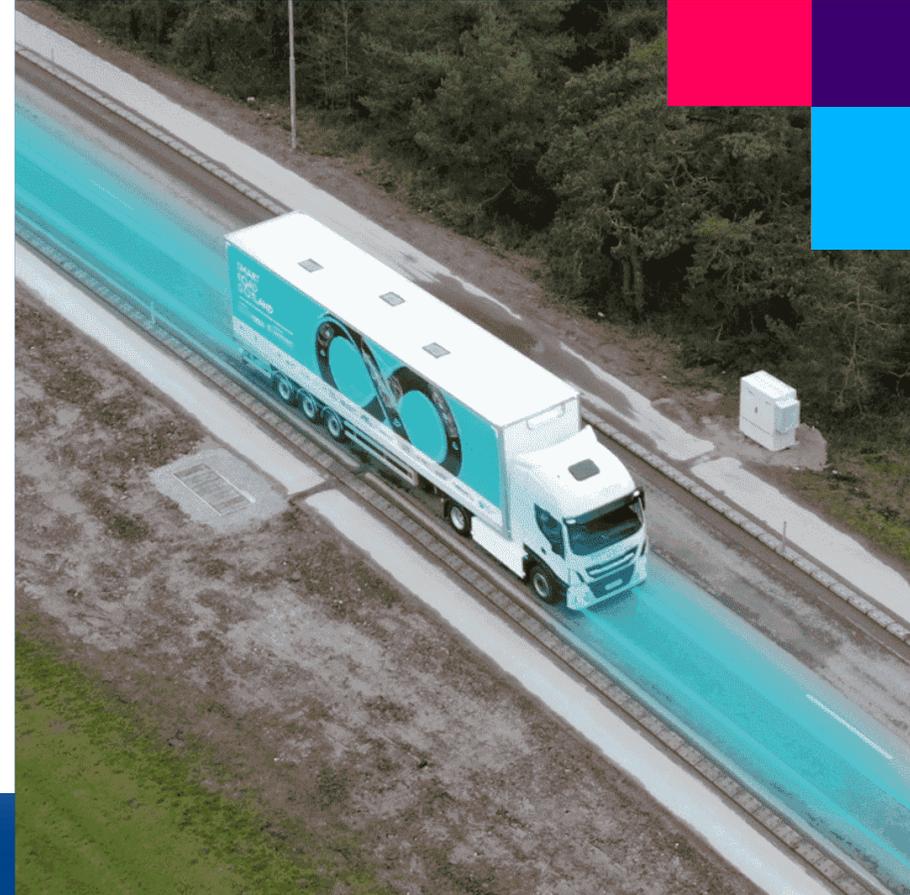


RECHARGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

SYSTÈMES DE ROUTE ÉLECTRIQUE



Bernard Jacob – Ing. Gén. Honoraire – Université Gustave Eiffel



Pierre Delaigue – Directeur de projets de mobilités connectée, autonome, électrique – VINCI Autoroutes / LEONARD

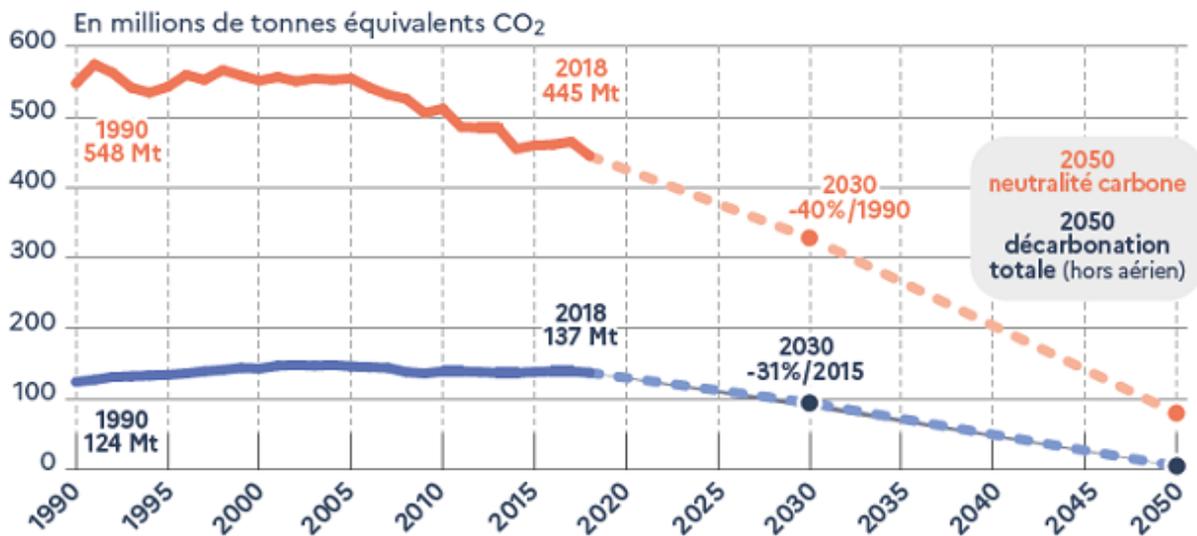
1. ENJEUX DE LA DÉCARBONATION



UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL MAJEUR



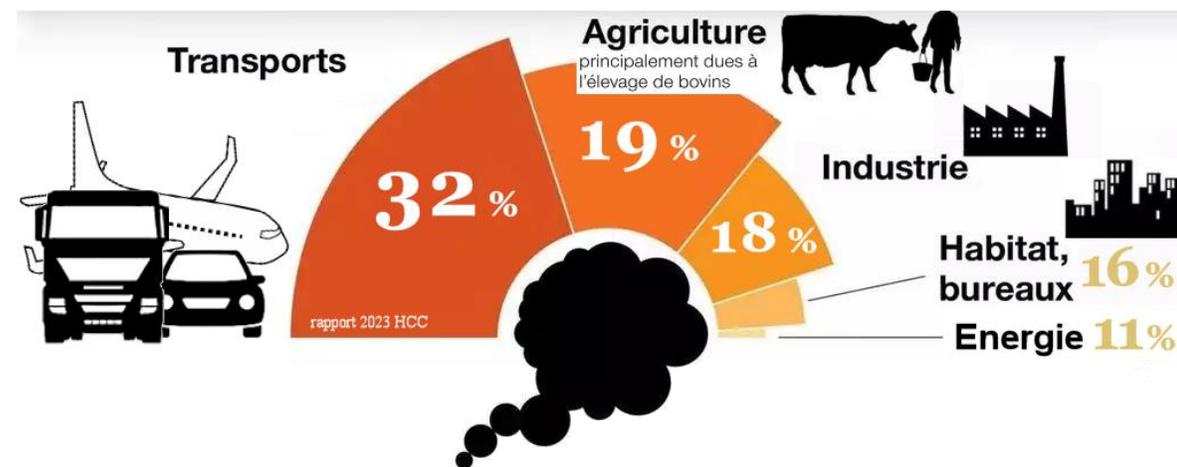
Objectifs France: -40% d'émission de GES en 2030 (vs. 1990), neutralité carbone en 2050



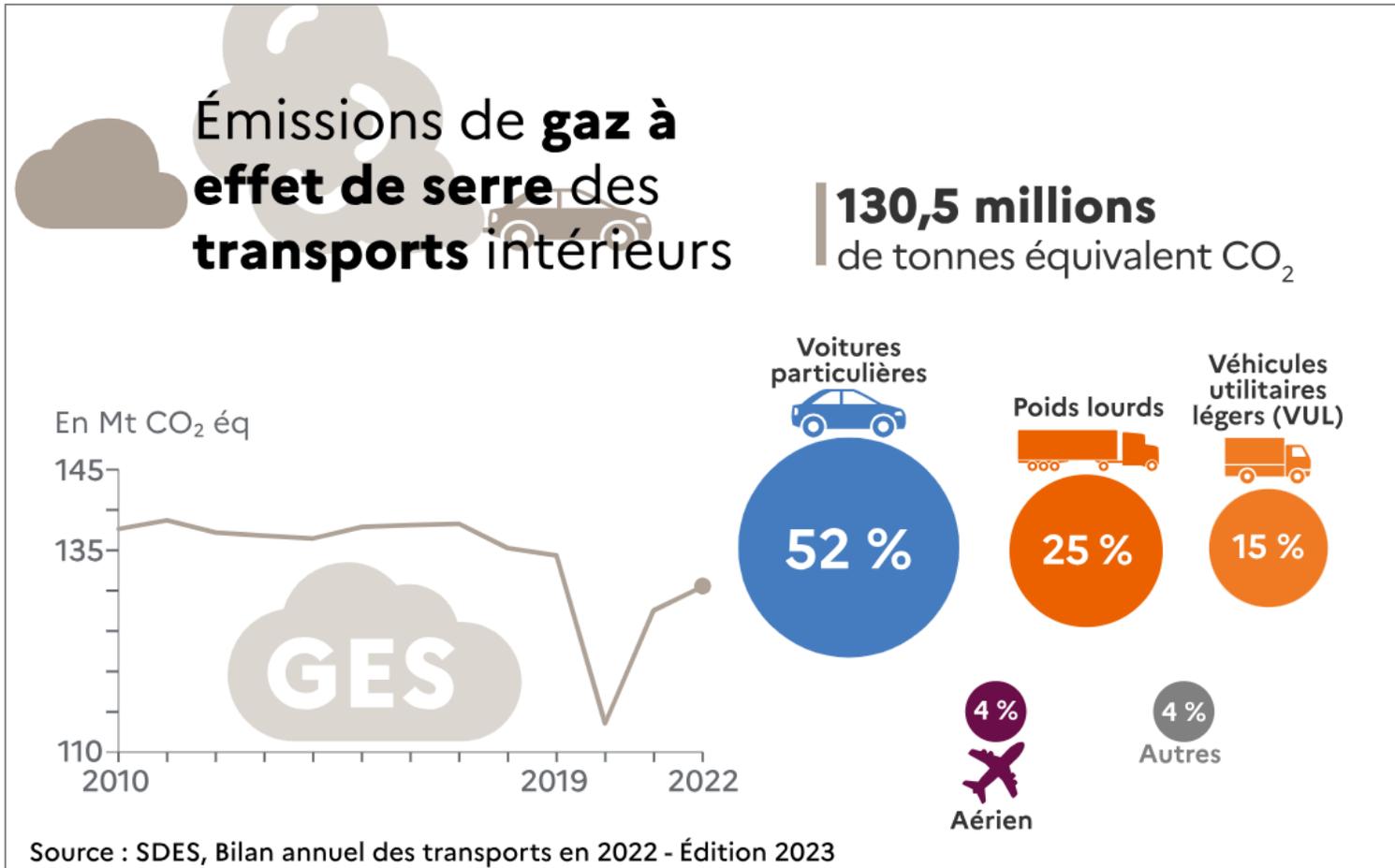
- Total France : émissions constatées
- Total France : trajectoire de réduction des émissions prévue par la SNBC-2
- Transports : émissions constatées
- Transports : trajectoire de réduction des émissions prévue par la SNBC-2



Transports: secteur le plus émissif



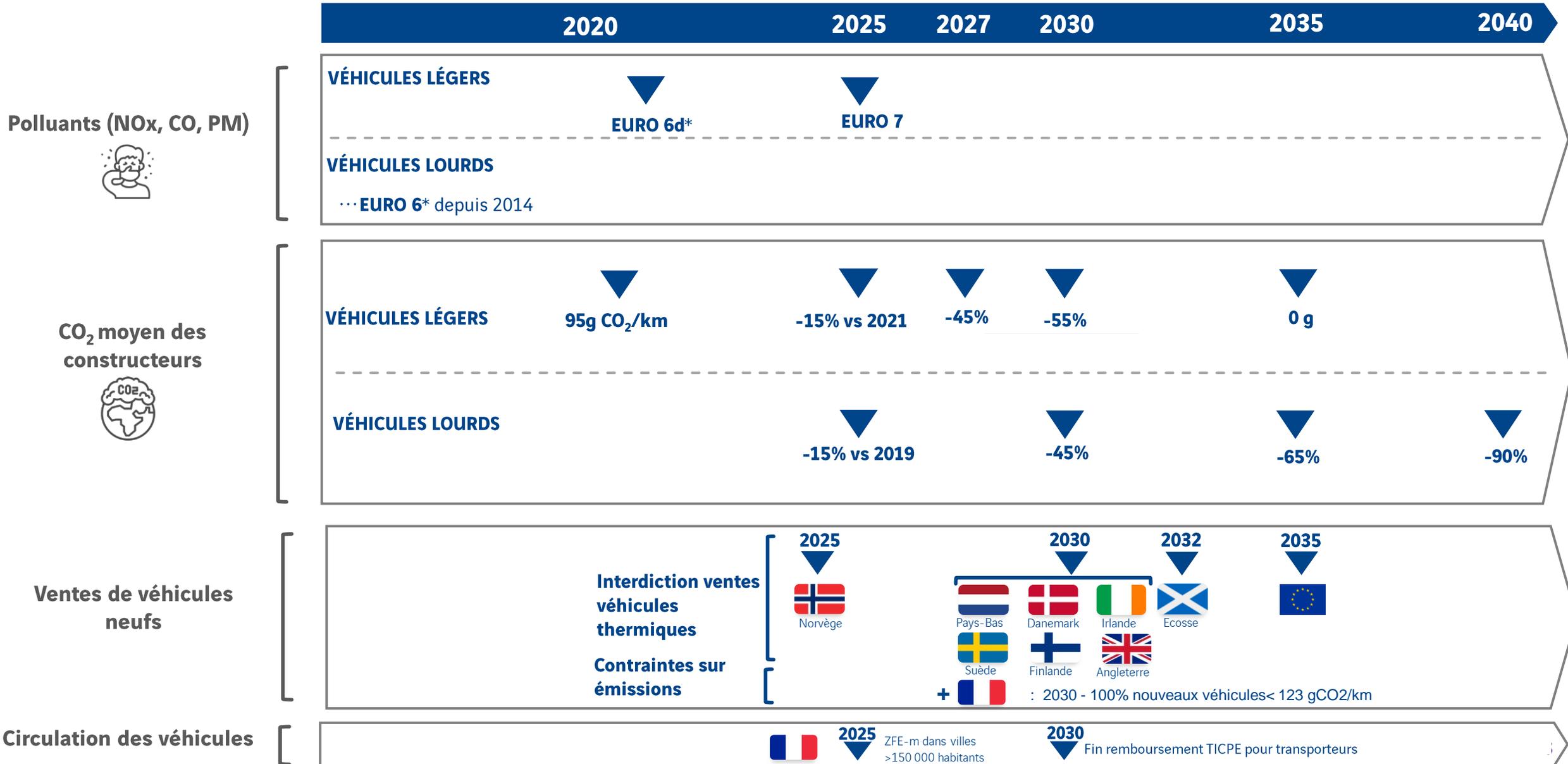
PART DES MOBILITÉS ROUTIÈRES



- Mobilité routière : 94% du secteur des transports
- Route représente plus de 85% des flux de transports

L'usage de la route est pérenne : pour tenir les engagements climatiques, il faut décarboner les usages de la route

CONTRAINTES SUR LES VÉHICULES



2. LIMITES DES SOLUTIONS PROPOSÉES



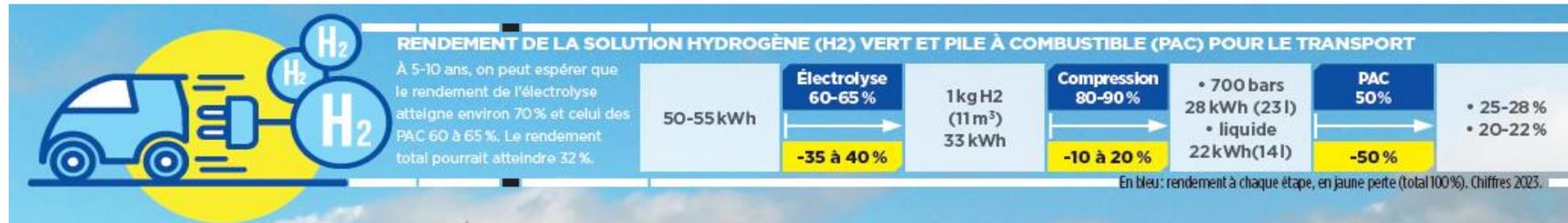
LIMITES DU BIODIESEL, BIOGAZ ET HYDROGENE

• Moteurs thermiques à biodiesel / biogaz:

- **Biodiesel:** gain énergétique (30%) mais 4x plus de GES en ACV par rapport au biogaz, concurrence agriculture (pas de substitution des terres agricoles)
- **Biogaz:** gain énergétique (40%) et GES en ACV (90%), mais annulés par 3,5% fuite (CH₄)
- **Problème de disponibilité:** besoins de 35 + 40 TWh en 2050 (x4), compétition avec autres usages: chauffage, production électrique;

• Hydrogène: pile à combustible / moteur thermique à H₂

- H₂ (non natif) **pas une énergie mais un stockage**, à faible rendement (27%) si électrolyse



- **1 Mt d'H₂/an en France** (1% du monde) pour chimie et industrie (non substituable), **nécessiterait 50 TWh (10% production française) pour production par électrolyse**
- **Alternative:** vapo-réformage du CH₄ + capture et séquestration du CO₂ ou thermolyse + vapo-craquage de la biomasse: **cher et long terme**
- **Compétition avec autres usages prioritaires** (industrie, aviation, maritime)
- **Complexité** pour le transport, le stockage et la distribution, pour PL 44 t: + 4 m³ et 3 t (130 kg, 1000 km)

- **Voitures**

- 90% des déplacements < 50 km mais demande d'autonomie de 700 à 800 km ⇒ **augmentation poids** (2 à 2,5 t, dont 250 à 600 kg de batteries) et **coût** (30 à 100 k€)
- **Coût électricité** /100 km: 2,65 € (domicile), 10,70 € (bornes publiques), 19,70 € (charges super-rapides) contre environ 11 € en diesel ⇒ **amortissement VE en 220 000 km** si 80% de recharges domicile

- **Poids lourds**

- PL de 44 t: 620 à 750 kWh (LFP) pour autonomie de 450 km ⇒ **surpoids: 4 t** (besoin de révision Directive CE96/53, +2/3 t PTC, et charge essieu + 1 t)
- **Surcoûts**: batteries de 80 à 100 k€ (x2 prix tracteur)

- **Longue distance: stations de recharge rapide (méga chargeurs)**

- Nombres de bornes (pour éviter attentes) ⇒ Consommation d'espace + puissance requise sur parkings

CONTRAINTES DE LA CHARGE EN ITINÉRANCE SUR AUTOROUTES



Besoins véhicules légers et VUL

- + Aires de service déjà équipées de 6 à 8 bornes à 150 kW
- + Besoins x10 d'ici 10 ans \Rightarrow 70 à 100 bornes, 10 à 30 MW/parking



Besoins poids lourds (en 2035/2050) – 32 000 places parking, 20/80% PLe

- + 10 à 25 000 points de charge CCS (100 kW), 20 à 80/parking \Rightarrow 2 à 8 MW
- + 2 à 6000 points de charge MCS (500 à 800 kW), 4 à 20/parking \Rightarrow 15 MW

Dimensionnement électrique

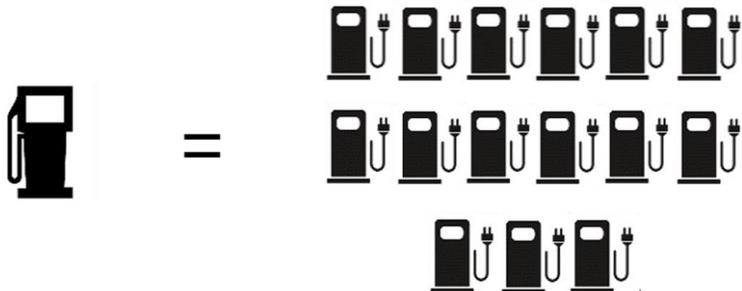
40 à 60 MW pour VL + VUL + PL
pas possible par ENEDIS, 20 000V
($> 2500 A$) \Rightarrow RTE, 200 000 V
1 ha de transformateur
Investissement
+ coût usagers (x 4 à 7 / domicile)



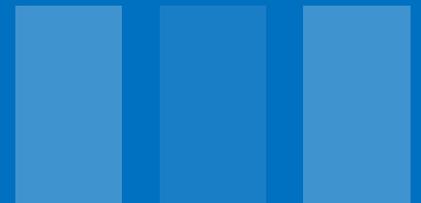
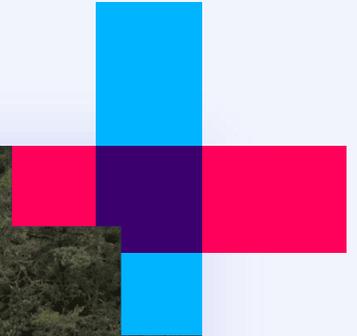
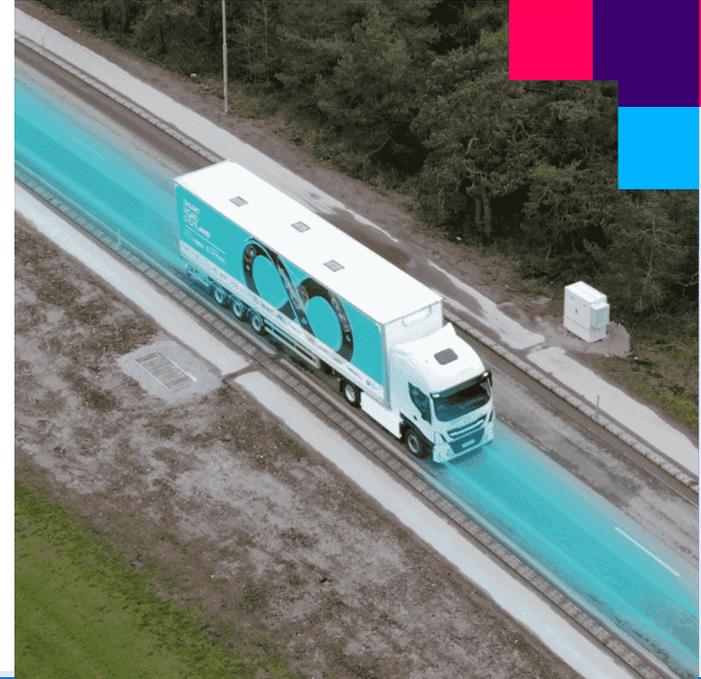
40 MW =



Foncier (6 fois plus de bornes pour délivrer 2 à 3 fois moins de kms)



3. SYSTEME DE ROUTES ÉLECTRIQUES



POURQUOI L'ERS ?

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

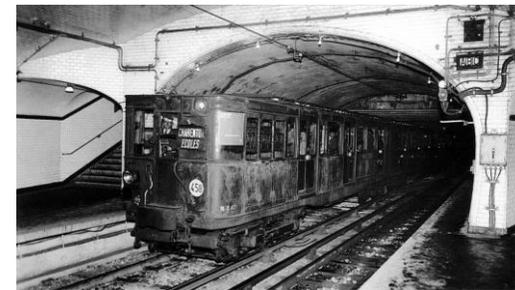
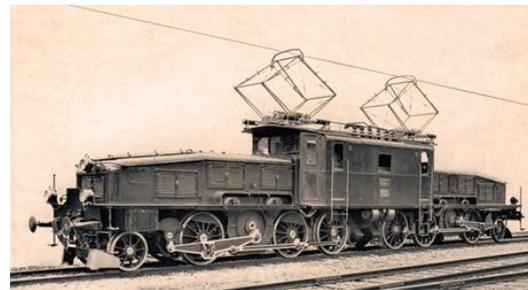


Locomotives à vapeur
et tender à charbon



→
1900

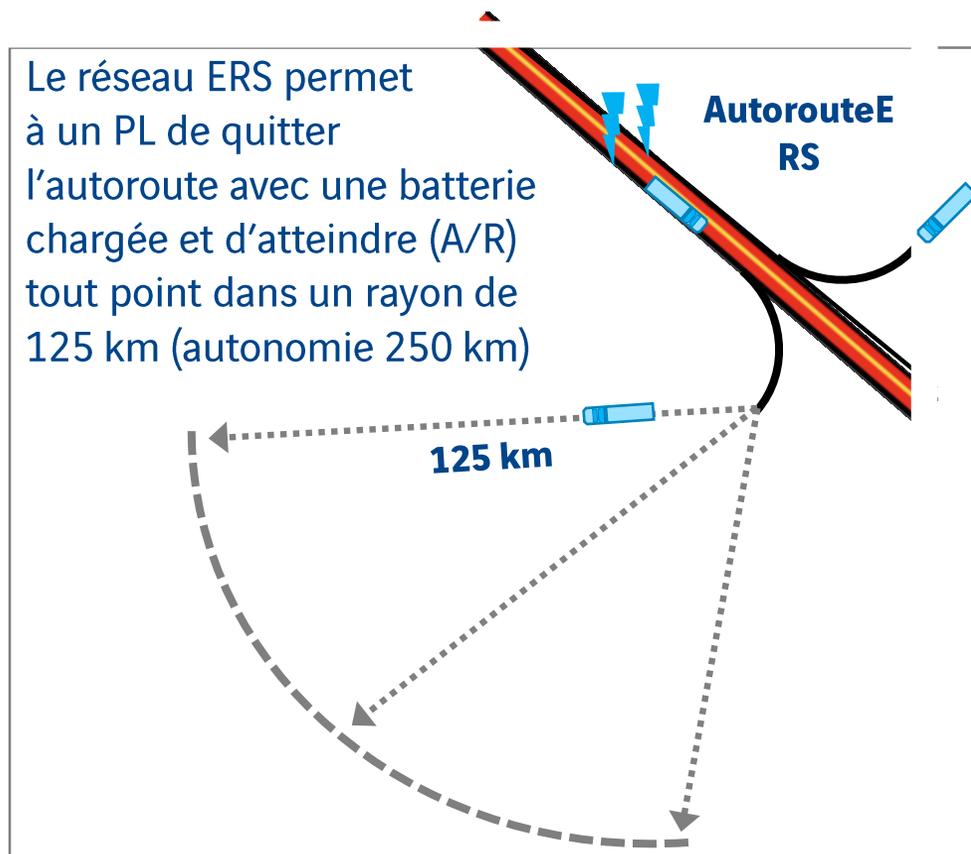
Locomotives électriques, métros et trams
alimentés en marche



DÉPLOIEMENT PROPOSÉ DE L'ERS EN FRANCE

Réseau RTE-T

Le réseau ERS permet à un PL de quitter l'autoroute avec une batterie chargée et d'atteindre (A/R) tout point dans un rayon de 125 km (autonomie 250 km)



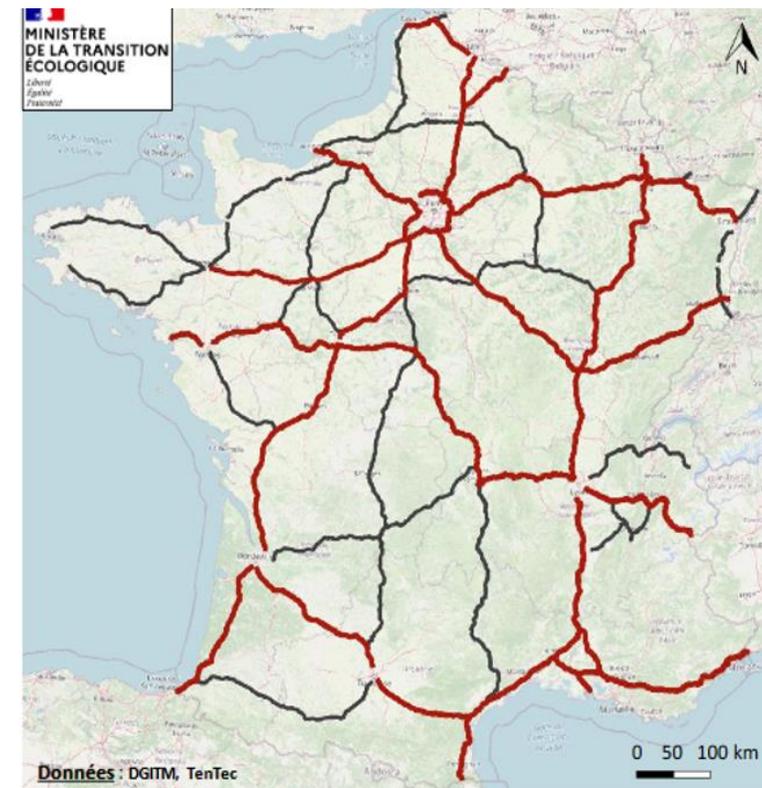
Phase 1 : 4,900 km

Phase 2 : 3,950 km

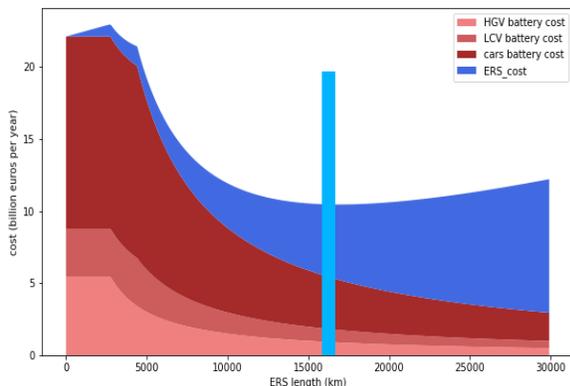
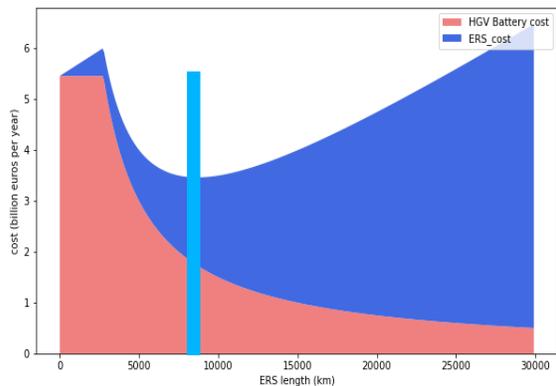
Total : 8,850 km

- Batteries réduites de 2/3 (380 kWh pour un PL)
- Puissance max.: 350 à 400 kW/PL
- Décarbonation: -85%
- TCO \approx diesel
- Investissement total: CAPEX 30 à 40 Mds € (concession ou PPP)

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



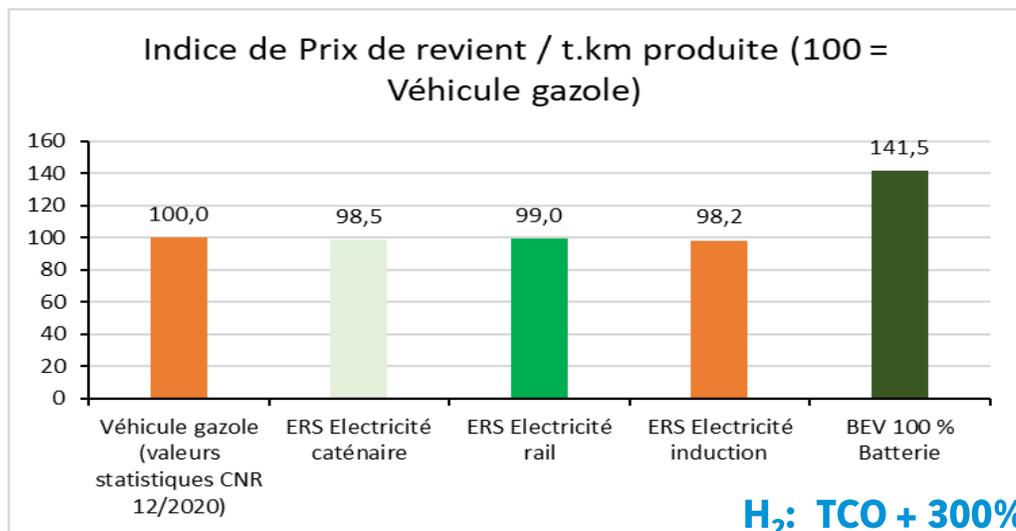
LINÉAIRE, BILAN GES, COÛTS, BILAN MATIÈRE



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

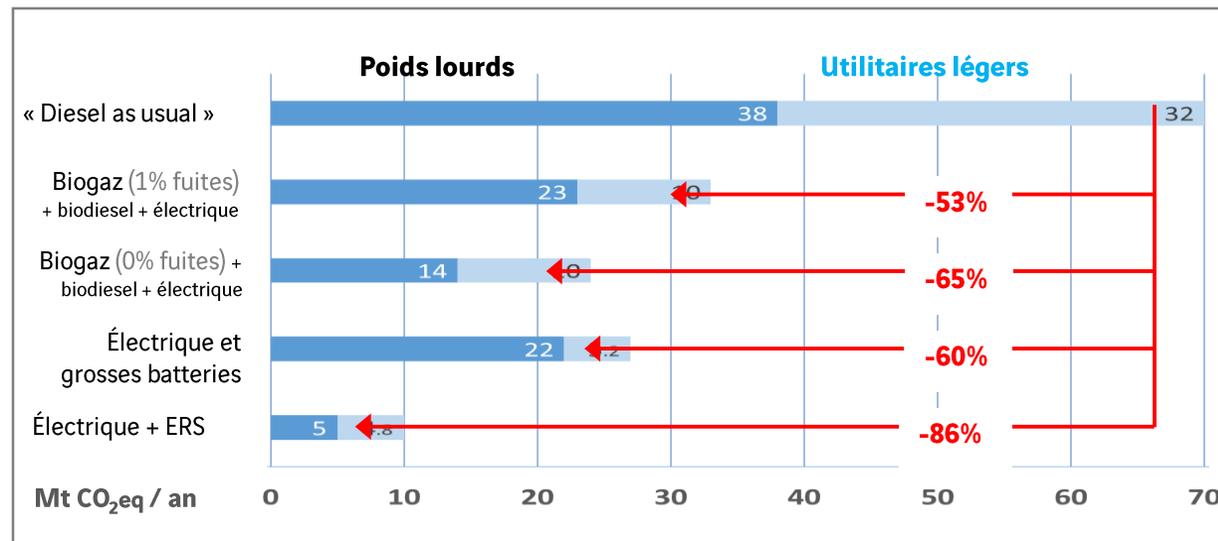
254 km (autonomie)
130 km (autonomie)

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



H₂: TCO + 300%

TCO - Prise en compte des coûts véhicule + énergie



ACV 2024 - 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)



10 ans, ERS / grosses batteries = économie de :

- 17 Mds € de batteries (à 80 €/kWh) pour les PL, +4 Mds € pour VUL et VL (conduction au sol), soit -10 Mt batteries
- 210 GWh de batteries à produire (PL), -50 GWh (VUL et VL si conduction au sol), soit -50% en 2040
- 180,000 t Ni, 200,000 t de cuivre + économie Co et Li

ANALYSE COMPARATIVE DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS



Réduction de 45% (vs. 2019) des émissions de CO₂ des camions neufs vendus en 2030



Biocarburants liquides et biogaz: solution transitoire



Batteries électriques: Nécessaire mais pas suffisant



Hydrogène Solution de « riches/niche »

Electric Road Systems (ERS) ✓



- Capacité de recharge en roulant réduit drastiquement la taille des batteries (rapport 3 à 4)



Construction des autoroutes (10-12M€/km)
90-100 Mds € (9000 km)

ERS (4 M€/km)
36-40 Mds € (9-10,000 km)

Electricité (30 TWh @ 80 €/MWh)
50 Mds € sur 20 ans

TIR: 6,5% sur 35 ans



- Coût véhicule réduit (TCO = diesel), empreinte carbone et besoin en matières premières limités, plus de contraintes d'autonomie et de temps d'arrêt pour la recharge

Moins de batterie et plus de rayon d'action

Groupes de travail 2021 sur la décarbonation des poids-lourds

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Liberté
Égalité
Fraternité

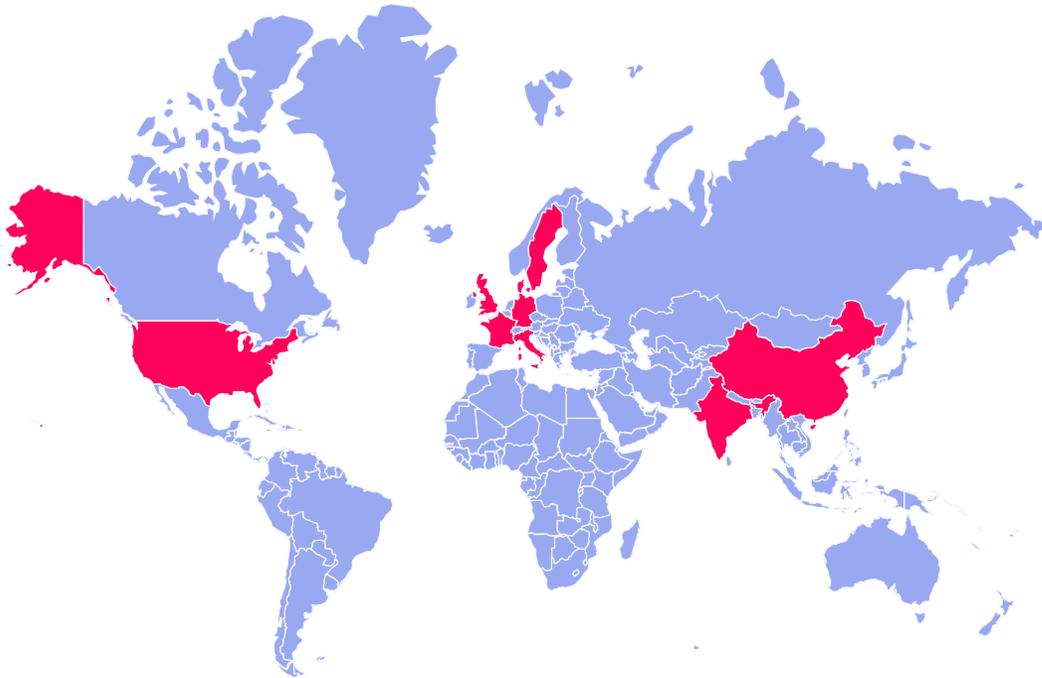
8 technologies groupées en 3 familles :

- **Conduction aérienne** (caténaïres)
Siemens, Equans
- **Conduction par le sol**
Alstom, Elonroad, *Elways/Evias*
- **Induction**
Electreon, WiPowerOne par KAIST/Olev, ENRX (IPT Technology/Primove)



PROJETS *ELECTRIC ROAD SYSTEMS* À TRAVERS LE MONDE

• Multiplication des projets ERS



  ■ **Allemagne** – 3 sections pilotes équipées en caténares, 4 sites équipés en induction

  ■ **Suède** – 2 démonstrateurs sur induction, 1 sur rail, 1 Appel d’Offres pour 1^{er} tronçon commercial permanent de 21 km

 ■ **France** – Feuille de route nationale, 1 Appel A Projets pour statuer de la meilleure technologie

 ■ **UK** – Projet caténaire proche de Glasgow, ambition de déploiements plus larges

 ■ **Israël** – Sites pilotes, déploiement commercial pour un réseau de 200 bus par induction proche de Tel Aviv

 ■ **Etats-Unis** – Focus exclusif sur l’induction à haute puissance, dizaine de projets en cours dans plusieurs états

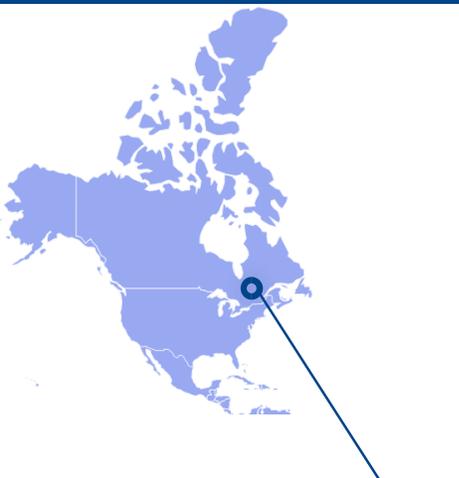
 ■ **Italie** – Recharge inductive sur une boucle de 1km pour tester les cas d’usages autoroutiers

■ **Inde** – Projet de déploiement de 250km entre Delhi et Mumbai

  ■ **Chine** – Systèmes inductifs en discussion

 : Charge conductive par caténares
 : Charge conductive par rail
 : Charge inductive

PROJETS VINCI SUR LA CHARGE DYNAMIQUE



Route électrique @Québec



Smartroad Gotland @Visby



Projet Rouen Métropole



Charge As You Drive



INCIT-EV @Versailles



eCharge @Cologne



EnBW @Karlsruhe



Floral Show @Balingen



EMPOWER @Nurnberg



PROJET CHARGE AS YOU DRIVE (CAYD)



electre^on



ELONROAD[®]



AVEC LA PARTICIPATION DE:



CHARGE AS YOU DRIVE – CHIFFRES CLÉS



Bobines inductives

vs



Rail conducteur

2

technologies ERS comparées



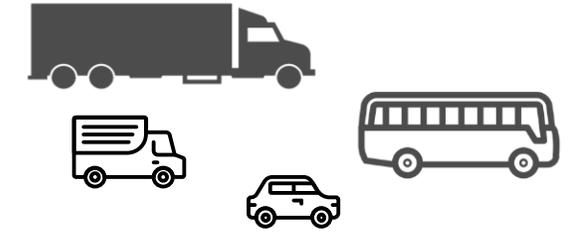
Charge dynamique

Charge semi-statique



2

cas d'usages expérimentés



4

catégories de véhicules testées



Piste fermée



Autoroute ouverte

2

sites d'expérimentations



electreon



ELONROAD



Laboratoires:
LAMES, MIT, Pics-L, LICIT-ECO7, SPLOTT, EASE,
LEOST, IMSE



5 partenaires industriels,
9 laboratoires académiques

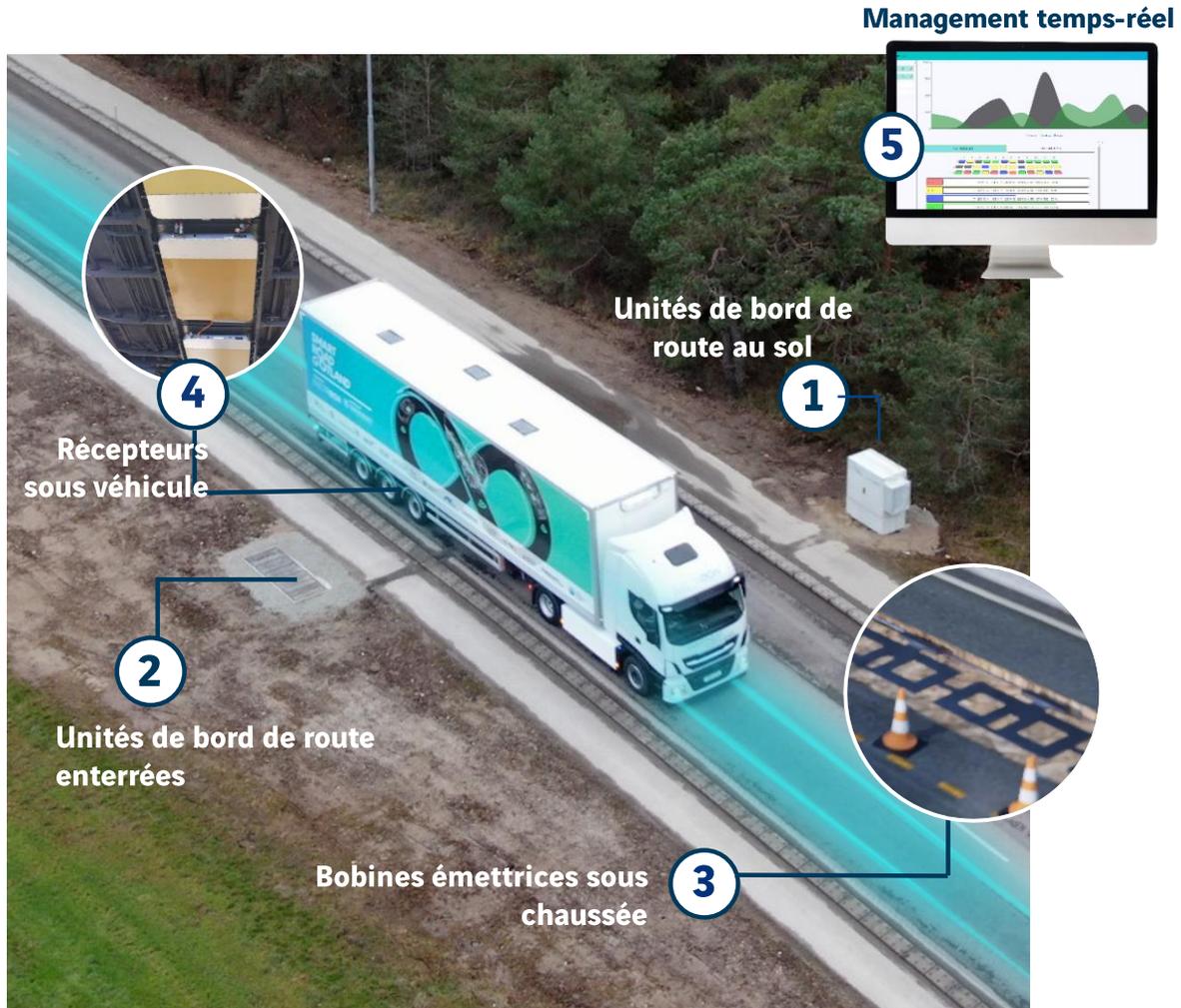


26

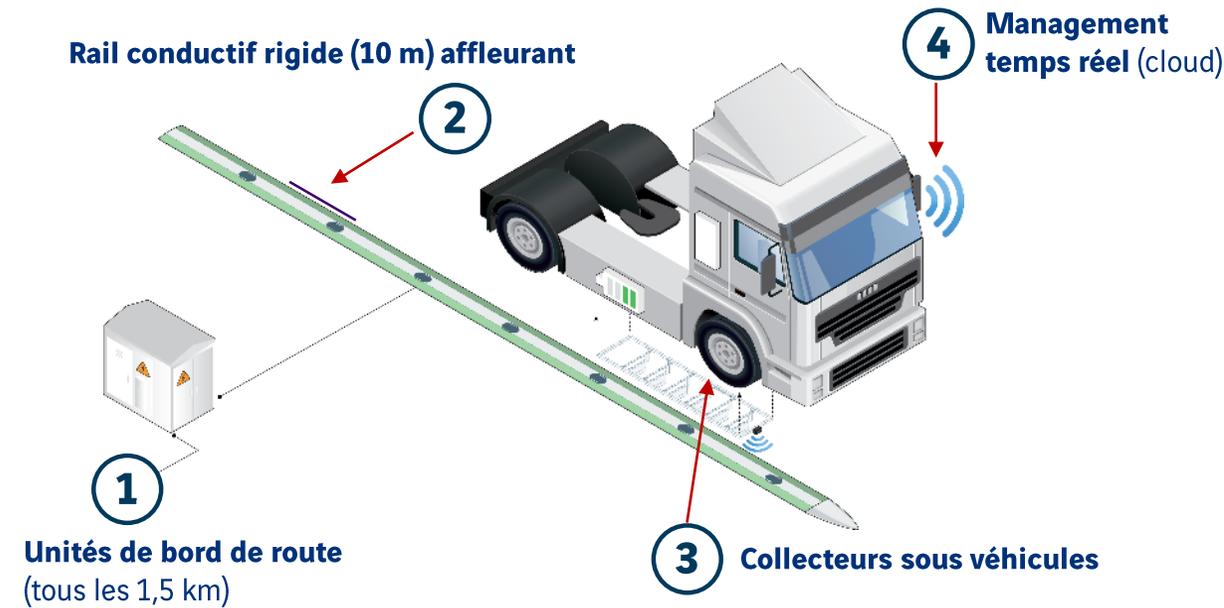
millions d'euros

2 TECHNOLOGIES À TESTER SUR L'A10

INDUCTION PAR **electreon** & **HUTCHINSON**



RAIL CONDUCTIF PAR **ELONROAD**



INDUCTION



electreon
 HUTCHINSON®

RAIL CONDUCTIF

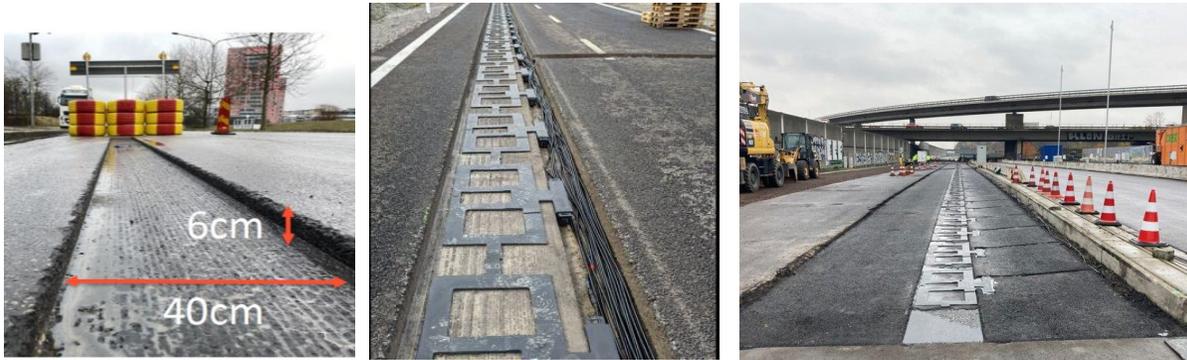


ELONROAD

ENJEUX DES *ELECTRIC ROAD SYSTEMS*

Enjeux d'intégration dans une structure routière ...

Impacts des tranchées sur les structures de chaussées



Matériaux de comblement



Raccordements électriques



Collage



Tenue à la chaleur



Tenue au compactage



ENJEUX DES *ELECTRIC ROAD SYSTEMS*

Enjeux pendant d'exploitation, de durabilité, de maintenance...

Gestion de l'évacuation de l'eau



Durabilité mécanique



Maintenance des chaussées



Adhérence

(enjeux de sécurité, notamment pour 2 roues)



Collisions

(entre collecteurs sous châssis et débris)



Résistance aux éléments extérieurs



Enjeux liés aux émissions électromagnétiques....

Un système **sur par conception**:

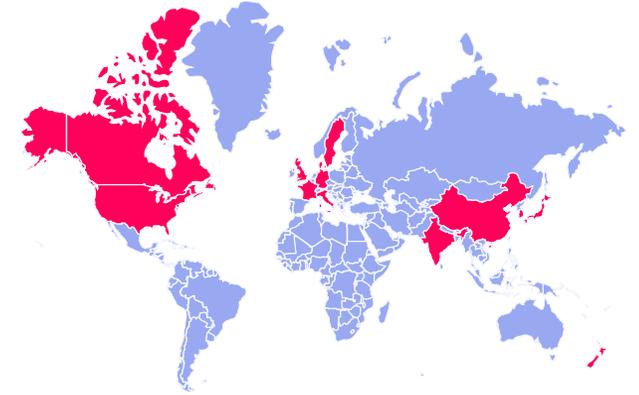
- Activation radio-pilotée des bobines
- Bobines émettrices **émettent uniquement lorsqu'un véhicule récepteur est au-dessus** (i.e. pas d'émission de champ à l'air libre)
- La **puissance du champ transmis est adaptée** aux besoins du véhicule



Enjeux liés aux émissions électromagnétiques....

Des expérimentations sur les ERS déjà en cours dans une dizaine de pays

- Des **mesures locales par des laboratoires experts** selon les **standards imposés par l'ICNIRP** (Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants) sur
 - La Compatibilité Electromagnétique (CEM)
 - L'Exposition des personnes aux ondes électromagnétiques (FEM)



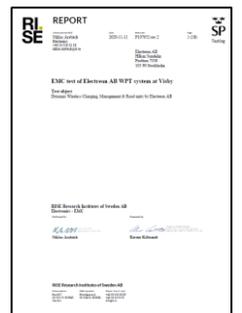
Test set-up, Radiated Emission, 10m H-field, 150kHz-30MHz



- Aucune des expérimentations à date n'a démontré de dépassement des seuils réglementaires existants



EMF en Suède
03/2020



EMC en Suède
11/2020

ENJEUX DES *ELECTRIC ROAD SYSTEMS*

Enjeux liés aux émissions électromagnétiques....

Par ex, projet BreBeMi en Italie

- Les véhicules font office de cage de Faraday pour les occupants



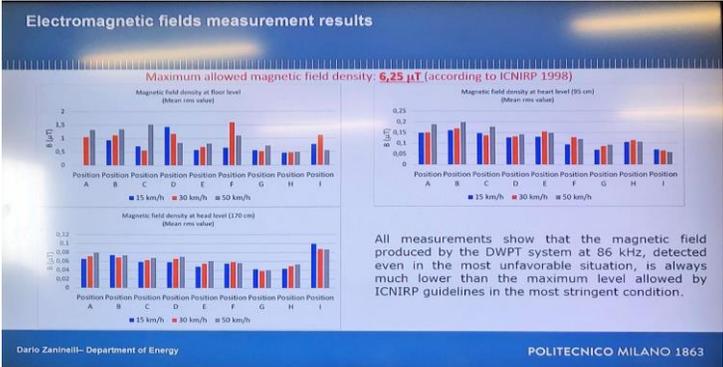
Mesures électromagnétiques par l'Université de Politecnico di Milano sur site de BreBeMi en Italie



- Des niveaux de champs émis inférieurs aux seuils réglementaires et même inférieurs en valeur absolue aux émissions électromagnétiques du moteur électrique

Ou en Suède

- Proximité immédiate de l'aéroport de Visby et aucune perturbation CEM observée sur les équipements aéroportuaires



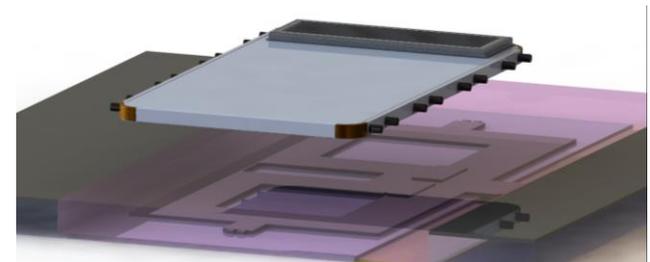
Aéroport de Visby

Enjeux liés aux émissions électromagnétiques....

Dans projet Charge As You Drive les sujets électromagnétiques seront étudiés par les **laboratoires experts indépendants** [LEOST](#) et [IMSE](#) (Université Gustave Eiffel)

Ils seront en charge de:

- **Mesures locales des émissions sur site**
- La démonstration du **respect des normes d'exposition électromagnétique** des systèmes de recharge vis-à-vis des passagers, et de l'ensemble des usagers de la route et agents de la voirie
- Proposer un **modèle reproduisant les émissions** représentatives du système de recharge et concevoir l'équipement d'émission associé pouvant servir à **l'homologation des futurs systèmes** de recharge dynamique
- Fournir en fin de projet un **bilan de l'évaluation** de l'exposition des personnes aux EMF et de la compatibilité électromagnétique

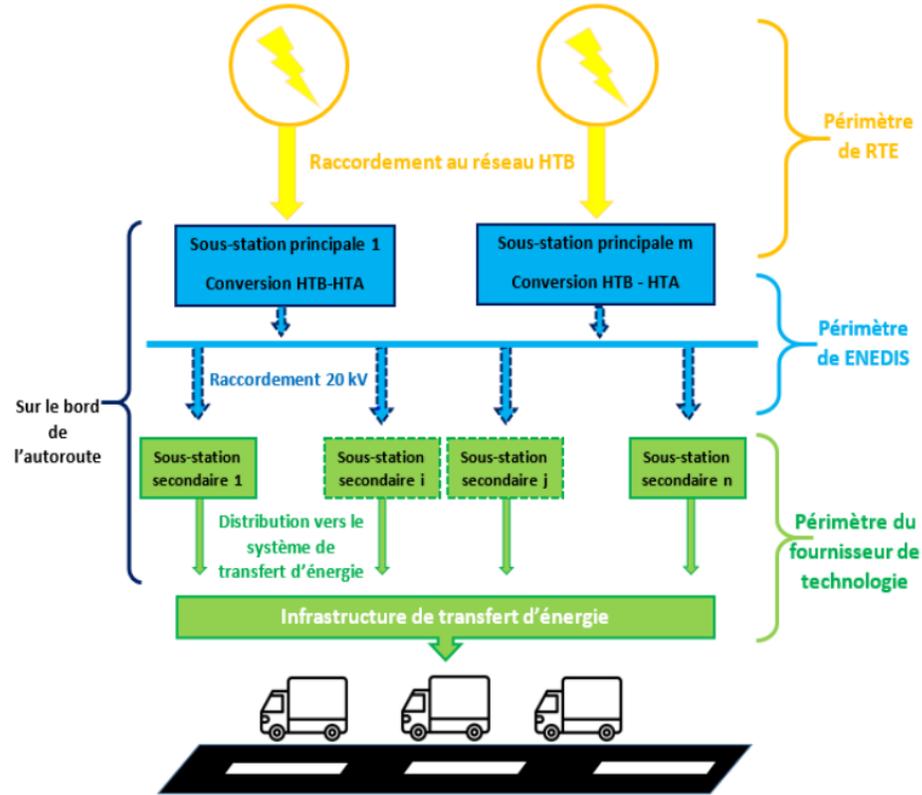


Une approche scientifique rigoureuse qui va au-delà de l'état de l'art actuel

ENJEUX DES *ELECTRIC ROAD SYSTEMS*

Enjeux liés les puissances, aux rendements et aux réseaux électriques....

Distribution électrique en bord de voie



Réseau de sous-distribution en 3 niveaux
(source: rapport #1 ERS DGITM 2021)

Avantage stratégique des ERS: distribution plus linéaire du besoin de puissance que les infrastructures de charge statiques

Puissances



30 KW



100 KW



200 KW

Rendements énergétiques



- Besoin d'analyse comparative end-to-end du réseau de distribution aux véhicules
- Avantages des ERS: une électrification plus directe et des puissances moins élevées (moins de pertes potentielles et de dégradation des batteries)



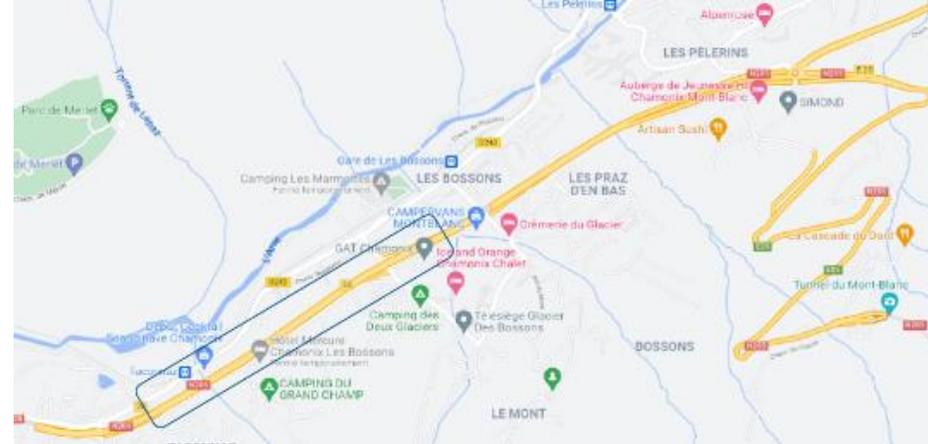
Labélisé par 2 pôles:



PROJET E-ROAD MONT BLANC

UNE TECHNOLOGIE : SOLUTION APS (ALSTOM)

Phase 1: 2023-24
Test sur site fermé
(TRANSPOLIS)
Validation et
TRL 3 à 5-6



Phase 2: 2025-27
Test sur route ouverte
(RN205, Mt Blanc)
VUL, PL et bus
TRL 5-6 à 7-8



Capture
énergie en
mouvement

Intégration dans
la chaussée



Viabilité hivernale



Adhérence





MERCI !

**bernard.jacob@univ-eiffel.fr
pierre.delaigue@vinci.com**