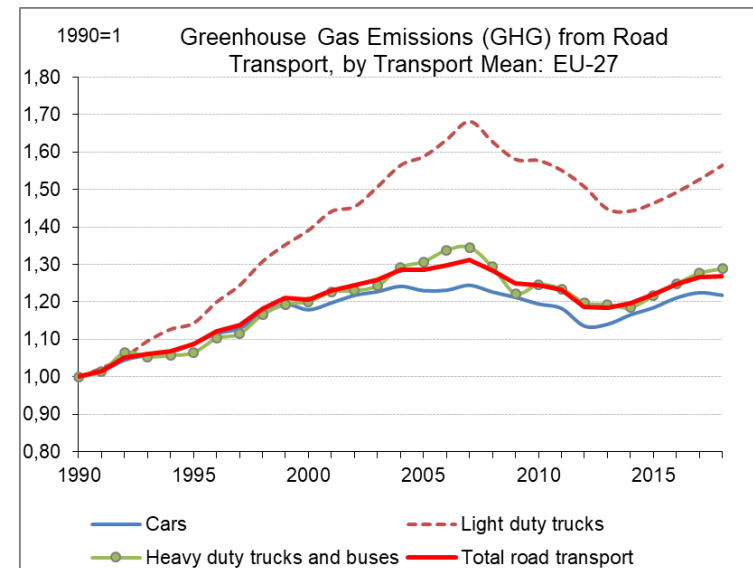
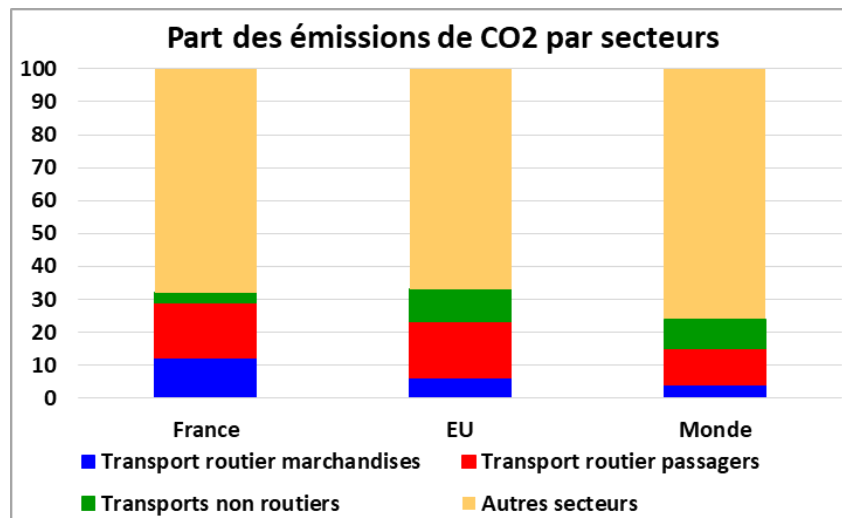


L'électrification du transport routier : des solutions et leurs limites

Fabienne Anfosso Lédée
Université Gustave Eiffel – Département MAST

Enjeux de la décarbonation du transport routier

- **Loi énergie climat, 2019 :**
 - **Abandonner les énergies fossiles : -40% d'ici 2030** (ref 2012)
 - **Neutralité carbone en 2050**
- **En France, transports = 32% des émissions de CO₂, dont 29% routier et 12% TRM (PL+VUL)**
- **+27% d'émissions du transport routier de 1990 à 2018**



Quelle solutions pour la décarbonation

- **5 leviers de la décarbonation**

- **Modération de la demande transport (sobriété)**

- **Report modal**

- **Taux de remplissage des véhicules**

- **Efficacité énergétique des véhicules**

- **Intensité carbone de l'énergie**

} Limités en pratique

} Déjà largement mis en œuvre

Biocarburants
Electrification, batteries
Hydrogène
Route Electrique (ERS)



Quelles perspectives ?

Quels impacts en termes d'infrastructure routière ?

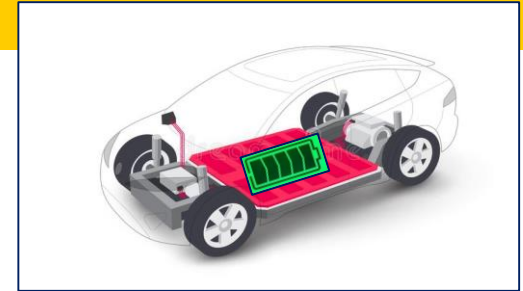
Gaz et biocarburants

- **Ne décarbonent pas complètement !**
- **GPL** (de pétrole liquéfié) :
 - fossile, 200-300 bars, VUL et VL ;
- **Biodiesel** (issu d'huile végétale ou animale) :
 - produit à partir de l'agriculture, donc pb de substitution de terres agricoles
 - Gain énergétique -30%, mais émission de GES en ACV 4 fois > biogaz
- **Biogaz** (méthane issu de la biomasse) :
 - GNV (biométhane) : bus et PL ; GNL naturel liquéfié (-163°C)
 - Forts gains énergétiques PL (-40%) et performance en ACV
 - mais attention aux fuites et concurrence avec chauffage, production électrique



Batteries

- **Autonomie : des progrès récents**
- **Compromis à trouver entre performance/coût/masse/durabilité**
- **Perspectives : des coûts qui ne vont pas baisser**
 - **Matières 1^{ères} rares et chères, la demande « explose »**
 - **Procédés encore nouveaux et coûteux en énergie, notamment au niveau du recyclage**
- **Les batteries nécessitent des infrastructures de recharge**
 - **Domestiques**
 - **Bornes de recharge rapide**
 - **L'ERS ?**



Recharge de batteries : scénarios d'usage pour VL et VUL

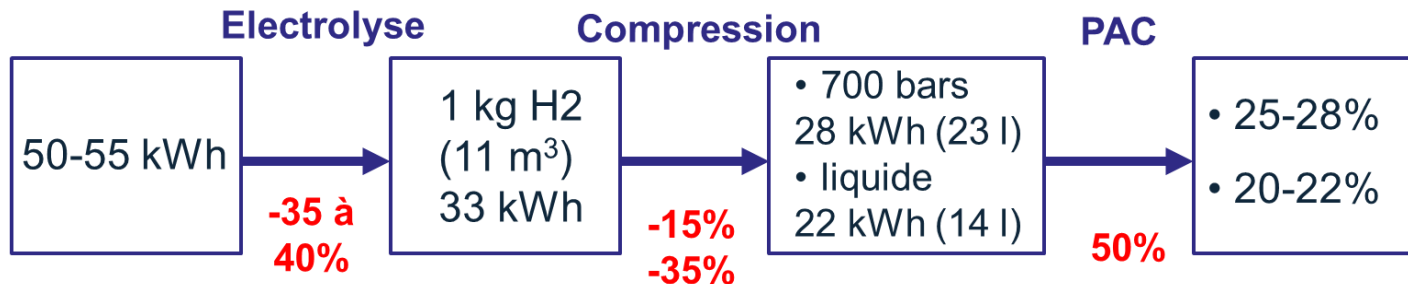
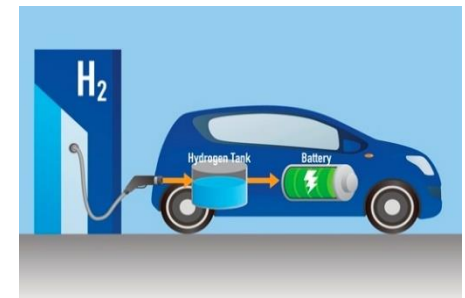
- **trajets du quotidien < 50 km (90%), urbains ou périurbains** : une autonomie de 100 km permet une **recharge à domicile** (lente, nocturne)
- **trajets ponctuels à + longue distance** : pour 800 km d'autonomie, solutions envisagées :
 - **échange de batteries (swap)**: pas souhaité par les constructeurs
 - **location de remorque transportant batteries de recharge**
 - **prêt ou location temporaire de véhicule à autonomie++**
 - **bornes de recharge rapide** :
 - Difficulté d'optimiser le dimensionnement de l'infrastructure pour les périodes de pointe
 - Bornes de recharge lentes publiques (aux étapes) à développer
- **La Route Electrique (ERS) : une solution pertinente**

Recharge de batteries : scénarios d'usage pour les PL

- **Pour les PL aux tournées limitées** (100 à 200 km/j avec recharge rapide en livraison) : **recharge** (lente) **au dépôt**
- **Bus : recharge partielle aux arrêts** (biberonnage) **ou en bout de ligne** (max. 30-40 km)
- **Pour les transports longue distance : recharge rapide indispensable**
 - **Schéma typique : 4h30 (400 km) de conduite, pause de 45 min., 4h30 (400 km) de conduite**
 - **PL de 40 t, 700-750 kWh pour 400 km >> 1 MW de puissance. 30 à 40 bornes par parking...**
 - **...donc environ 50 MW par parking ! + si fort trafic PL longue distance**
 - ***La Route Electrique (ERS) : une solution pertinente***

Hydrogène: quelques bases physiques et chiffres

- Actuellement, 96% de la production d'H₂ dans le monde provient du gaz naturel : forte émission de CO₂
- L'hydrogène décarboné (non natif) n'est PAS une source d'énergie, mais un moyen de stockage...
- ...à coût énergétique élevé :



Exemple : production d'H₂ par électrolyse de l'eau

H2 et exploitation PL

1 l diesel = 10,5 kWh \Leftrightarrow 0,30 kg H2

40 t, autonomie 1000 km

Gazole

400 l = 4,2 MWh
Réservoir: 0,5 m³, 70 kg

H2 @ 700 bars

2800 l (120 kg)
Réservoir: 4 m³, 3 000 kg + batterie tampon

H2 liquide

1630 l (120 kg)

PL longue distance 40 t: 100 000 km, 40 000 l diesel
si 50% en H2 \Leftrightarrow 6 t H2

En France 600 000 PL, 35 Mds PL.km, diesel: 11,4 Mm³
si 50% en H2 \Leftrightarrow 1,7 Mt H2
soit ~ 2,7 fois la production/consommation actuelle

- De simples calculs de quantités d'H₂ à produire, d'énergie mobilisée, de volumes et masses transportées et de coûts, montrent la faible pertinence globalement pour le transport routier de marchandises

Niches pour l'hydrogène dans le TR

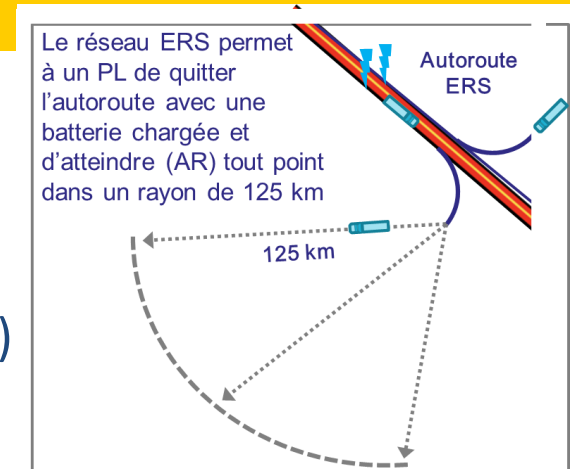
- **Coûts de production élevés**
- **Concurrence avec autres transports (avion, bateau, train)**
- **Problème d'infrastructure d'approvisionnement**
- **Pertinent pour des niches :**
 - **Transport de marchandises à longue distance hors autoroutes, sans possibilité de recharge. Moins de 1% des PL/trajets...**
 - **Transports urbains et péri-urbains: taxis si kilométrage journalier > 400 km et longues lignes de bus en péri-urbain (>100 km en AR), sans attente entre clients ou sans possibilité de biberonnage aux arrêts ; un point de recharge par agglomération (au lieu de centaines de bornes électriques)**
 - **Vélos électriques pour distances > 50 km et cycles livraison sans possibilité de recharge aux arrêts. 20 à 100 g d'H₂ = 50 à 100 km, cartouches échangeables de 1 à 2 kg; pas de pb de rendement pour petites quantités**

ERS : Electric Road System

• Principe

Permettre la recharge en roulant des lourds (principalement), sur autoroute

- batteries réduites de 2/3 (380 kWh pour un PL)
- Puissance de dimensionnement: 400 kW/PL
- Décarbonation : -85% (> autres solutions)



• Les 3 familles de solutions

Conduction aérienne



Siemens

Conduction par le sol



Alstom, Elonroad, Elways/Evias

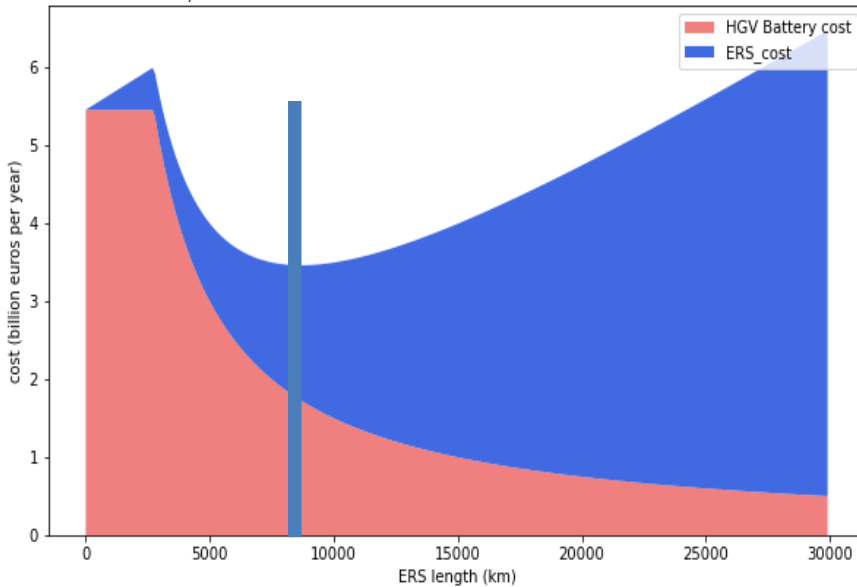
Induction



Electreon, Primove, WiPowerOne

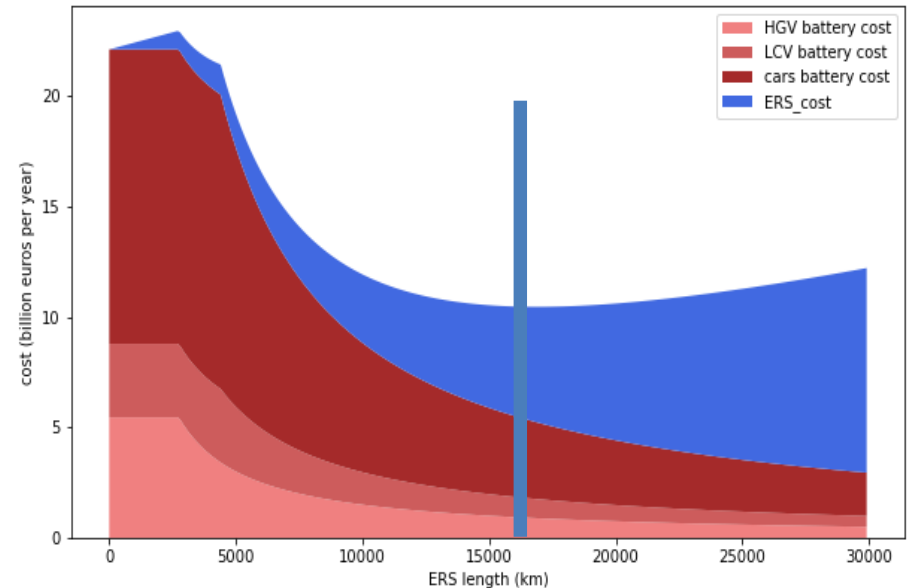
Optimisation macroscopique du réseau ERS : coût déploiement vs économie batteries

F. Perdu et al, TRA 2022



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

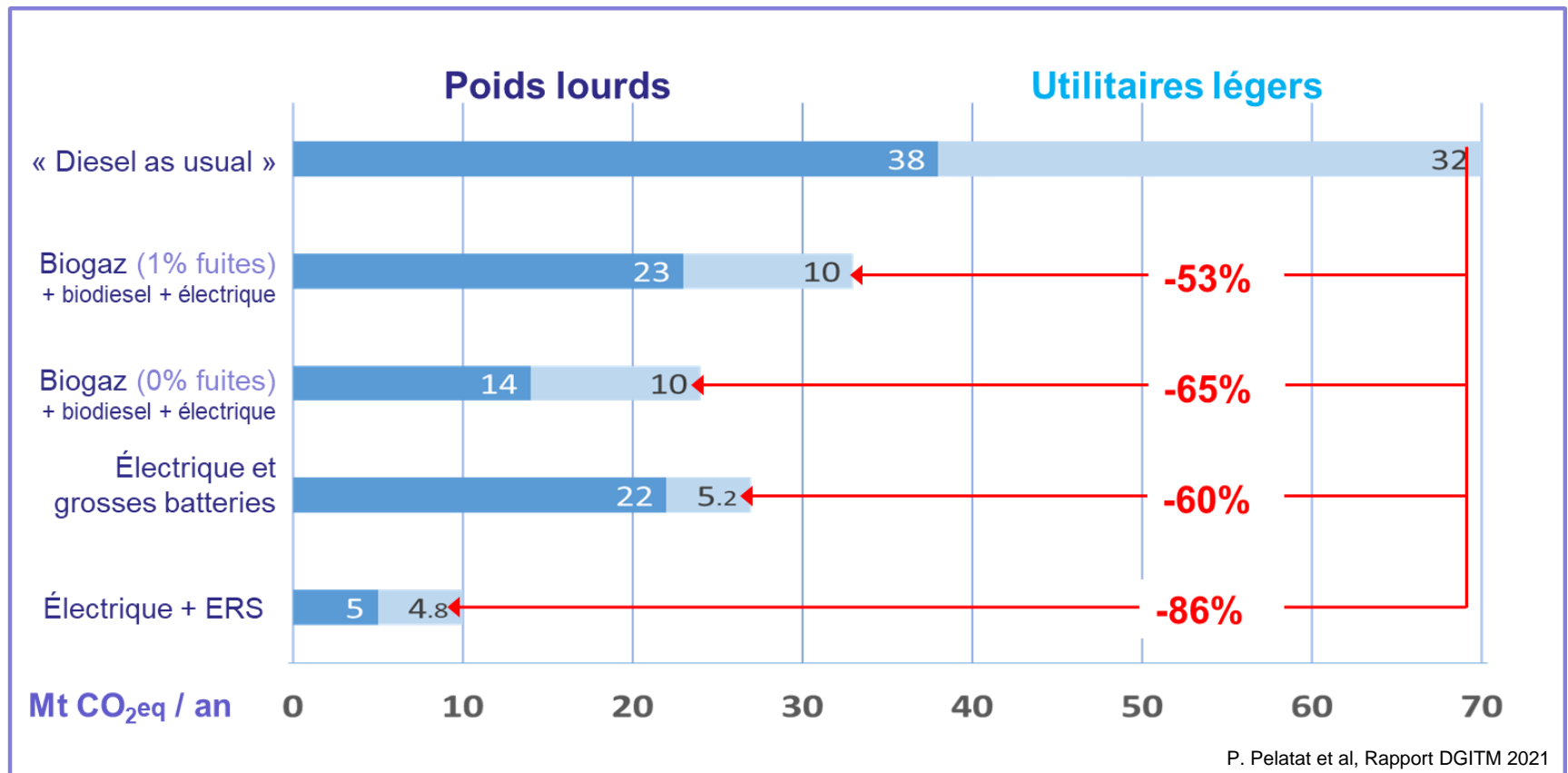
Sans prendre en compte les économies sur le réseau de bornes de recharge



254 km (autonomie)
130 km (autonomie)

Nécessité cependant de développer des solutions à l'échelle des corridors suffisamment ouvertes technologiquement

Décarbonation comparée des solutions (ACV 2040)



La solution conductive par le sol permettrait d'économiser 4 Mt CO₂ eq/an de plus avec 25% de VL ayant une plus petite batterie (40 kWh)

Conclusions

- **Parmi les pistes pour décarboner l'énergie des transports, l'électrification semble globalement la plus pertinente**
- **Pour le transport routier de marchandise à longue distance, l'ERS paraît incontournable**
- **Développement en parallèle de solution de niches (biogaz, H₂...) adaptées au contexte urbain ou péri-urbain**

Merci de votre attention

Fabienne Anfosso Lédée
Université Gustave Eiffel – Département Matériaux et Structures
Campus de Nantes
fabienne.anfosso@univ-eiffel.fr