

**Bernard Jacob**

Université Gustave  
Eiffel

**Marc Raynal**

Cerema / DTech ITM

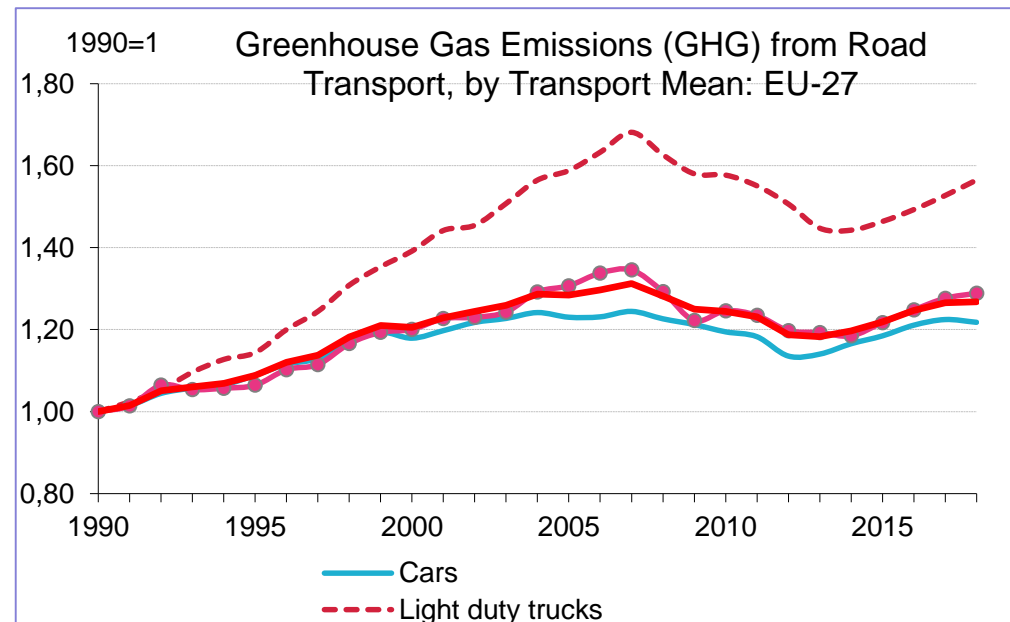
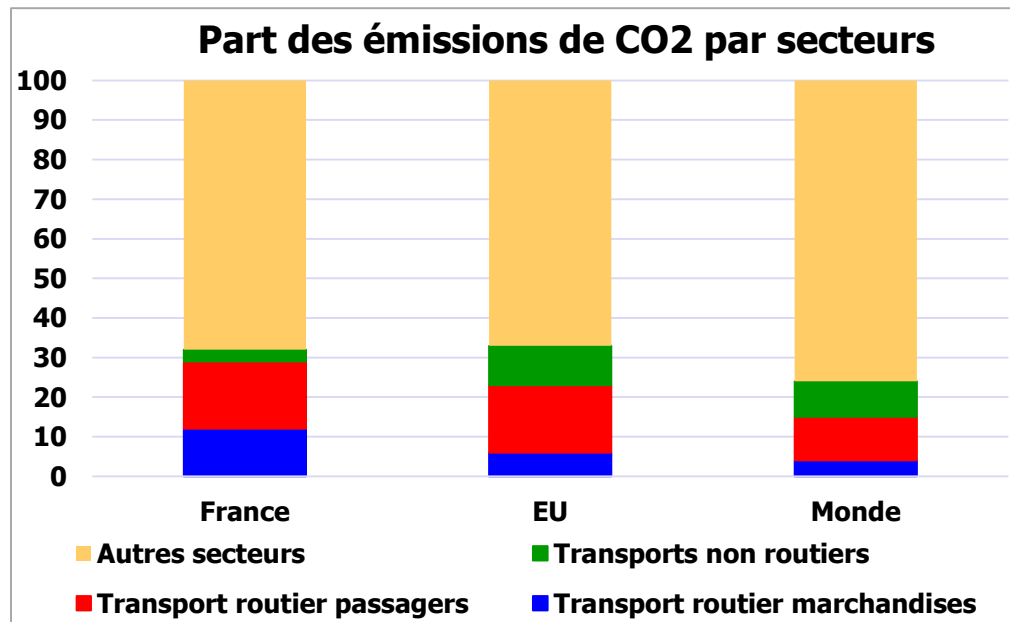
# L'ERS pour la décarbonation du transport routier



# 1. Enjeux et défis

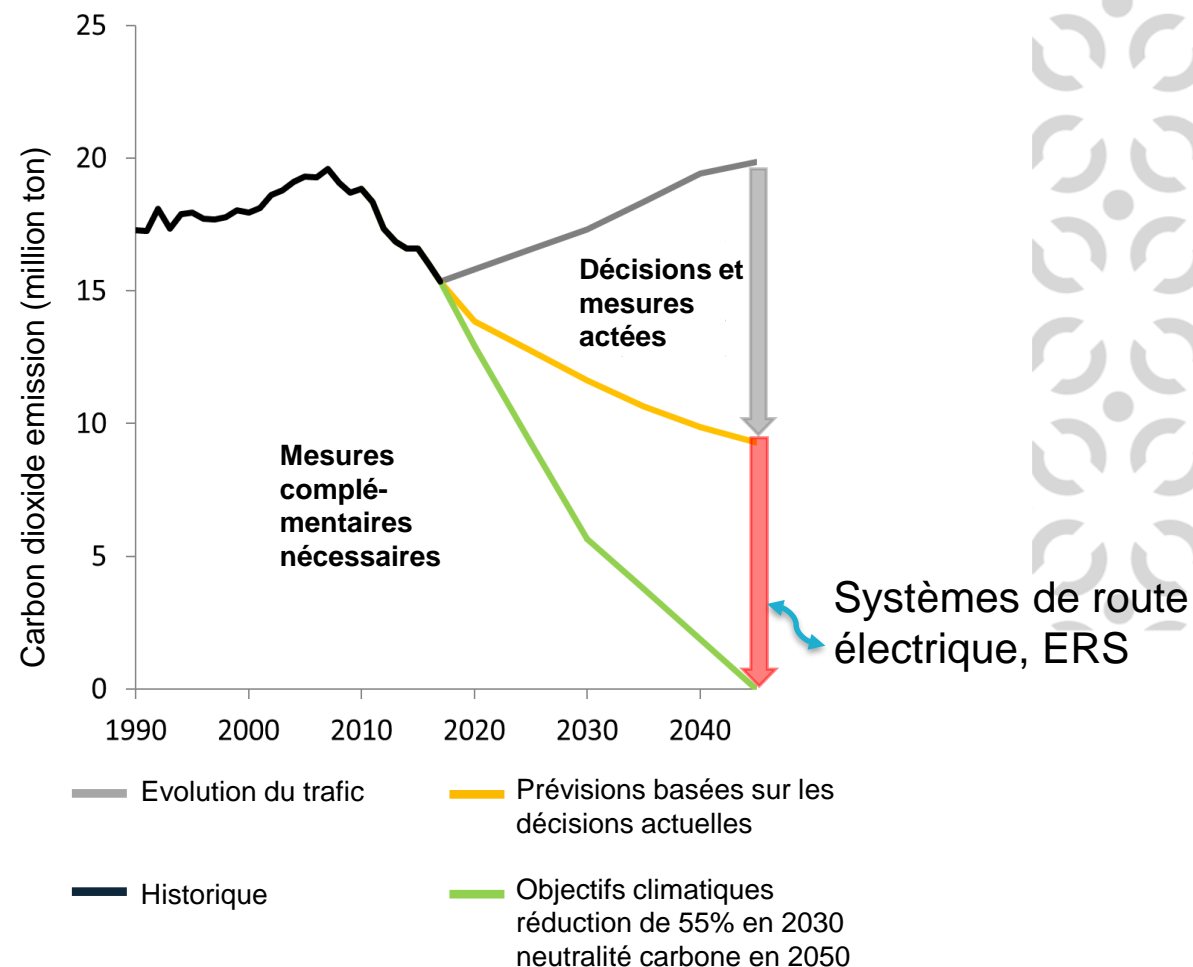
# Enjeux de la décarbonation du transport routier

- 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)
- 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 (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: 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

## 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) / LMP / Li-Air

- Poids: 150 à 250 Wh/kg (10 à 20 fois moins d'énergie massique que diesel), 500 Wh/kg pour Li-Air
- Matériaux critiques (Ni, Co)
- Coût 120 à 150\$/kWh  
PL: TCO + 15 à 40%  
Durée vie: 1000-1500 cycles **sauf froid et recharge rapide**, 2000 (Li-Air)  
VL: 8-12 ans, PL: 2-3 ans
- Risques incendie, échauffement...
- Recyclage énergivore

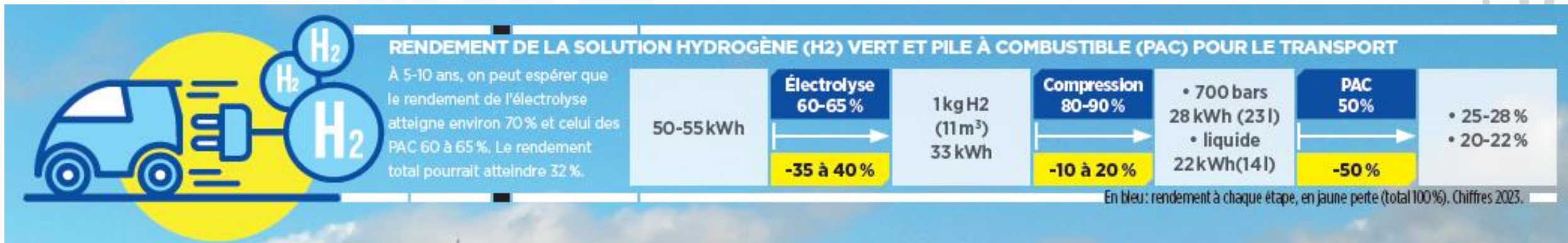
## Bornes de recharge rapide

- 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)  
⇒ **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 tranches de centrales nucléaires)

Avec ERS et batteries:

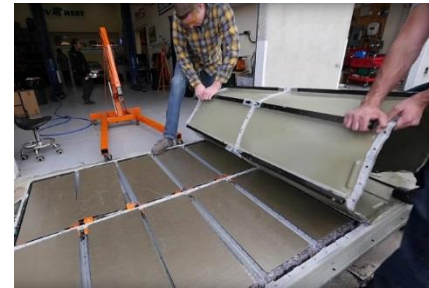
-60% d'électricité, - 5 centrales !

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

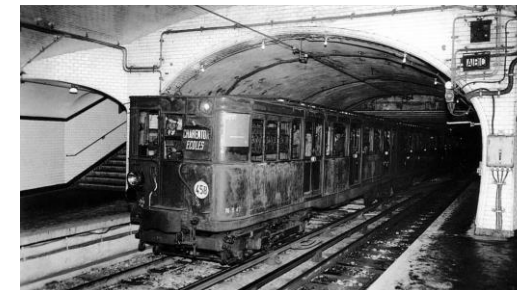
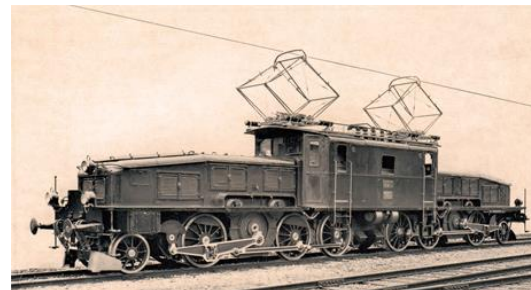


Locomotives à vapeur et tender à charbon



→  
1900

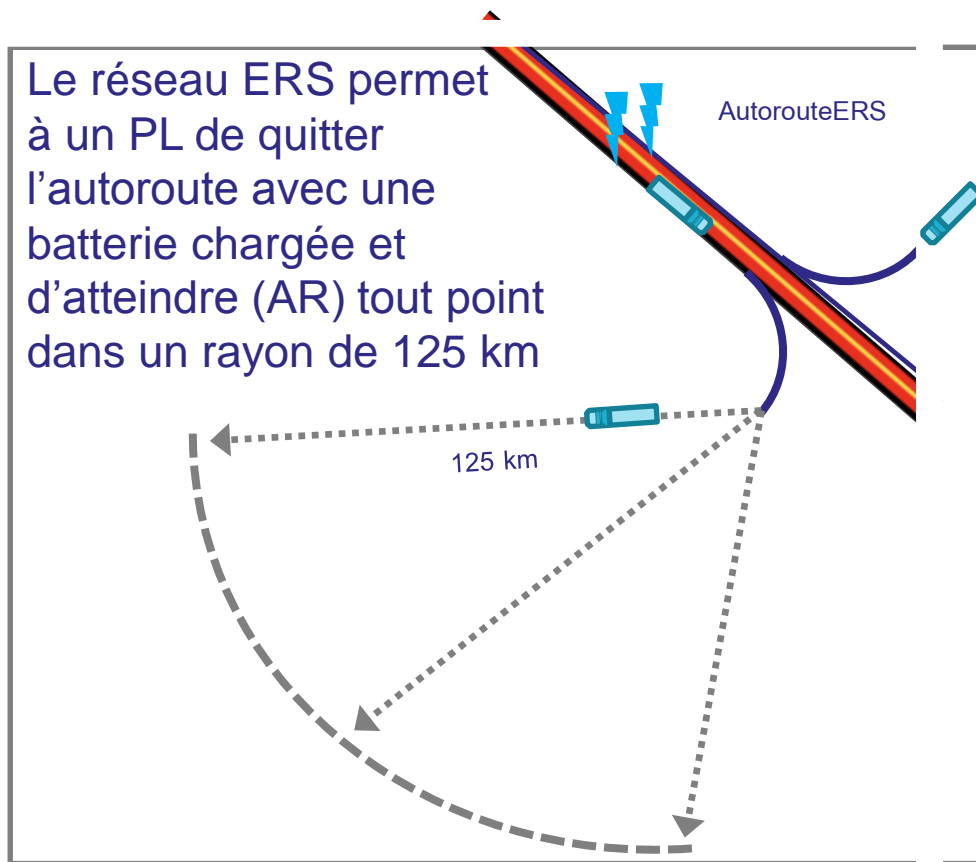
Locomotives électriques, métros et trams alimentés en marche



# Déploiement proposé de l'ERS en France

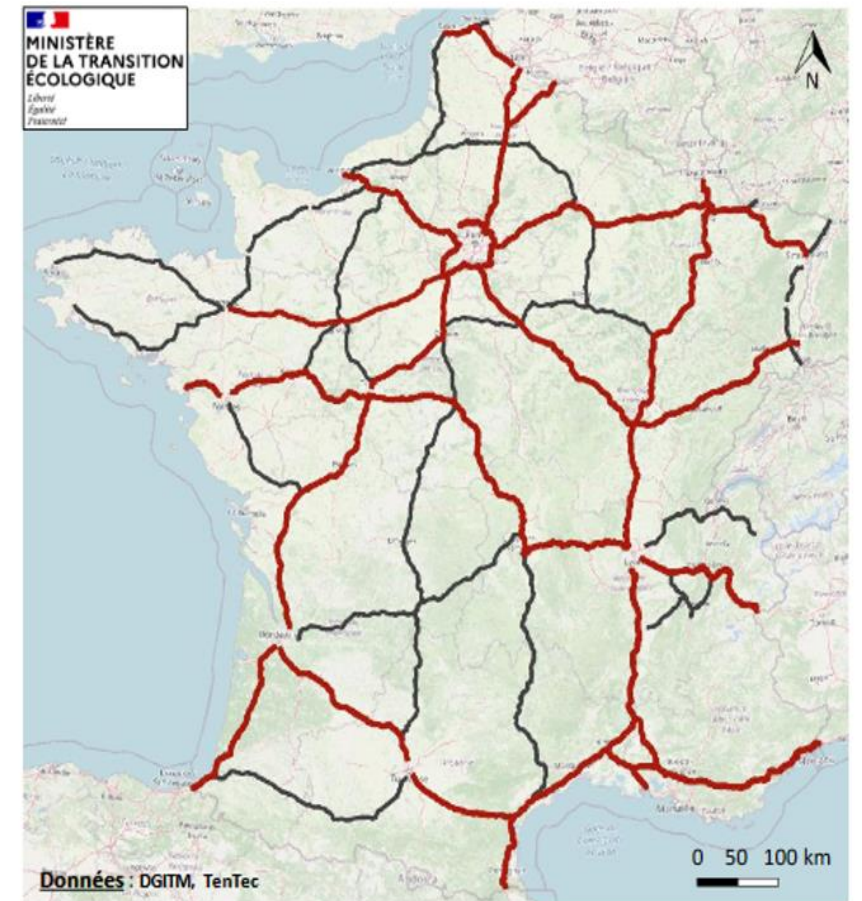
Réseau RTE-T Phase 1 : 4,900 km  
Phase 2 : 3,950 km  
Total : 8,850 km

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

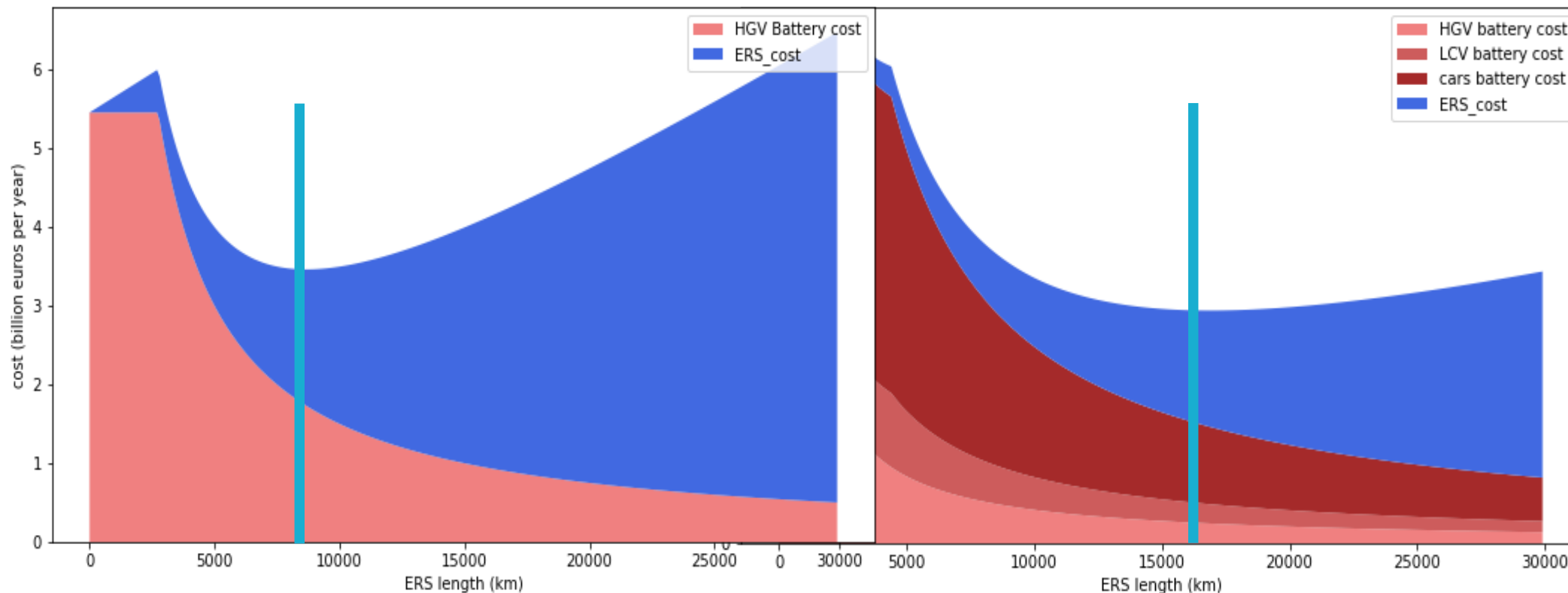


Batteries réduites de 2/3 (380 kWh pour un PL)  
Puissance max.: 400 kW/PL  
Décarbonation: -85%  
TCO  $\approx$  diesel  
Investissement total: 30 à 40 Mds € (concession)

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



# Optimisation du réseau ERS en investissement

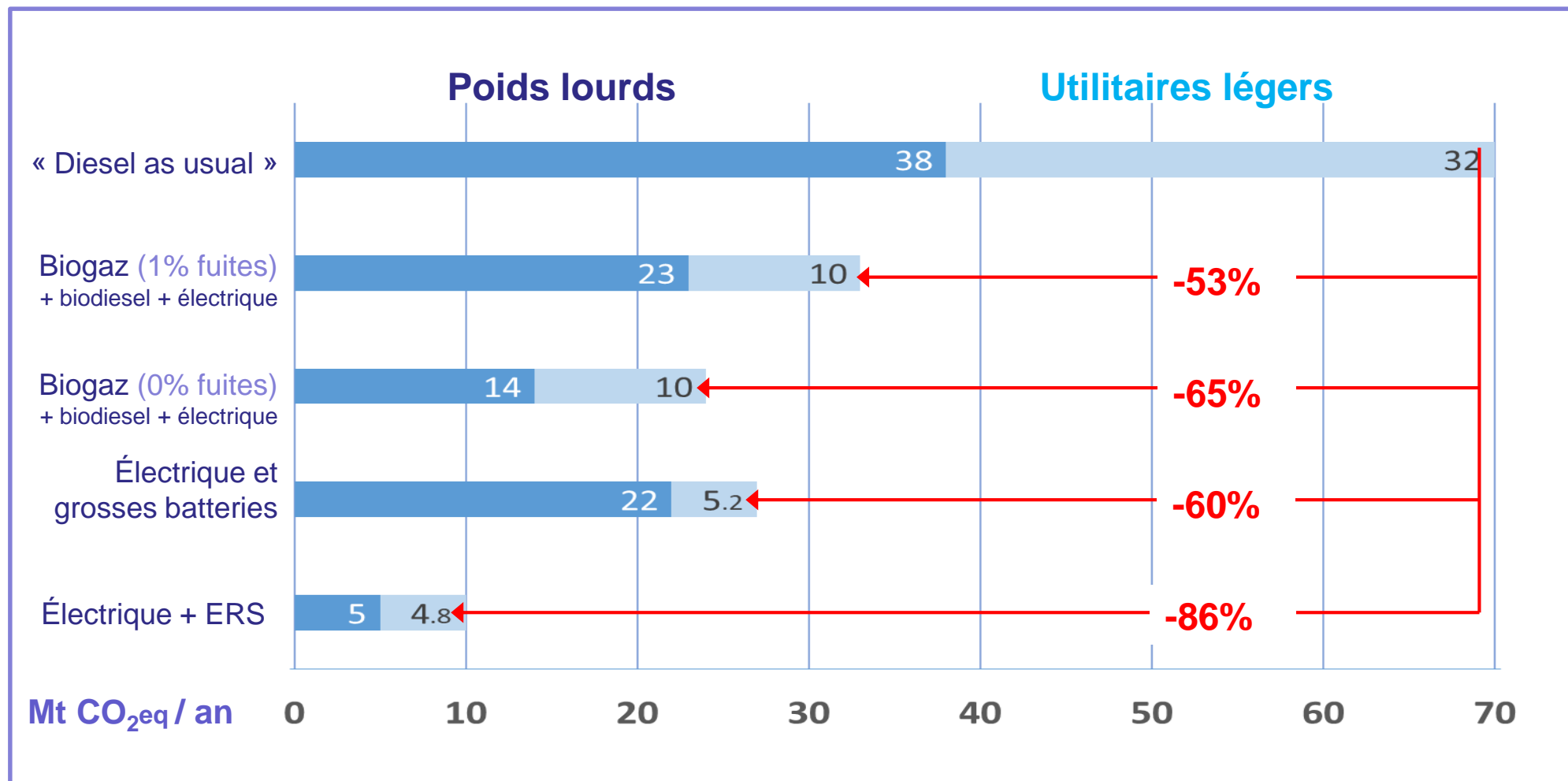


**ERS pour PL seuls**      **8 666 km**  
**ERS tous véhicules**    **16 882 km**

**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)*



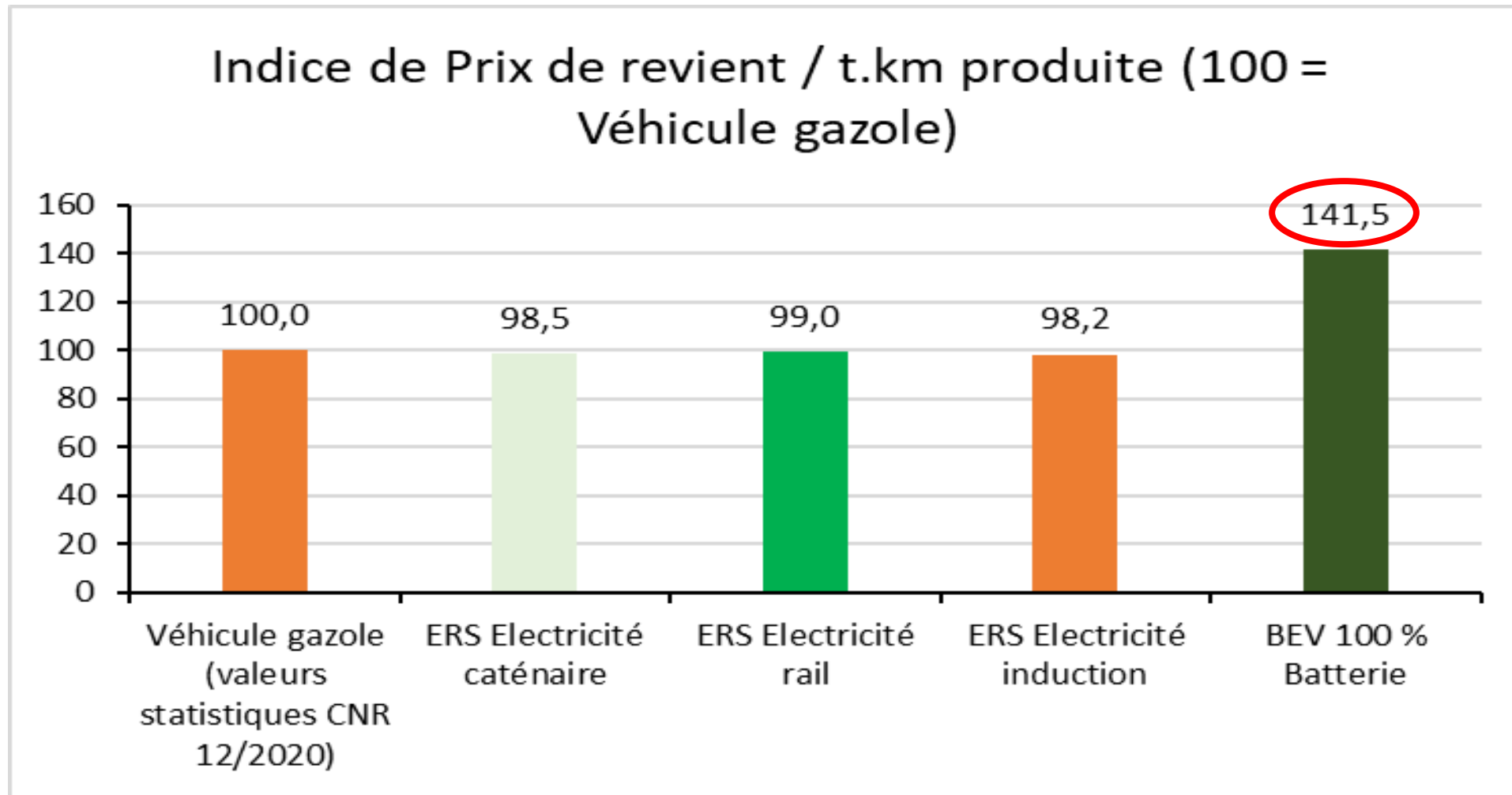
# Bilan matière et matériaux critiques

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



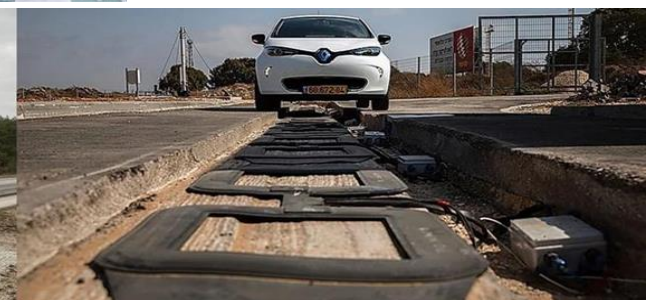
*Prise en compte des coûts véhicule + énergie*

# 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
- 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

# 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 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...
3. ... mais requiert des essais à grande échelle sur route
4. 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 en 2023**



# 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)

