.

Système de stockage d'énergie par batterie

La deuxième innovation, développée et validée pour ce projet est un ensemble de technologies de stockage appropriées pour créer des synergies entre les réseaux de transport électrifiés et les réseaux de distribution d'électricité en augmentant les sources d'énergie renouvelables. Avec le sSOP, ce sont les deux actifs partagés entre le réseau de distribution d'électricité et le réseau de transport.

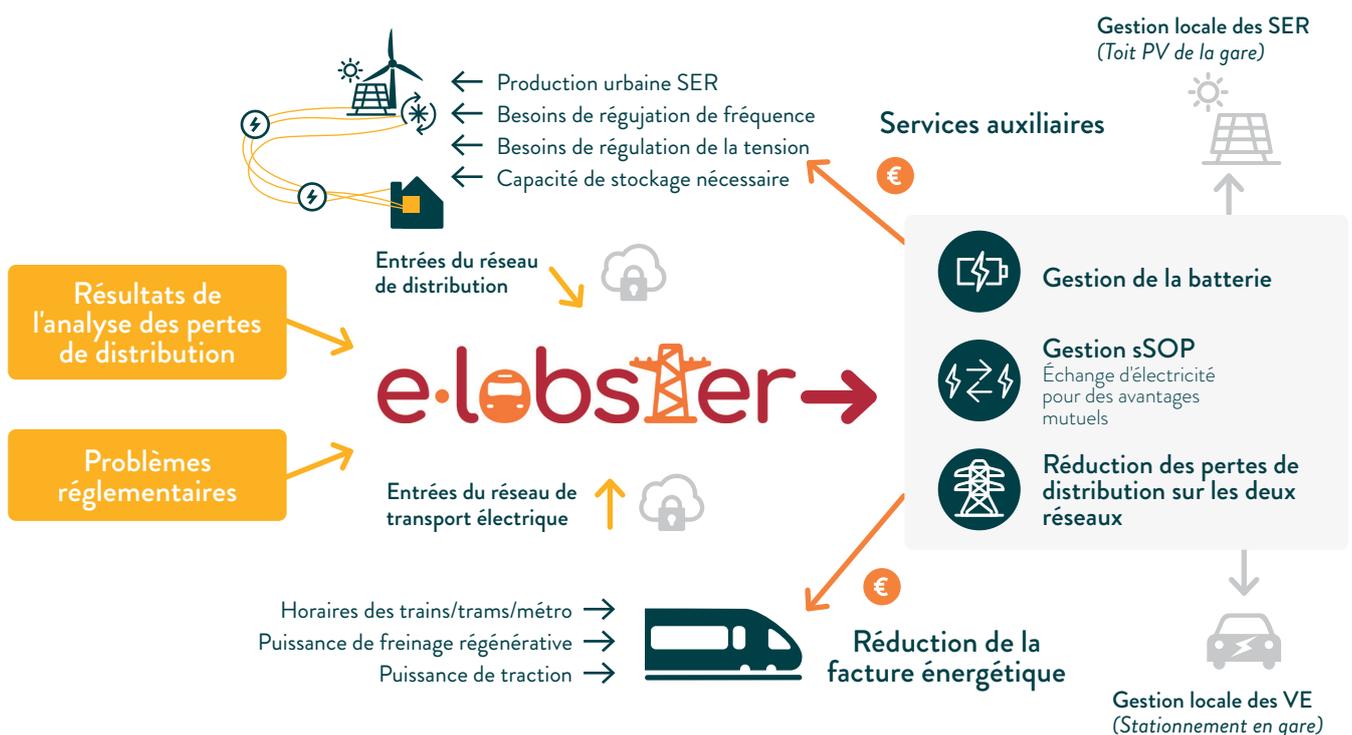
Système de gestion E-LOBSTER R+G

E-LOBSTER a développé et validé un nouveau système innovant de gestion R+G en temps réel capable d'optimiser l'interaction entre les deux réseaux. Le système de gestion E-LOBSTER a fourni une plateforme unique pour la gestion en temps réel des flux d'énergie entre le rail, le réseau électrique et le système de stockage d'énergie.

Le système tient également compte des véhicules électriques routiers et vise à optimiser l'interaction entre les trois réseaux énergétiques. Le système augmente la sous-consommation de l'énergie renouvelable connectée localement au réseau de distribution et la sous-consommation de l'énergie de freinage des véhicules. De cette manière, le système analyse la stratégie de charge optimale pour les véhicules électriques.

Pour finir, le système de gestion R+G a utilisé de manière optimale l'énergie disponible sur les deux réseaux. Cet outil unique et innovant d'évaluation des pertes et de la consommation d'énergie des réseaux de distribution d'électricité et des réseaux d'électrification ferroviaire a été validé par des données réelles.

Image 3. Concept E-LOBSTER



Outre les objectifs techniques susmentionnés, le projet E-LOBSTER comprenait également les étapes suivantes :

- Concevoir la mise en œuvre du concept E-LOBSTER (études de faisabilité) et définir une feuille de route pour la commercialisation et l'exploitation des résultats d'E-LOBSTER au moyen de modèles commerciaux appropriés.
- Analyser les cadres réglementaire, normatif et politique actuels afin d'identifier les mesures à reproduire.
- Préparer un manuel de "bonnes pratiques", afin de garantir le degré de sécurité nécessaire à la protection des données informatiques.
- Créer un réseau unique de parties prenantes et de partisans du projet pour favoriser la commercialisation des solutions E-LOBSTER.

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Le projet a permis de développer et de valider - au TRL7 - un **smart Soft Open Point (sSOP)**. Le système se compose principalement des boîtiers suivants :

- Convertisseur CC-CC rail 200kW nominal
- Convertisseur CC-CC pour système de stockage d'énergie (SSE), puissance nominale 200kW
- Réseau basse tension (BT), convertisseur CC-CA 80kVA
- Transformateur d'isolement basse tension (BT) CA-CA, 80 kVA.

Le deuxième élément matériel développé est le **système de stockage d'énergie par batterie (SSEB)**, d'une puissance totale maximale de 200kW. En voici les spécifications :

- Technologie : Lithium-ion NMC
- Nombre de racks : Trois
- Puissance max. totale : 200 kW
- Énergie maximale théorique : 237 kWh.

XOLTA (le département des systèmes de batteries de Lithium Balance) a mis au point un système de stockage unique sur batteries, efficace en termes de coûts et d'énergie. Il peut être utilisé en extérieur sans qu'il soit nécessaire d'installer des conteneurs encombrants, climatisés et coûteux.

Le système a été développé pour résister à des conditions météorologiques difficiles (températures élevées ou basses). Le système de batterie a été intégré au sSOP et il a été piloté par le système de gestion R+G.

En outre, XOLTA a également mis au point une méthode intelligente de gestion de l'énergie de la batterie. Elle répond non seulement aux exigences du projet E-LOBSTER mais prolonge également la durée de vie du système de batterie.

Le **système de gestion R+G** peut être divisé en un composant matériel basé sur un PC industriel, et un composant logiciel qui permet de contrôler E-LOBSTER et de surveiller les paramètres par le biais d'une interface graphique utilisateur dédiée.

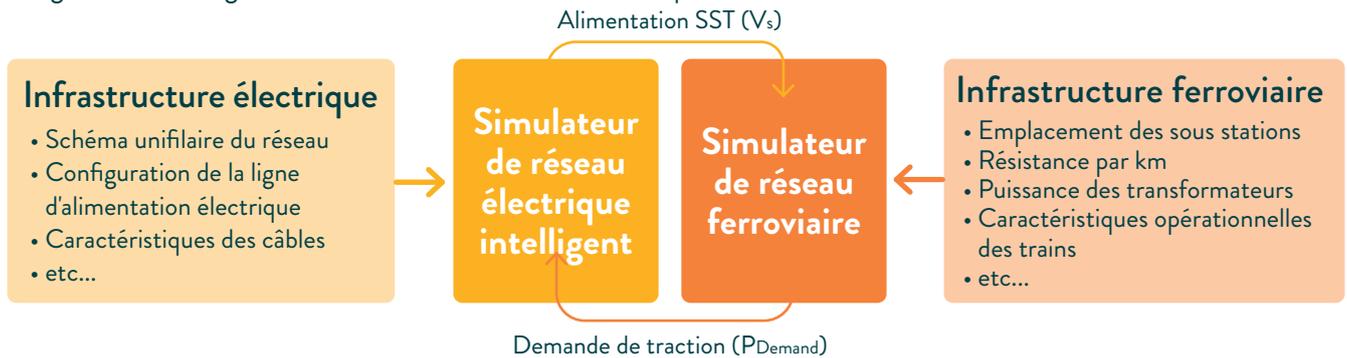
Enfin, un **outil novateur** a été développé pour évaluer les pertes et la consommation d'énergie dans le réseau de distribution électrique et le réseau d'électrification ferroviaire. L'outil a été validé par des données réelles fournies par le métro de Madrid.

L'**outil développé** permet d'identifier la source la plus importante de pertes dans le réseau, grâce aux données fournies par les utilisateurs, les équipements et l'électronique installés dans la ligne et à d'autres caractéristiques. L'idée est d'extraire de la voie ferrée tout excès de puissance régénératrice qui serait autrement gaspillé.

Image 4. Système de batterie modulaire Lithium Balance (XOLTA)



Image 5. Outil intégré de surveillance et de simulation des pertes de distribution



Le système E-LOBSTER permet :

- D'augmenter l'efficacité de l'énergie de rupture, d'améliorer la récupération de l'énergie de freinage de 10%.
- Selon la fréquence des services, l'énergie stockée dans la batterie peut aller jusqu'à 4-5 MWh/jour.
- Cette énergie peut recharger, en partant d'un véhicule déchargé, 40 à 50 gros VE (en supposant une batterie de 100 kWh) ou 100 à 125 VE plus petits (à hayon) (en supposant une batterie de 40 kWh).

VALIDATION DANS LE LABORATOIRE DE L'UNIVERSITÉ DE NEWCASTLE ET DÉMONSTRATION DANS LE MÉTRO DE MADRID

Le Smart Energy Lab, situé dans le bâtiment des sciences urbaines de Newcastle Helix, a été utilisé pour valider et démontrer les technologies innovantes du projet E-LOBSTER. Le Smart Energy Laboratory de l'Université de Newcastle fournit une connexion au réseau de distribution électrique physique de basse tension (BT). Le réseau physique, le système de stockage d'énergie par batterie et les composants sSOP ont été combinés avec des comportements émulsés pour le réseau ferroviaire en utilisant des données en temps réel mesurées dans la sous-station Sacedal du métro de Madrid afin de démontrer l'applicabilité de la solution dans différents cas.

L'objectif principal du système de gestion R+G embarqué est d'augmenter l'efficacité du freinage régénératif dans le réseau ferroviaire et d'aider le réseau BT à prendre en charge la production excédentaire provenant, par exemple, des ressources renouvelables et la consommation excédentaire des points de charge des VE. Dans ce concept, la stratégie de gestion de l'énergie du projet E-LOBSTER a été conçue pour distribuer l'énergie entre trois systèmes : le réseau, le chemin de fer et le stockage sur batterie.

Le système de gestion R+G détermine si de la puissance de freinage est disponible sur le réseau ferroviaire, si une consommation excédentaire est demandée, par exemple par les VE, le réseau BT ou si des ressources renouvelables génèrent un surplus d'énergie. Cela signifie que le système de gestion R+G a été développé pour basculer intelligemment entre les deux modes suivants, en fonction de la disponibilité de l'énergie de freinage :

- **Mode rail + réseau** : le rail fournit une puissance de freinage régénérative au SSEB et au réseau BT (si le réseau BT a besoin d'énergie ou non).
- **Mode réseau** : la puissance est échangée entre le SSEB et le réseau BT, en fonction des niveaux de puissance consommée et produite du côté du réseau. Il n'y a ici pas de puissance de freinage disponible.

L'efficacité de la solution E-LOBSTER pour répondre à la demande excédentaire telle que celle des stations de recharge des véhicules électriques, et pour soutenir le réseau alors que l'énergie excédentaire provient des ressources d'énergie renouvelable, a été démontrée dans les tests effectués dans le laboratoire de Newcastle. Ceux-ci ont validé le système et fourni de précieuses informations sur la solution E-LOBSTER pour la prochaine phase du projet.

DÉMONSTRATION SUR LE MÉTRO DE MADRID

La démonstration de la technologie innovante E-LOBSTER a eu lieu dans les² locaux du métro de Madrid, où l'optimisation du réseau de distribution d'énergie est vitale. Plus précisément, le système E-LOBSTER a été installé dans la sous-station de Sacedal, où l'alimentation en courant de traction dessert deux tronçons de la ligne 9 ainsi que le dépôt de Sacedal.

À des fins de test, la sortie du système E-LOBSTER a été connectée au réseau local de basse tension (BT) de la sous-station. L'objectif principal était d'utiliser l'excédent d'énergie généré lors du freinage du train pour alimenter le réseau BT interne du métro de Madrid. En pratique, les systèmes E-LOBSTER transforment une sous-station classique en une sous-station réversible.

2 Statistiques du métro de Madrid : plus de 300 stations, près de 300 km de réseau ferroviaire et une moyenne de 14 millions de passagers par an.

La démonstration consistait en un Smart Soft Open Point (sSOP) avec le convertisseur de rail connecté au réseau ferroviaire, le convertisseur de réseau connecté à un réseau local basse tension et le convertisseur de batterie SSE connecté au système de stockage de batterie. Pendant la démonstration, l'équipe du projet a effectué des mesures pour évaluer le fonctionnement du système. L'équipe a enregistré la tension d'entrée du convertisseur de rail, le courant continu d'entrée du convertisseur de réseau (I_g CC) et le courant d'entrée du convertisseur de batterie (I_b CC). Les conditions de test ont été définies avec une puissance de référence du rail jusqu'à 50kW, une puissance de référence du réseau jusqu'à 10KW et ont choisi un point de consigne pour la tension du rail à 652V.

Le système a également fait l'objet d'une démonstration avec des conditions d'essai définies avec une puissance de référence du rail jusqu'à 100 kW, une puissance de référence du réseau jusqu'à 10 kW et a choisi un point de consigne pour la tension du rail à 655V.

RÉPLICATION DU SYSTÈME

Au cours du projet, une conception préliminaire pour une application à grande échelle de E-LOBSTER a été réalisée. E-LOBSTER peut être adapté à des sous-stations et à des lignes présentant des caractéristiques différentes, non seulement là où il a été testé, mais également dans de nombreuses autres situations. En plus d'être déployé dans des lignes de métro en Europe et au-delà, l'ensemble du concept peut être reproduit, si les modifications nécessaires sont appliquées pour adapter le système aux spécificités locales.

Les modèles préliminaires du déploiement d'E-LOBSTER à grande échelle ont été réalisés en considérant les cas suivants :

- autres lignes de métro
- tramways
- trains régionaux
- chemins de fer à grande vitesse

REPRODUCTION SUR D'AUTRES LIGNES DE MÉTROS

Le système E-LOBSTER peut être reproduit sur d'autres lignes du métro de Madrid fonctionnant à 600V sans modifications majeures. La reproduction d'E-LOBSTER dans le métro dans la gamme 600 - 750V nominal ne nécessite pas de changements majeurs, et peut être réalisée en affinant le système installé sur la ligne 9 du métro de Madrid.

Les situations dans lesquelles des modifications peuvent être nécessaires sont les suivantes :

- en cas de modification du nombre de wagons par train
- en cas de changements dans le flux de puissance vers le réseau externe.

Si le système E-LOBSTER doit être reproduit sur d'autres lignes du métro de Madrid fonctionnant à 1500V, des modifications du système original seront nécessaires. La tension de la liaison CC dans le sSOP peut être maintenue à 750 V mais les aspects suivants doivent être modifiés :

- Convertisseur de rail
- Cote du SSEB : la puissance et la capacité nominale du SSEB devront être modifiées en fonction de deux facteurs :
 - a. la puissance/énergie régénératrice attendue du train
 - b. les exigences pour le flux de puissance entre le sSOP et le réseau local
- Convertisseur de réseau : classé en fonction des deltas de l'évaluation du rail et du SSEB.

TRAINS RÉGIONAUX

Les trains régionaux de la plupart des pays européens fonctionnent à 1,5 kV ou 3 kV CC. Par conséquent, si le système E-LOBSTER doit être reproduit pour les lignes de trains régionaux, certaines modifications sont nécessaires :

- Convertisseur de rail
- Évaluation SSEB
- Convertisseur de réseau (si les deltas rail/SSEB différent)

A prendre en compte également :

- Nombre de voitures par rame
- Flux de puissance vers le réseau externe.

TRAMS

Dans le monde entier, les tramways fonctionnent soit en 600V DC, soit en 750V DC, le 750V étant plus répandu dans les systèmes modernes. Si le système E-LOBSTER doit être répliqué sur un tramway fonctionnant à 750V, aucune modification spécifique ne sera nécessaire.

Image 6. E-LOBSTER en utilisation réelle



SPÉCIFICATIONS ET AVANTAGES DÉMONSTRABLES DU SYSTÈME :

La ligne 9 du métro de Madrid est longue de 39,4 km, comporte 29 stations allant de Paco de Lucía à Arganda del Rey. La tension de fonctionnement de cette ligne est de 600 V CC.

Les avantages de l'utilisation du système E-LOBSTER démontrés à Madrid étaient les suivants :

- L'énergie électrique produite lors du freinage, qui n'est pas utilisée par un autre train, peut être utilisée pour alimenter d'autres équipements.
- La consommation d'énergie globale est réduite.
- Les émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone sont réduites.
- L'utilisation de résistances de freinage est réduite car la température du tunnel et la ventilation nécessaire sont réduites.
- L'infrastructure de la station n'a pas besoin d'être modifiée, le fonctionnement normal et l'exploitation de la sous-station ne sont pas affectés et le système peut être connecté et déconnecté selon les besoins.
- Le fonctionnement du système n'interfère pas avec l'installation et la capacité de se déconnecter automatiquement si nécessaire, garantissant les ratios de fiabilité et de disponibilité actuels de la sous-station de traction.

Il convient de noter qu'E-LOBSTER peut également être utilisé pour les stations de recharge de véhicules électriques, car la batterie peut également prendre en charge la recharge de véhicules électriques, tout en étant réapprovisionnée par le freinage du train.



CONCLUSIONS

Le système E-LOBSTER a été validé et démontré avec succès dans des conditions réelles au TRL6 en prouvant les potentialités du système global qui - à travers certains actifs partagés (sSOP et SSEB) entre le réseau de distribution d'électricité et le réseau de transport - est capable de réduire les pertes d'énergie à la fois au niveau du réseau de distribution (actuellement autour de 5%) et au niveau de l'électricité ferroviaire (actuellement autour de 8%). Ceci grâce à un système de gestion R+G approprié, capable d'échanger de l'électricité entre les deux réseaux. Il en résulte des avantages mutuels, à savoir une réduction des pertes et une stabilité accrue du réseau.

Certaines réalisations techniques et non techniques doivent être mises en évidence après la conclusion du projet :

- Une gestion optimale de l'énergie, capable de créer des synergies entre les réseaux de distribution d'électricité et de transport.
- Démonstration du fonctionnement stable et sûr de réseaux intelligents intégrant des sources d'énergie variables, avec un potentiel élevé d'intégration de parts plus importantes d'énergies renouvelables sur le futur marché de l'UE.
- Réduction des pertes.
- Haut potentiel de reproductibilité dans différents contextes (tels que les métros, les tramways, les chemins de fer régionaux, les chemins de fer à grande vitesse).
- Soutien aux développements politiques en cours dans le domaine de la conception du marché intérieur de l'électricité. Il s'agit également de soutenir les politiques d'efficacité énergétique dans les transports électrifiés et de faire la démonstration de nouveaux systèmes pour leur contribution « locale et intelligente » à la gestion du réseau de distribution d'électricité.

Parmi les principales leçons tirées du projet, pour le dernier point, il convient de mentionner l'importance du cadre politique et la nécessité d'accorder une attention particulière au processus d'autorisation pour l'installation du système, en fonction des spécificités des contextes locaux.

PROPOSITION DE VALEUR DU SYSTÈME :

- Améliore la résilience, la capacité et la qualité du réseau électrique
- Permet la connexion de l'infrastructure de recharge des VE
- Permet l'intégration de sources de production d'énergie renouvelable
- Réduit le coût de l'énergie consommée pour charger les VE
- Fournit une gestion optimale en temps réel des flux d'énergie à travers la plateforme de contrôle
- Réduit les pertes de puissance et donc les coûts globaux
- Offre des possibilités de décarbonisation de la mobilité urbaine et extra-urbaine

MERCI AUX PARTENAIRES DU PROJET

- RINA
- Turbo power systems ltd (TPS)
- Rail safety and standards board limited (RSSB)
- Université de Birmingham
- Lithium balance A/S
- Metro de Madrid SA
- Université de Newcastle
- Fundación ferrocarriles españoles

MERCI À NOS RÉDACTEURS ET AUTEURS

- Flavio Grazian, UITP
- Giannicola Loriga, RINA Consulting
- Mansoureh Zangiabadi, Newcastle University
- Maciej Swierczynski, Sensata

Le dossier a été examiné par l'unité Bus et l'unité Rail du département K&I, respectivement.



This is an official Project Brief of UITP, the International Association of Public Transport. UITP has more than 1,900 member companies in 100 countries throughout the world and represents the interests of key players in this sector. Its membership includes transport authorities, operators, both private and public, in all modes of collective passenger transport, and the industry. UITP addresses the economic, technical, organisation and management aspects of passenger transport, as well as the development of policy for mobility and public transport worldwide.

This Project Brief is part of the research project E-LOBSTER which has received funding by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, under grant agreement No 774392.

Find out more at <https://www.e-lobster.eu/>



DIGITAL VERSION AVAILABLE ON
 MYLIBRARY



DECEMBER | 2022

Rue Sainte-Marie 6, B-1080 Brussels, Belgium | Tel +32 (0)2 673 61 00 | info@uitp.org | www.uitp.org