

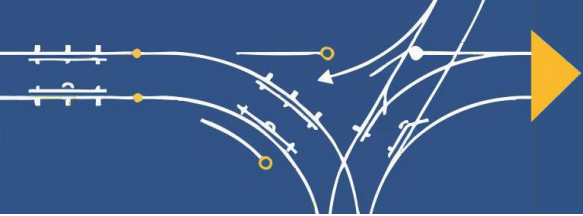


Innovations dans l'alimentation des infrastructures de traction électrique

Journée technique ferroviaire

le 17 mars 2026 à Nîmes

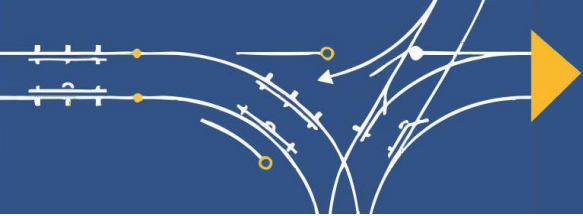
P. LADOUX – Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE)



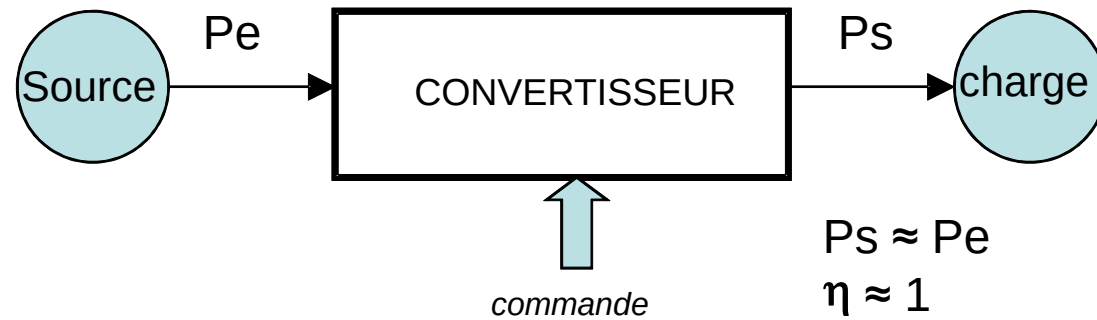
- *Le rail est le secteur de transport le plus électrifié*
- *Le rail est l'un des modes de transport les plus économes en énergie et le moins émetteur de gaz à effet de serre*
- *L'extension des lignes ferroviaires à grande vitesse est le meilleur moyen de réduire les vols sur de courtes et moyennes distances (les émissions ferroviaires par kilomètre passager représentent en moyenne un cinquantième de celles du transport aérien)*
- *Union Européenne : La part du transport de marchandises par le rail doit passer de 18 % (2021) à 30 % d'ici 2030*

Dans les années à venir, le rail jouera un rôle clé pour accélérer la transition vers une mobilité plus durable

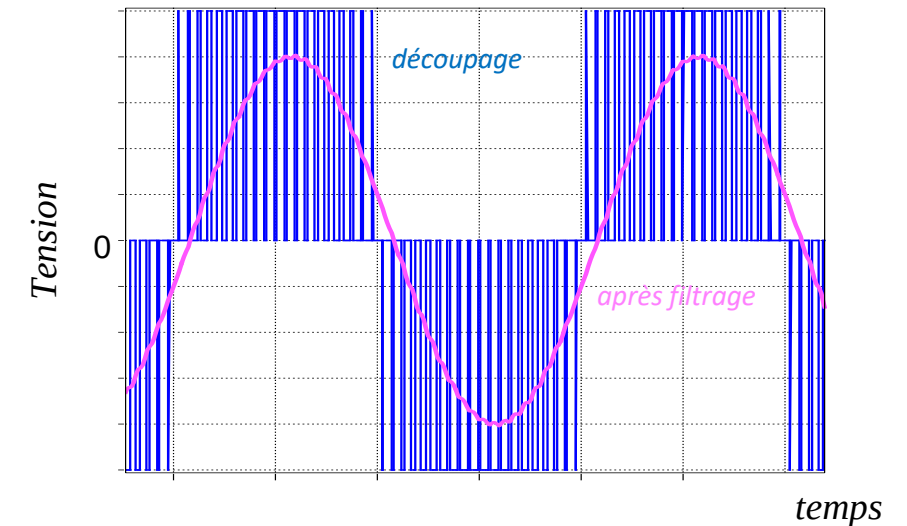
L'augmentation du trafic ferroviaire doit s'accompagner d'une amélioration de l'efficacité énergétique du système d'électrification ferroviaire.



Traitement de l'énergie électrique → chasse aux pertes
(rendement élevé / faible dissipation thermique)



Exemple de la conversion AC/DC



Éléments constitutifs d'un convertisseur :

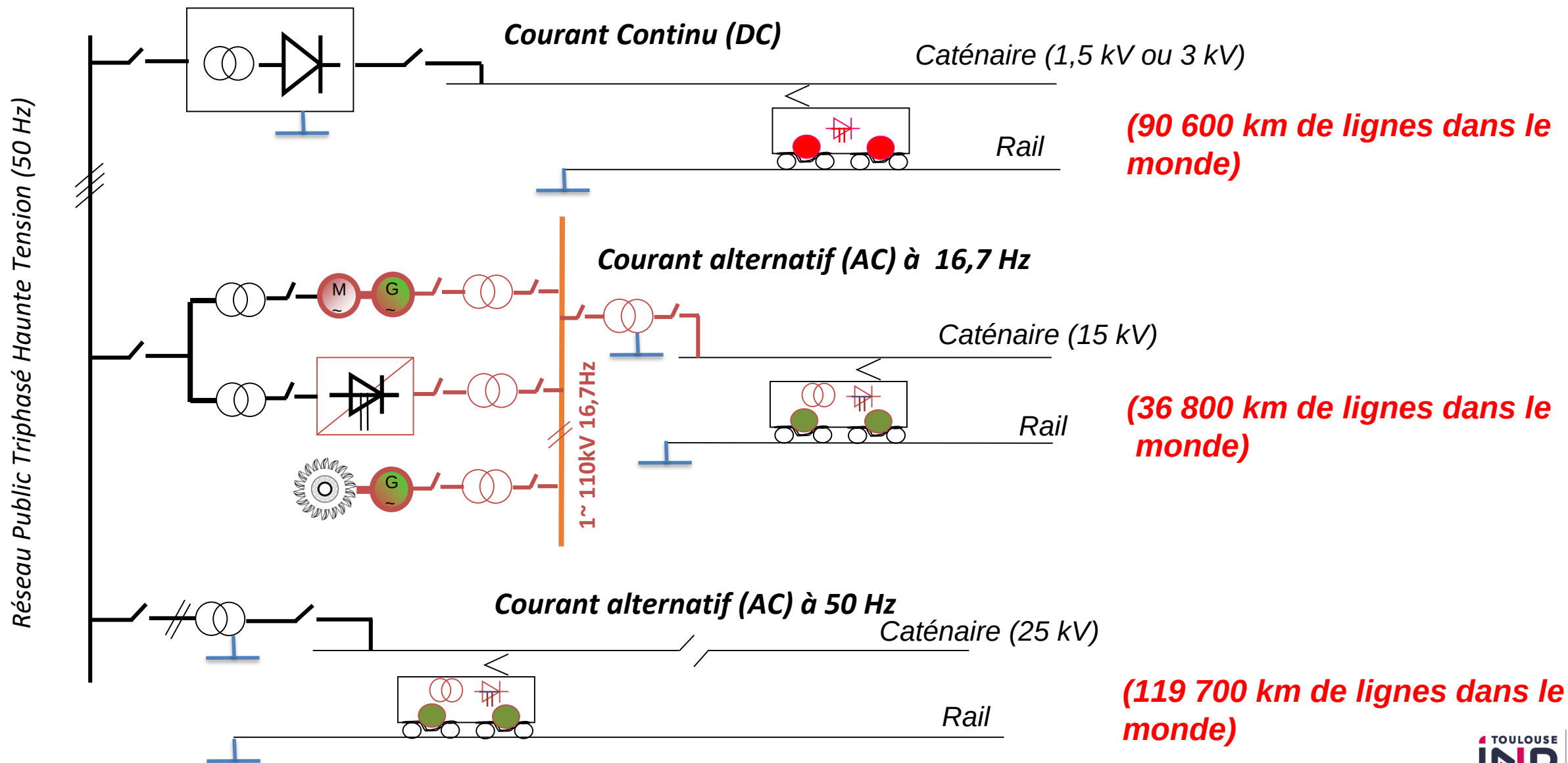
Semi-conducteurs : Utilisation en interrupteurs

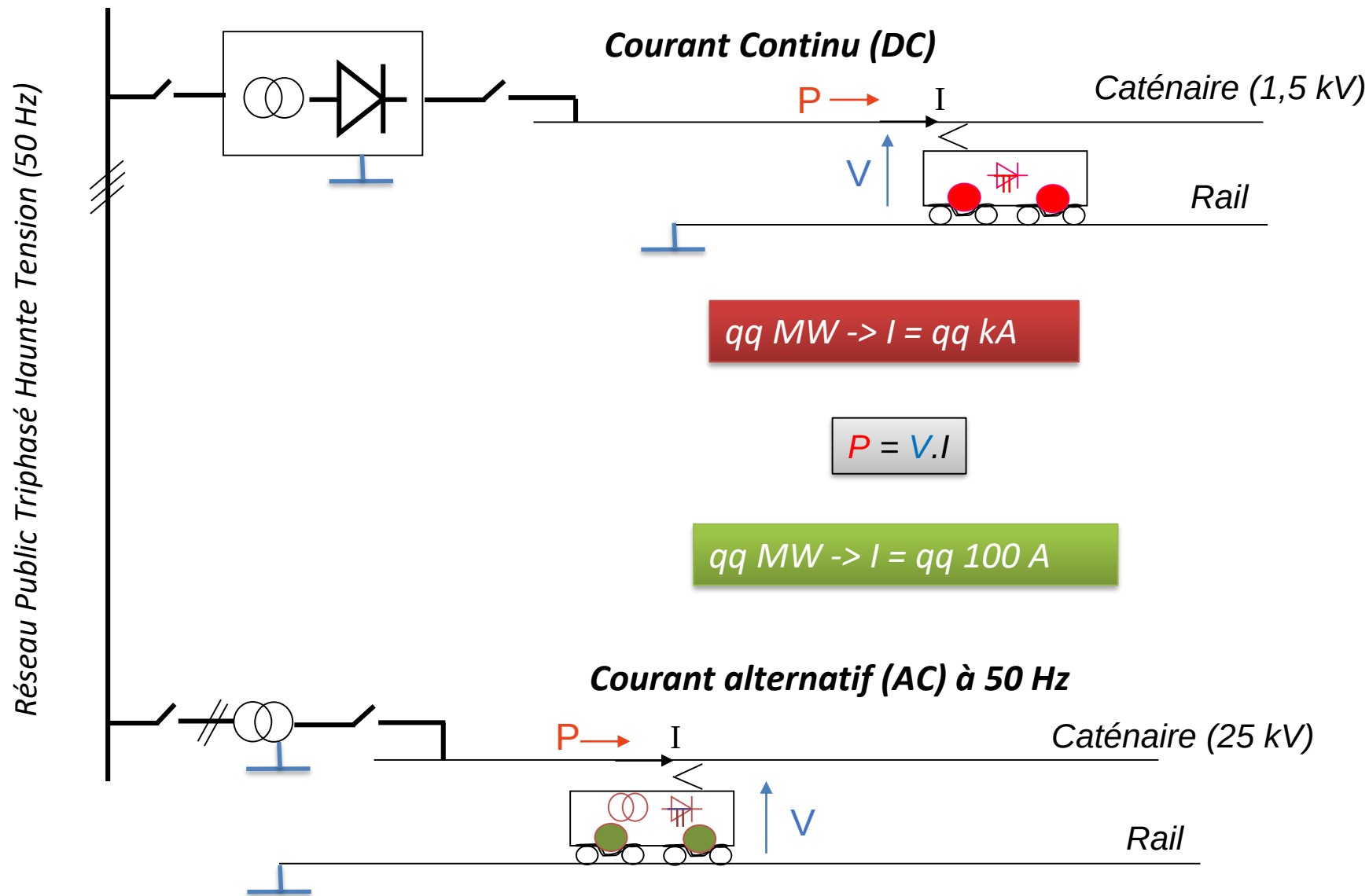


Inductance, Condensateur : stockage temporaire d'énergie, éléments de filtrage



Les systèmes d'électrification ferroviaire dans le monde





6 000 km de lignes

$$V_0 - V = R \cdot \frac{P}{V}$$

$R : \text{qq } 10 \text{ m}\Omega / \text{km}$

$\text{qq MW} \rightarrow I = \text{qq kA}$

$$P = V \cdot I$$

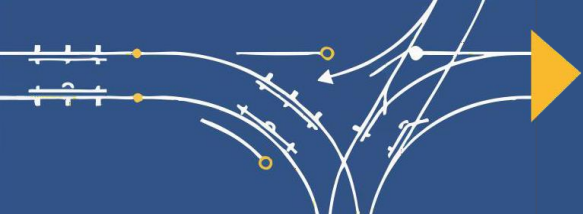
$\text{qq MW} \rightarrow I = \text{qq } 100 \text{ A}$

10 000 km de lignes

$$V_0^2 - V^2 = 2 \cdot R \cdot P + (R^2 + X^2) \frac{P^2}{V^2}$$

$R : 100 \text{ m}\Omega / \text{km}$

$X : 300 \text{ m}\Omega / \text{km}$



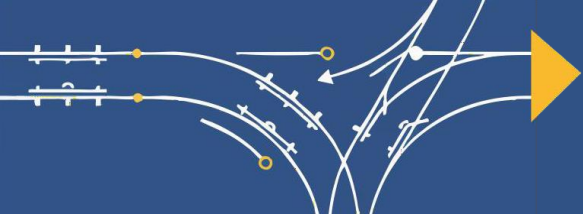
✓ *La chute de tension en ligne*

Extrait de la Norme Européenne En50163

Electrification System	Nominal Voltage	Lowest permanent Voltage	Highest permanent Voltage
DC	1.5 kV	1.0 kV	1.8 kV
AC – 50 Hz	25 kV	19 kV	27.5 kV

✓ *Le dimensionnement initial des sous-stations*

✓ *La puissance de court-circuit du réseau public amont*



✓ *Solutions Passives pour limiter la chute de tension*

*En AC ou DC : Installation de nouvelles sous-stations (Réduction de la longueur des secteurs)
Nécessite un nouveau raccordement au réseau public haute tension*

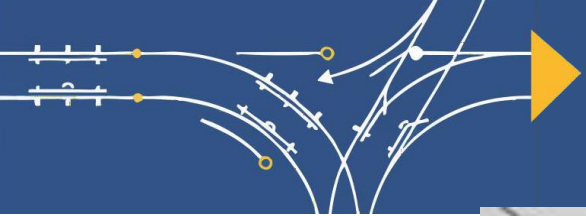
*En DC : Augmentation de la section de cuivre de la ligne aérienne (Réduction de la résistance)
Limité par la contrainte mécanique sur les poteaux supports de caténaire*

✓ *Solutions Electroniques de Puissance mises en œuvre sur le Réseau Ferré Français.*

En AC 25 kV/50 Hz : Static Var Compensator (SVC) ou STATCOM → Booster de tension.

En AC 25 kV/50 Hz : STATCOM pour limiter le déséquilibre des tensions du réseau public triphasé

En DC : rien !

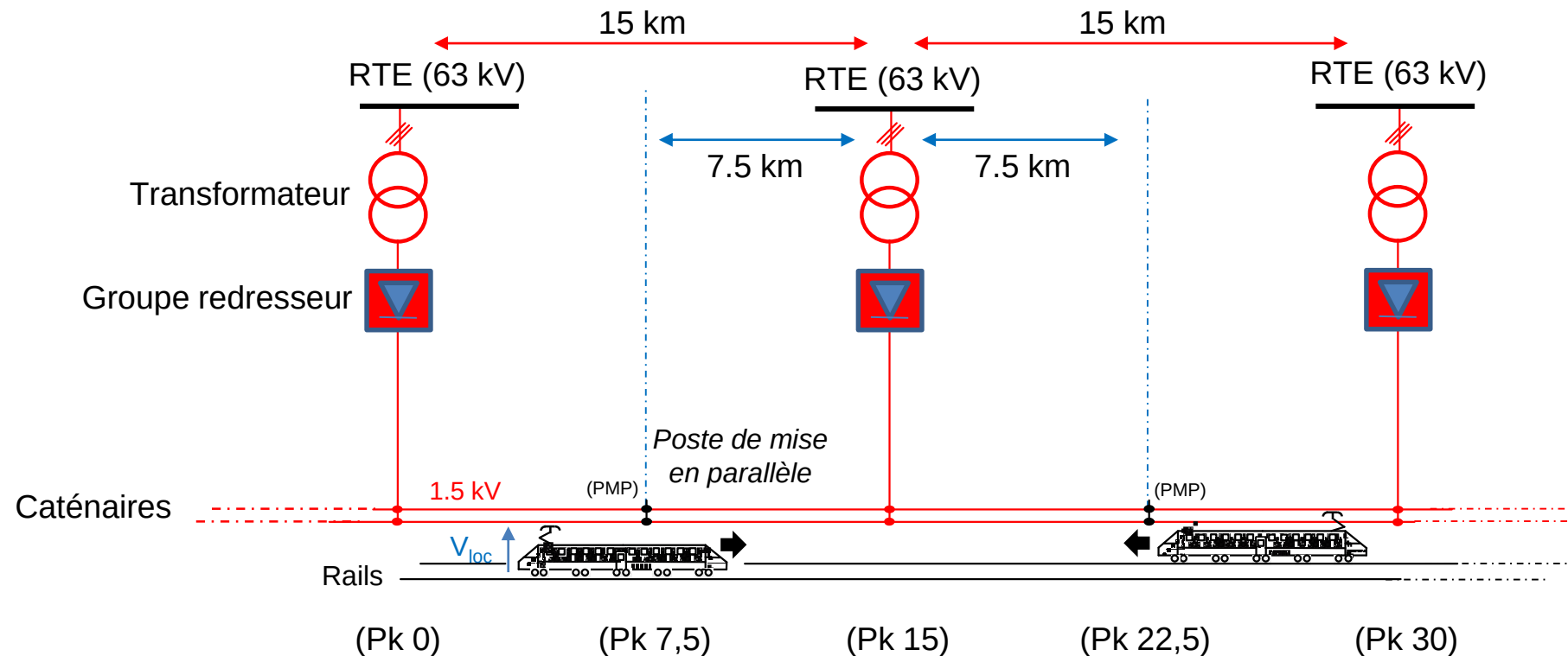


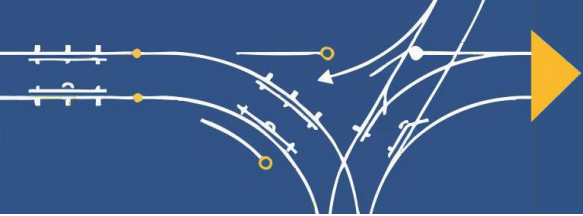
Le futur des électrifications en courant continu



Le problème de la chute de tension en ligne

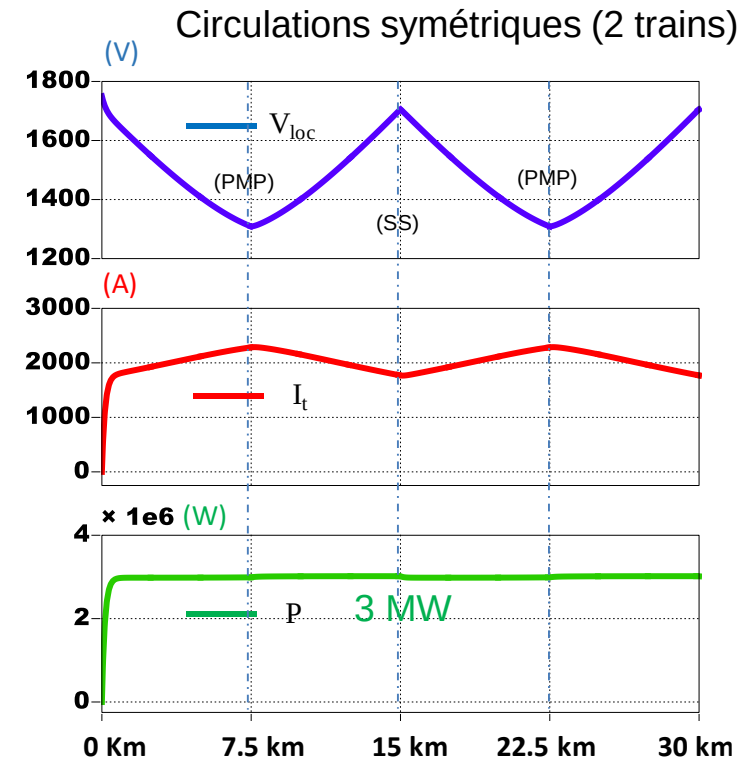
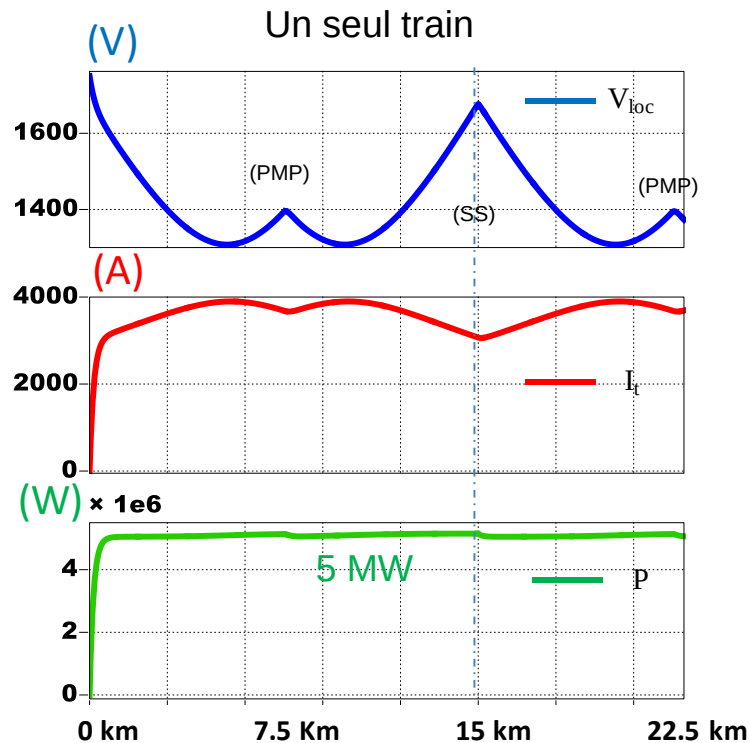
Etude d'un cas typique



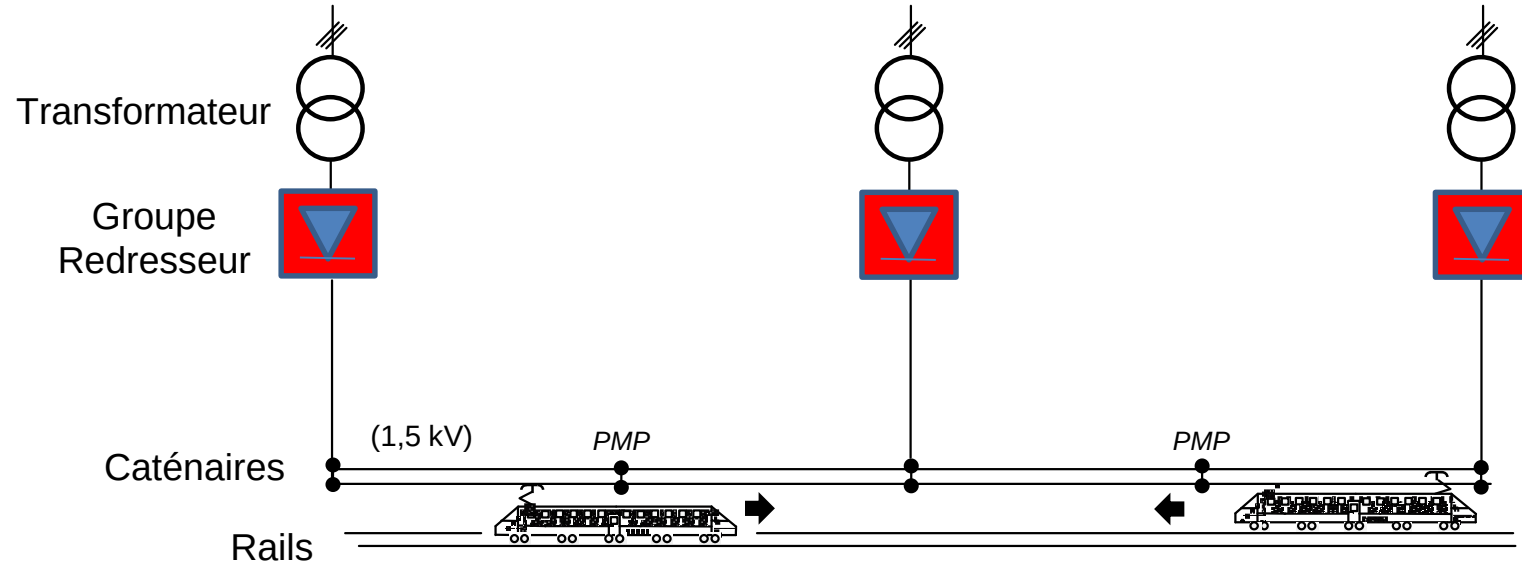
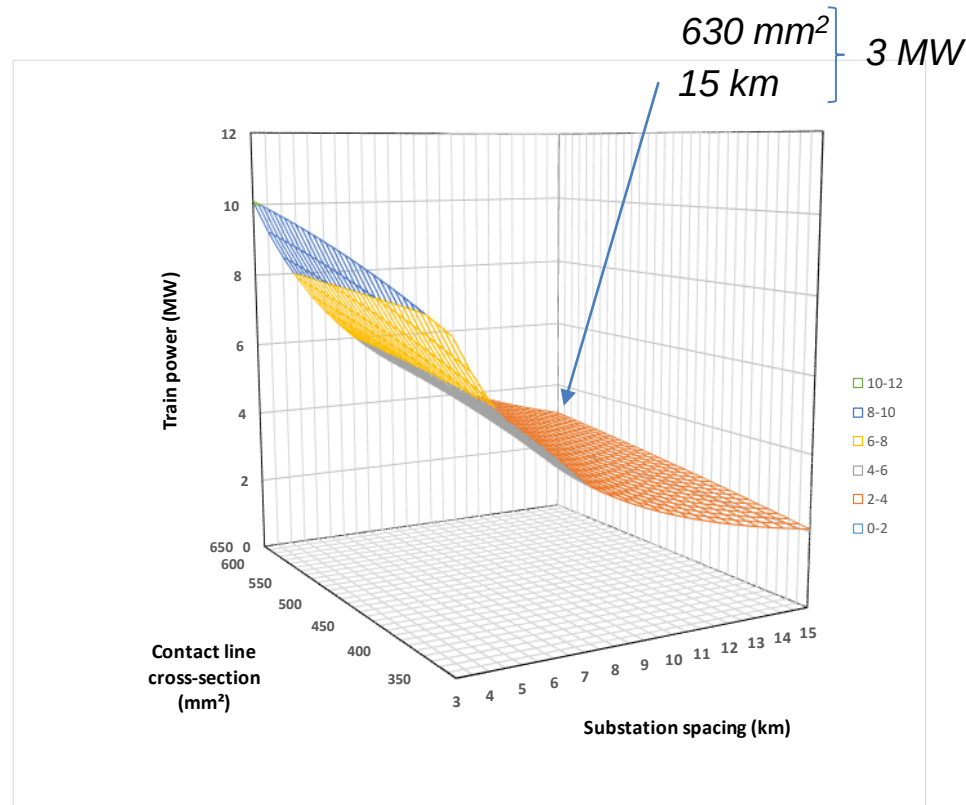


Le problème de la chute de tension en ligne

Circulation @ $V_{locmin} = 1300\text{ V}$ Section caténaire $S_c = 630\text{ mm}^2$

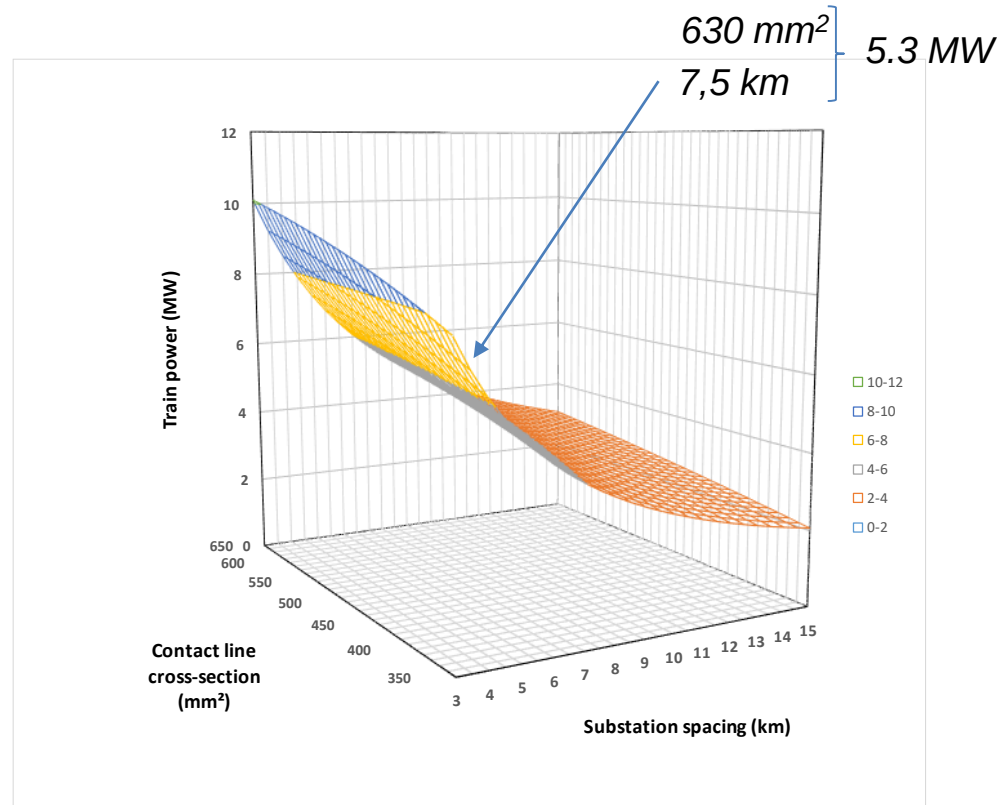


Comment augmenter le trafic ?

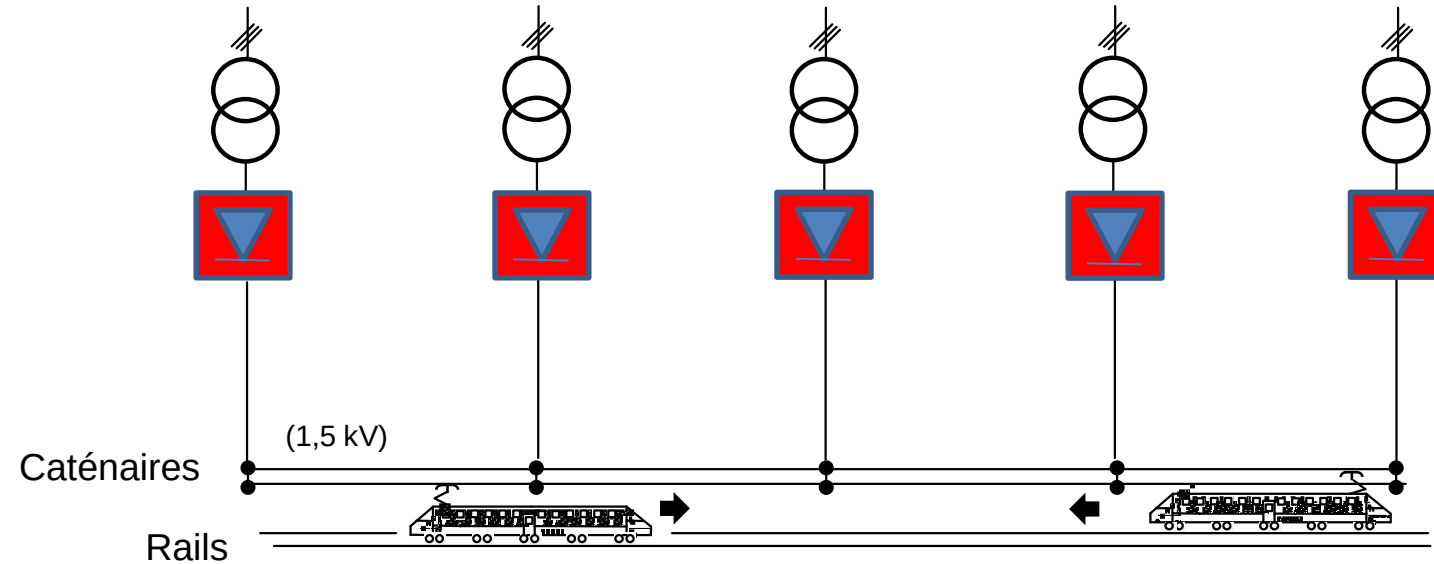


Puissance des trains versus section caténaire et espacement des sous-stations @ $V_{locmin} = 1300 \text{ V}$.

La solution classique pour augmenter le trafic



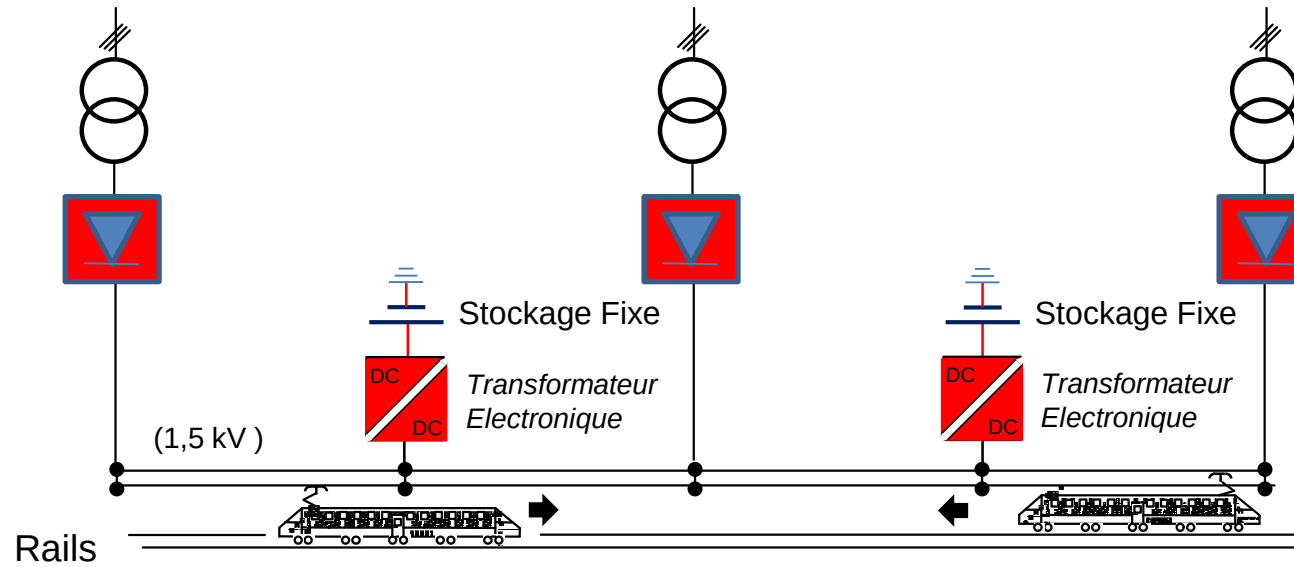
L'installation de nouvelles sous-stations



Puissance des trains versus section caténaire et espacement des sous-stations @ $V_{locmin} = 1300 V$.

Solutions innovantes pour augmenter le trafic

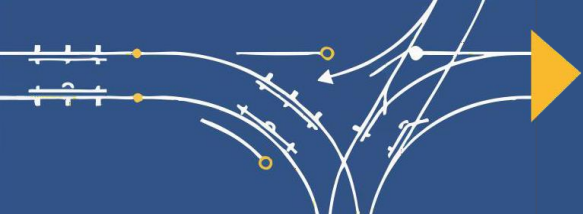
Renforcement de l'alimentation électrique par des systèmes de stockage stationnaires (batteries)



Projet INSTODRES

(2022 – 2026)



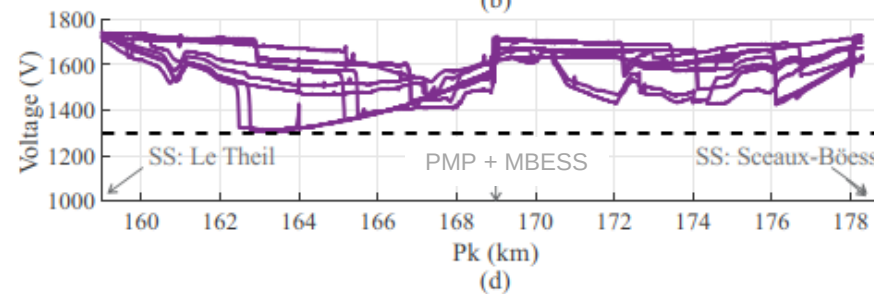
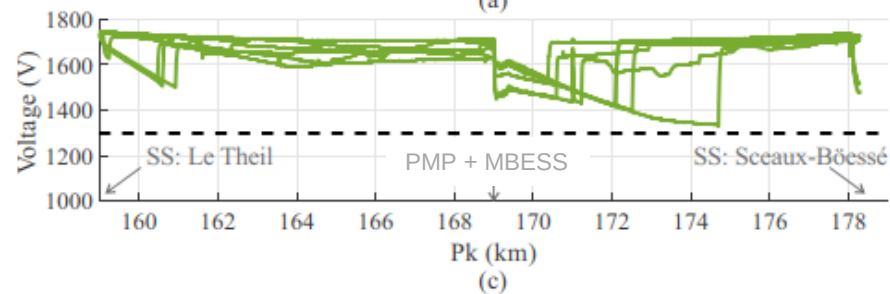
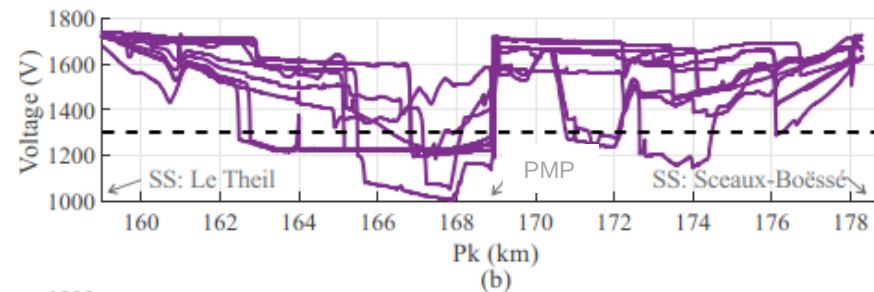
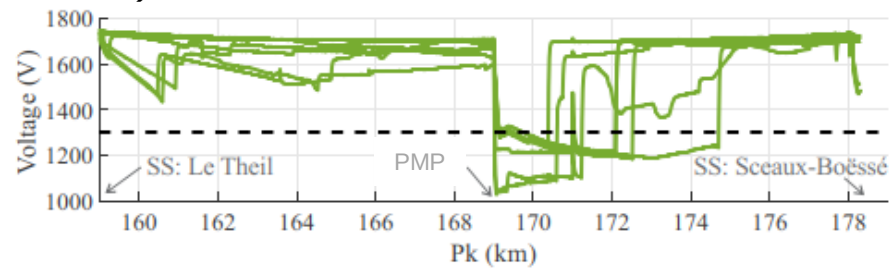


Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Renforcement de l'alimentation électrique par des systèmes de stockage stationnaires (batteries)

Exemple : Ligne Chartres-Le Mans

Secteur entre les sous-stations Le Theil (Pk = 159 km) et Sceaux-Boëssé (Pk = 179 km)



Projet INSTODRES

(2022 – 2026)



Puissance maximale : 2,4 MW – Capacité des batteries : 2 MWh

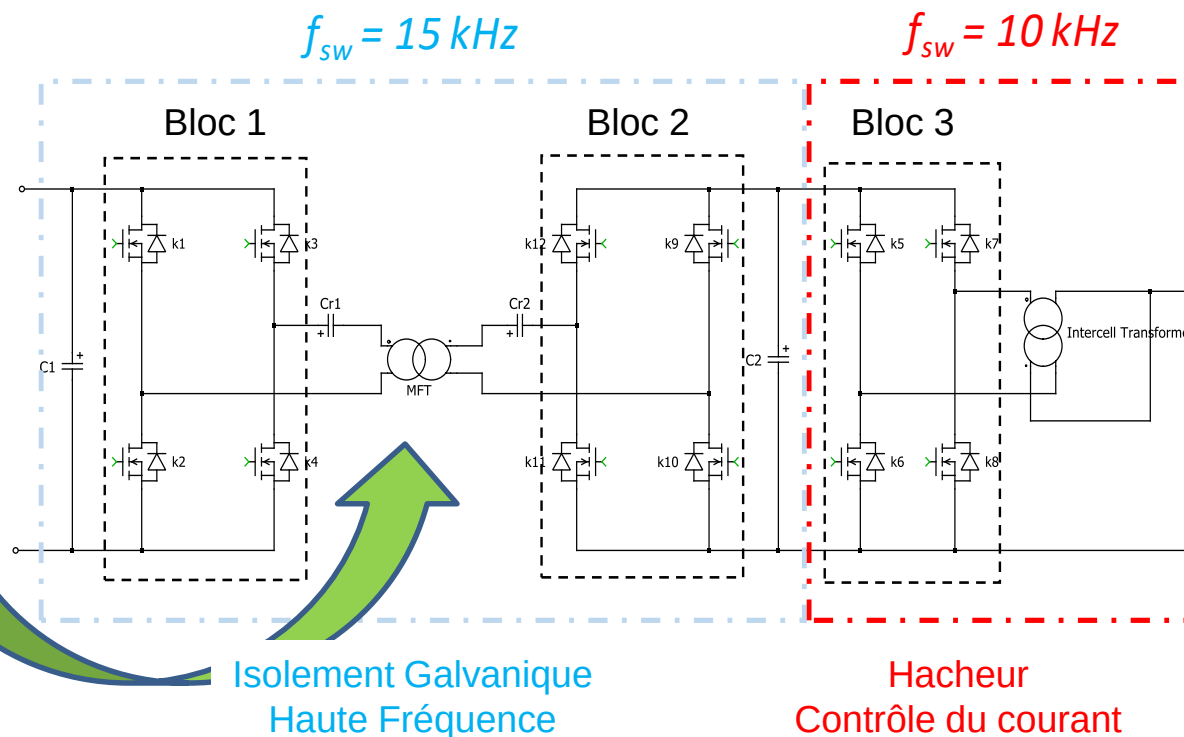
Augmentation du rendement du circuit d'alimentation (caténaire + rail) : 83,6% -> 85,9%

Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Renforcement de l'alimentation électrique par des systèmes de stockage stationnaires (batteries)



400 kVA ; 50 Hz
1200 kg ; 600 litres

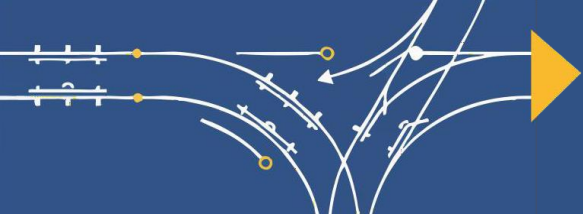


Projet INSTODRES

(2022 – 2026)

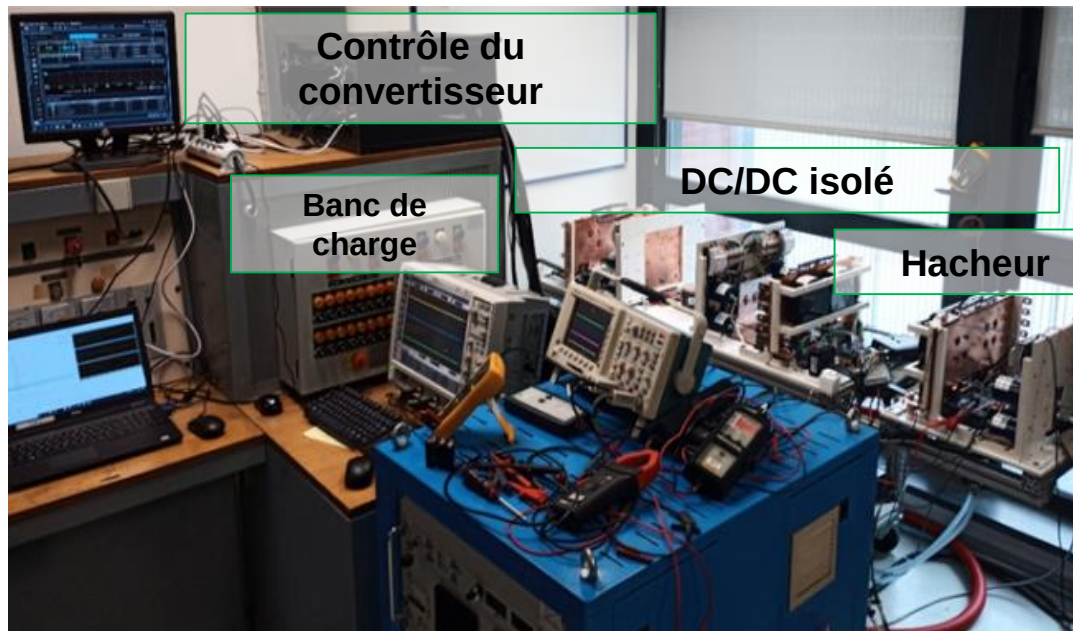


Convertisseur DC/DC isolé -> Séparation du circuit de traction et de la batterie (module de base $P_n = 300 \text{ kW}$)
Modularité : association série et/ou parallèle en fonction du niveau de tension et de puissance

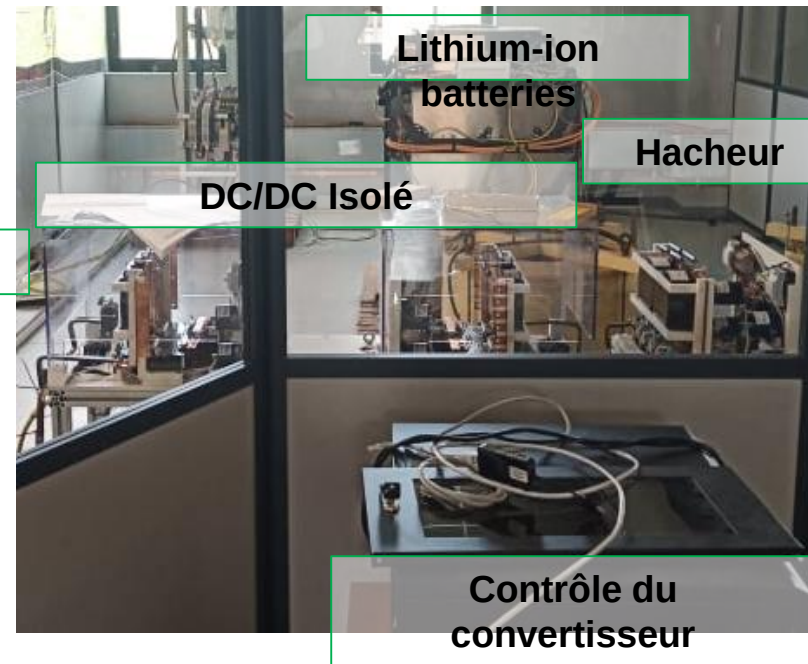


Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Renforcement de l'alimentation électrique par des systèmes de stockage stationnaires (batteries)



Prototype réalisé au LAPLACE (300 kW – 1,8 kV)
Avec MOSFET SiC 3,3 kV – refroidissement par eau



Association avec batterie 147 kWh – Plateforme ZEUS (SCLE)

Projet INSTODRES

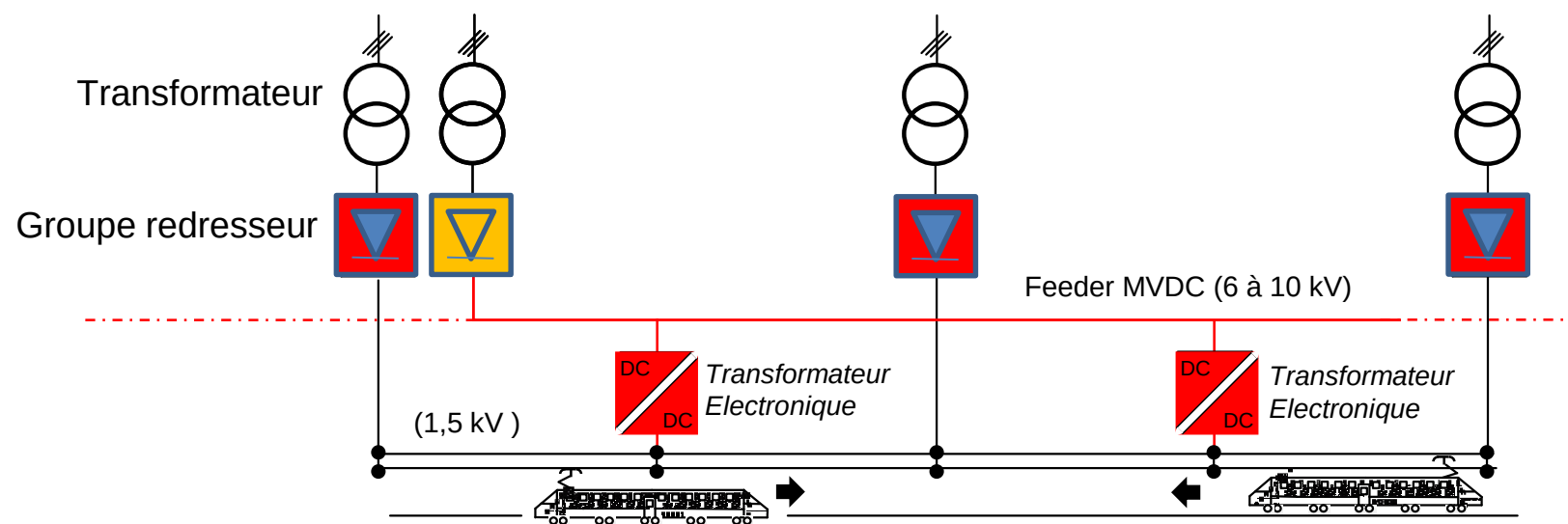
(2022 – 2026)



Convertisseur DC/DC isolé -> Séparation du circuit de traction et de la batterie (module de base $P_n = 300$ kW)
Modularité : association série et/ou parallèle en fonction du niveau de tension et de puissance

Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Système d'alimentation à trois fils avec feeder moyenne tension (MVDC)



Projet FUNDRES
2019 – 2022



EPFL

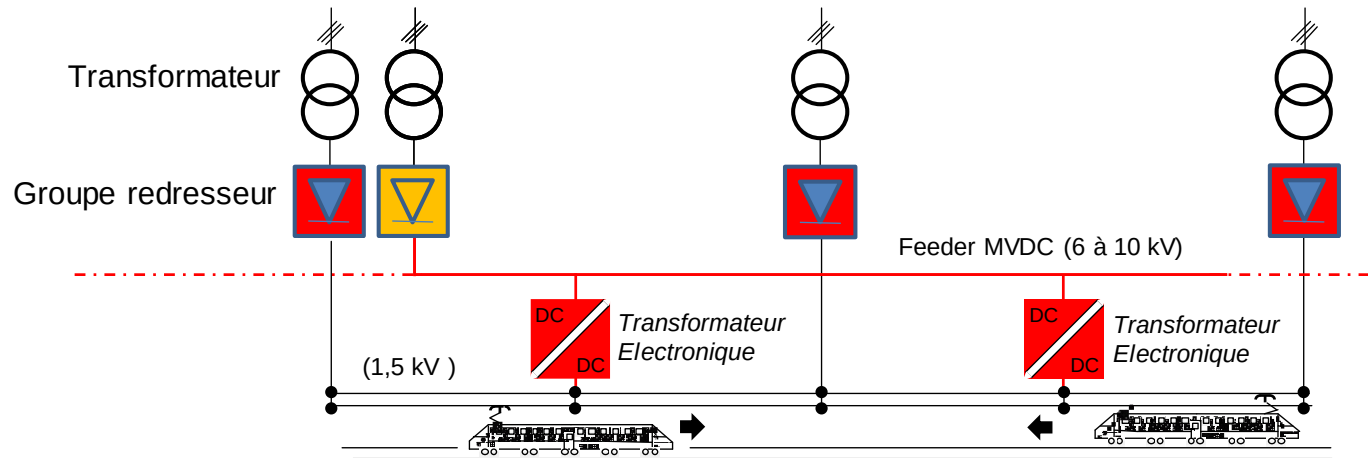
UIC

POLITECNICO
MILANO 1863

TOULOUSE
INP U

Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Exemple de renforcement avec feeder MVDC et transformateurs électroniques



Projet FUNDRES
2019 – 2022



Résultats de simulation

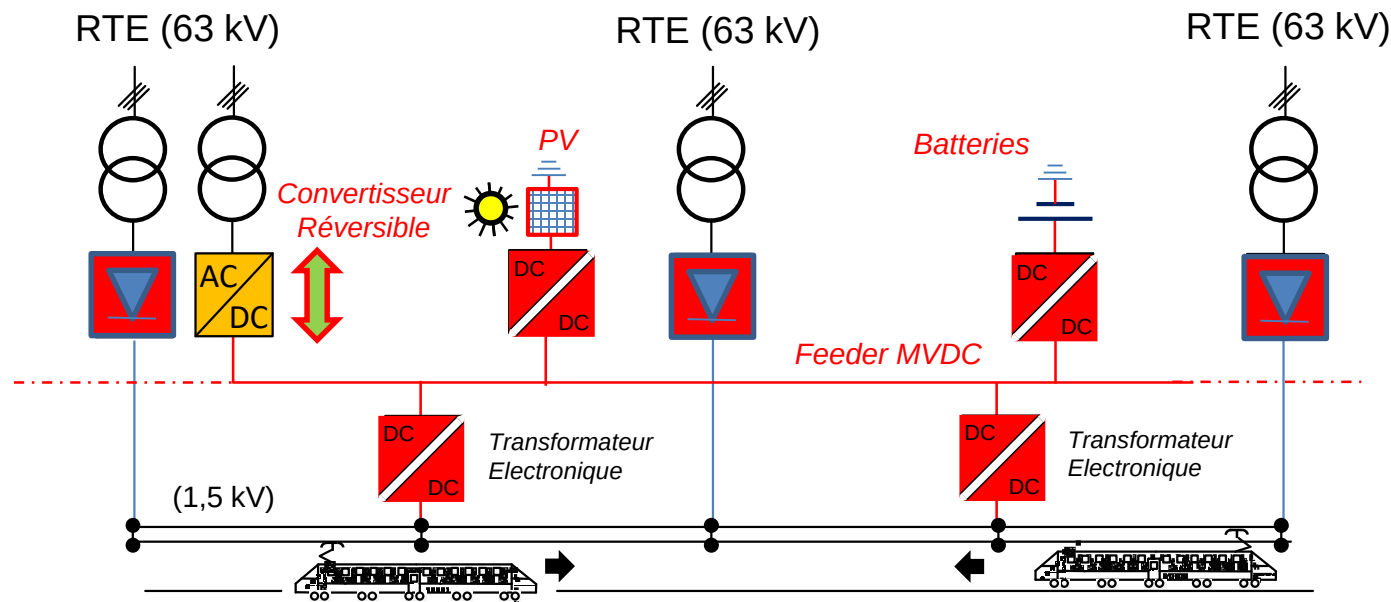
Scenario Considéré :

- Limitation de courant des transformateurs électroniques : I_{outmax} @ 4 kA
- Espacement des sous-stations : 15 km
- Section caténaire: 630 mm²
- 1 train de FRET toutes les 15 mn dans chaque sens ; $V = 120$ km/h
- Section du feeder (par voie) : $S_f = 256$ mm²

Système d'électrification	V_{loc} min	P_{loc} moyenne	Rendement
Situation initiale 1,5 kV	1,23 kV	4,8 MW	82 %
Renforcement par feeder 10 kV	1,37 kV	6,1 MW	86 %

Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Système à trois fils avec un feeder MVDC jouant le rôle de Hub énergétique



RACCOR-
RESEAU FERROVIAIRE A COURANT CONTINU INTELLIGENT
POUR LE VERDISSEMENT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

(2022 – 2026)

bpi france
SERVIR L'AVENIR

Laplace

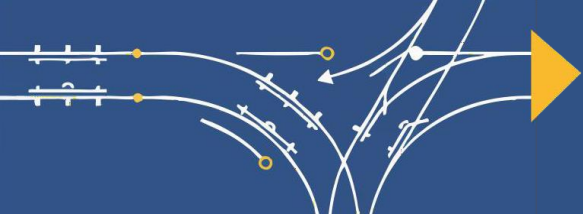
L2EP
Laboratoire d'Electronique de l'EP

SNCF
RESEAU

RAIL ENIUM
RAIL RESEARCH & INNOVATION

SCLE
SFE

Rte

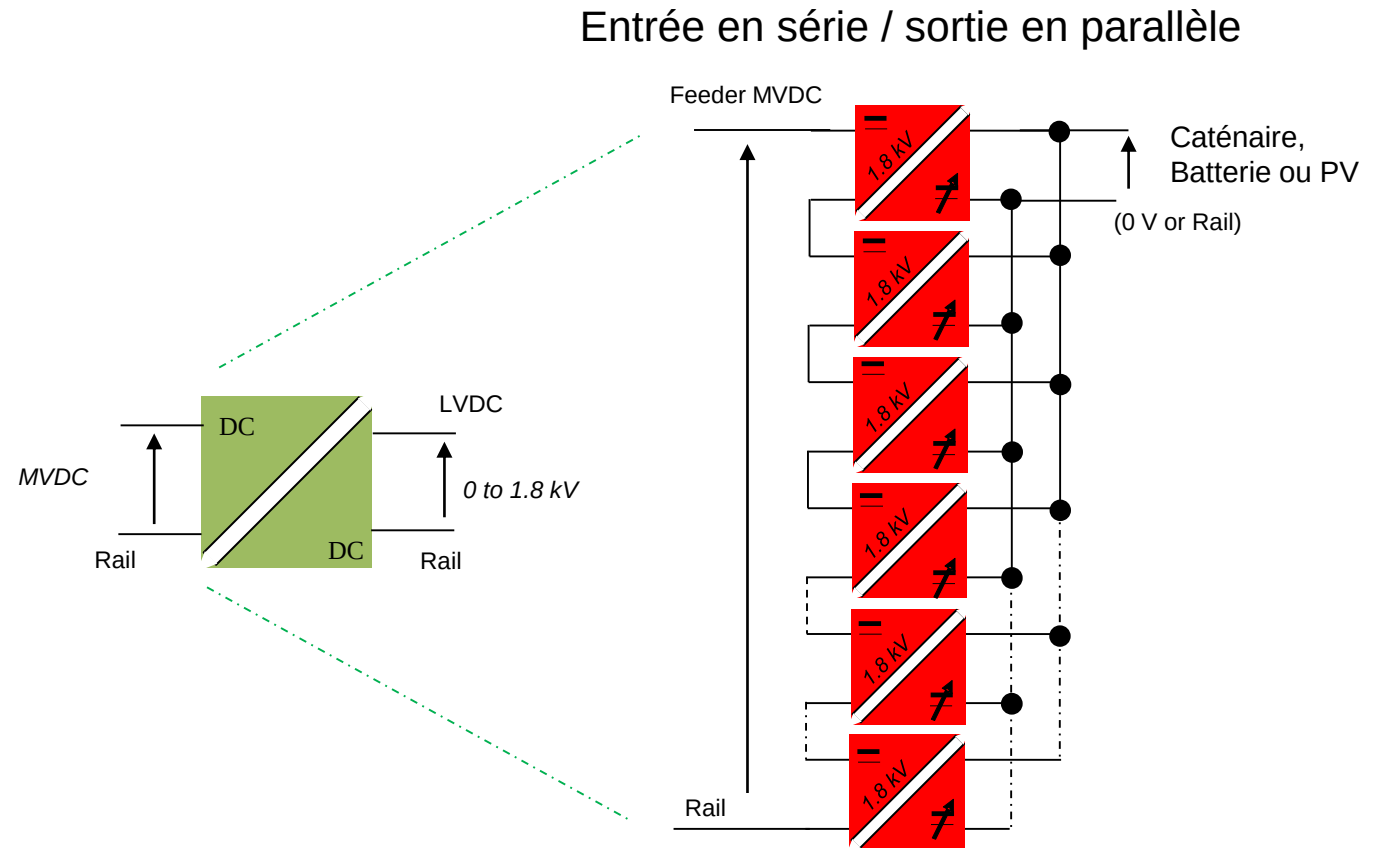


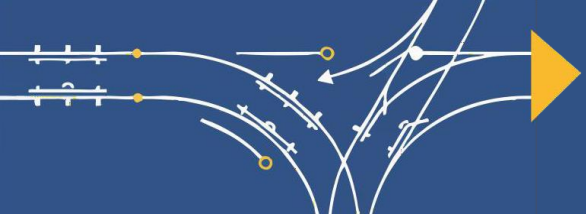
Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Le transformateur électronique : une solution modulaire



Prototype d'une brique élémentaire





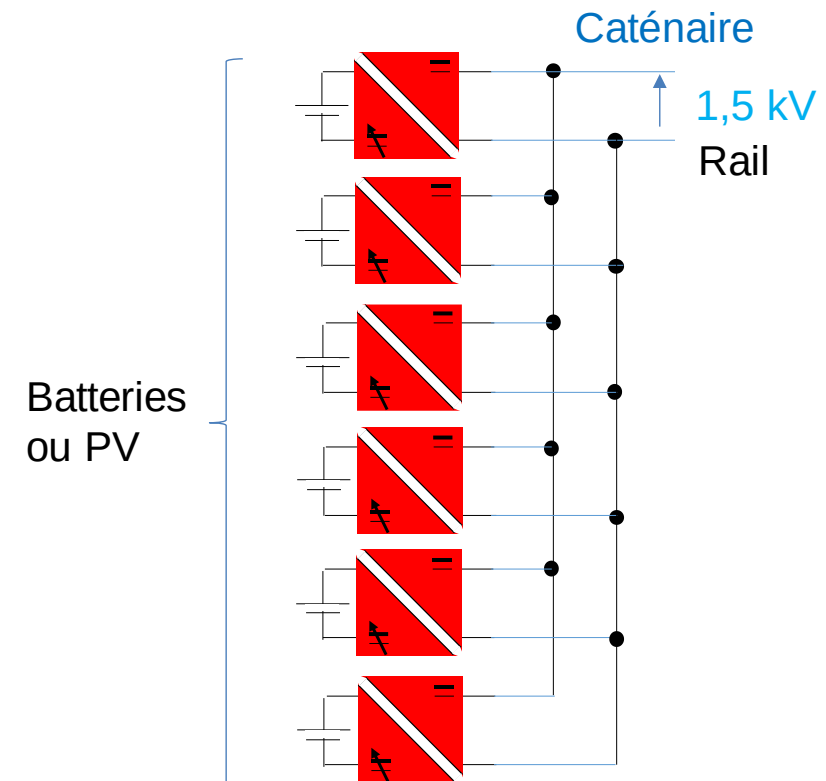
Solutions innovantes pour augmenter le trafic

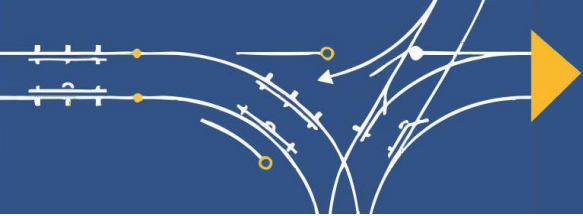
Le transformateur électronique : une solution modulaire

Connexion sur caténaire 1,5 kV avec isolement intégré



Prototype d'une brique élémentaire



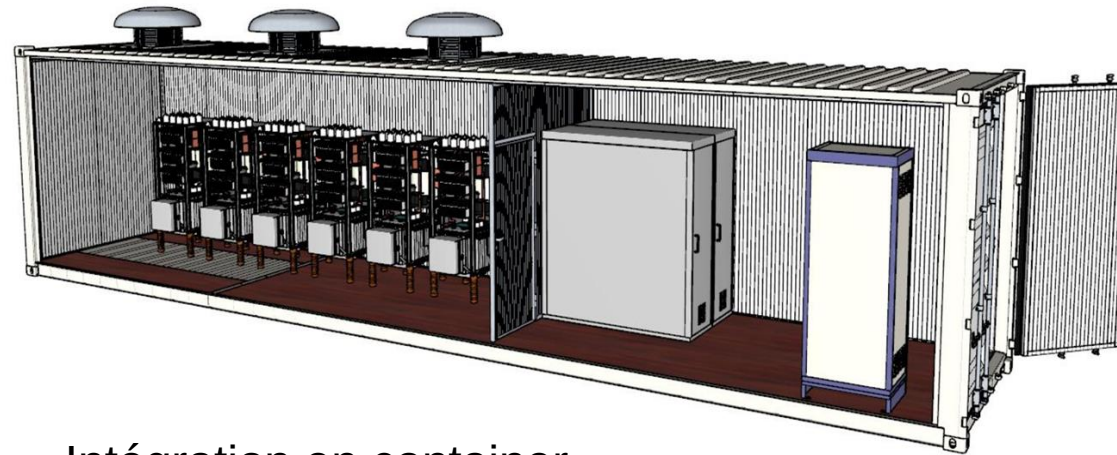


Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Le transformateur électronique : une solution modulaire



Prototype d'une brique élémentaire



Intégration en container

RACCOR- Φ
RÉSEAU FERROVIAIRE À COURANT CONTINU INTELLIGENT
POUR LE VERDISSEMENT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

(2022 – 2027)

bpifrance
SERVIR L'AVENIR

Laplace

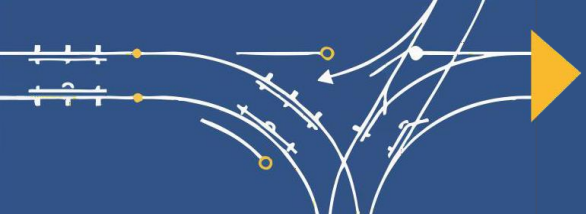
L2EP
Laboratoire d'Electrotechnique et
d'Electronique de puissance des L2EP

SNCF
RÉSEAU

RAILENIUM
RAIL RESEARCH & INNOVATION

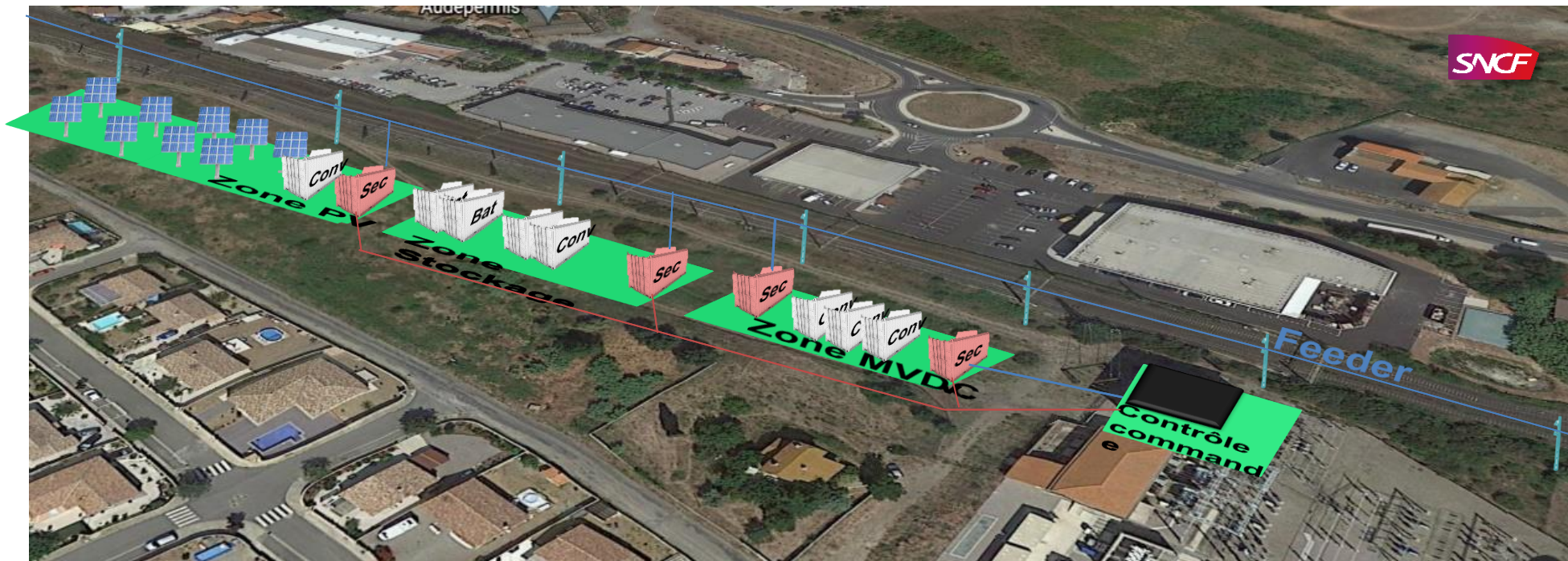
SCLE
SFE

Rte

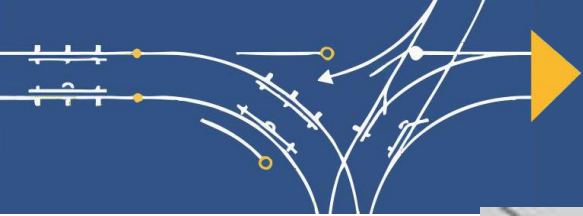


Solutions innovantes pour augmenter le trafic

Un site d'expérimentation unique en France



Stockage Batterie : 1 MW en décharge – 600 kWh
PV : 200 kW crête



À court terme, l'intégration des sources d'énergie renouvelables associées à du stockage d'énergie est possible.

Le système à trois fils permet de déployer un réseau d'énergie MVDC le long des voies.

Le transformateur électronique est un composant essentiel qui doit être industriellement développé



Des gains en efficacité énergétique sont possibles pour l'électrification DC ou AC

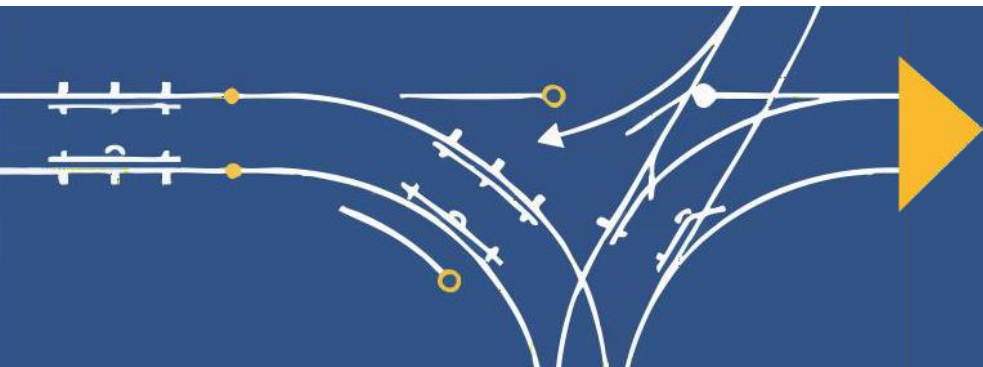
Des augmentations de trafic sont possibles sans avoir systématiquement à modifier l'infrastructure existante

Il faut des solutions électroniques de puissance fiables et à coût d'exploitation réduit.
Celles-ci doivent être compatibles avec les circuits de voie (détection des trains, signalisation ...)

La France manque de recul, il faut aller voir ce qui se fait en Suisse et au Japon notamment

Il faut des démonstrateurs pour convaincre les décideurs et avoir un retour d'expérience

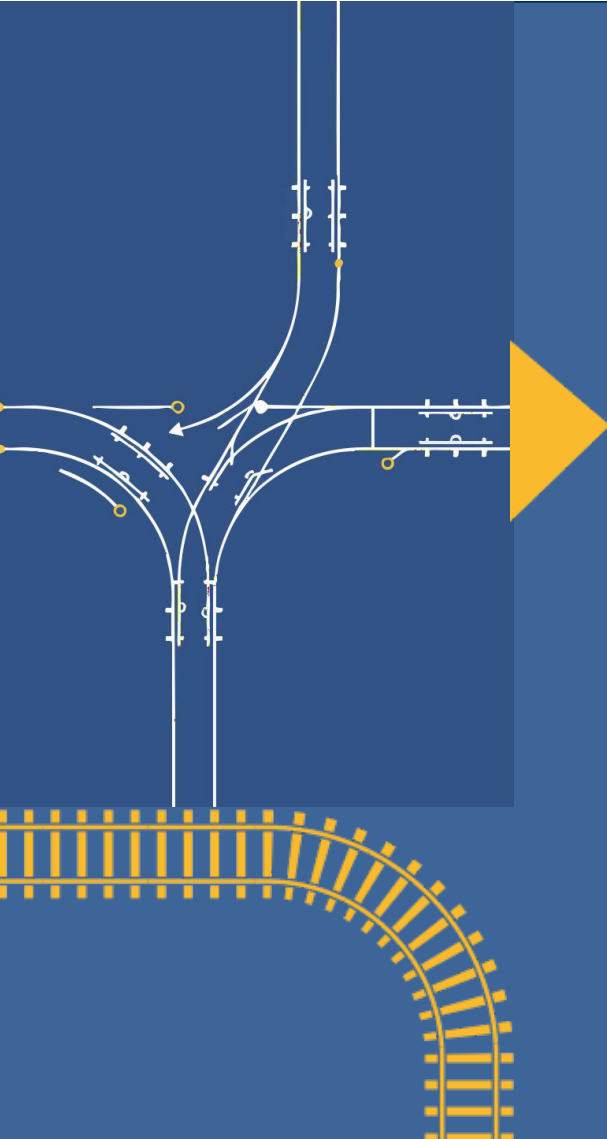
Il faut former des ingénieurs et des techniciens à ces nouvelles technologies



Journée technique ferroviaire

le 17 mars 2026 à Nîmes





contact@ocvia.fr

**Journée technique
ferroviaire** le 17 mars 2026 à Nîmes