

**Bernard Jacob**

Université Gustave  
Eiffel

bernard.jacob@univ-  
eiffel.fr

# L'ERS pour la décarbonation du transport routier

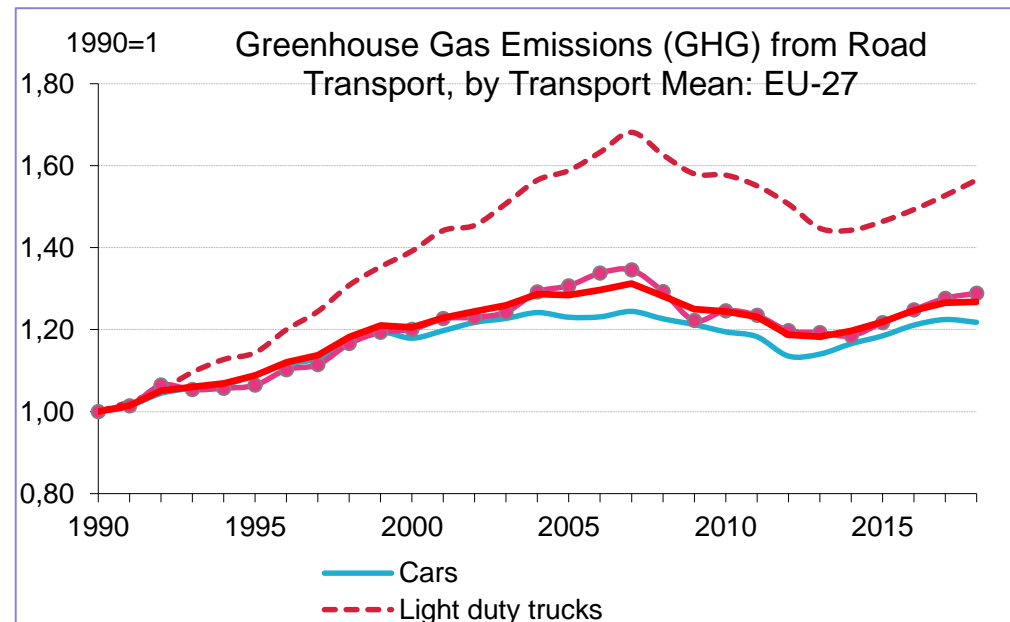
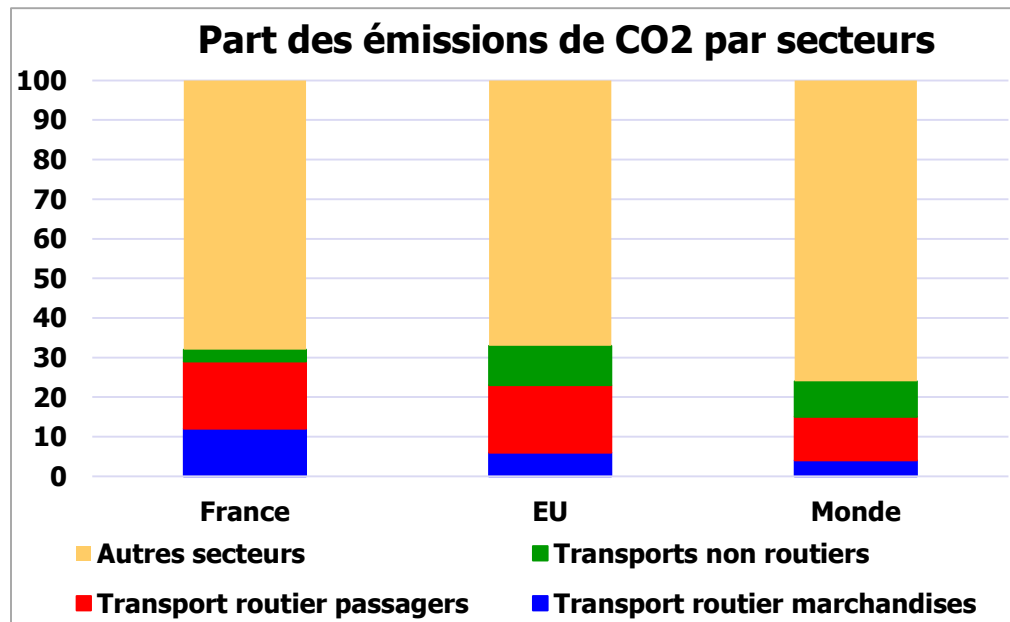


Université  
Gustave Eiffel

# 1. Enjeux et défis

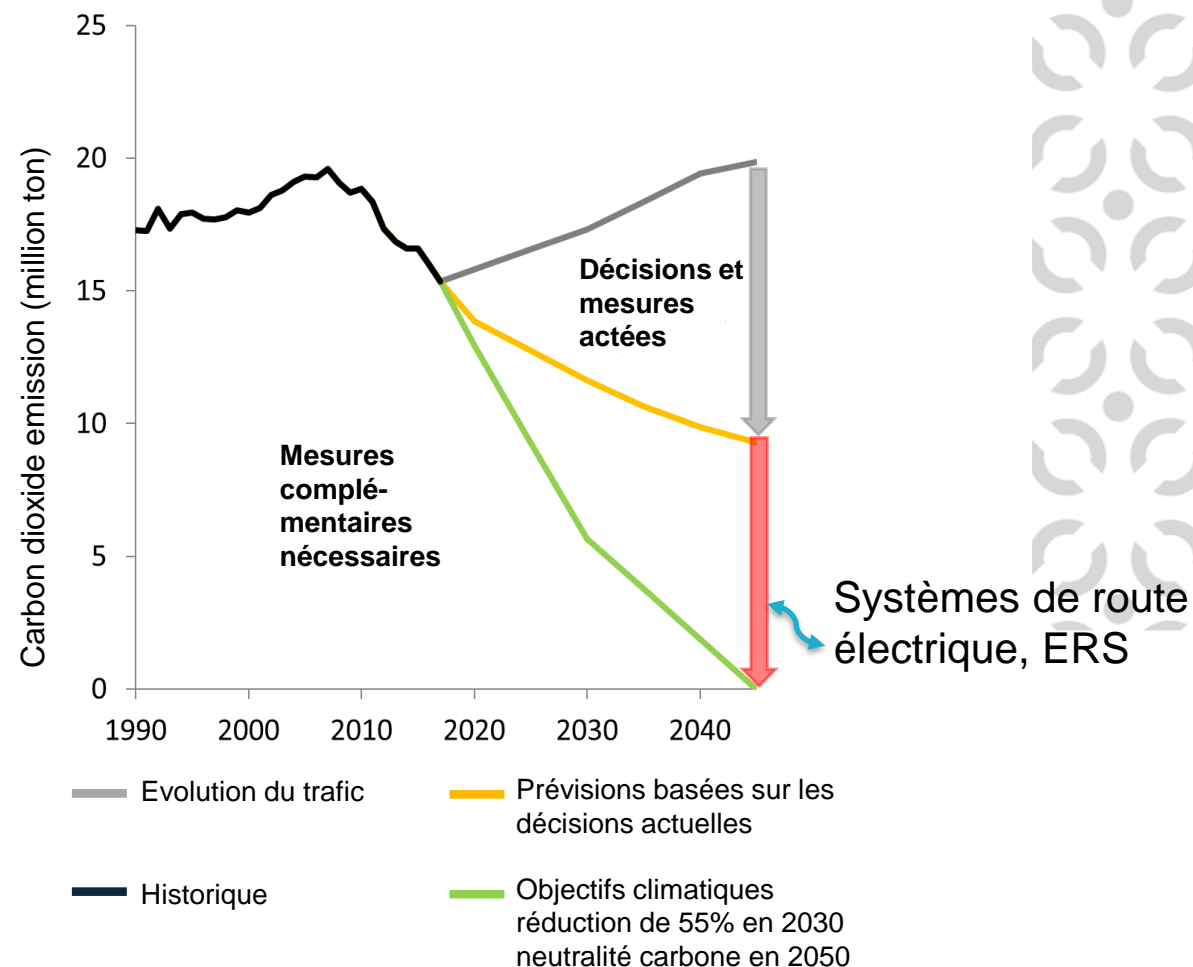
# Enjeux de la décarbonation du transport routier

- Part modale fret routier = 88% (FR) et 75% (EU)
- France: transports = 32% des émissions de CO<sub>2</sub>, dont 29% routier et 12% TRM (PL+VUL)
- EU = transports = 33% des émissions, dont 23% routier et 6% TRM
- France: part CO<sub>2</sub> transport routier = 24% (PL) et 20% (VUL)
- Emissions du transport routier (PL) ont augmenté de 27% de 1990 à 2018



# Défis de la décarbonation du transport routier

- - 55% d'émissions en 2030 par rapport à 1990 (Parlement européen et États membres, Fit for 55)
- Neutralité carbone en 2050
- Règlement 2019/1242 : réduction 15% en 2025 et 30% en 2030 des émissions des PL neufs (vs moyenne UE de 2020)
- Minimisation émissions et consommation matières (cycle de vie complet)
- Conserver des conditions d'exploitation des PL proches de l'existant





## **2. Solutions de décarbonation**

# Gaz et Biocarburants

Ne décarbonent pas  
complètement

## Gaz fossiles et biogaz

- GPL: de pétrole liquéfié (butane+propane) – fossile, 200-300 bars, VUL et VL
- GNV: naturel véhicules, biométhane, bus et PL
- GNL: naturel liquéfié (-163°), volume 1/600

## Biodiesel

- Produit à partir de l'agriculture

## Biogaz

Besoin 40 TWh en 2050 si partage avec biodiesel

Forts gains énergétiques PL (-40%) et performance GES en ACV... mais annulés par 3,5% de fuites (réchauffement à 25 ans du CH<sub>4</sub> 80 fois > CO<sub>2</sub>)

Compétition avec chauffage, production électrique...

## Biodiesel

Besoin de 35 TWh en 2050

Gain énergétique -30%, mais émission de GES en ACV 4 fois > biogaz

Problème de substitution de terres agricoles

# Batteries et bornes de recharge rapide

## Batteries

### Li-Ion (NMC, LFP)

- Poids: 150 à 250 Wh/kg (10 à 20 fois moins d'énergie massique qu'essence et diesel, NMC>LFP)
- Matériaux critiques (Ni, Co)
- Coût (PL: TCO + 15 à 40%):  
NMC 150\$/kWh (+7% en 2022)  
LFP 120 \$/kWh (+27% en 2022)
- Durée vie: 6-10 ans, 1000-1500 cycles (LFP>NMC) **sauf froid et recharge rapide**
- Risque incendie, échauffement...
- Recyclage énergivore

**LMP:** moins denses, à tenir à 60°

**Li-Air:** densité >500 Wh/kg, jusqu'à 2000 cycles, en développement

### Bornes recharge rapide

OK pour VL (43 à 70 kW)

jusqu'à 150-250 kW (Tesla)

Pour PL: 750 kW à 1 MW (recharge en 45 min, 750 kWh pour 400-450 km)

⇒ **75 à 100 MW/parking !!**

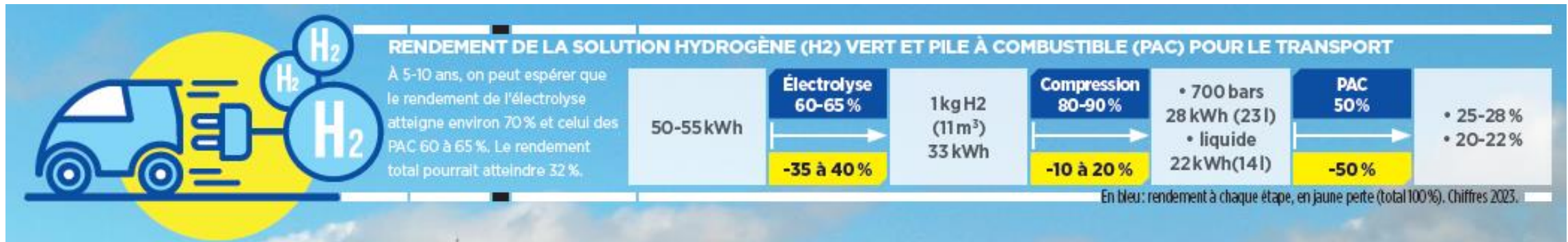
Coût élevé: 0,5 à 1 €/kWh contre 0,15 à 0,20 part. et pros (1/2023)

Besoin de refroidissement et maîtrise risques



# Hydrogène: quelques bases physiques et chiffres

- L'hydrogène (non natif) n'est PAS une source d'énergie, mais un moyen de stockage...
- ...à coût énergétique élevé:



- Pas d'énergie fatale avec part renouvelable <15% et ratio puissance périodes creuses/pointes de 30%
- 90 Mt d'H<sub>2</sub>/an (1 Mt en France) consommées pour chimie et industrie (non substituable) nécessiteraient 4950 TWh (10 x production française)



# Hydrogène pour les poids lourds

1 l diesel = 10,5 kWh  $\Leftrightarrow$  0,30 kg H<sub>2</sub>

PL 40 t, autonomie 1000 km : 120 kg H<sub>2</sub>

H<sub>2</sub> @ 700 bars: 2800 l    H<sub>2</sub> liquide: 1630 l

Réservoir: 4 m<sup>3</sup>, 3000 kg + batterie tampon

$\Rightarrow$  +2 à 2,5 t masse (10% CU)

**Pour un PL de 40 t sur un an:**

85 000 km

$\approx$  10 t H<sub>2</sub> @ 8 €/kg = 80 000 €  
(+60%/diesel)

vs 25 000 l gasoil @ 2 € = 50 000 €

PAC: 350 000 €, + réservoirs...

$\Rightarrow$  **TCO x2 à 3**

**Si 50% des PL.km longue distance en H<sub>2</sub>:**

>1 Mt H<sub>2</sub>  $\approx$  55 TWh (>10% prod. Fr  
ou 8 centrales nucléaires)

**Avec ERS et batteries:**

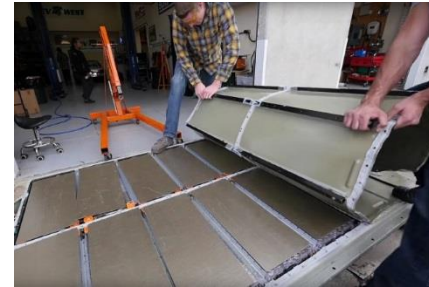
**-60% d'électricité, - 5 centrales !**

**Mais usage pour aviation, maritime et « niches » (vélos, taxis, qqs bus...)**

### **3. Intérêt de l'ERS et perspectives en France**

# Pourquoi l'ERS ?

L'électricité se transporte facilement à un coût modéré, mais se stocke difficilement

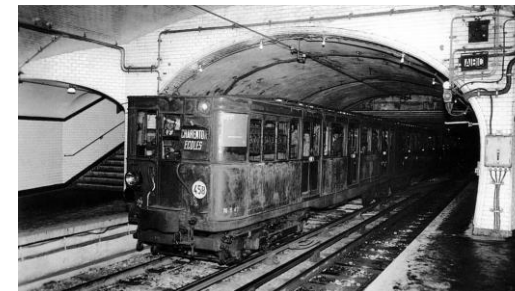
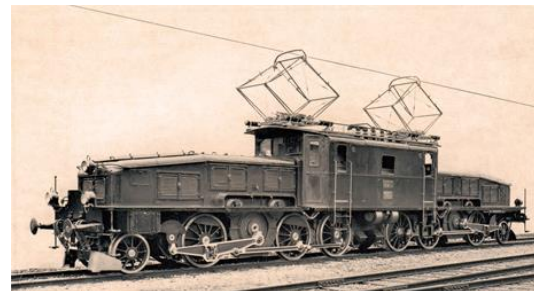


Locomotives à vapeur et tender à charbon



➔  
1900

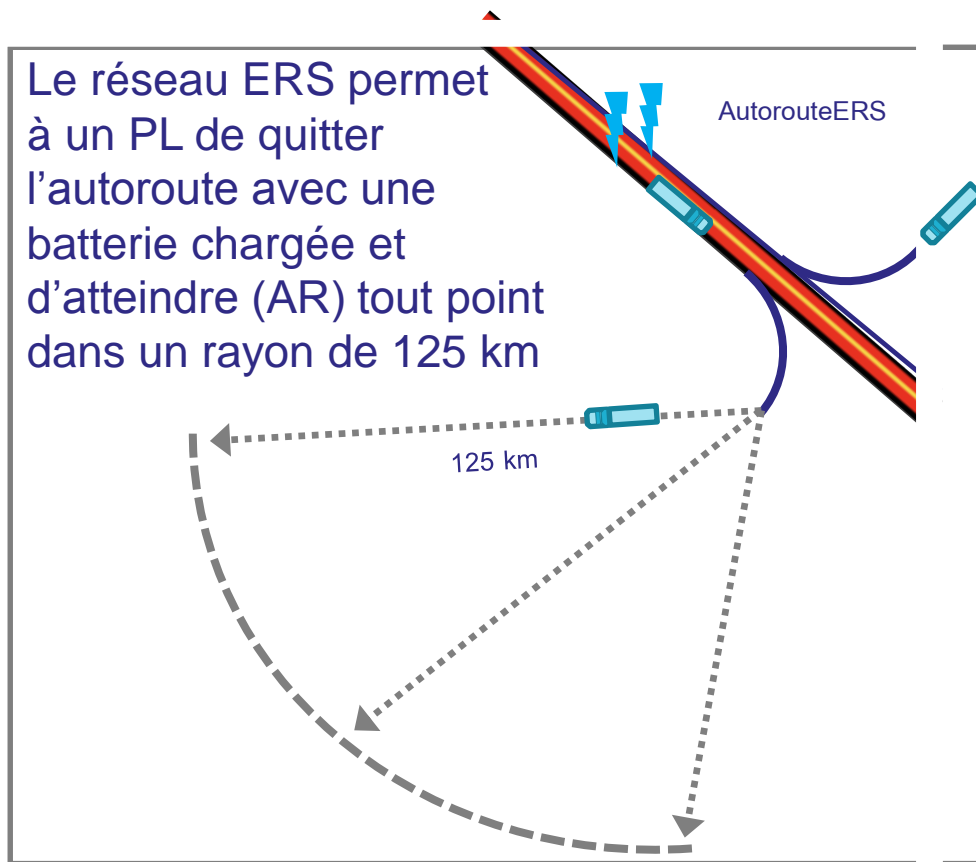
Locomotives électriques, métros et trams alimentés en marche



# Déploiement proposé de l'ERS en France

Réseau RTE-T Phase 1 : 4,900 km  
Phase 2 : 3,950 km  
Total : 8,850 km

Le réseau ERS permet à un PL de quitter l'autoroute avec une batterie chargée et d'atteindre (AR) tout point dans un rayon de 125 km



Batteries réduites de 2/3 (380 kWh pour un PL)

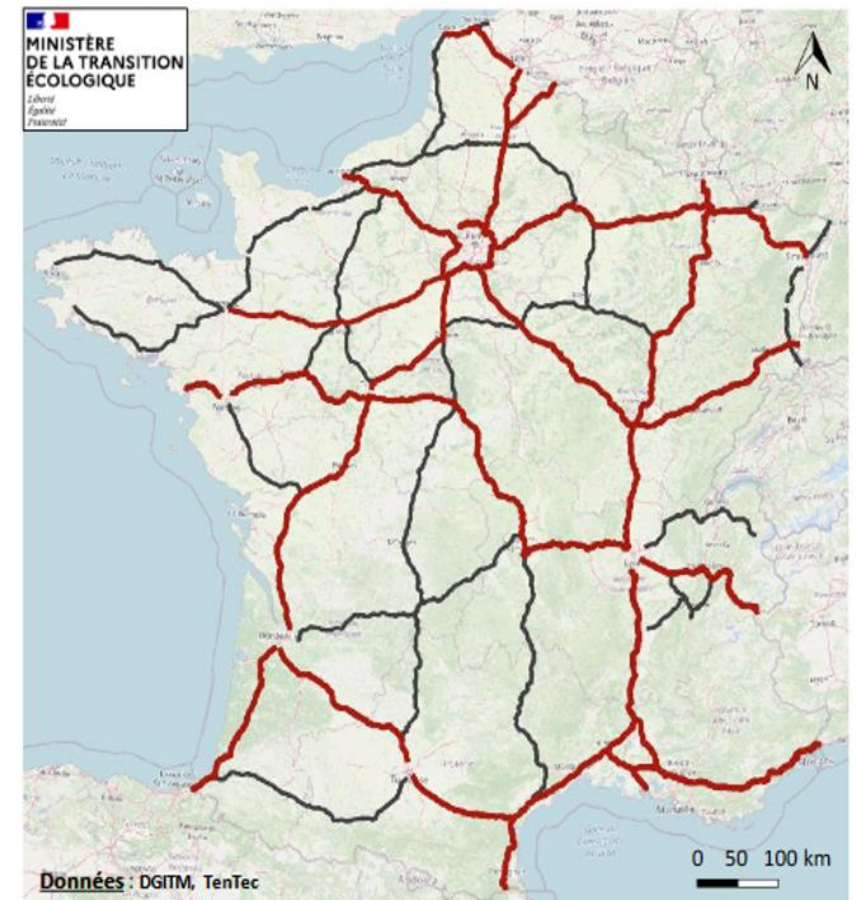
Puissance max.: 400 kW/PL

Décarbonation: -85%

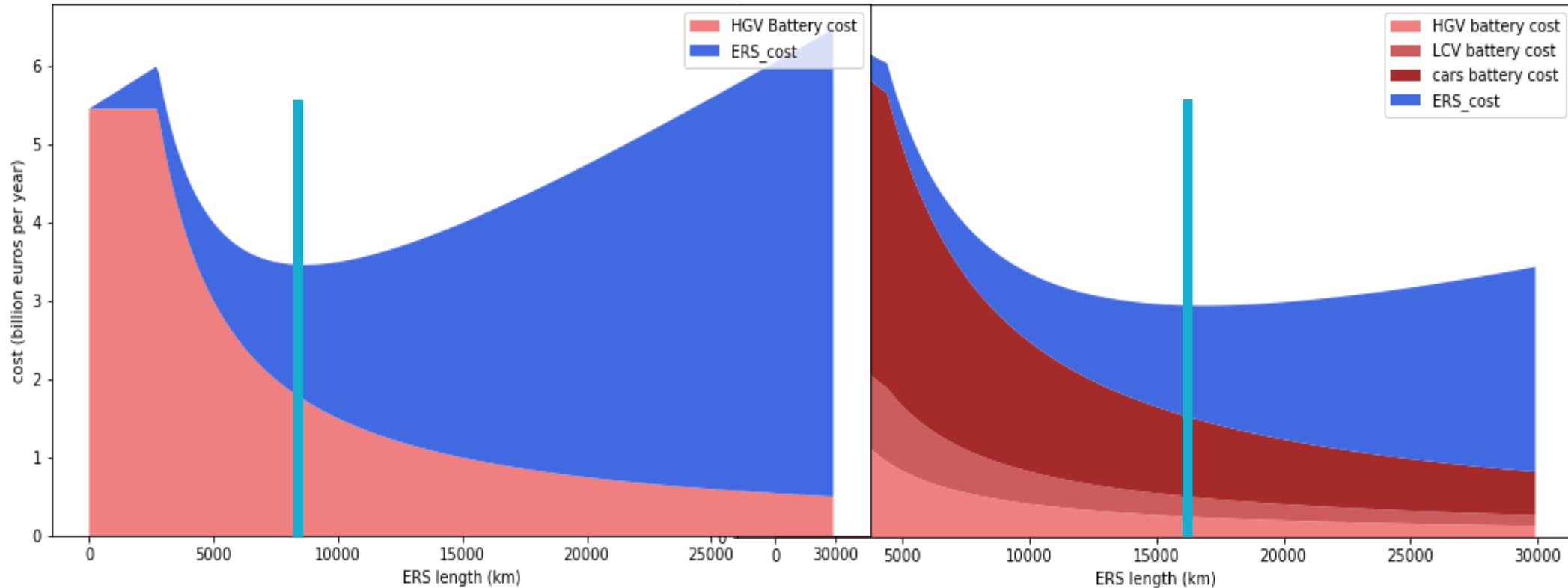
TCO  $\approx$  diesel

Investment total: 30 à 40 Mds € (concession)

Périmètre ERS : 2030 (rouge) / 2035 (noir)



# Optimisation du réseau ERS en investissement

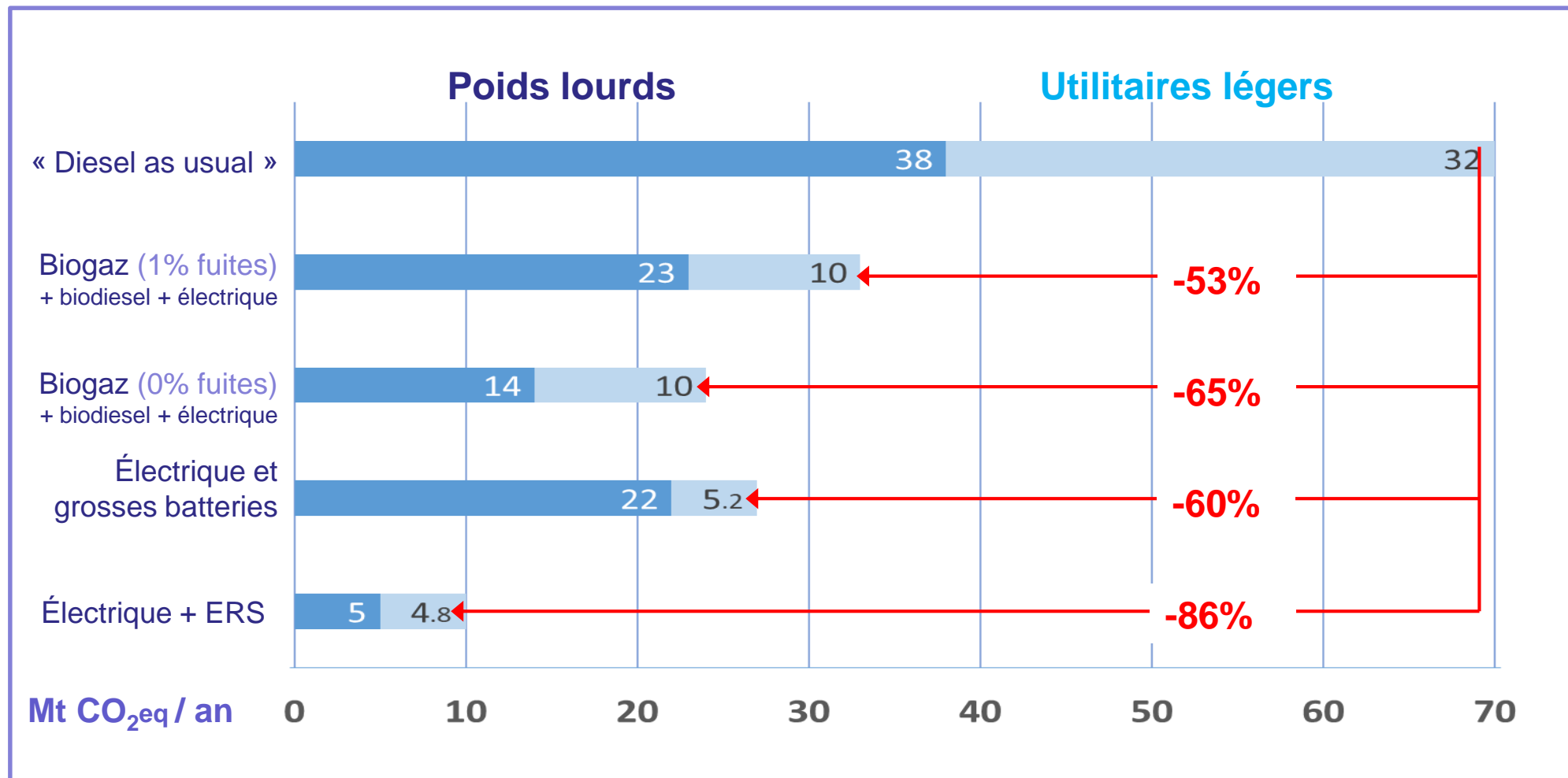


**ERS pour PL seuls**      **8 666 km**  
**ERS tous véhicules**    **16 882 km**

**254 km (autonomie)**  
**130 km (autonomie)**

*Sans prendre en compte les économies sur le réseau de bornes de recharge*

# Décarbonation comparée des solutions (ACV 2040)



*La solution conductive par le sol permettrait d'économiser 4 Mt CO<sub>2</sub> eq/an de plus avec 25% de VL ayant une plus petite batterie (40 kWh)*



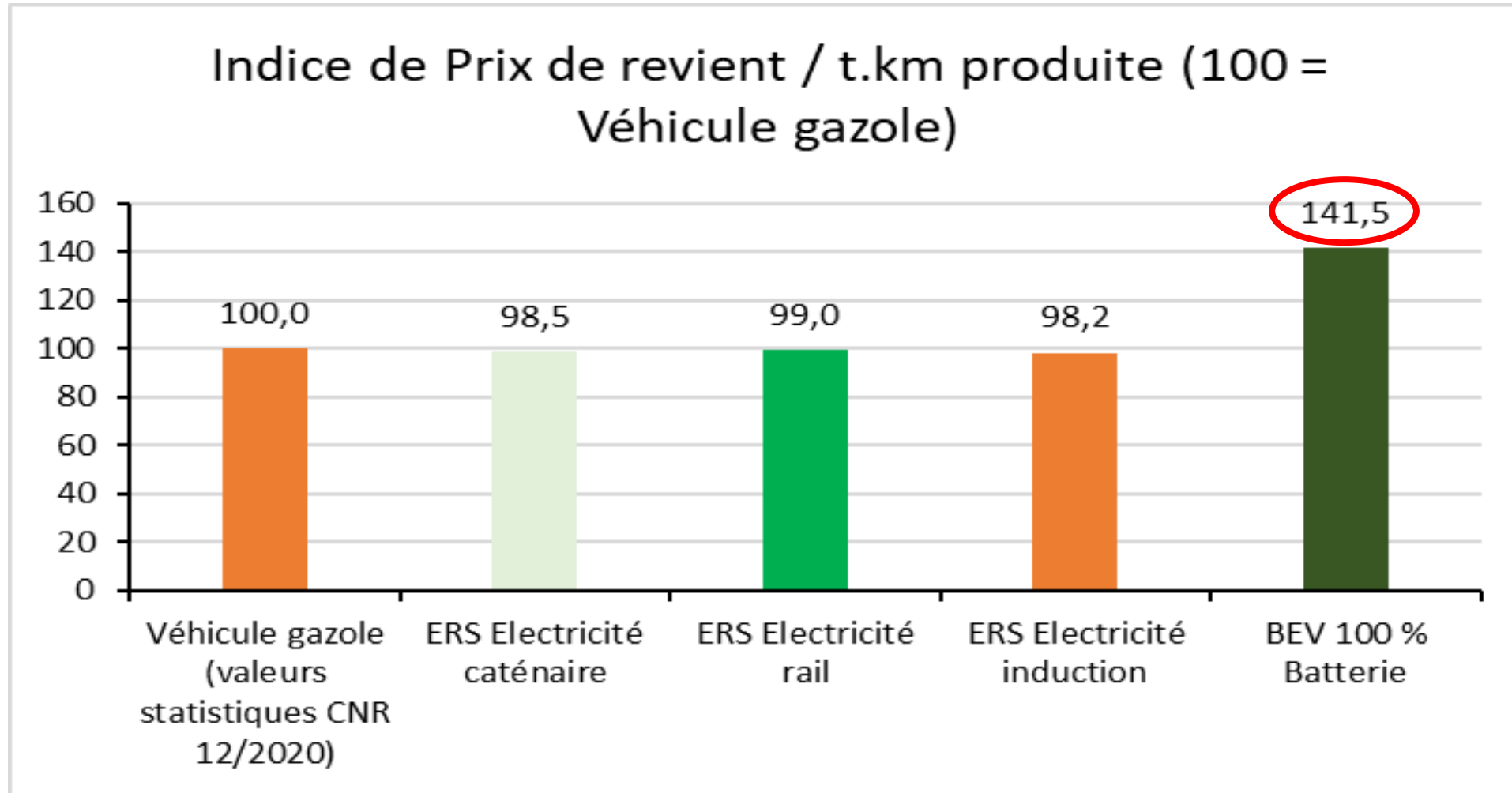
# Bilan matière et matériaux critiques

Sur 10 ans, l'ERS comparé aux seules batteries permettrait l'économie de:


- 17 Mds € de batteries (à 80 €/kWh) pour les PL, plus 4 Mds € pour les VUL et VL avec la conduction au sol (soit une économie de 10 Mt de batteries)
- 210 GWh de capacité de batteries à produire plus 50 GWh pour les VUL et VL avec la conduction au sol, à comparer à la capacité totale requise en France  $\approx$  80 GWh/an en 2030, et 135 GWh en 2040)
- 180,000 t de Nickel, le matériau le plus critique des batteries à moyen terme (et du cobalt, mais déjà largement substitué)
- $\approx$  200,000 t de cuivre



# TCO (coût total de possession) des PL



*Prise en compte des coûts véhicule + énergie*



## **4. Evaluation des technologies ERS et recommandations**

# Technologies d'ERS étudiées

8 technologies groupées en 3 familles :

- Conduction aérienne (caténares)  
Siemens
- Conduction par le sol  
Alstom, Elonroad, Elways/Evias  
+ *Honda (latérale)*
- Induction  
Electreon, WiPowerOne par  
KAIST/Olev, IPT Technology/Primove



# Groupes d'évaluateurs des technologies

- SG1 - Pouvoirs publics et régulateurs: DGITM, DSR, ADEME...
- SG2 - Constructeurs et exploitants routiers (concessionnaires): ASFA, Routes de France et leurs adhérents
- SG3 - Constructeurs de véhicules: Scania, Renault Trucks
- SG4 - Transporteurs et chargeurs: FNTR, OTRE, TLF
- SG5 - Energéticiens: EDF, Engie, Eiffage Energie Systèmes..
- + SG transversal : organismes scientifiques et techniques, consultant: Université G. Eiffel, Cerema, CEA, Meta Consulting

# Critères d'évaluation

## 63 critères regroupés en 13 familles :

- A - Interopérabilité, domaine d'emploi, maturité technologique
- B - Potentiel de décarbonation
- C – Efficacité et rendement énergétique
- D - Coûts : investissement, maintenance et exploitation
- E - Intrusivité (infrastructure, environnement)
- F - Intégrabilité dans les véhicules
- G - Santé
- H – Sécurité routière
- I - Sureté
- J - Durabilité et résilience
- K – Risques technologiques et systémiques
- L – Acceptabilité environnementale et sociale
- M - Autres

# Synthèse des résultats

## SG2 (Constructeurs et exploitants routiers)

Réponses les plus détaillées et complètes

notes sur 10

Induction	Conduction au sol	Conduction aérienne
Electreon: 7.6 WiPowerOne: 7.2	Alstom: 6.8 Elonroad: 6.2 Elways/Evias: 5.5	Siemens: 6.0
Faible intrusivité après installation	Intrusivité moyenne	Nombreux problèmes: sécurité, durabilité, contraintes d'exploitation routière

## SG5 (Energéticiens)

Conduction au sol	Conduction aérienne	Induction
8.0	6.5	4.0 to 5.0
Haut rendement, économie de matière, coût et déploiement	Bon rendement, mais infrastructure complexe, pas d'interopérabilité VL	Pas assez mature Puissance insuffisante (PL) Faible rendement

# Conduction aérienne (Siemens)

## Pros

- Technologie la plus mature, profite de l'expérience ferroviaire
- Plusieurs démos sur routes
- Pas intrusive pour les chaussées

## Cons

- Incompatible avec V et VUL
- Sécurité: pylônes (véhicules et caténaires si choc), déploiement accidentel de grue
- Sécurité en cas d'accident grave: pas d'accès hélicoptère, difficile par le côté (murets de protection),

## Cons (suite)

Mise en œuvre de grue de relevage de PL, usage de bennes (travaux)

Durabilité et résilience: 100 fois plus de passages de pantographes/jour que sur voie ferrée, débattement vertical 10 fois plus important, risques face aux événements climatiques extrêmes (vent, glace...)

Passage de ponts, trainée pantographes  
Acceptabilité visuelle?



# Conduction au sol (Alstom et Elonroad)

*Elways/Evias: pas adaptée au trafic autoroutier (vitesse, débit)  
Risque en cas de manœuvre latérale rapide, problèmes de drainage*

## Pros

- Alimentation tous véhicules
- Maturité moyenne (entre conduction aérienne et induction)
- Pas de verrous majeurs sur les critères essentiels
- Pratiquement pas de limite de puissance
- Le plus simple à installer
- Meilleur bilan matière (pas de matériau critique)

## Cons

Manque de démos sur route et autoroute  
Matériel dédié à développer pour remplacement de couche de roulement sans démonter le rail  
Etudes complémentaires à mener sur la fiabilité mécanique à long terme, et en cas de chute d'objet ou substance conductrice

# Induction (Electreon, IPT/Primove)

## Pros

- Alimentation tous véhicules
- Pas d'intrusivité après installation
- Pas de contact mécanique entre les véhicules et l'infrastructure
- Exploitation routière "as usual"

## Cons

Faible maturité, coût élevé

Manque de puissance pour propulser et recharger les batteries de PL, chute de rendement rapide si décalage latéral

Installation très intrusive (enlèvement de la couche de surface)

Incertitudes sur la durabilité et résilience, surtout sur chaussées bitumineuses: intrusion d'eau, réfection de chaussée

Le pire bilan matière (Cuivre x2-3)

Incertitudes sur la santé des usagers (surtout à haute puissance)

# Recommandations à la DGITM

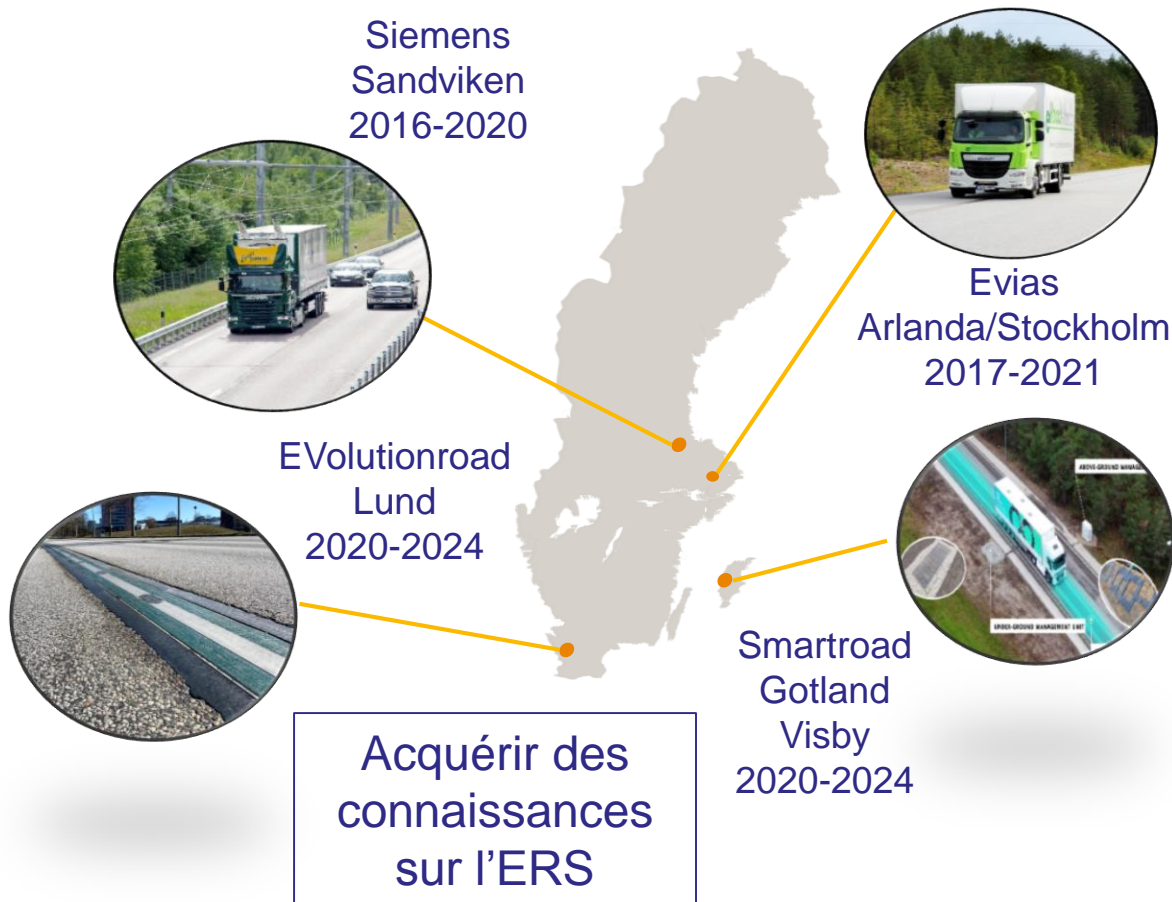
1. Induction réservée au milieu urbain, en statique pour recharge rapide (livraisons, bus, taxis, etc...), en attendant TRL 8 à 10 et meilleure efficacité énergétique démontrée par essais
2. Conduction au sol à rail creux réservé au réseau secondaire (faibles trafic et vitesse). Conduction latérale inappropriée.
3. Conduction au sol à rail plat affleurant = solution préférable compte tenu de l'état de l'art (interopérabilité, faible intrusivité en exploitation, faible impact sur la sécurité routière, haute efficacité énergétique et bon bilan matière, bonne durabilité...
4. ... mais requiert des essais à grande échelle sur route
5. Conduction aérienne peut répondre au besoin pour les PL mais exclusion des voitures et VUL, fortes contraintes d'exploitation.  
Réservée si les deux autres technologies ne répondent pas aux spécifications.

**Appel à projet BPI France en 2022... projets sélectionnés attendus**

## **5. ERS en Europe et travaux PIARC**

# ERS en Suède

Forte mobilisation: Trafikverket, VTI, université de Lund, WSP, Scania, Volvo, accords décarbonation/climat avec l'Allemagne et la France, essais sur sites des 3 familles de technologies:



**E20  
Hallsberg – Örebro,  
21 km (2023-24)**



**2400 km ERS  
Serait possible**



# ERS en Allemagne (1)

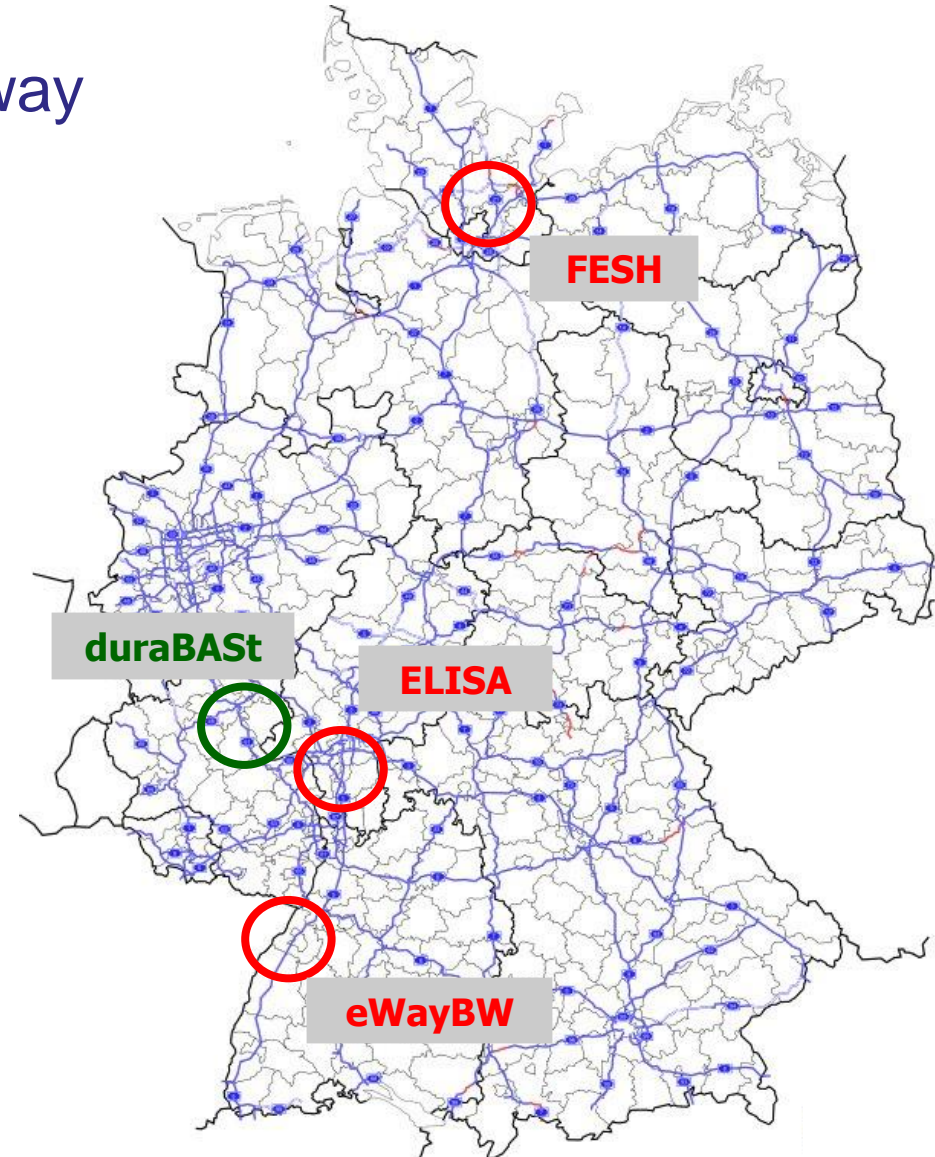
## Conduction aérienne (caténaire) - eHighway

**ELISA** (Hesse) Mai 2019-Mars 2023:  
A 5 Frankfurt – Darmstadt (10-12 km)  
Trafic très intense  
12 poids lourds en essai

**FESH** (Schleswig-Holstein) Décembre 2019:  
A1 Hamburg – Lübeck (10 km)  
Hinterland portuaire  
5 poids lourds en essai

**eWayBW** (Baden-Württemberg) Juillet 2021:  
B462 Gernsbach – Kuppenheim (4 km)  
Traversée urbaine  
5 poids lourds en essai

Induction - duraBAST



# ERS en Allemagne (2)

- Conduction aérienne (caténaire)
  - Suivi et évaluation des 3 essais sur sites
  - Evaluation technique des déploiements
  - Efficacité de l'alimentation électrique et de la recharge des batteries embarquées
- Induction
  - Première installation de démonstrateur par la BASt, site d'essai et de référence (duraBASt) en développement
  - Evaluation des aspects de construction routière
  - Efficacité de l'alimentation électrique et de la recharge des batteries embarquées



# COLLERS – un partenariat pour l'innovation



## *Systemes de route électrique (ERS)*

Suède, Allemagne et France ont décidé de travailler ensemble pour améliorer les technologies d'ERS et identifier les moyens d'assurer l'interopérabilité transfrontalière au niveau européen pour un large déploiement de l'ERS.

Projet d'action COST Transport à soumettre en 202

**Symposium** à Berlin: 14-15 février, 2023.

# PIARC – TF2.2 sur l'ERS



- TF2.2 “Electric Road Systems” couvre le champs de l'ERS.
- Partage de connaissances et d'expériences issues de projets de recherche et développement nationaux et de démonstrateurs.
- Diffusion des connaissances sur l'ERS, au-delà des technologies, recensement des parties prenantes potentielles, des modèles économiques, interopérabilité, stratégies et politiques nationales.
- Elaboration de recommandations pour accélérer le déploiement de l'ERS et une future coopération internationale grâce à PIARC.
- Rapport final sera présenté au XVII<sup>e</sup> congrès mondial de la route PIARC à Prague, 6-10 octobre 2023

**Merci pour votre attention !**

**Bernard Jacob**

[bernard.jacob@univ-eiffel.fr](mailto:bernard.jacob@univ-eiffel.fr)

