

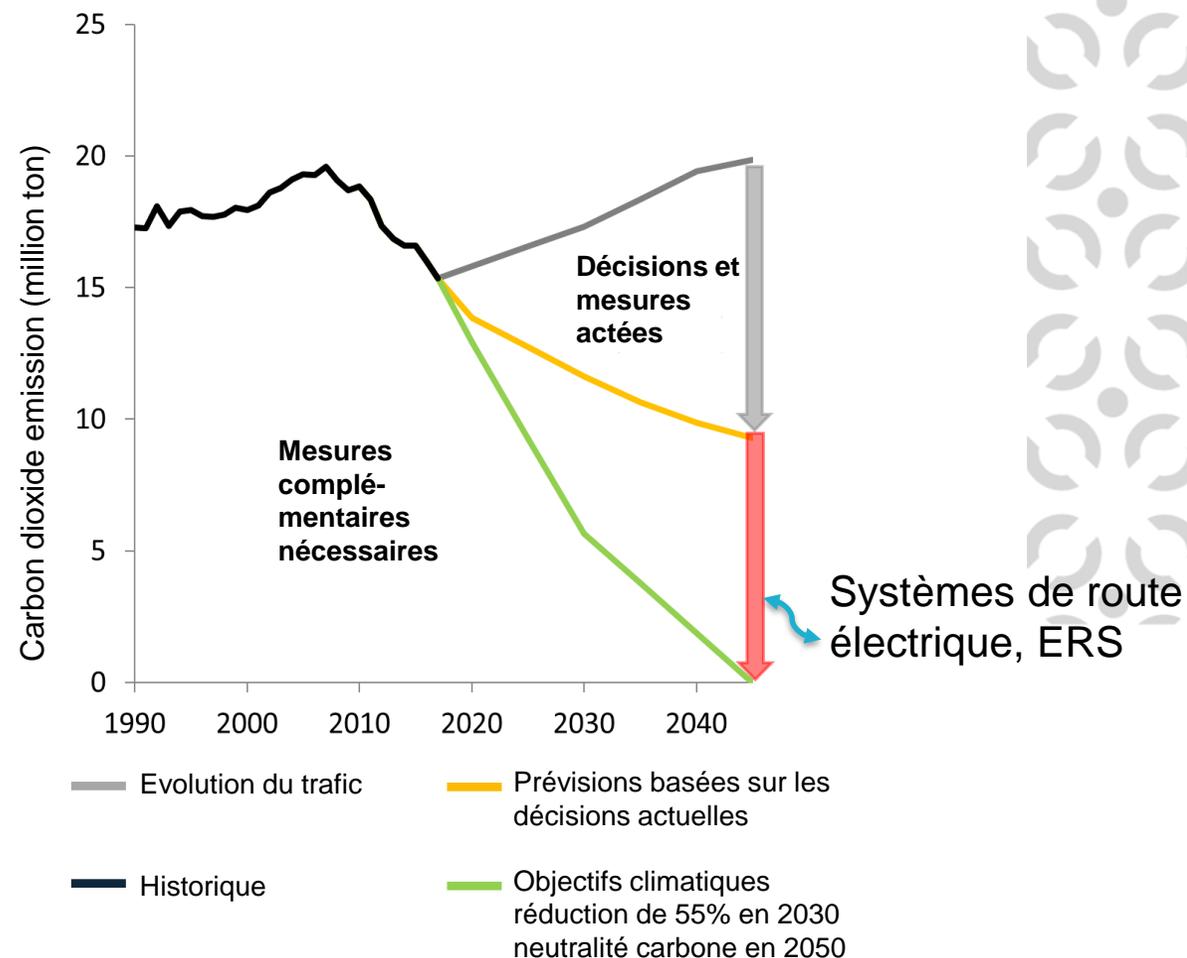
**Bernard Jacob**

Université Gustave  
Eiffel

# Perspectives et technologies de l'ERS pour décarboner le transport routier

# Défis de la décarbonation du transport routier

- - 55% d'émissions en 2030 par rapport à 1990 (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



# 1. Solutions de décarbonation

# Gaz et Biocarburants

OK transition 2023-35, pas long terme

## Gaz fossiles

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

## Biogaz

- Fermentation de matières organiques, surtout CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>

## Biodiesel

- Produit à partir de l'agriculture

## Biogaz (biométhane)

- Besoin 40 TWh en 2050 si partage avec biodiesel (prod. actuelle 13 TWh)
- Forts gains énergétiques (-40%) et performance GES (-90%) en ACV... mais annulés par 3% 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

**Ne décarbonent pas complètement**

# Hydrogène: quelques bases physiques et chiffres

- L'hydrogène (non natif) n'est PAS une source d'énergie, mais un stockage...
- ...à coût énergétique élevé si électrolyse (x3):



- Pas d'énergie fatale avec part renouvelable <15 à 20%
- Vapo-réformage du CH<sub>4</sub> + **capture et séquestration du CO<sub>2</sub>**  
**ou thermolyse + vapo-craquage de la biomasse** - OK mais cher, long terme
- 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)
- Pour PL: masse et volume (+4 m<sup>3</sup>, 3 t), coût (TCO x3), 6 à 10 tranches nucléaires

# Batteries et bornes de recharge rapide

## Batteries

### Li-Ion (NMC, LFP) / LMP / Li-Air solid

- Densité: 270 à 170 Wh/kg (10 à 20 fois moins d'énergie massique que diesel), (450 Wh/kg pour Li-Air solid)  
-20 à 30% rapporté au poids pack
- Matériaux critiques Li, (Ni, Co si NMC)
- Durée vie: 1500 à 2000 cycles **sauf froid et recharge rapide**, LFP 4000, (2000 Li-Air solid)  
VL: 8-12 ans, PL: 2-3 ans
- Coût  $\approx$  120 \$/kWh...  
PL: TCO + 15 à 40%
- Risques incendie, échauffement...
- Recyclage énergivore

## Bornes de recharge rapide

- VL : 43 à 70 kW, jusqu'à 150-250 kW (Tesla)
- PL: 750 kW à 1 MW (recharge en 45 min, 750 kWh pour 400-450 km)  
 **$\Rightarrow$  75 à 100 MW/parking !!**  
**Alimentation RTE, foncier pour transformation (1 ha/parking)**
- Coût élevé: 0,5 à 1 €/kWh contre 0,15 à 0,20 part. et pros (1/2023)
- Durée de vie batterie de 1800 cycles (3 ans)
- Refroidissement et maîtrise risques

## Grosses batteries

1200 kWh, 150 k€, 6 t (-25 à 40% CU)

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

# Pourquoi l'ERS ?

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

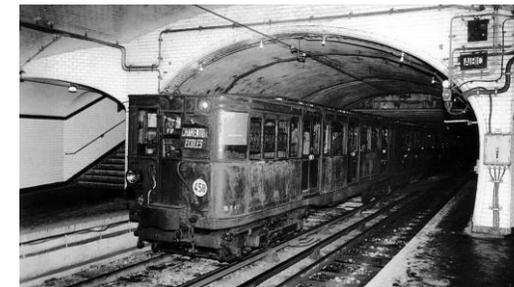
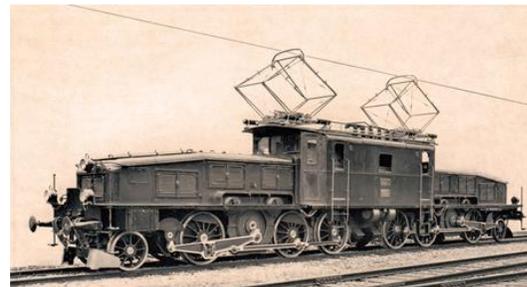


Locomotives à vapeur et tender à charbon



→  
1900

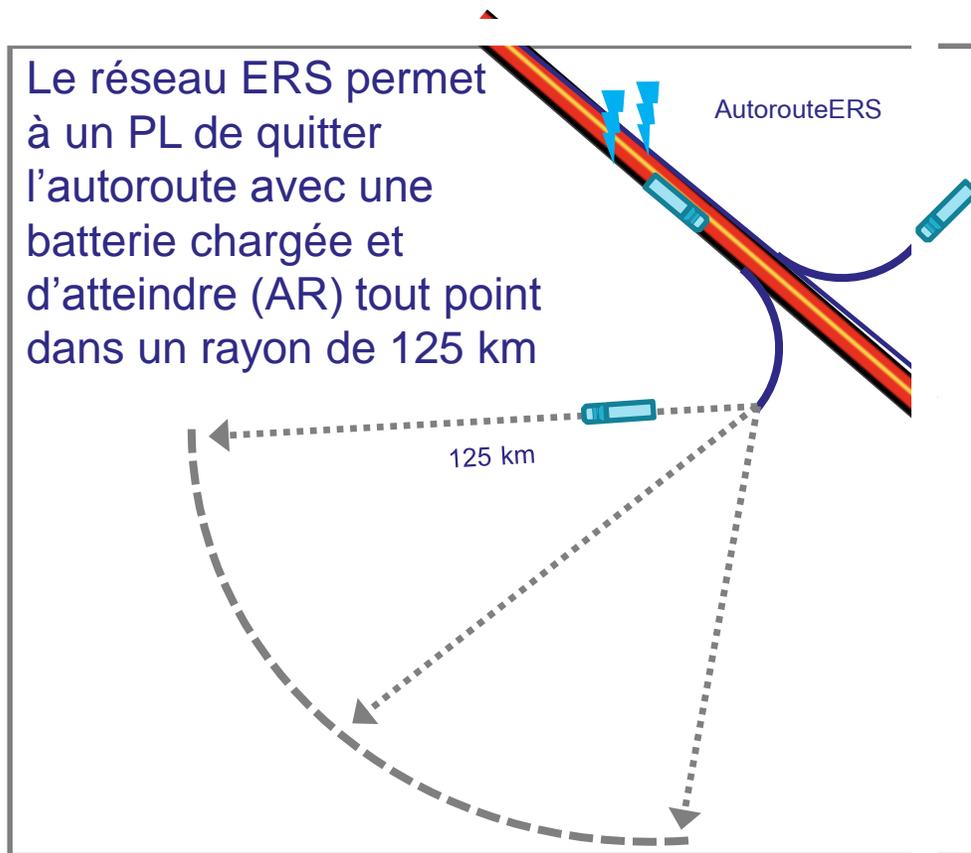
Locomotives électriques, métros et trams alimentés en marche



# Déploiement proposé de l'ERS en France

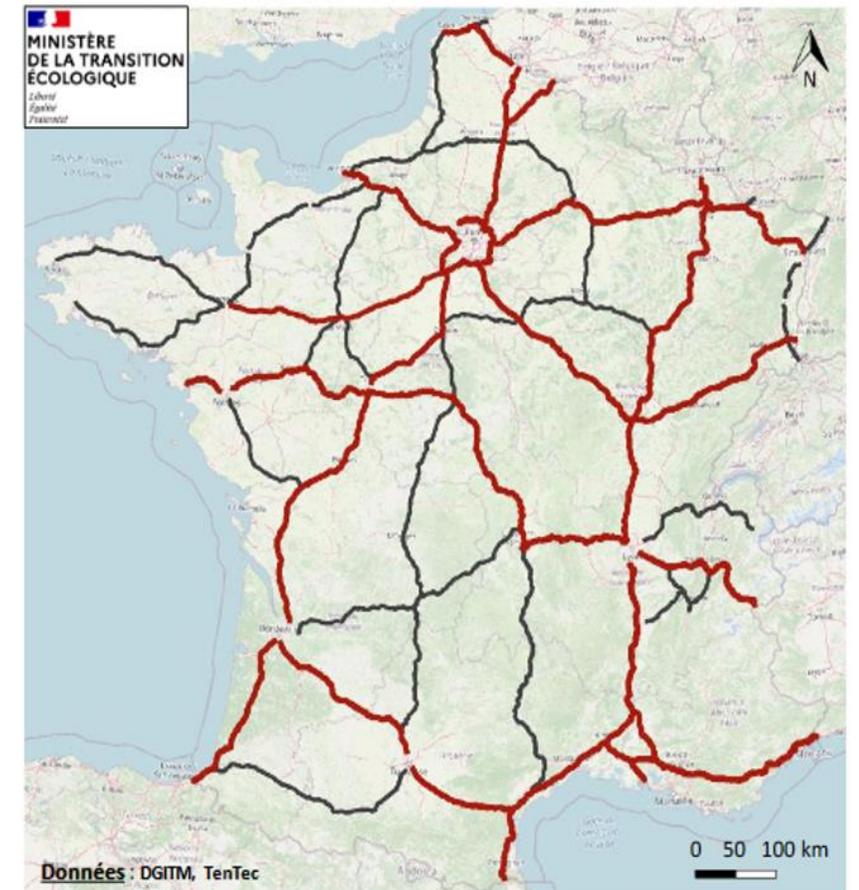
Réseau RTE-T Phase 1 : 4,900 km  
Phase 2 : 3,950 km  
Total : 8,850 km

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

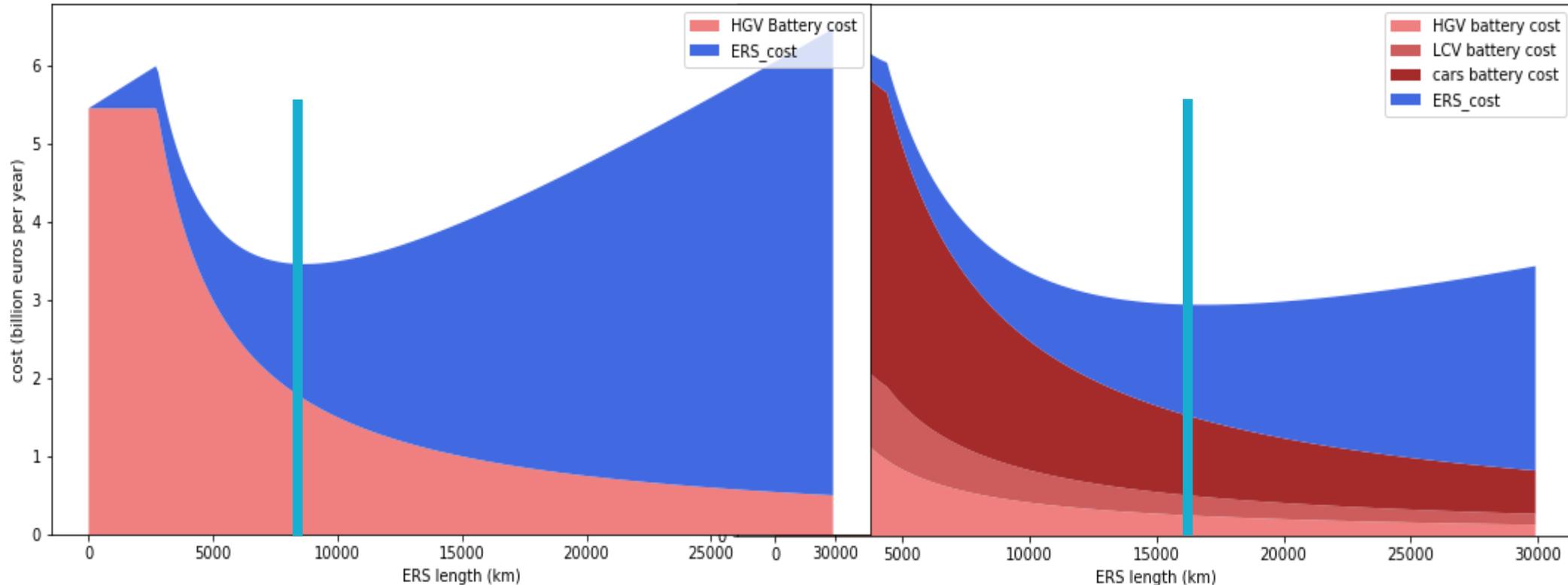


Batteries réduites de 2/3 (370 kWh pour un PL)  
Puissance max.: 350 à 400 kW/PL  
Décarbonation: -85%  
TCO  $\approx$  diesel  
Investissement total: 30 à 40 Mds € (concession)

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



# Optimisation du réseau ERS en investissement

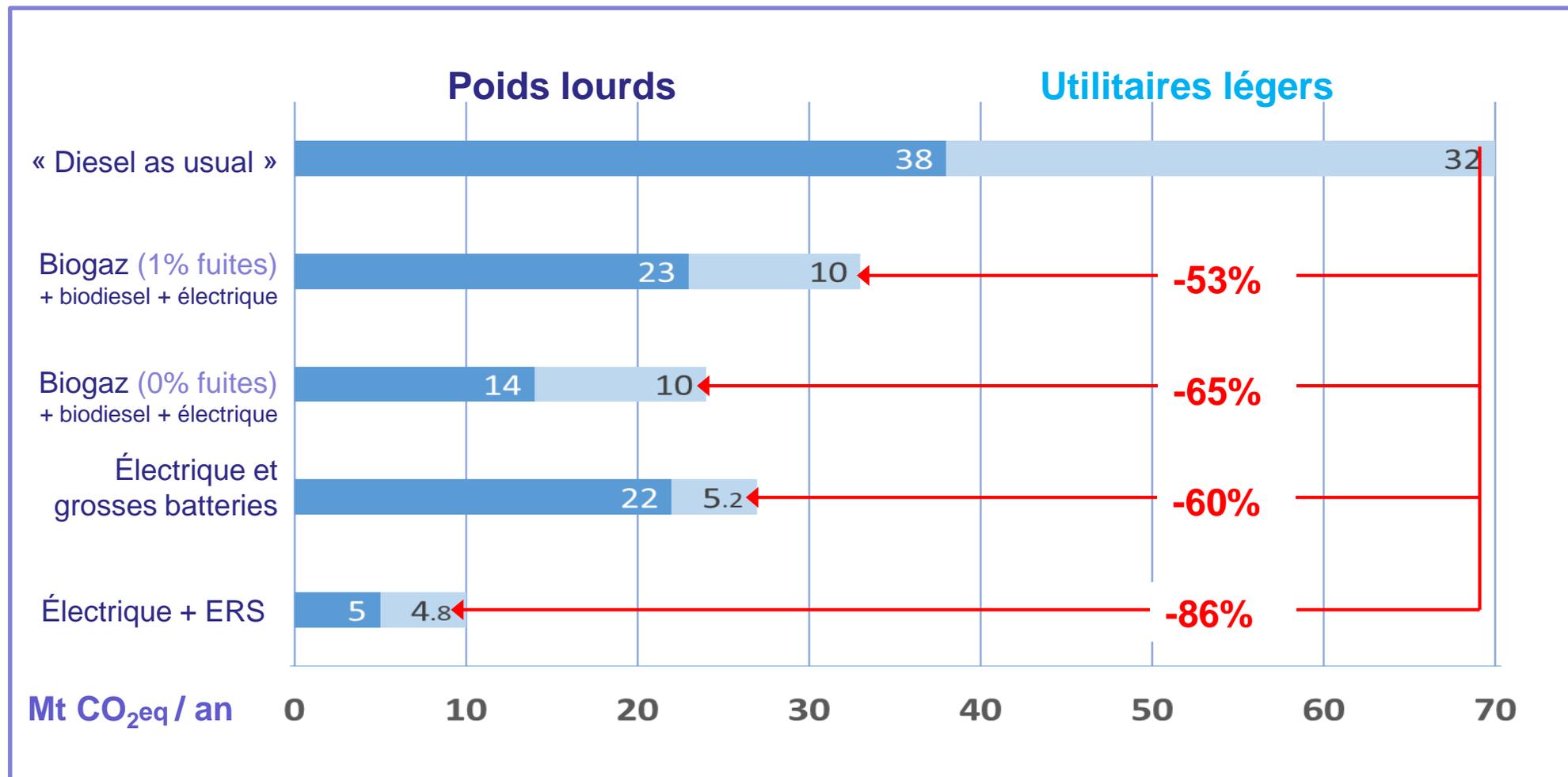


**ERS pour PL seuls      8 666 km**  
**ERS tous véhicules    16 882 km**

**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)



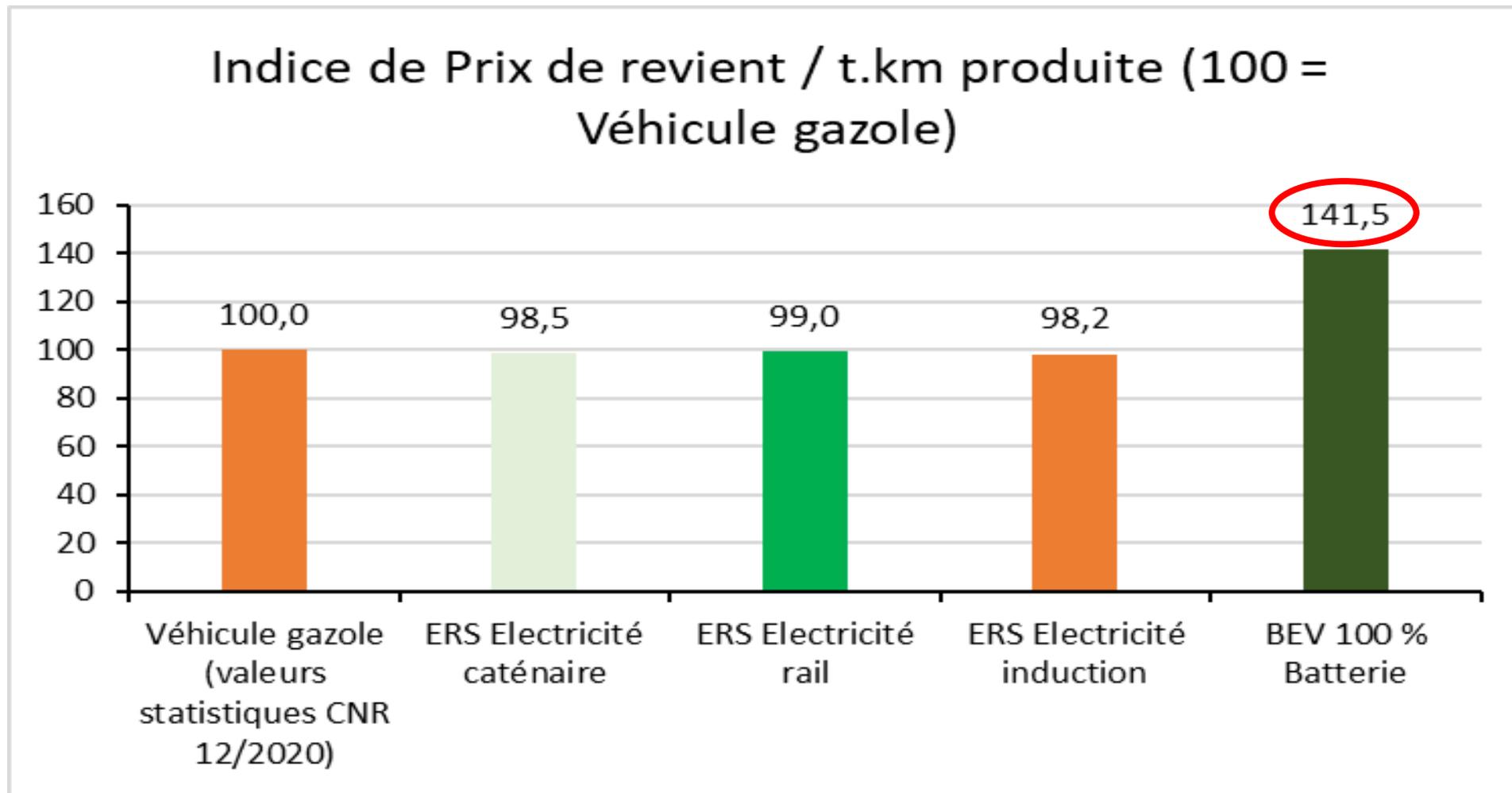
*La solution conductive par le sol permettrait d'économiser 4 Mt CO<sub>2</sub> eq/an de plus avec 25% de VL ayant une plus petite batterie (40 kWh)*

# 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



**H2:**  
**TCO + 300%**

*Prise en compte des coûts véhicule + énergie*

# 3. 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
- Induction  
Electreon, WiPowerOne par  
KAIST/Olev, IPT Technology/Primove



# 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)

# Perspectives de l'ERS et situation européenne

- Projets soutenus par BPI France
  - Charge as you Drive: Vinci Autoroutes, Uni. Gustave Eiffel, etc., 2 technologies  
Sites d'essai: fermé + autoroute
  - eRoad Mont-Blanc: ATMB, Alstom, Uni. Gustave Eiffel, etc., 1 technologie, 2 phases  
Essais TRANSPOLIS puis RN205
- Potentiel de décarbonation à coût raisonnable, bilan matière > autres solutions.
- L'ERS peut rendre les VE accessibles à tous et maintenir la compétitivité du TRM
- Encore besoin d'essais à grande échelle et points à approfondir, dont acceptabilité et modèle économique
- Au niveau européens 3 questions + projet action COST + TF2.2 PIARC :
  1. déploie-t-on l'ERS dans l'UE ?
  2. si oui, selon quel(s) scénario(s) et calendrier ?
  3. avec quelle(s) technologie(s) et interoperabilité ?

# Références bibliographiques

- Jacob, B. (2023), La route électrique pour la décarbonation du transport routier, revue TEC, n° 256, janvier, 34-35.
- Ollinger, E., Jacob, B., Pelata, P., Hautière, N., Levesque, S., Rossigny, P., Chaniot, P., Raynal, M., Perdu, F., Giret, A. (2022), Les ERS pour décarboner le transport routier, Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), n°989, mars-avril, 32 pages.
- Ministère de la Transition Ecologique (2021), Rapports des GT1, 2 et 3 sur le système de routes électriques, <https://www.ecologie.gouv.fr/lautoroute-electrique>
- Jacob, B. (2021), Décarboner le transport routier de marchandises à longue distance, Transports, Infrastructures et Mobilités (TI&M), n°525, janvier-février, 53-56.
- PIARC (2022), Electric Road Systems – A PIARC Collection of Case Studies, 2022R31EN, <https://www.piarc.org/ressources/publications/source/1/e45132b-39726-2022R31EN-Electric-Road-Systems-PIARC-Case-Studies.pdf>
- PIARC (2018), Electric Road Systems: a solution for the future, 2018SP04EN, <https://www.piarc.org/ressources/publications/10/29699,2018-SP-04EN.pdf>

**Merci pour votre attention !**

**Bernard Jacob**

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

