La décarbonation difficile et nécessairement rapide des mobilités routières

Certitudes et incertitudes

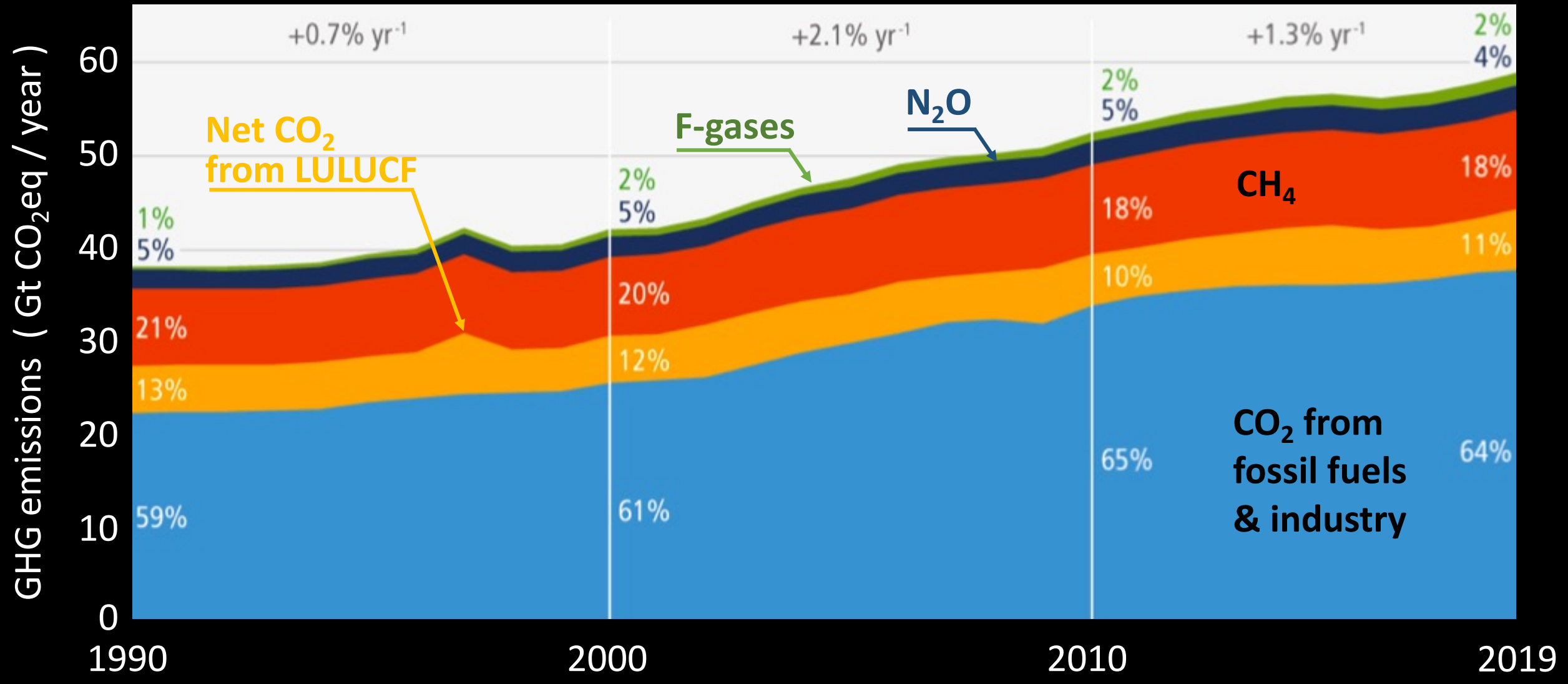
STRATEGY CONSULTING
Patrick Pélata
pelata@meta-strategy-consulting.com

Le Cercle des Transports, 13 Mars 2022

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- Conclusion

- **La contrainte climatique**
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- Conclusion

Les émissions anthropogéniques de GES



Source: IPCC, AR6, WGIII

NB. Aggregated GHG emissions in this report are stated in CO_2-equivalent (CO_2-eq) using the Global Warming Potential with a time horizon of 100 years (GWP100)

Le constat du GIEC

> Climate resilient development is already challenging at current global warming levels.
>
> The prospects will become further limited if warming exceeds 1.5°C and may not be possible if warming exceeds 2°C.

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change
WMO UNEP

IPCC (GIEC)
SIXTH ASSESSMENT REPORT **Oct 2021**
Working Group II – Impacts, Adaptation and Vulnerability

Atteindre rapidement le « zéro carbone »

Émissions nettes actuelles:

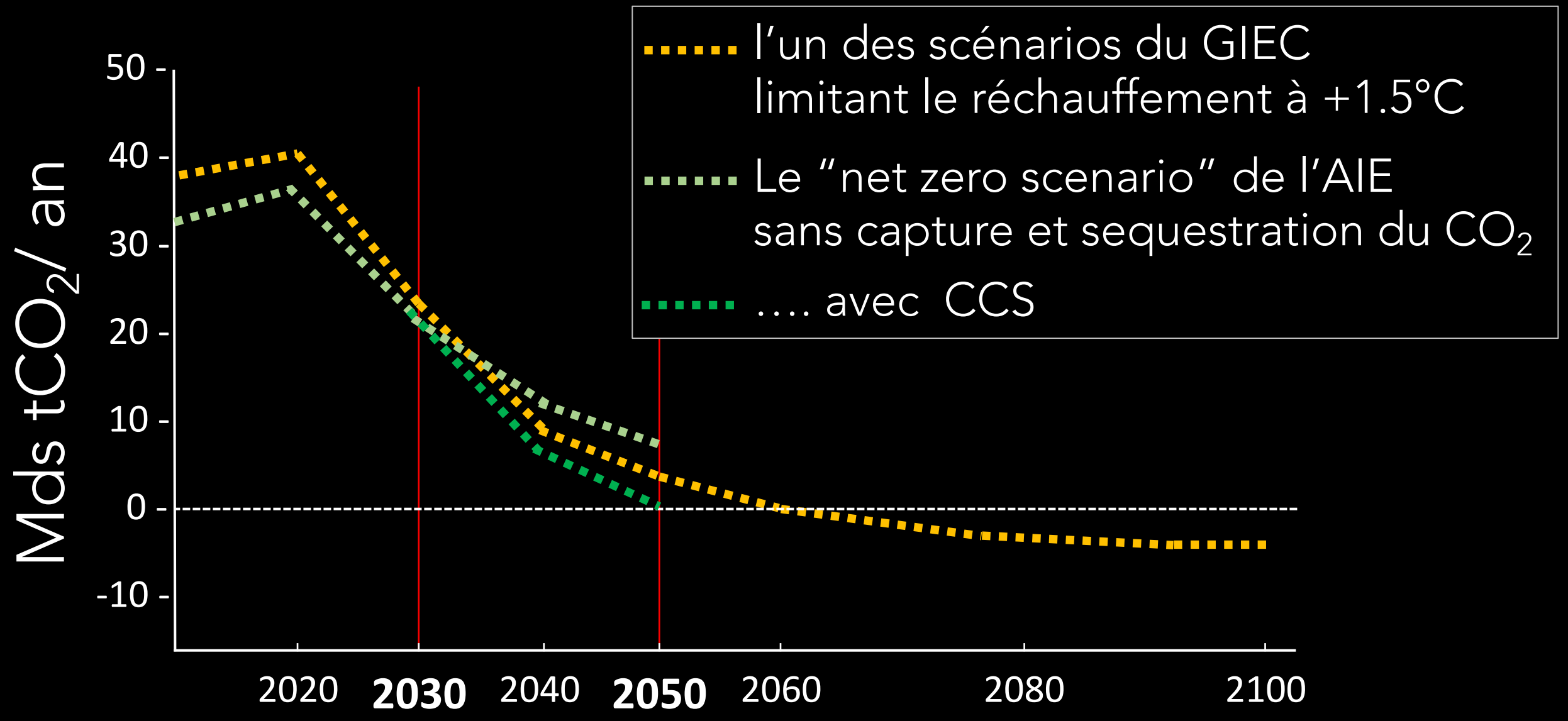
42 Mds tCO_2/ an

Émissions cumulées pour ne pas dépasser +1.5°C (ou à peine):

500 Mds tCO_2

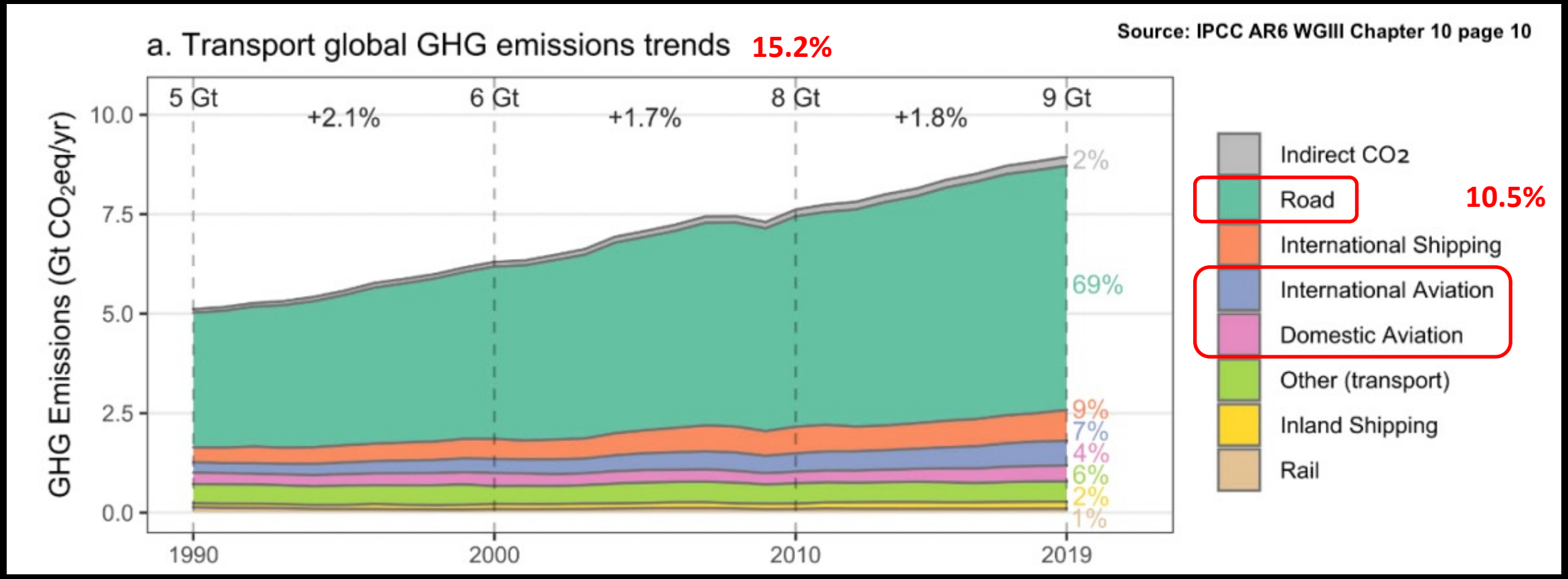
Source: IPCC Oct.2021

Atteindre rapidement le « zéro carbone »



- La contrainte climatique
- **La place des mobilités routières**
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- Conclusion

Le transport, mauvais élève de la décarbonation



Source: IPCC AR6 WGIII
Chapter on Transport, p.10

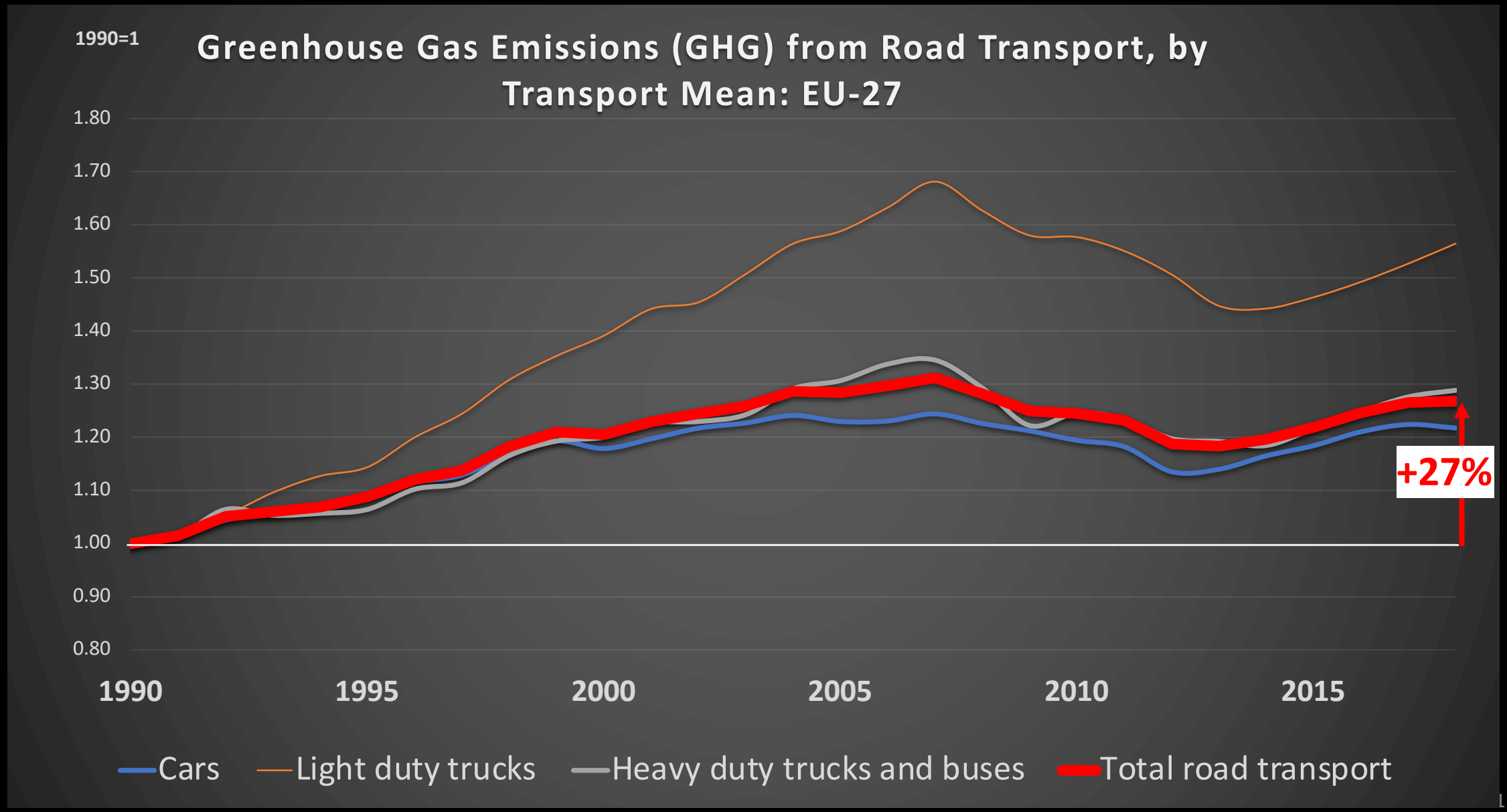
Les mobilités routières, premier coupable

17 % des émissions directes de CO2 liées à la consommation d'énergie en 2019

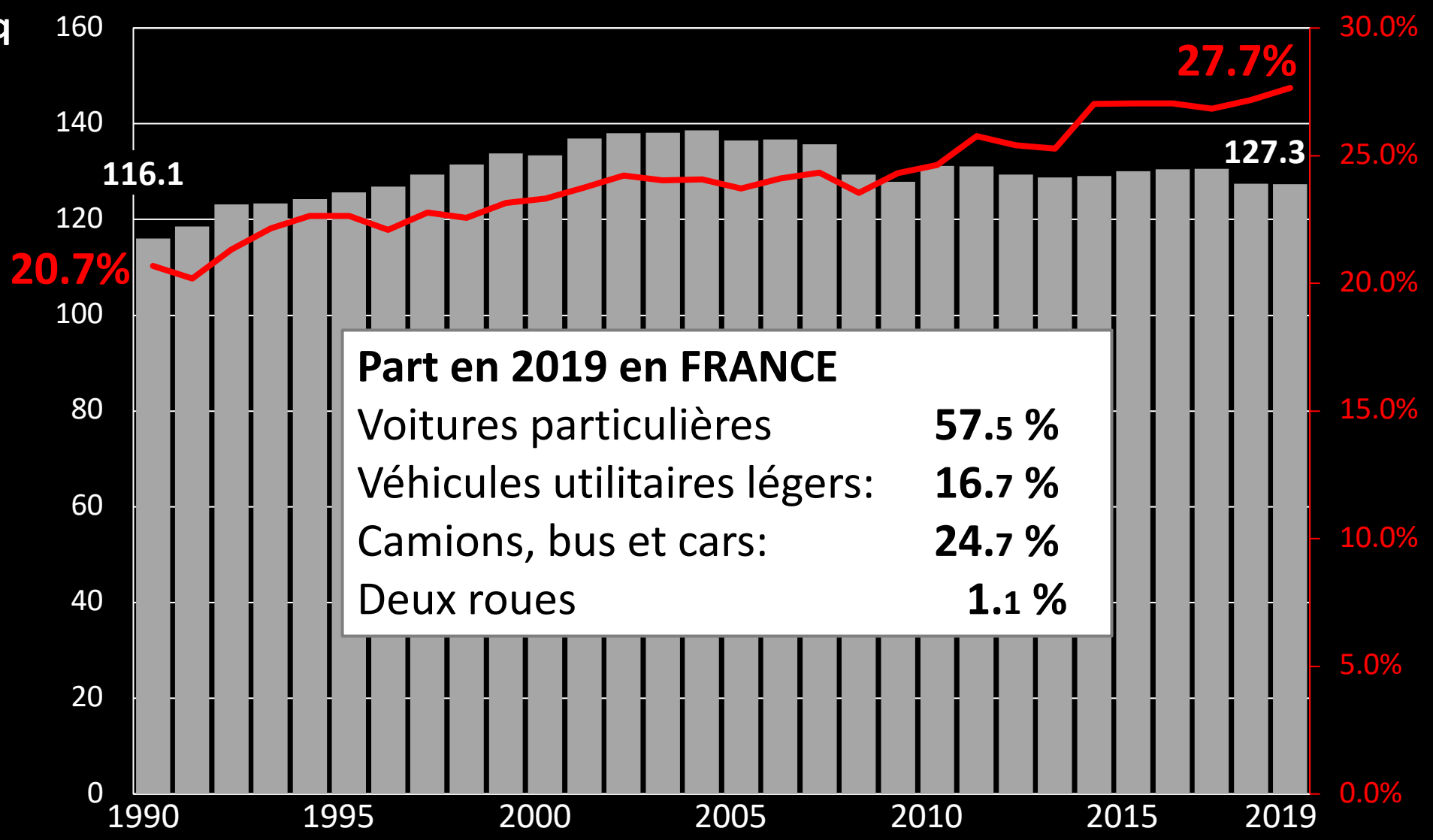
[rail 0.2% , shipping 2.4% , aviation 2.9%]
[acier 7.4%]

Source: IEA World Energy Outlook 2021

La route en Europe ne fait pas exception



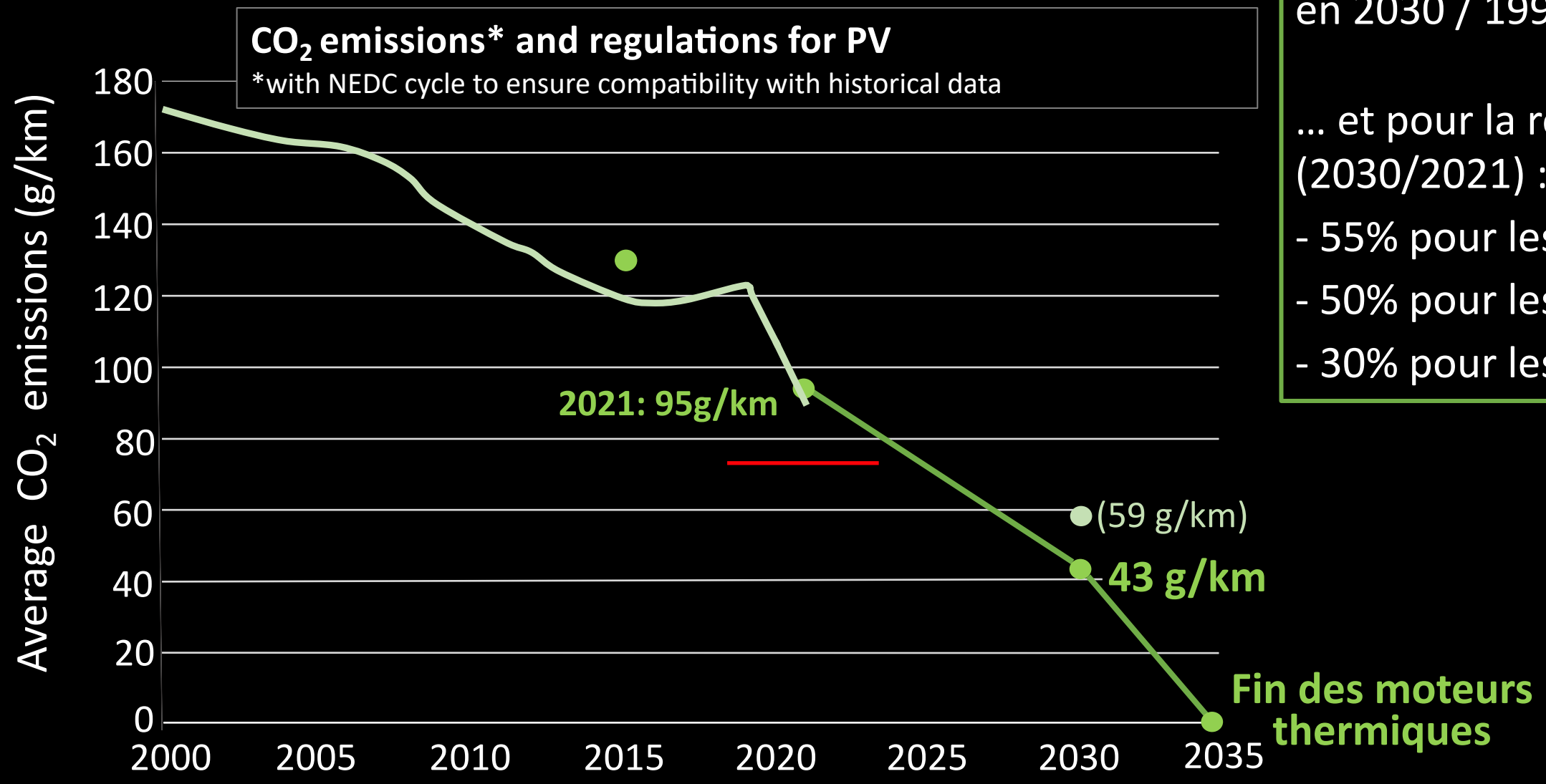
… ni la France (+10% depuis 1990)



En rouge: part des mobilités routières dans les émissions de GES de la France (Total sans UTCATF mais incluant le transport international)

Source: CITEPA, avril 2021
Fichier au format SECTEN

L'Europe a donc réagi !



"Fit for 55": - 55% des émissions de l'EUROPE en 2030 / 1990

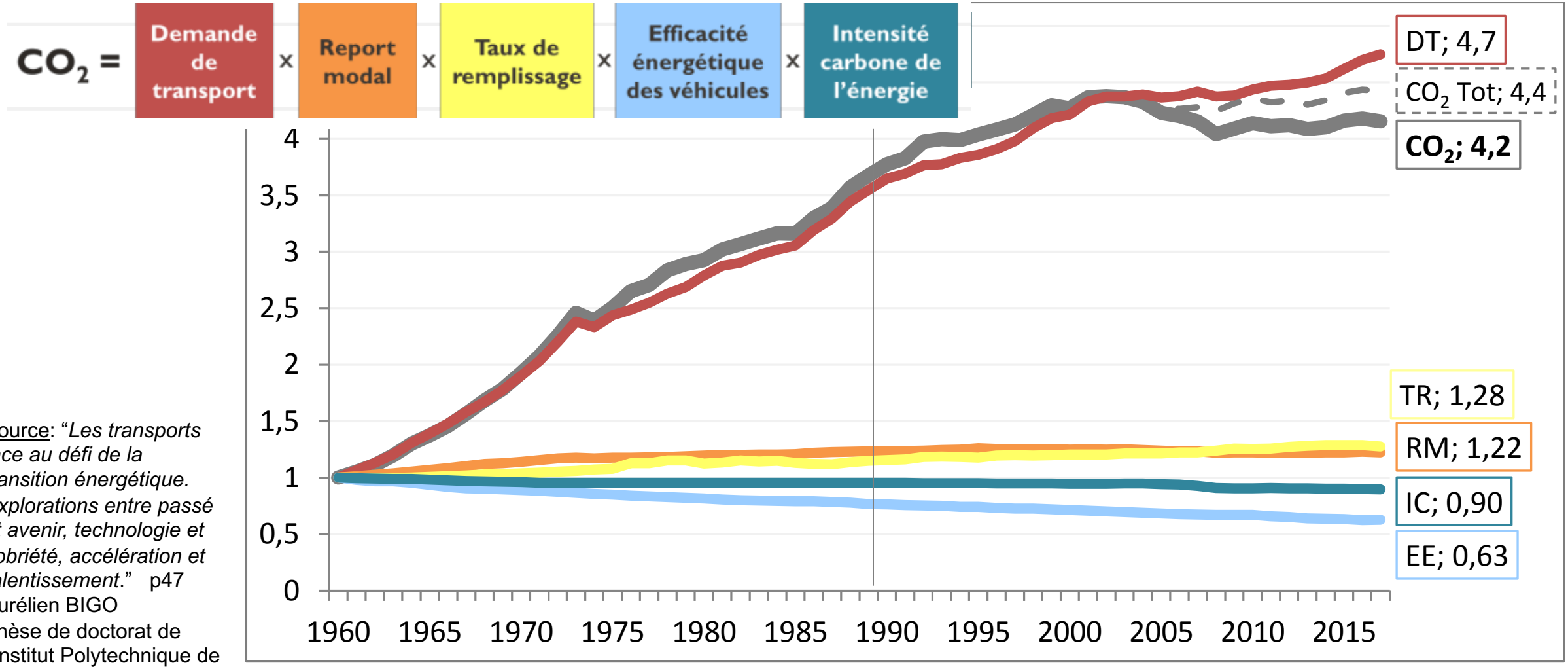
… et pour la route (2030/2021) :

- 55% pour les VPs
- 50% pour les VUL
- 30% pour les camions

Source: European Commission, ICCT and Jato Dynamics

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- **Le potentiel de la sobriété**
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Prix des voitures et adoption massive
- Le fret routier
- Conclusion

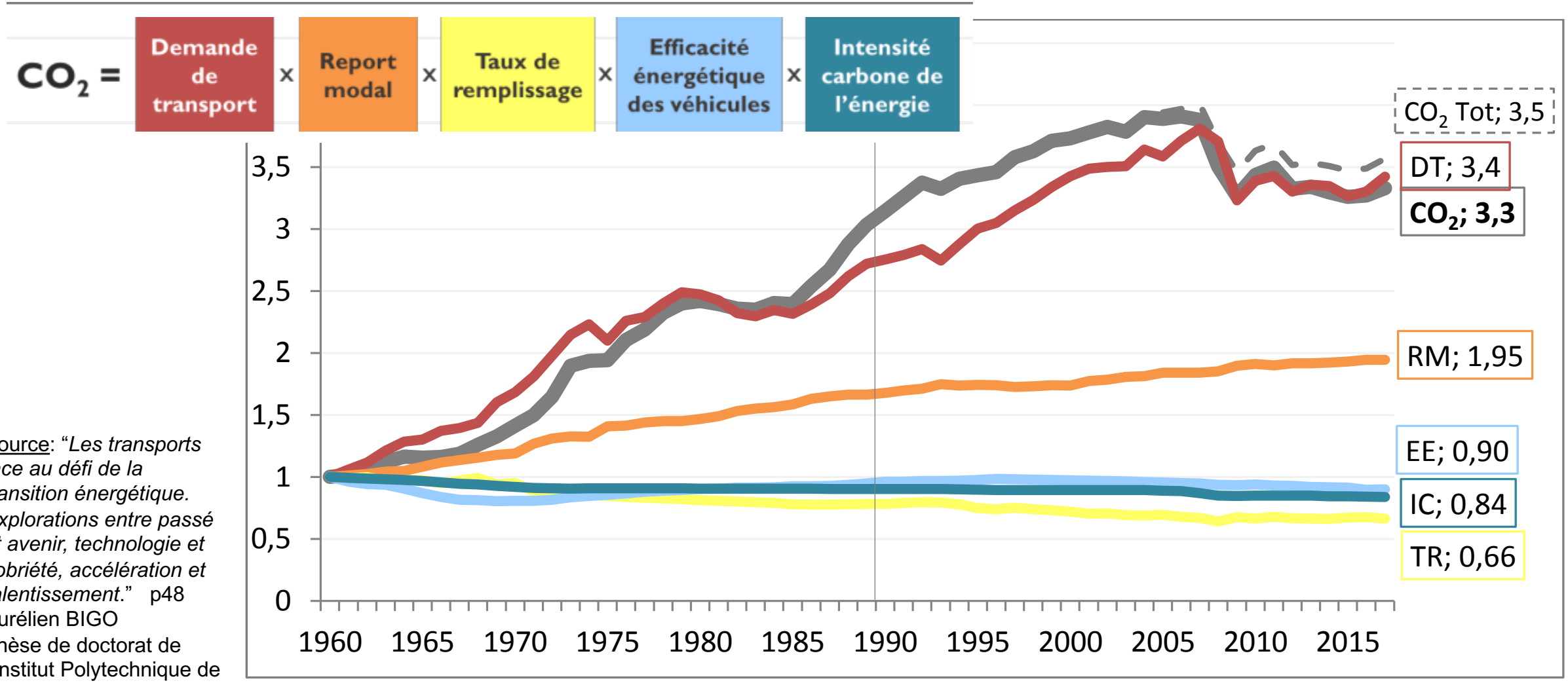
Décomposition des facteurs: voyageurs en France



Source: "*Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.*" p47
Aurélien BIGO
Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris , Nov.2020

Figure 12 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de voyageurs, 1960-2017

Décomposition des facteurs : marchandises en France

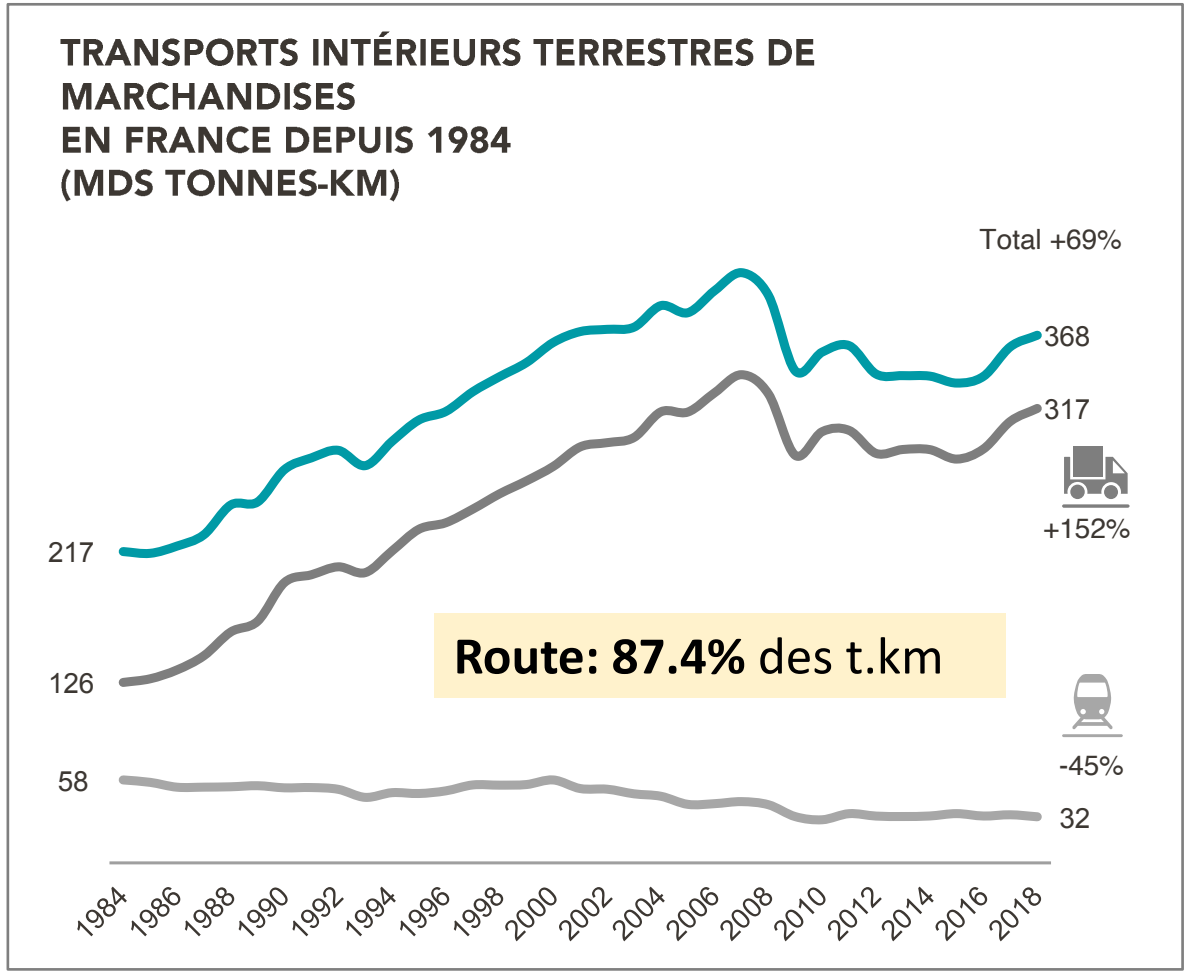


Source: "*Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.*" p48
Aurélien BIGO
Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris , Nov.2020

Figure 14 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de marchandises 1960-2017

La route reste incontournable

Mobilités des marchandises (France)



Mobilités des personnes (France)

Parts modales en 2019 (hors déplacements de +80km) (en voyageurs.km)	**Jour de semaine**	**Jour de week-end**
Nombre de voyageurs-km (en millions)	1,578.8	1,333.5
Marche à pied	2.6%	3.2%
Vélo	1.0%	1.0%
Transports en commun	12.5%	6.9%
Voiture	**81.6%**	**88.0%**
Deux roues motorisé	1.5%	0.7%
Autre	0.8%	0.2%
Total	**100.0%**	**100.0%**

Source: Enquête mobilité des personnes de 2019, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires

Une approche simple du potentiel de la sobriété

Les déplacements en commune centre (v.km)

44% de la marche à pied en France
28% du vélo
14% des TC
5% de la voiture
7% des v.km au total
(28% de la population > 6 ans)

Si les déplacements en voiture (en v.km)

- de moins de 5 km (100%)
- de 5 à 10 km (50%)
- de 10 à 20 km (10%)

.. se faisaient en marchant, en vélo, **ou en TC** on réduirait les émissions CO_2 de **17%**
(en supposant qu'on remplace 100% de véh. thermiques)

Source: Enquête mobilité des personnes de 2019, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires

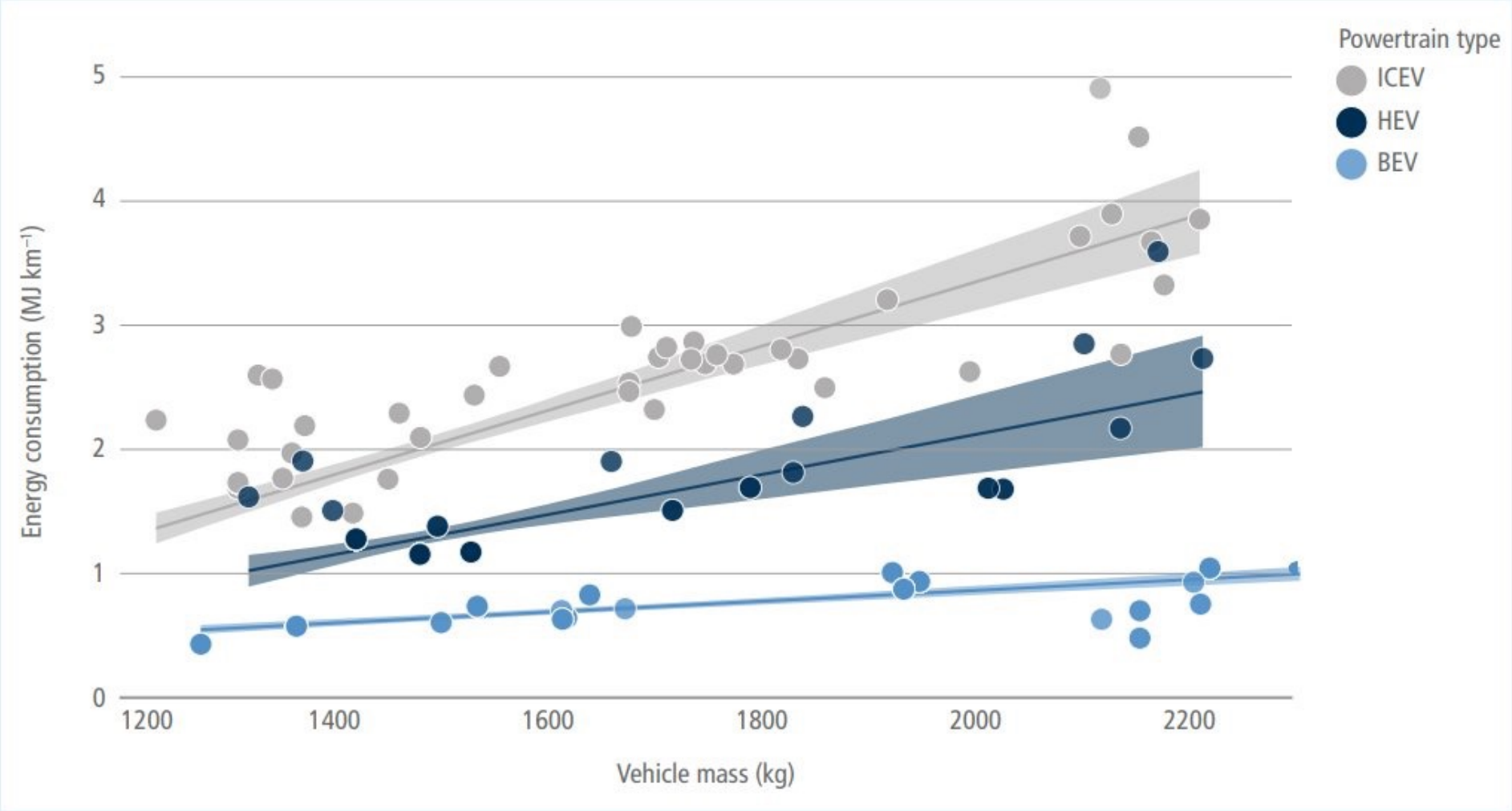
D’autres moyens sobres…

- La masse des voitures
- Grands plans pour
  - les transports en commun
  - le fret ferroviaire
- Télétravail
- Co-voiturage
- Autopartage
- E-commerce

… ou très high tech

…. Voitures autonomes partagées (robotaxis)

L’impact de la masse… baisse avec l’électrification



Box 10.3, Figure 1 | Illustration of energy consumption as a function of vehicle size (using mass as a proxy) and powertrain technology. FCVs omitted due to lacking data.

Source: IPCC AR6 WGIII, 2022
Chapitre 10

D’autres moyens sobres…

- La masse des voitures
- Grands plans pour
  - les transports en commun
  - le fret ferroviaire
- Télétravail
- Co-voiturage
- Autopartage
- E-commerce

… ou très high tech

…. Voitures autonomes partagées (robotaxis)

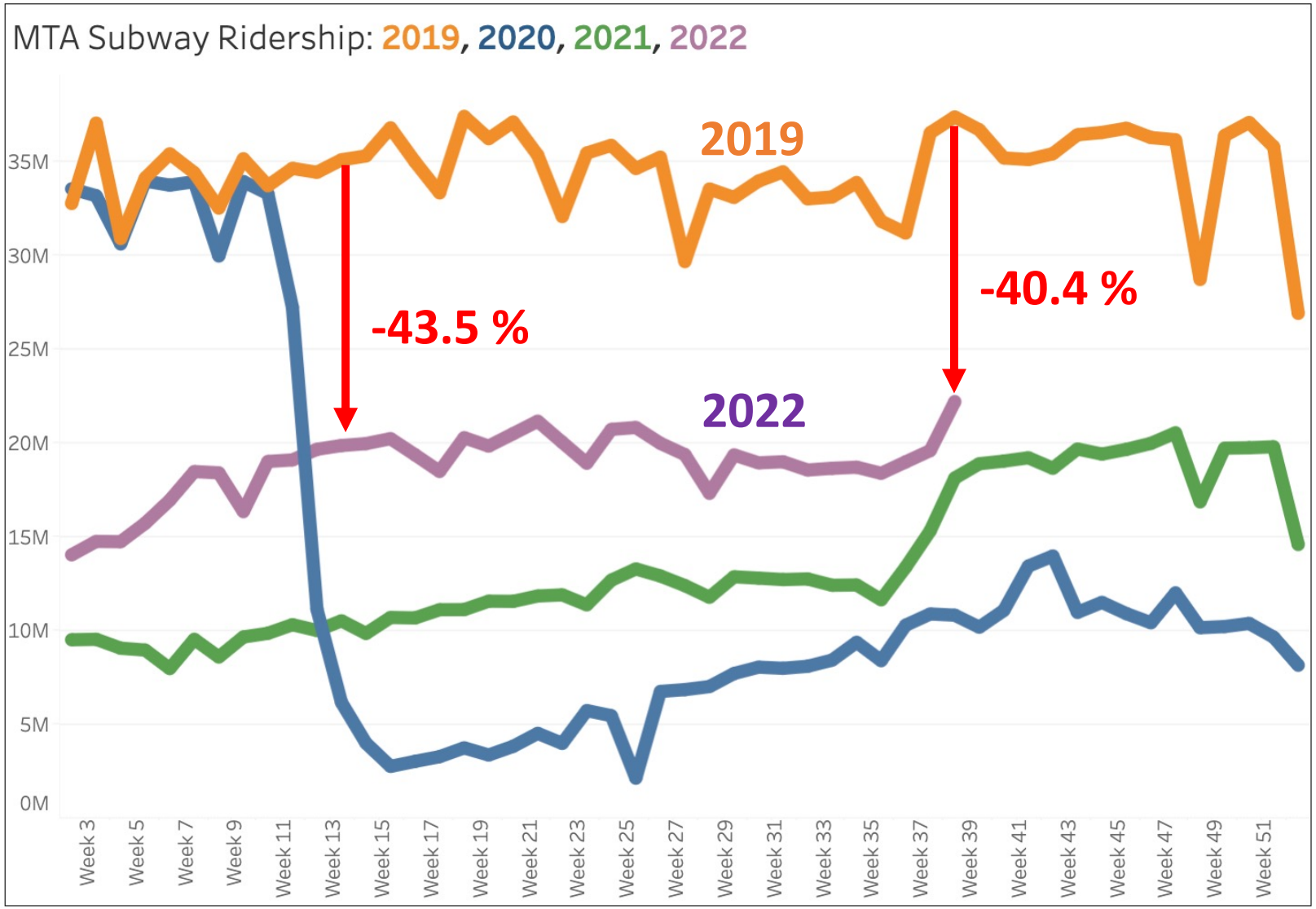
L'évolution modale aux US durant et post COVID

Le trafic routier passagers retrouve le niveau de 2019 en Juin 2021 et stagne légèrement au-dessus depuis.

Source: Vehicle Miles Traveled on all roads and streets month, US Dept of Transportation, Bureau of Transport Statistics

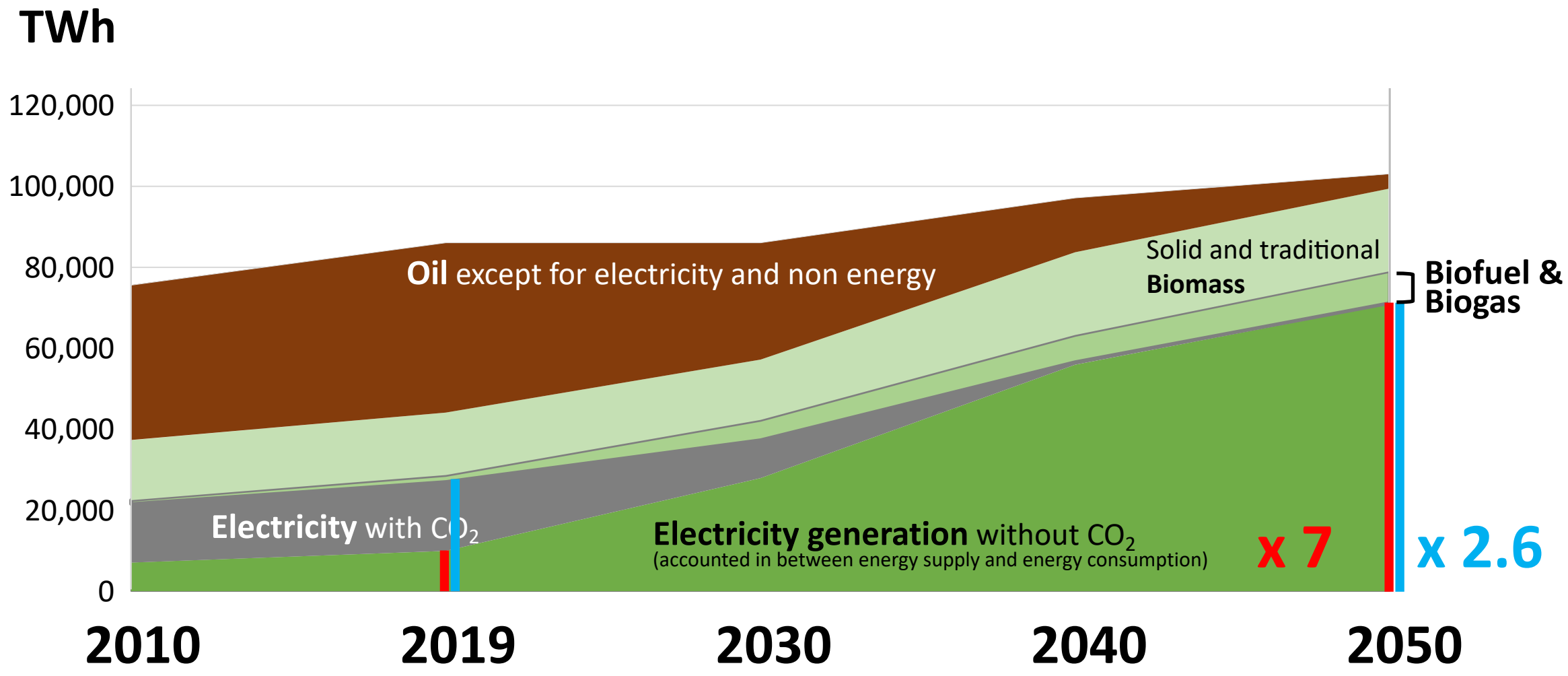
Le trafic des transports en commun reste 36% sous le niveau de 2019 (global US), 40% dans l'aire de NY (métro) 50% et 60% à Washington DC et San Francisco

Source: The week in Transportation (for Covid) DoT-BTS et New York Metropolitan Transport Authority



- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- **Le contexte énergétique**
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- Conclusion

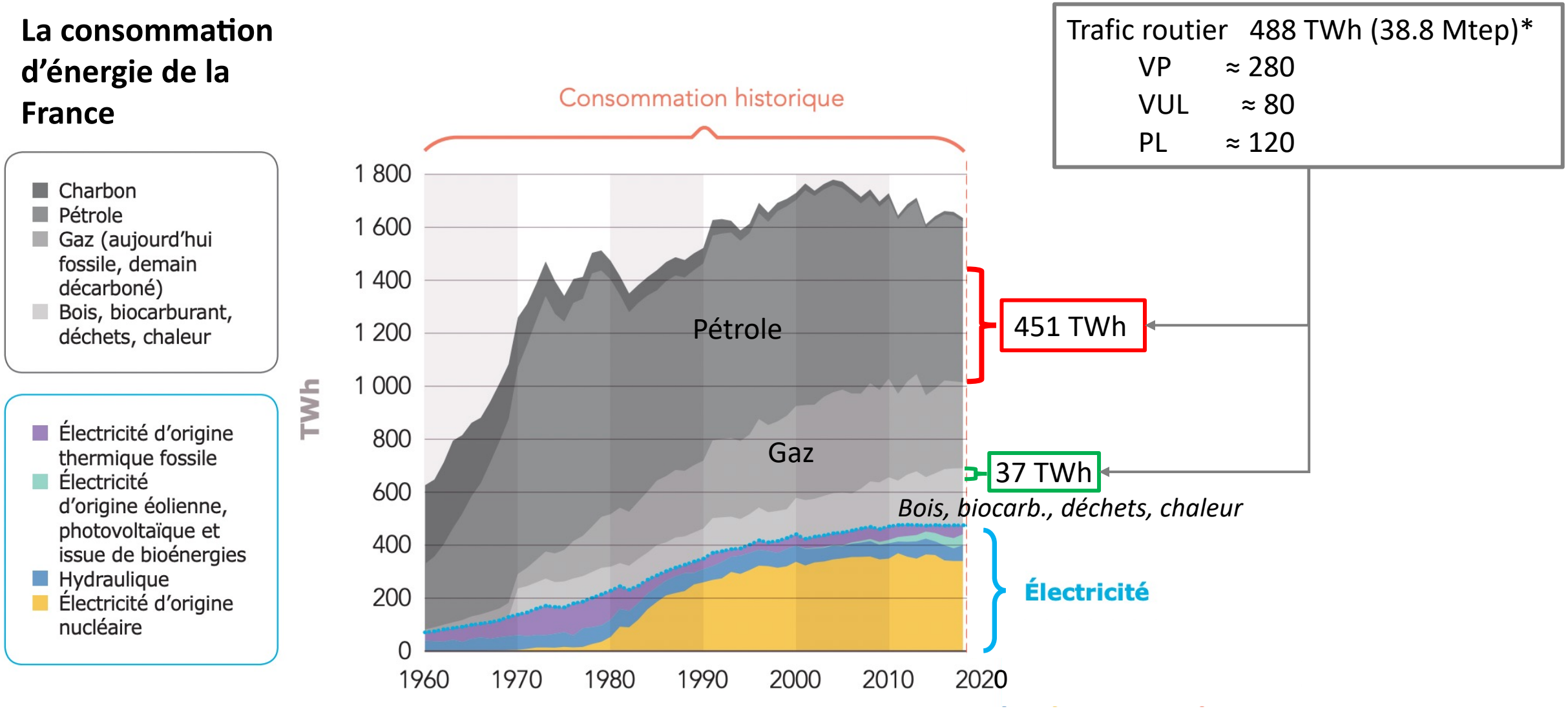
Pétrole, Biomasse & Electricité (monde, AIE “net zero scenario”)



Source: World Energy Outlook 2021

La part du trafic routier dans l'énergie consommée en France

La consommation d'énergie de la France



Source: « Futurs énergétiques 2050 » RTE, Oct. 2021

* 1 Mtep = 11.630 TWh (donnée AIE)

Énergies consommées: qq ordres de grandeur

- **Trafic routier tout électrique** : ≈ 170 TWh d'électricité consommée

(en prenant les hypothèses de rendement moyen des moteurs thermiques du parc roulant en 2019 de 30% et un rendement de charge-décharge des batteries et des moteurs électriques de 85 %)

- **PL et VUL à 50 % en biogaz** : il en faudrait ≈ 9 Mtep (≈ 100 TWh).

La production actuelle est de 0,98 Mtep quasi exclusivement consommée en autoproduction et production de chaleur et d'électricité (0,67 Mtep), en chauffage des bâtiments ou réseaux de chaleur (0,16 Mtep), en mélange au gaz naturel(0,10 Mtep), et dans l'industrie (0,05 Mtep).

- **PL et VUL à 50 % en biodiesel** : il en faudrait ≈ 9 Mtep (≈ 100 TWh). .

La production actuelle y compris les importations nettes) est de 2,8 Mtep dont 2,5 sont mélangés au carburant diesel, le reste étant utilisé par l'agriculture. Mais l'aviation (y compris les vols internationaux) consomme aujourd'hui ≈ 8 Mtep de kérosène.

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- **Solutions potentielles**
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- Conclusion

Solutions potentielles

Biodiesel

Biométhane

Hybride rechargeable avec biodiesel / biométhane

Hydrogène (pile à combustible ou combustion)

E-fuels

Électrique à batterie

Solutions potentielles

	2023-2035	2035-2050
Biodiesel :	Transition ✅	Long terme ✗
Biométhane :	Transition ✅	Long terme ✗
Hybride rechargeable & biocarburant	Transition ✅	Long terme ✅

Biodiesel :

- 45% CO_{2eq} /km / diesel.

Biométhane :

-90% CO_{2eq} /km / diesel

mais 3% de fuites élimine tout bénéfice (CH_4 GWP_{25} effect). ⚠️

mais la concurrence d'usage….

production actuelle 13 TWh* / consommation 2019 de gaz naturel :

résidentiel ≈ 130, industrie ≈ 120, électricité & chaleur 85, tertiaire 70 TWh*

Hybride rechargeable & biocarburant

Bon pour voitures et camions en usage urbain, mais cher

* PCS

Solutions potentielles

Biodiesel

Biométhane

Hybride rechargeable avec biodiesel / biométhane

Hydrogène (pile à combustible ou combustion)

E-fuels

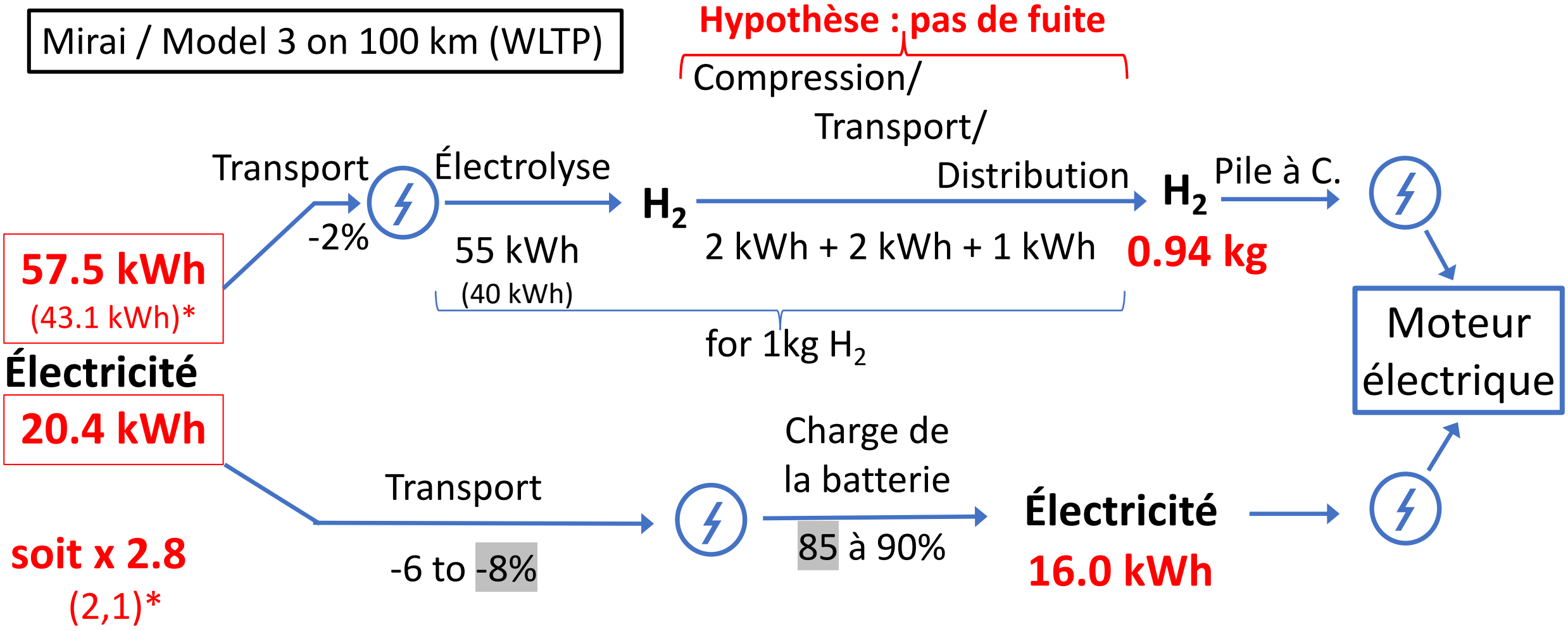
Électrique à batterie

Solutions possibles avec H_2 issu de ..

	2023-2035	2035-2050
Vaporéformage du méthane (SMR) :	Transition ✗	Long terme ✗
mais émissions WtW > 100 gCO_2/km (voiture H_2)		
autres process > 130 and 200 gCO_2/km		
SMR + Carbon Capture & Sequestration	Transition ✅	Long terme ✅
Électrolyse avec électricité décarbonée :	Transition ✗	Long terme ?
nécessite ≈ 2.8 à 3 fois plus d'électricité décarbonée que BEV (2.1 à terme)		

Comparaison VE H_2 (issu d'électrolyse)/ VE Batterie

Mirai / Model 3 on 100 km (WLTP)



Toyota Mirai: 0.94 kg H2/100km, 1850 kg	range	650 km WLTP
Tesla Model 3 long range: 16.0 kWh/100km 1980kg		560 km WLTP

* Électrolyse à haute température (Pilot plant en 2030)

Solutions possibles avec H_2 issu de ..

	2023-2035	2035-2050
Vaporéformage du méthane (SMR) :	Transition ✗	Long terme ✗
mais émissions WtW > 100 gCO_2/km (voiture H_2)		
autres process > 130 and 200 gCO_2/km		
SMR + Carbon Capture & Sequestration	Transition ✅	Long terme ✅
Électrolyse avec électricité décarbonée :	Transition ✗	Long terme ?
nécessite ≈ 2.8 à 3 fois plus d'électricité décarbonée que BEV (2.1 à terme)		
Thermolyse + vapocraquage de la biomasse:	Transition ?	Long terme ✅
excellent WtW carbon footprint		
needs to be scaled and close to available biomass for big volume		
Torche à plasma (R&D)	Transition ✗	Long terme ?

Solutions potentielles

Biodiesel

Biométhane

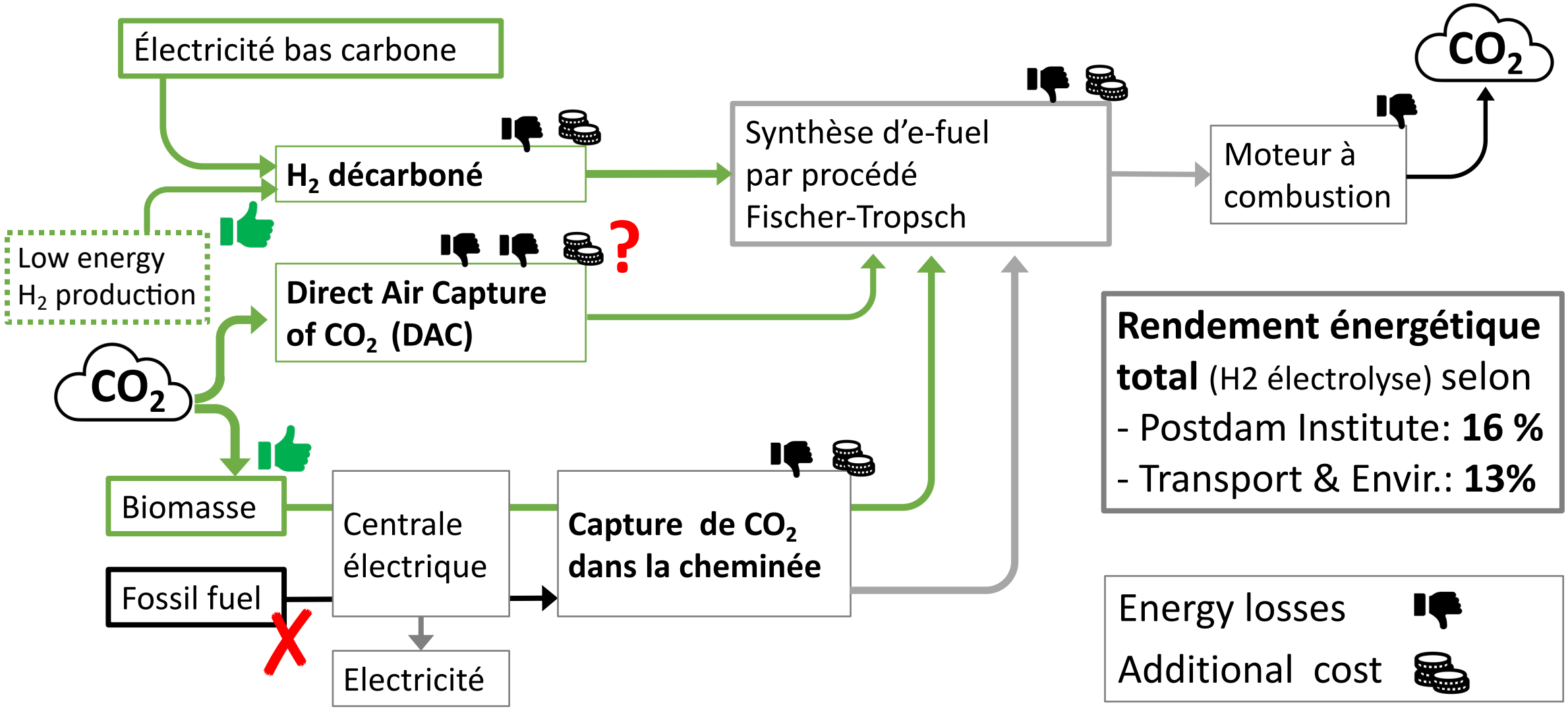
Hybride rechargeable avec biodiesel / biométhane

Hydrogène (pile à combustible ou combustion)

E-fuels

Électrique à batterie

Comment obtenir un e-Fuel décarboné



Rendement énergétique total (H2 électrolyse) selon
- Postdam Institute: **16 %**
- Transport & Envir.: **13%**

Energy losses
Additional cost

Solutions possibles pour les e-fuels..

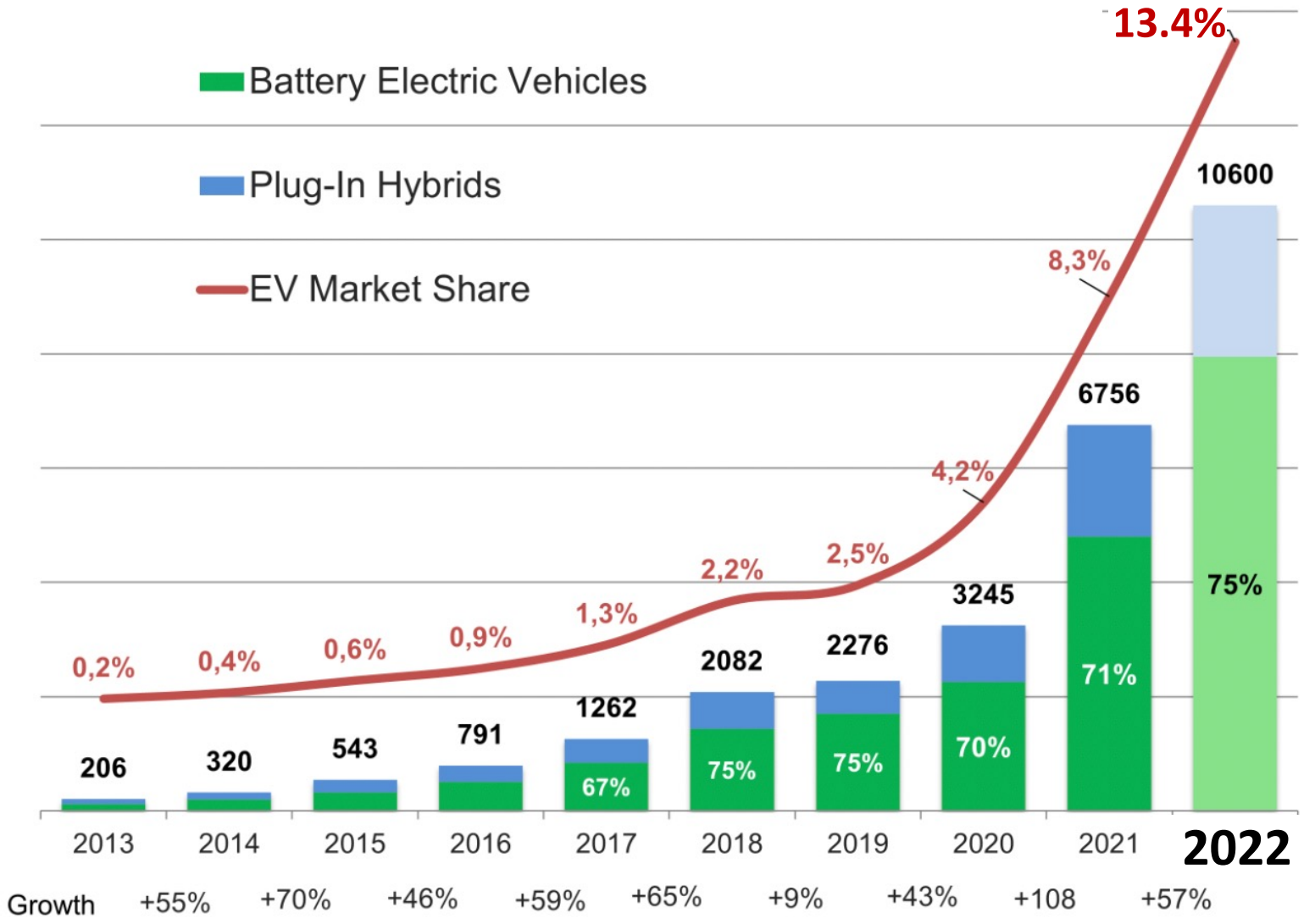
Compétition pour les e-fuels: aviation, fret routier longue distance (avec CO_2 issu de l'atmosphère ou de la biomasse)

	2023-2035	2035-2050
+ H_2 issu d'électrolyse rendement énergétique 11-14%	Transition ✗	Long terme ?
+ H_2 issu de SMR + CCS	Transition ✗	Long terme ?
+ H_2 issu de biomasse / torche à plasma	Transition ✗	Long terme ?

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- **Véhicules électriques à batterie**
- Le fret routier
- Conclusion

La solution qui a décollé: le véhicule électrique

Ventes mondiales de VEs + VHRs 2012 – 2022e

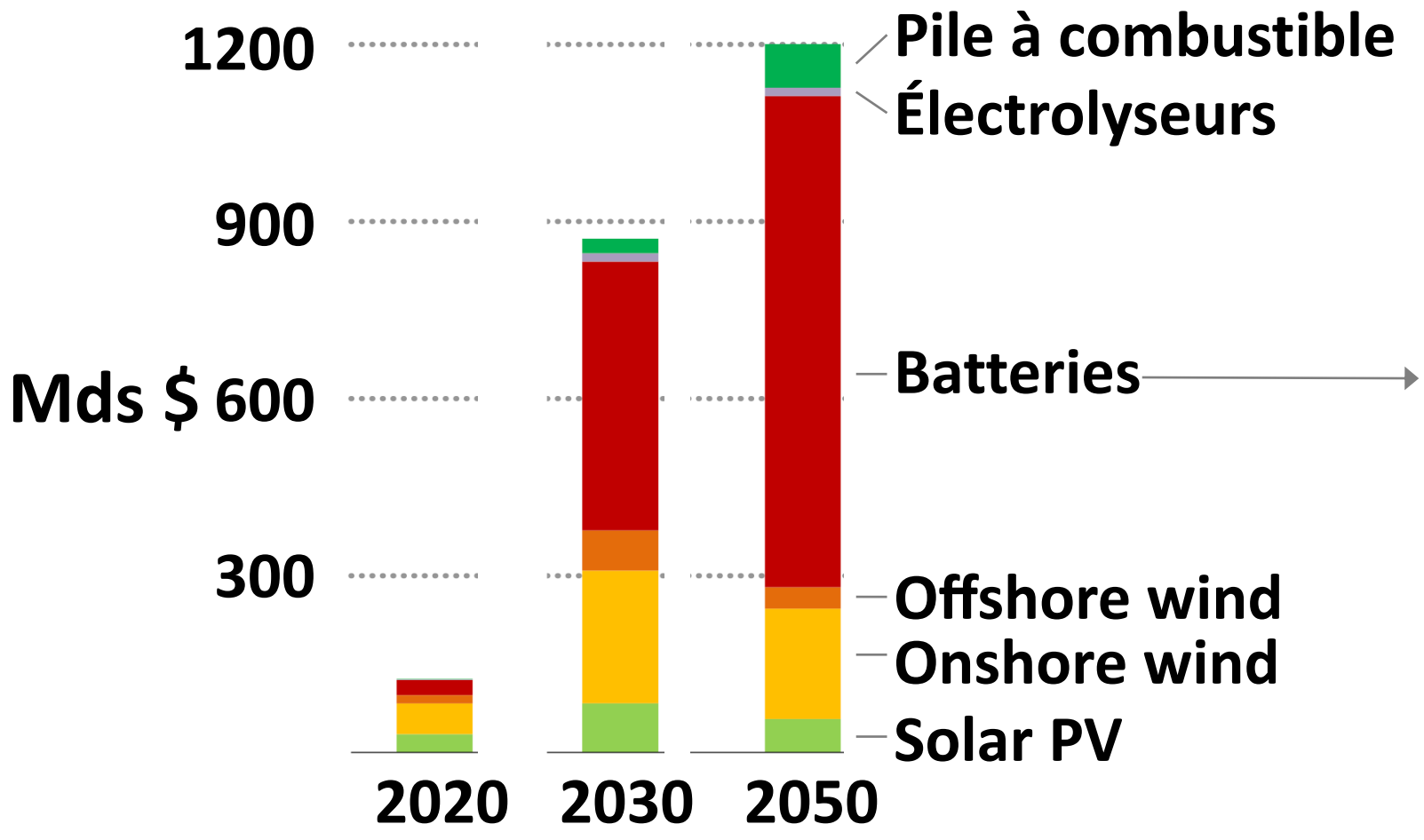


	2022
≈ 0.5 M	+ 89%
≈ 0.9 M	+ 48%
≈ 2.3 M	+ 15%
> 6 M	+ 82%
	+ 57%

Source: EV Volumes

Taille des marchés pour quelques technologies vertes

estimée par l'AIE dans son scénario « net zero emissions by 2050 »



… pour la mobilité

… pour les réseaux électriques

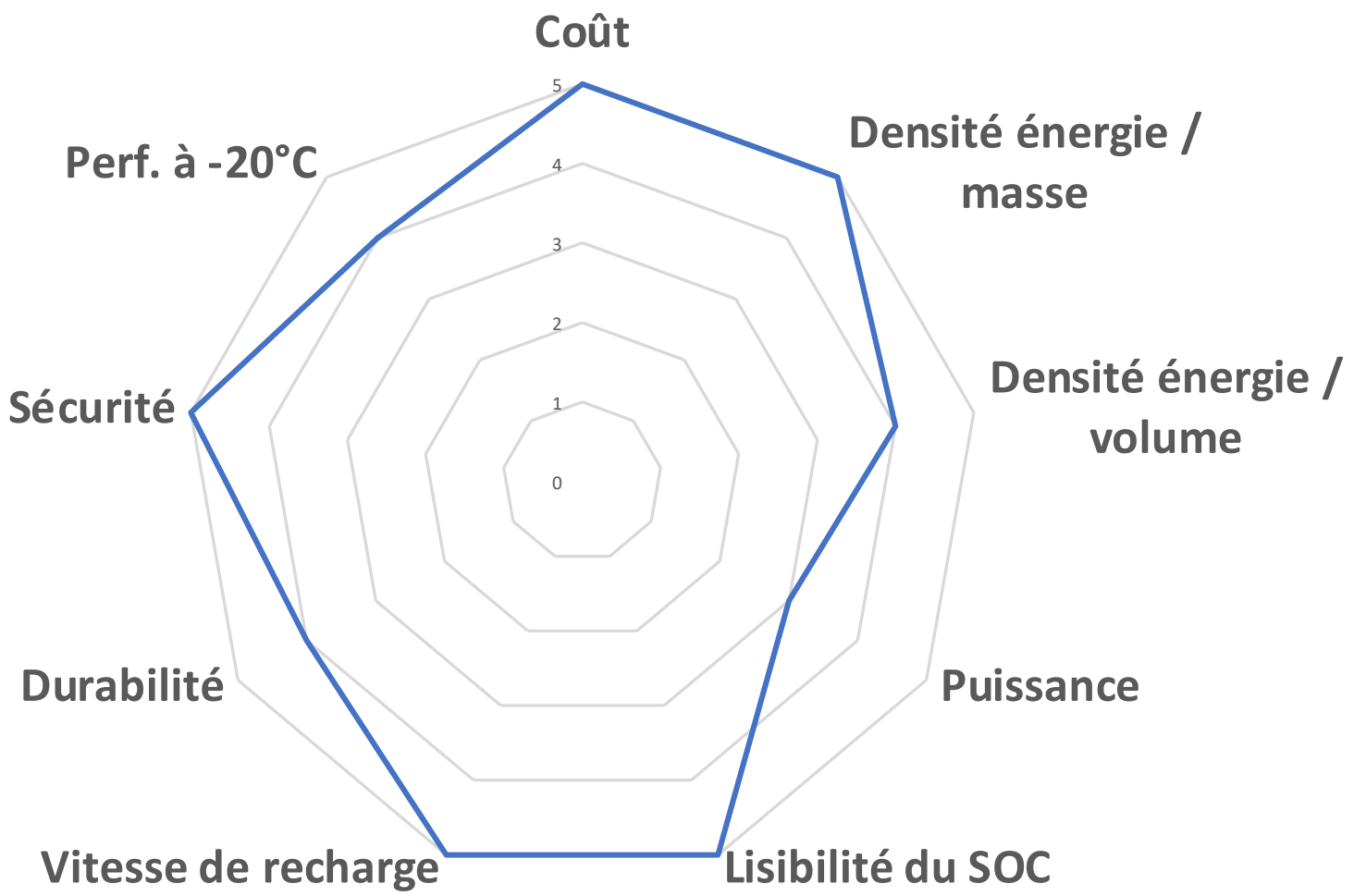
Source: IEA « World Energy Outlook 2021 » p 30

Les points soulevés concernant les VEs

- Performance des batteries (densité massique, vitesse de recharge, durabilité)
- Environnement dont l’empreinte carbone
- Recyclage
- Disponibilité des Lithium, Nickel, Cobalt
- Infrastructure de recharge
- Prix des voitures

Les besoins de performance des batteries pour VEs

… et les contraintes sur leur production



- **Empreinte CO_2eq**
- **Recyclage et son coût**
- **Ressources en métaux**
  - Lithium
  - **Nickel**
  - Cobalt
  - Graphite
- .. et Responsible Mining
- **Investissements élevés**

Les batteries évoluent vite mais…

	Aujourd'hui		Visible 2025		2030	
	NMC 6.2.2 & 7.1.2	**LFP**	**NMC 8.1.1** ou 85/10/5	**LFP**	**NMC** évolution	**Solid State** anode Li métal
Densité massique cellule (Wh/kg)	270	170	300+	200+	350	(450)
Densité massique pack (Wh /kg)	170	140	240	160+	280?	(380)
Vitesse de recharge (pour 80% de la capacité)	30-40 min		20 min		15 min	(20 min)
Durabilité (Nb de cycles 1C/1C avec capacité résiduelle > 75%)	2,000	≈ 4,000	1,800	?	1,200 ?	2,000
Coût du pack ($/ kWh)	120 $	< 120$	100$?	60-70$?	80$??	(>100$)

Sources: diverses et P.Simon à l'Académie des Technologies, « *État de l'art et perspectives des batteries de voitures électriques* » 03-2020, ENS-Paris Saclay

Life cycle CO_{2eq} emissions of a battery

60 kWh battery production from mining to recycling
« fully depreciated » over 150,000 km)

100 kg CO_{2eq} / kWh : **6.0 t** et **40 g/km**

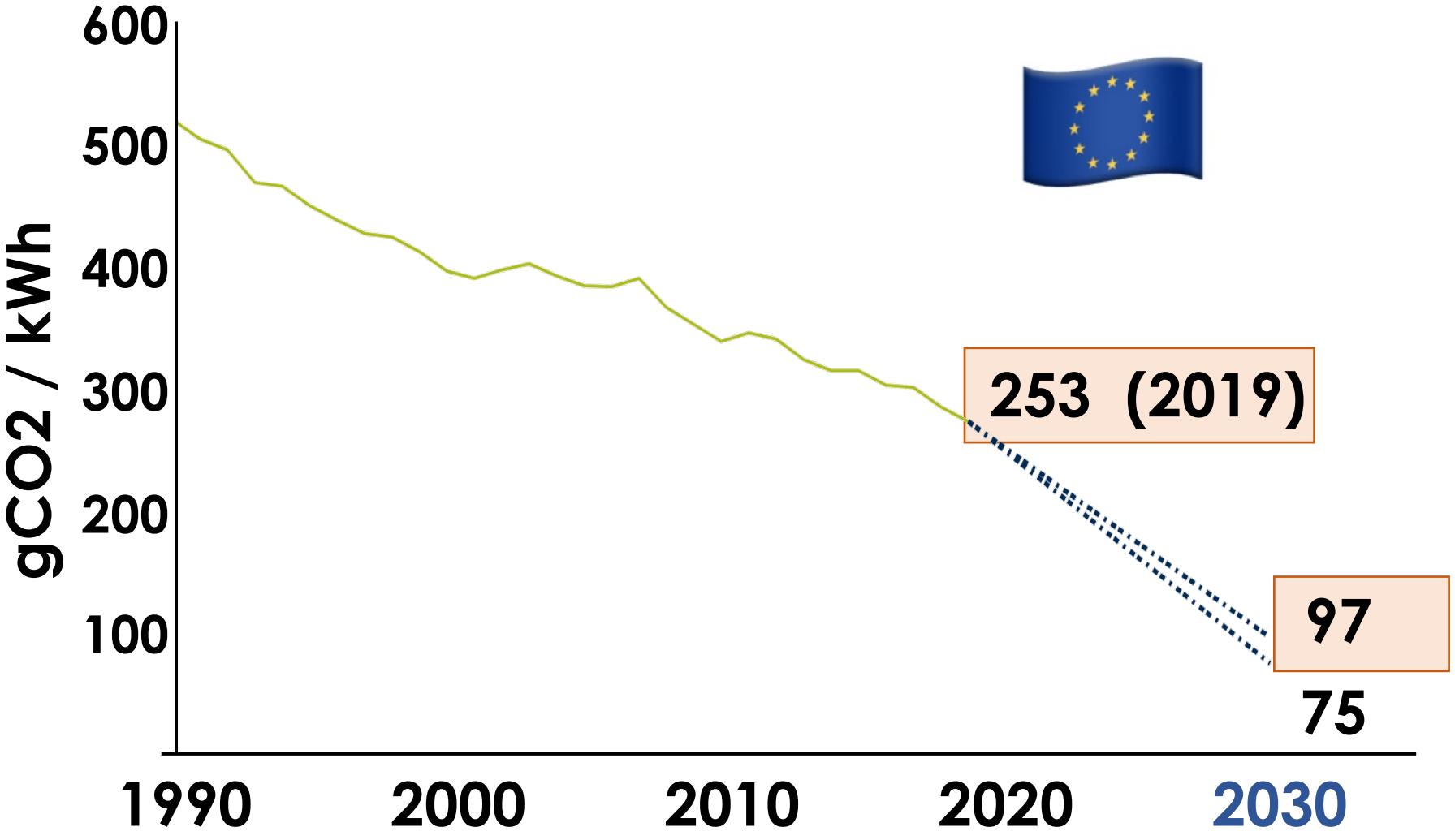
60 kg CO_{2eq} / kWh : **3,6 t** et **24 g/km**

target : **30 kg** CO_{2eq} / kWh : **1,8 t** et **12 g/km**

.. with refining, CAP, pre-CAM and gigafactory using low carbon energy

Source: **Lithium-Ion Vehicle Battery Production,** Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling , Erik Emilsson, Lisbeth Dahllöf, IVL Swedish Environmental Research Institute with Swedish Energy Agency Nov. 2019

Electricity footprint



in 2019 (gCO_2eq/kWh)	
Sweden	10
France	56
Spain	210
Europe 27	253
Germany	344
Poland	744

Source: European Environment Agency, Dec. 2020

Émissions sur le cycle de vie

Toyota Yaris hybrid

Emissions CO_2 : 87 g / km (WLTP)
Production-transport of gasoline + 19% (ADEME)
Battery 1,5 kWh

Renault Zoe

Consumption: 17,2 kWh/100km (WLTP)
Yield of electricity transport and battery charging : 85%
Batterie : 54 kWh
Production de la batterie: Europe

	Zoe			Yaris hybride
Battery production:	**22**	**22**	**11** target	**≈ 0**
Electricity production :	**11**	**51** 2019	**20** 2030	
Gasoline production				**17**
and combustion :				**87**
Total en g CO2/km	**33**	**73**	**31**	**104**

Besoins de métaux / Production / Réserves

Besoins monde 2030 (demande totale 5000 GWh/an)

	NMC 811 50% LFP 50%	Production globale 2021 / réserves prouvées	Ressources estimées
Lithium	500 kt	100 kt ⚠ / 22 000 kt	89 000 kt
Nickel	1,500 kt	2 700 kt ⚠ / 95 000 kt	300 000 kt
Cobalt	185 kt	170 kt / 7 600 kt	25 000 kt

En ce qui concerne le **cuivre**, les réserves prouvées sont de 880 Mt. La production de 2021 était de 26 Mt. Les ressources connues sont de 2 100 Mt. Les ressources totales estimées : 3 500 Mt. Et le recyclage fonctionne bien.

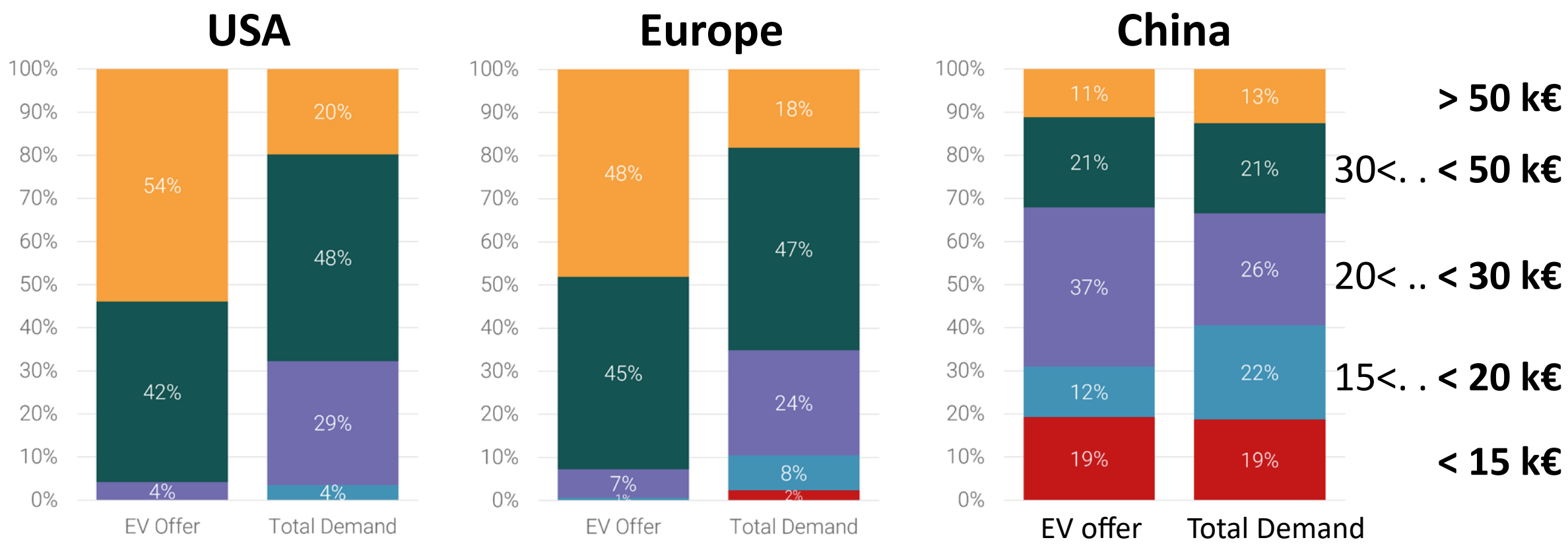
Source: US Geological Survey 2022

L’infrastructure de recharge, un retard français

Une station de 72 superchargers par Tesla en Chine (2020)

Le prix des VEs: un obstacle, un danger

H1 2022 Retail Price of Electric Cars by range as percentage of total offer vs H1 2022 Sales distribution by Retail Price range



Source: Affordable EVs and Mass Adoption: The Industry Challenge, **JATO Dynamics, 2022-09**

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- **Le fret routier**
- Conclusion

Solutions potentielles (fret longue distance)

	2023-2035	2035-2050
Biodiesel :	Transition ✅	Long terme ✗
Biométhane :	Transition ✅ ?	Long terme ✗
Hybride rechargeable & biocarburant ✗		
Électrique-hydrogène avec..		
Vaporéformage du méthane (SMR) :	Transition ✗	Long terme ✗
SMR + Carbon Capture & Sequestration	Transition ✅	Long terme ✅
Électrolyse avec électricité décarbonée	Transition ✗	Long terme ?
Thermolyse + vapocraquage de la biomasse	Transition ?	Long terme ✅
Torche à plasma (R&D)	Transition ✗	Long terme ?
E-fuel		
avec H_2 issu d'électrolyse	Transition ✗	Long terme ?
avec H_2 issu de SMR + CCS	Transition ✗	Long terme ?
avec H_2 issu de biomasse / torche à plasma	Transition ✗	Long terme ?

Motorisation électrique à batterie sans ERS

Deux cas possibles:

- **Recharge chaque 4h 30min => autonomie 400 km et recharge rapide** (70-80% en 45 min)
  - ⇒ **Batterie de 770 kWh** (1) prix > 80,000 € en 2030, **Masse de 3.5 à 4.3t** (3) => perte de 1 à 2t de charge utile.
  - ⇒ **Stations de recharge de 900 kW à 1 MW** (2) dans toutes les aires de repos et en nombre suffisant
  - ⇒ Après 1800 cycles de recharge rapide (≈ 700,000 km), la capacité de la batterie descendra sous 80% => **a new battery**

  Ce cas nous paraît peu réaliste

- **Recharge en 9h** (et quelques recharges intermédiaires) **=> autonomie de 800 km**
  - ⇒ **Batterie de 1200 kWh**(4) prix > 130,000 € en 2030. **Masse de 5.5 à 6.7 t** (3) => perte de 3 à 5 t de charge utile.
  - ⇒ **Stations de recharge de 150 à 200 kW** (5) et quelques **stations de recharge de 900 kW à 1 MW** dans toutes les aires de repos et en nombre suffisant
  - ⇒ La batterie tiendra plus de 1M km à plus de 80% de capacité sans besoin de 2ème batterie

  Ce cas est retenu dans l'étude

(1) 1.30 kWh/km x 400 km / 80% (max filling in fast charging) / 85% (battery after 1800 cycles) = 770 kWh

(2) 770 kWh x 80% in 40 min => 900 to 1200 kW charging plots

(3) Pack density forecasted for 2030 respectively in NMC and LFP. Solid state batteries should come later for trucks. Battery pack weight may then go down to 2.2t and 3.4t for, respectively 770 kWh and 1200 kWh batteries.

(4) 1.30 kWh/km x 800 km / 85% (battery after 1800 cycles) ≈ 1200 kWh

(5) 1200 kWh / 8 hours = 150 kW

Motorisation électrique avec ERS

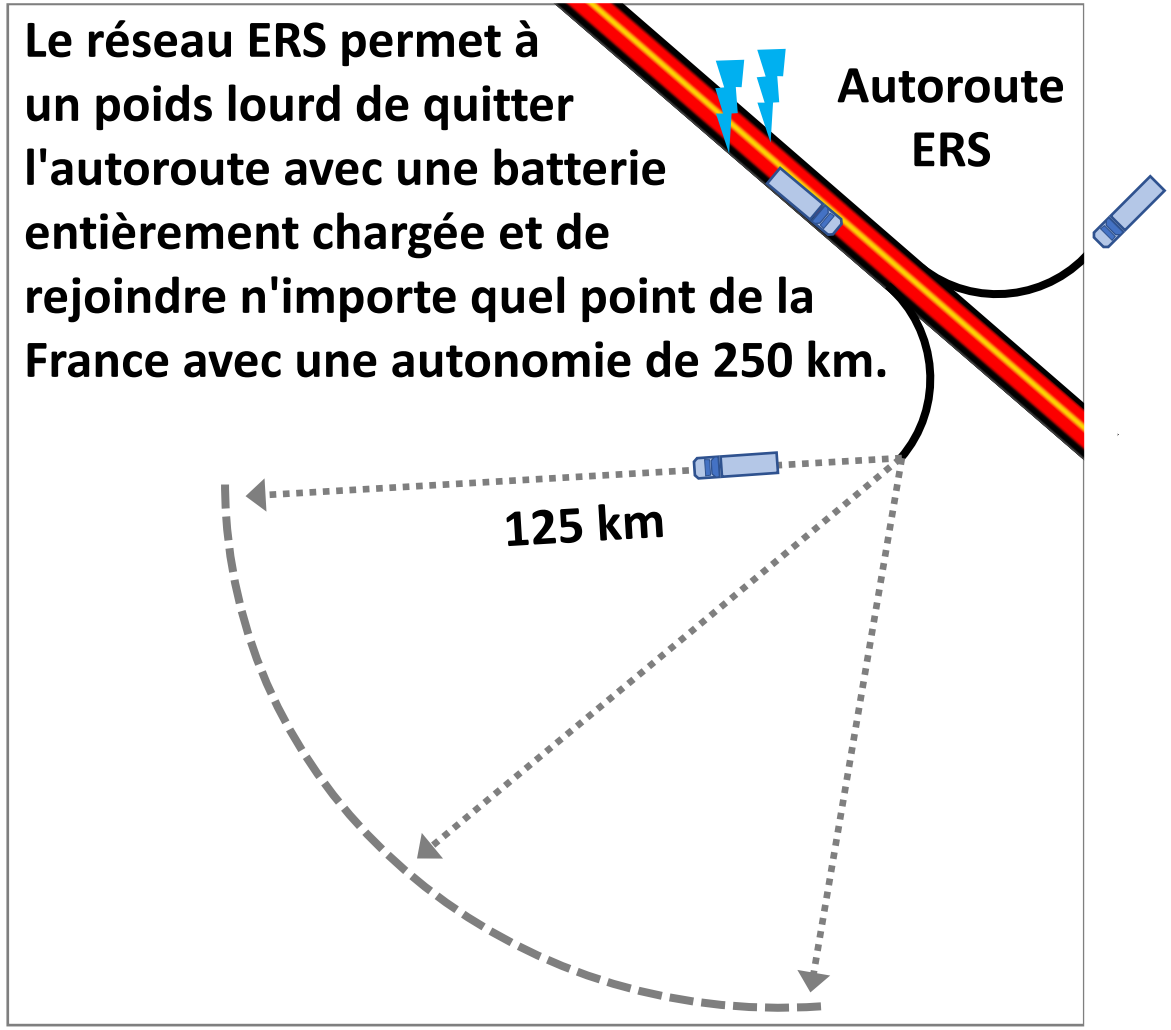
Données France

Trois technologies

Nos hypothèses

- Équipment de ≈ **9000 km d'autoroutes**
- **Batterie de 370 kWh** permettant 250km d'autonomie pour un camion électrique en fin de vie*
- **Puissance délivrée: 350 à 400 kW** pour les cas les plus difficiles (44 t réfrigéré capable de se recharger à 100% sur ERS)

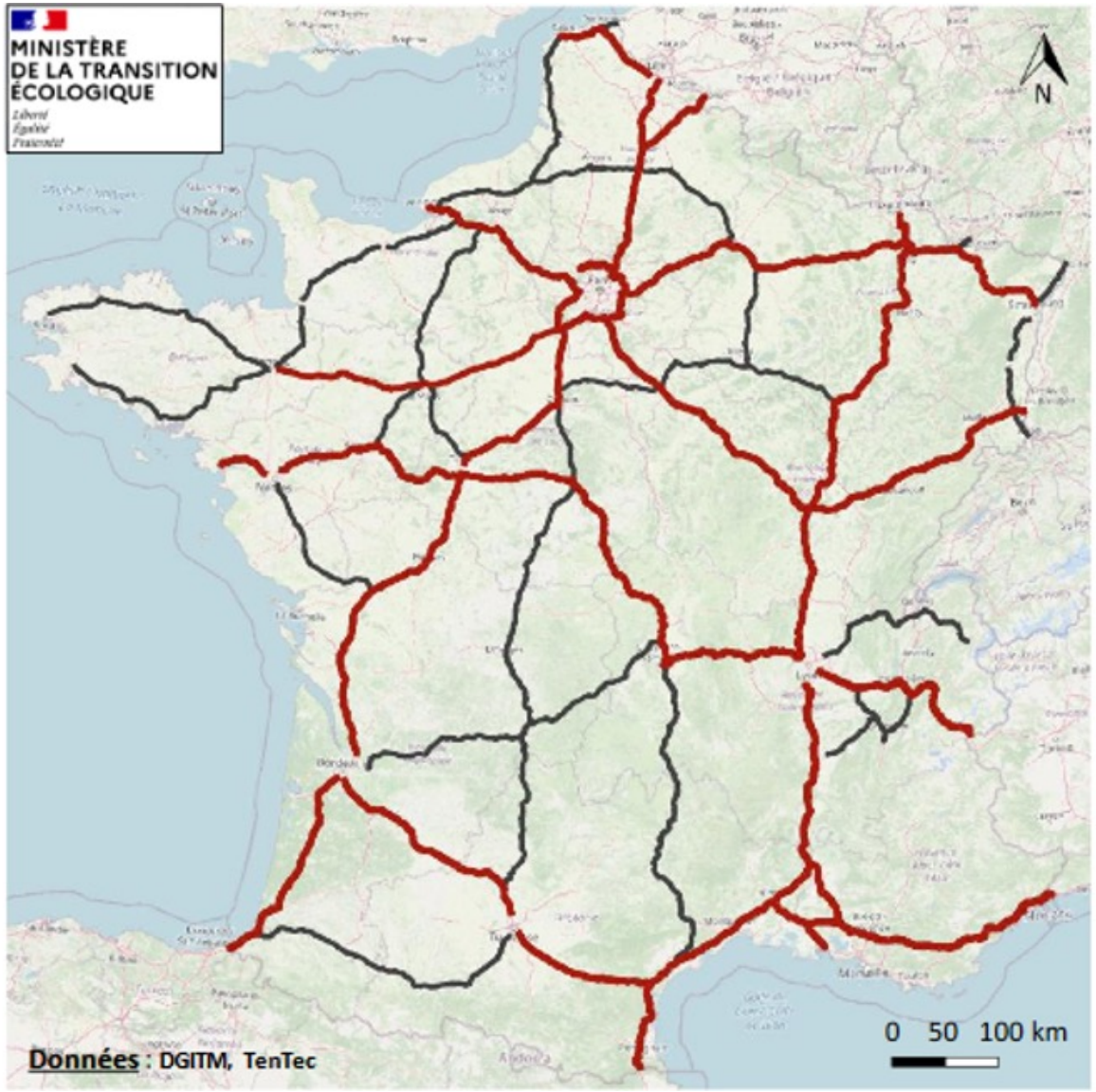
* 1.25 kWh/km x 250 km / 0.85 = 380 kWh



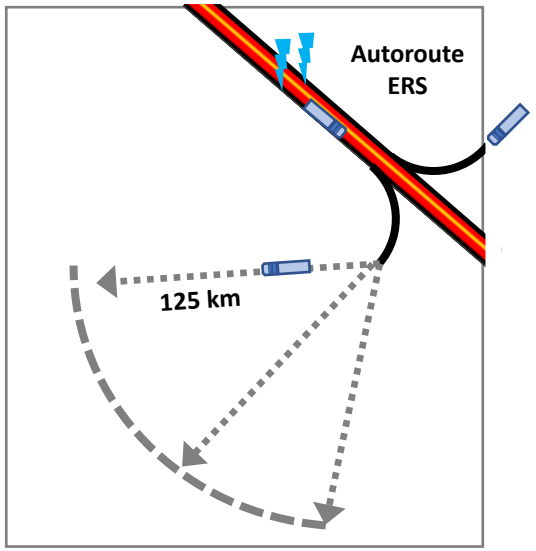
Le réseau ERS étudié

2030 4,900 km
puis 2035 + 3,950 km

soit au total **8,850 km**



Résultats en résumé

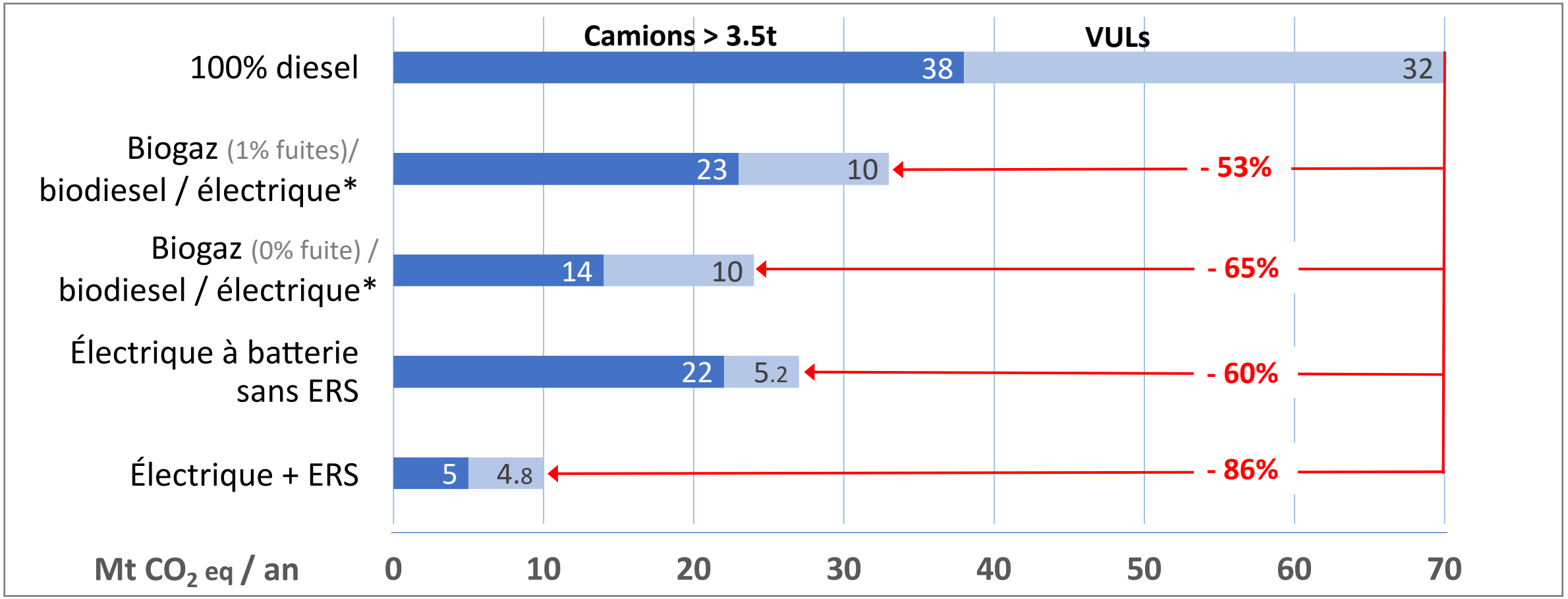


Le système d'autoroute électrique (ERS) permettrait ..

- Une décarbonation massive (-85%) du fret routier

Émission de GES /année en cycle de vie (2050)

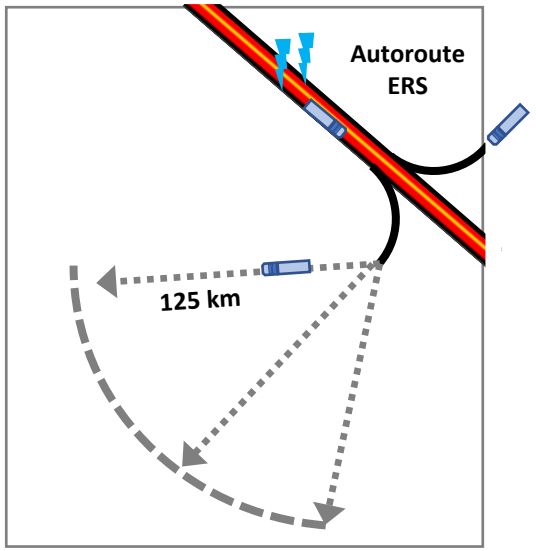
Données France



*25% biodiesel, 25% biogaz et 50% électrique pour les camions, 18% biodiesel (longue distance) et 72% électrique pour les VULs.

La solution « rail » économiserait 4Mt CO_{2eq} de plus par an permettant à 25% des voitures d'avoir une batterie plus petite (- 40kWh)

Résultats en résumé



Le système d'autoroute électrique (ERS) permettrait ..

- Une décarbonation massive (-85%) du fret routier
- Un coût total d'utilisation similaire au diesel
- Un investissement (privé) 2025-2035 de 30 à 40 Mds €.
- Une solution plus compétitive que des camions à grosse batterie et les très nombreuses stations de recharge qui devront aller avec

Mais nécessitera

- Un support financier public temporaire dû à la lente (6 ans?) transformation de la flotte de poids lourds.
- Une décision pan-Européenne pour que une premier réseau significatif soit opérationnel fin 2029.

De plus..

- **Camions à grosses batteries ou H_2 (sans ERS)** : des investissements lourds pour les transporteurs
- **Avec ERS** : des investissements lourds pour des grands opérateurs... et plus légers pour les transporteurs.
- **L'ERS** génèrerait des emplois dans chaque pays européen.
- **L'ERS** pourrait rabattre du trafic sur les autoroutes à péage (cas de la France) et libérer le réseau secondaire d'une partie du trafic de fret selon les simulations effectuées par la DGITM
- Le doute ou le « il faudra un peu de toutes les solutions » conduit aujourd'hui à **l'inaction**. Et à une question: pourra-t-on justifier plusieurs réseaux de distribution ?

- La contrainte climatique
- La place des mobilités routières
- Le potentiel de la sobriété
- Le contexte énergétique
- Solutions potentielles
- Véhicules électriques à batterie
- Le fret routier
- **Conclusion**

Conclusion sur les mobilités routières

1) Pas d'autre choix que des véhicules ≈ zéro carbone en 2050.
2) Donc véhicules neufs ≈ zéro carbone en 2035-40.
3) Une approche énergies / ressources / infrastructure est nécessaire
4) EV meilleure solution à moyen terme (VP, VUL, camions intra-régionaux).
5) Le H2 et les e-carburants posent problème pour le trafic routier
6) La recharge est à la traîne
7) Besoin urgent de VE d'entrée de gamme
8) Fret longue distance : ERS ou grosses batteries (H2 ou eFuels ??)
9) Une vraie rupture à venir: les véh. autonomes partagés. Mais quand ?

Cinq messages en conclusion

- Mobilités + énergies + infrastructures + ressources : un tout en transformation
- Aller vite et prendre en compte l’effet parc
- Déployer rapidement les solutions matures ou, pour une part, qui seront matures avant 2035
- Prendre en compte les usages réels choisis ou acceptés
- Le débat sur la sobriété ne doit pas ralentir la transformation énergétique, industrielle et technologique. C’est un complément.

Merci pour votre attention