



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# Les émissions des transports routiers

Laurent GAGNEPAIN – Service Transports et Mobilité

# Préambule

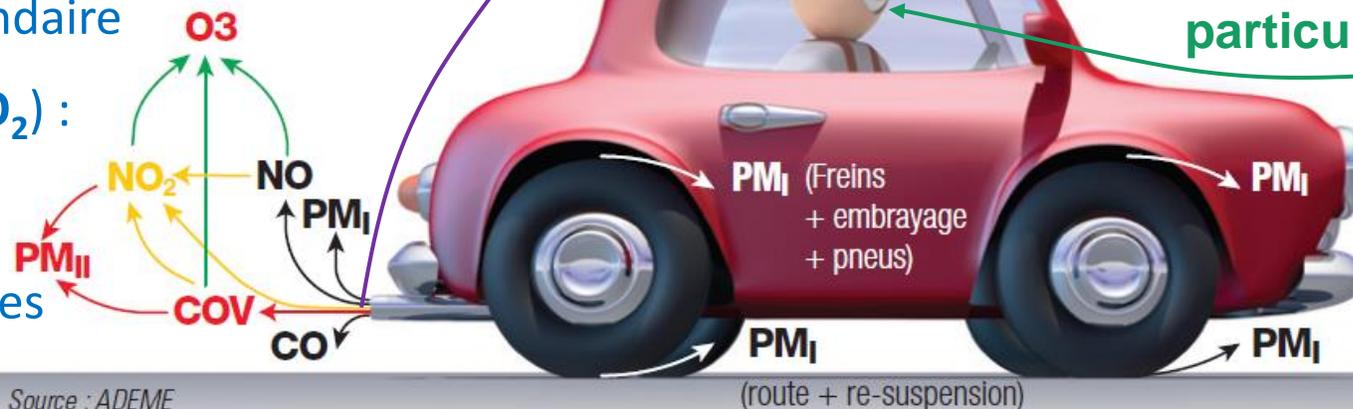
Émissions de polluants  
atmosphériques  
par un véhicule thermique

Gaz à effet de serre :  
 $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  + HFC (climatisation)

L'ozone, polluant secondaire

Le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) :  
primaire + secondaire

Les particules, primaires + secondaires



Source : ADEME  
Création : O'Communication

CO : monoxyde de carbone  
COV : composés organiques volatils  
NO : oxyde d'azote  
 $\text{NO}_2$  : dioxyde d'azote

$\text{O}_3$  : ozone  
 $\text{PM}_{10}$  : particules primaires  
 $\text{PM}_{10-10}$  : particules secondaires

# Sommaire

## 1. Evolutions des émissions des transports routiers au cours du temps

- a) Part des transports routiers dans les émissions nationales
- b) Réglementation Euro et impact sur les émissions

## 2. Les particules hors échappement

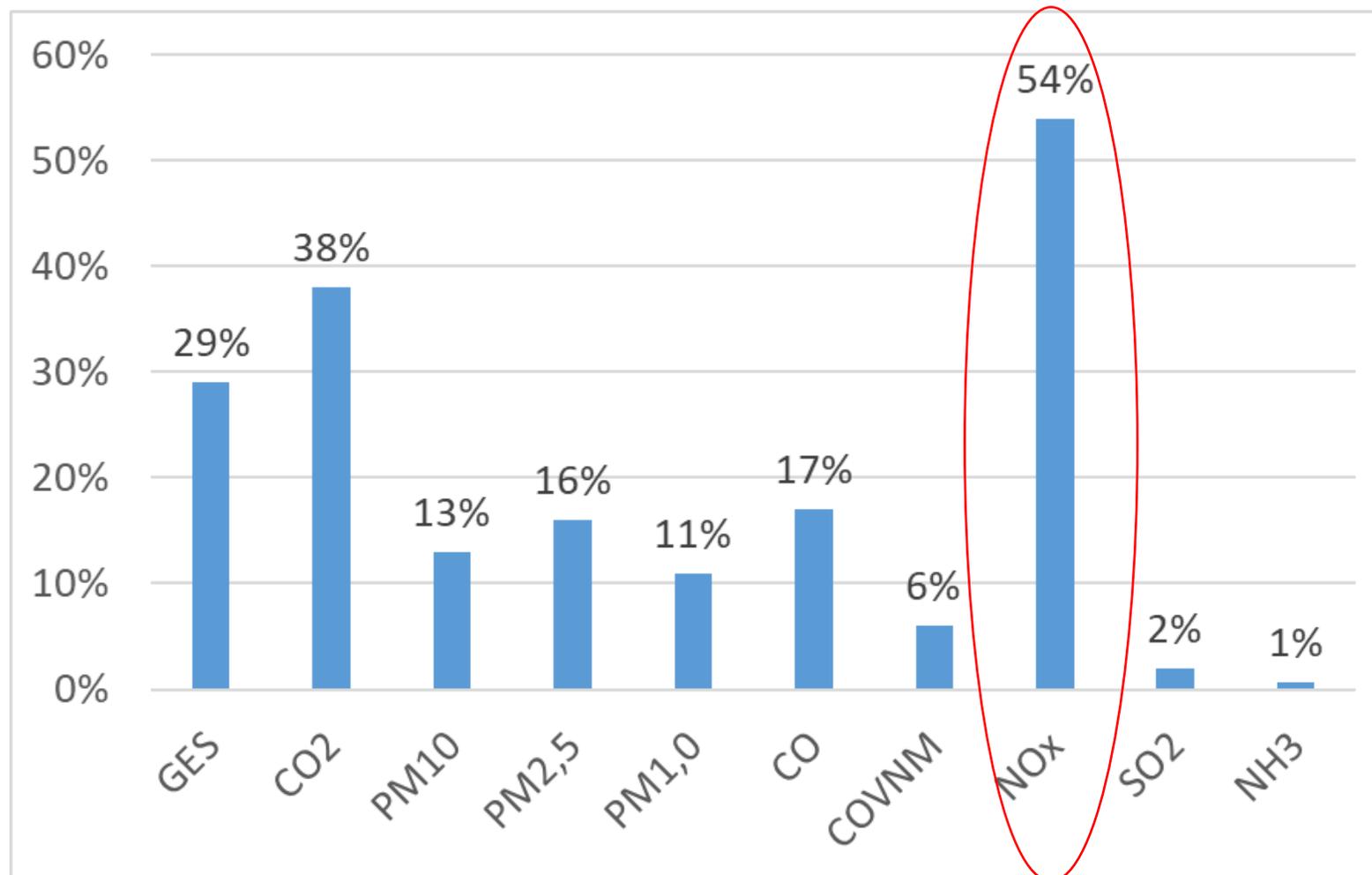
- a) Quantités de particules hors échappement émises
- b) Particules de frein
- c) Particules issues du contact pneu - chaussée
- d) Impacts sanitaires et environnementaux
- e) Solutions de réduction des émissions
- f) Évolutions réglementaires

## 3. Les véhicules légers aujourd'hui

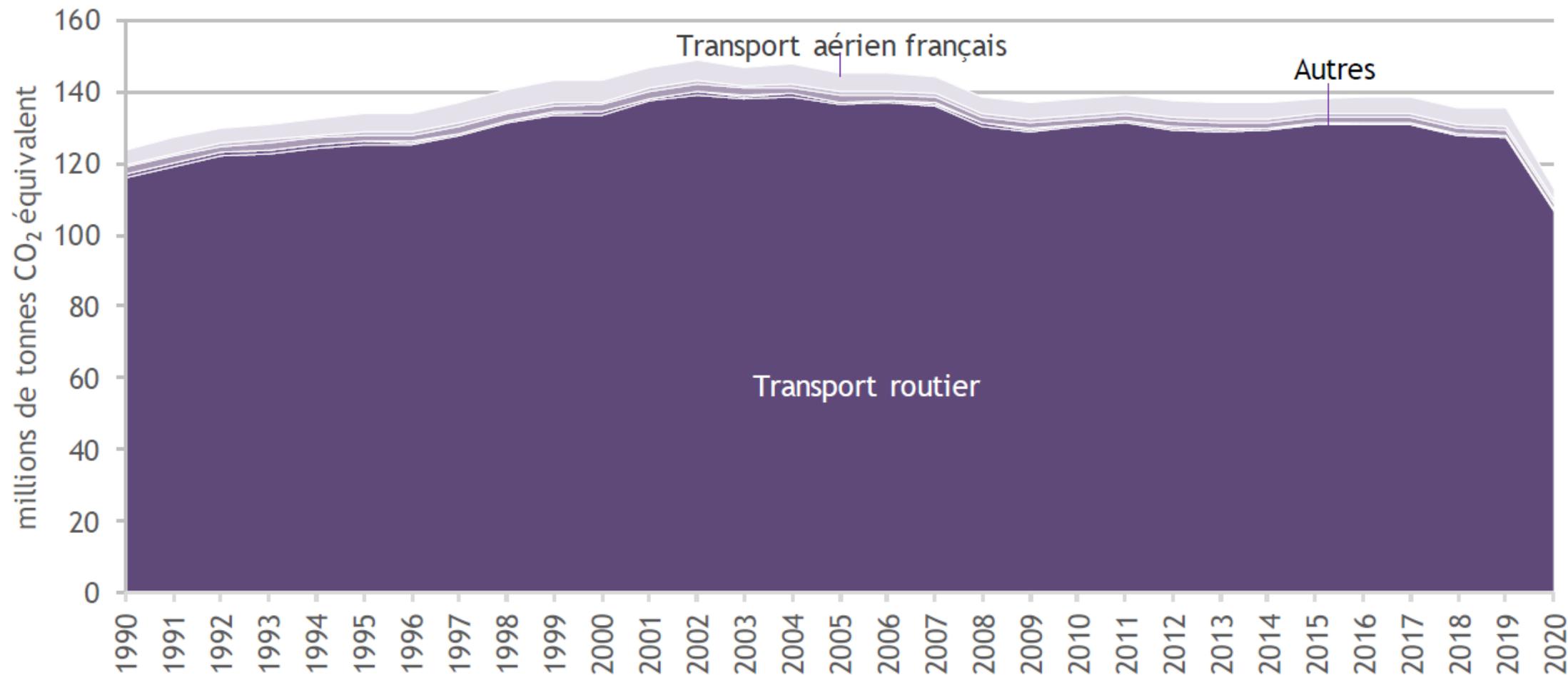
- a) Contrôle des émissions des véhicules
- b) Les différentes filières énergétiques
- c) Impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule

# 1 - Evolution des émissions des transports routiers au cours du temps

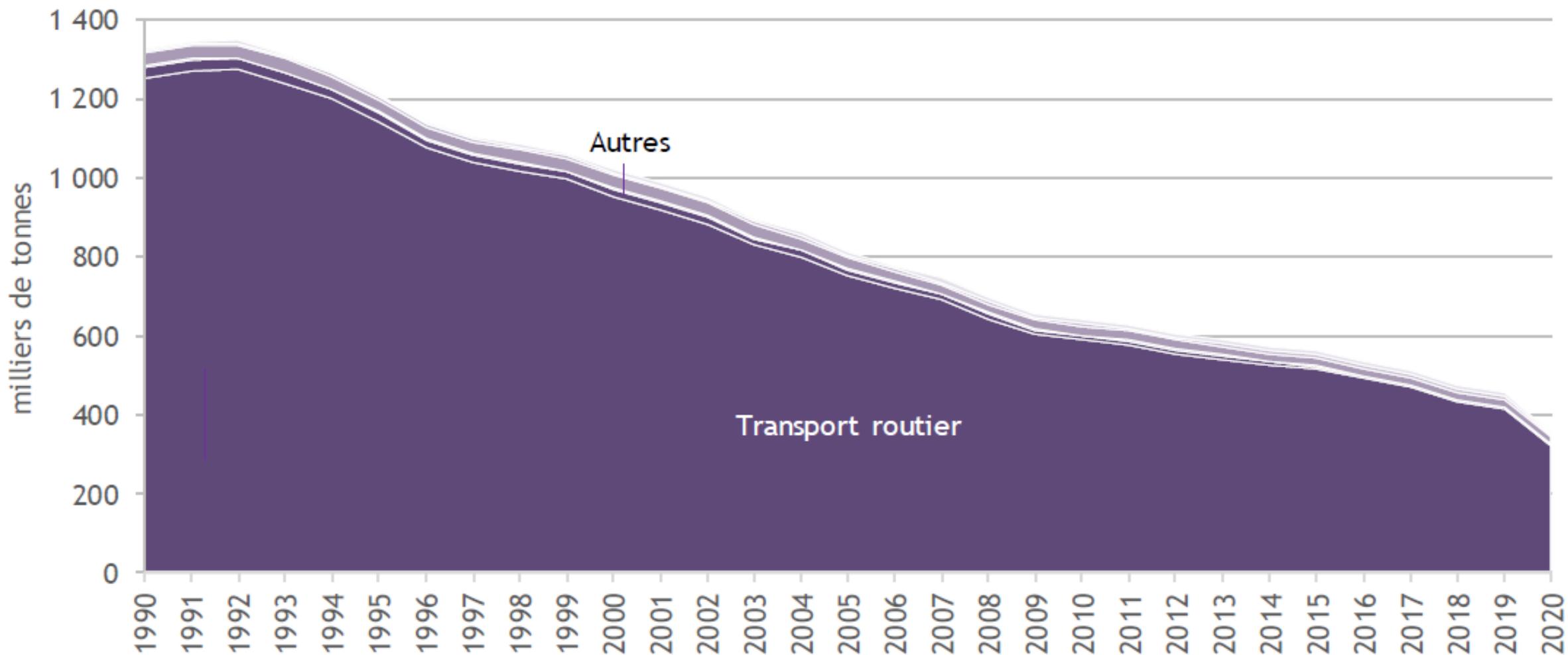
## Poids du secteur des transports dans les émissions nationales en 2020



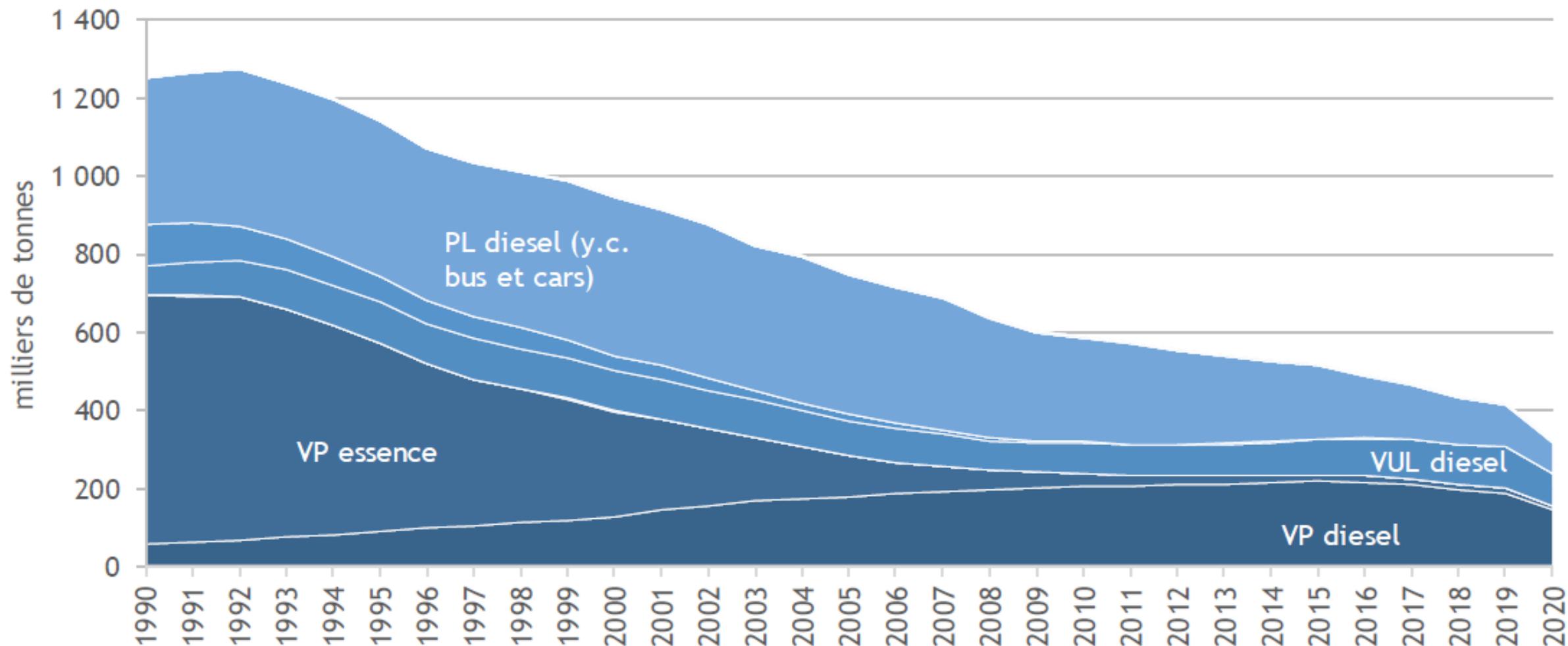
# Émissions de GES du transport stables depuis 15 ans



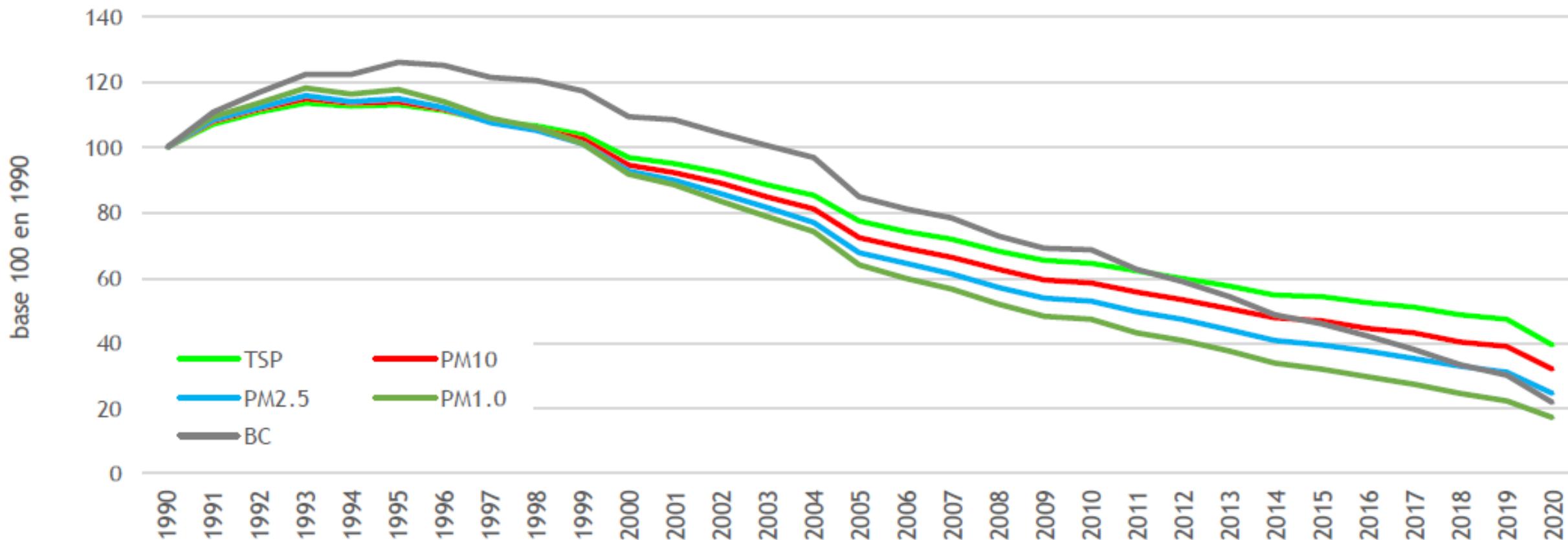
## Emissions de NOx des transports : source principale le transport routier



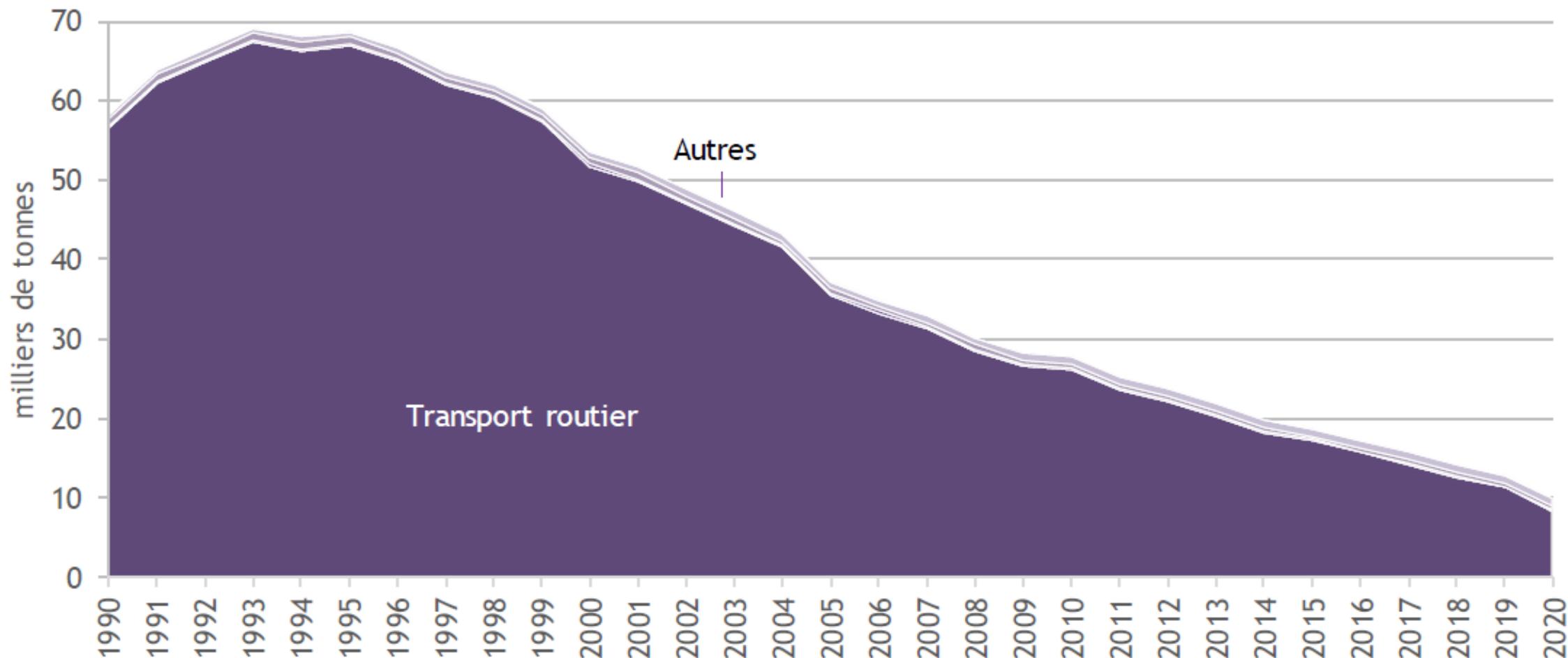
## Emissions de NOx du transport routier : source principale les véhicules Diesel



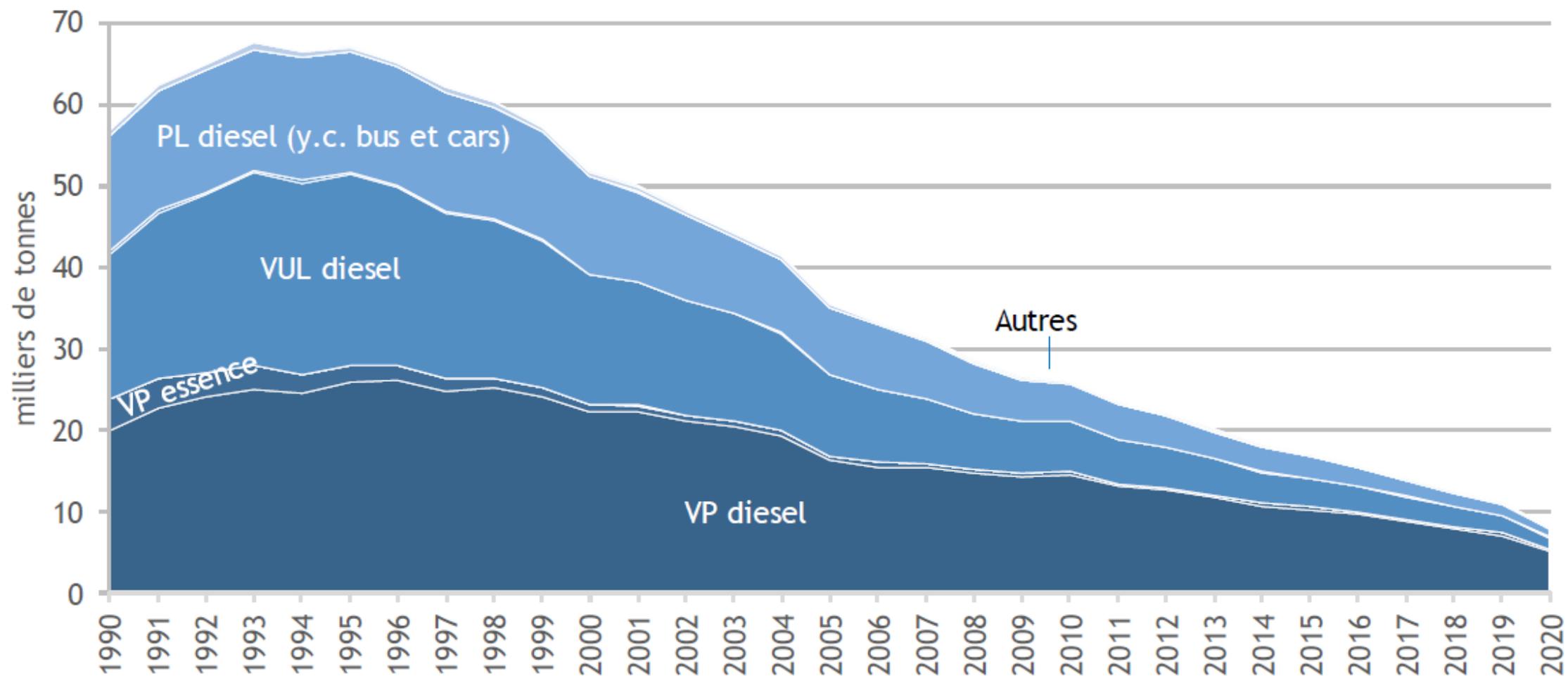
## Emissions de particules : évolution relative du secteur des transports / 1990



## Emissions de PM<sub>1,0</sub> des transports : source principale le transport routier



## Emissions de PM<sub>1,0</sub> du transport routier : source principale les véh. Diesel

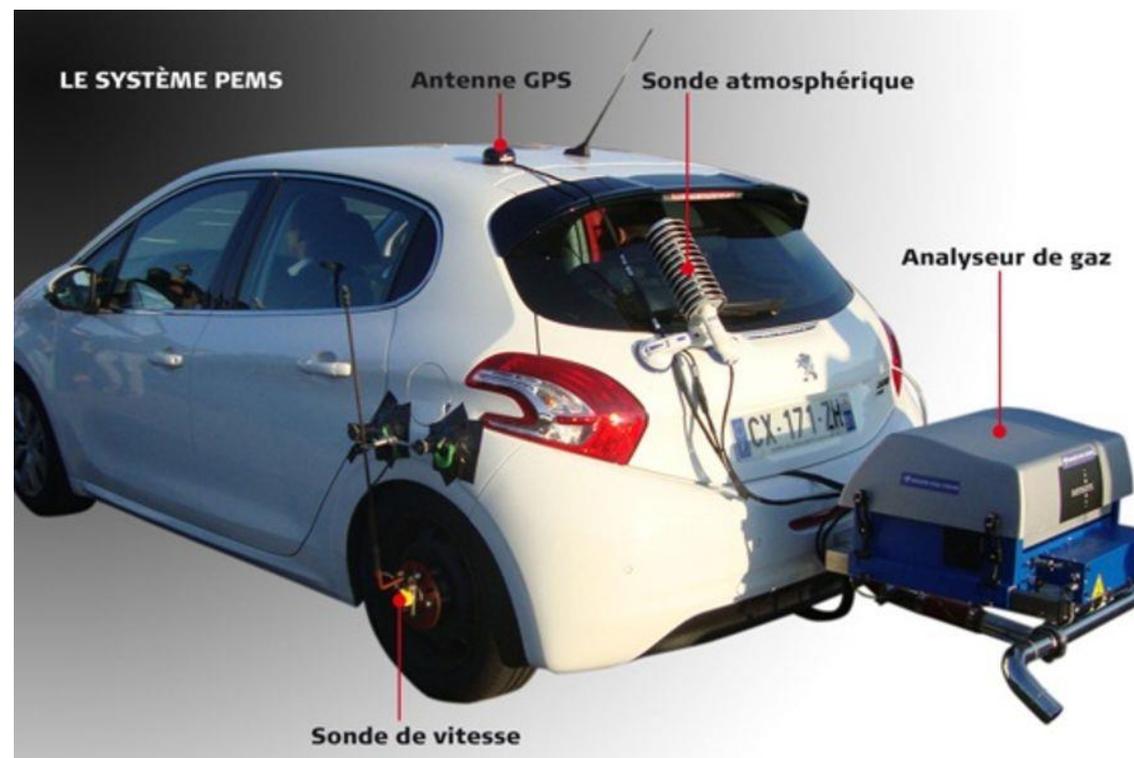


## Réglementation sur les émissions à l'échappement – Normes Euro

- Homologation des nouveaux modèles de véhicules : respect seuils réglementaires Euro
- Depuis 30 ans, sévèrisation des seuils réglementaires Euro et des protocoles de mesures (WLTC, RDE)

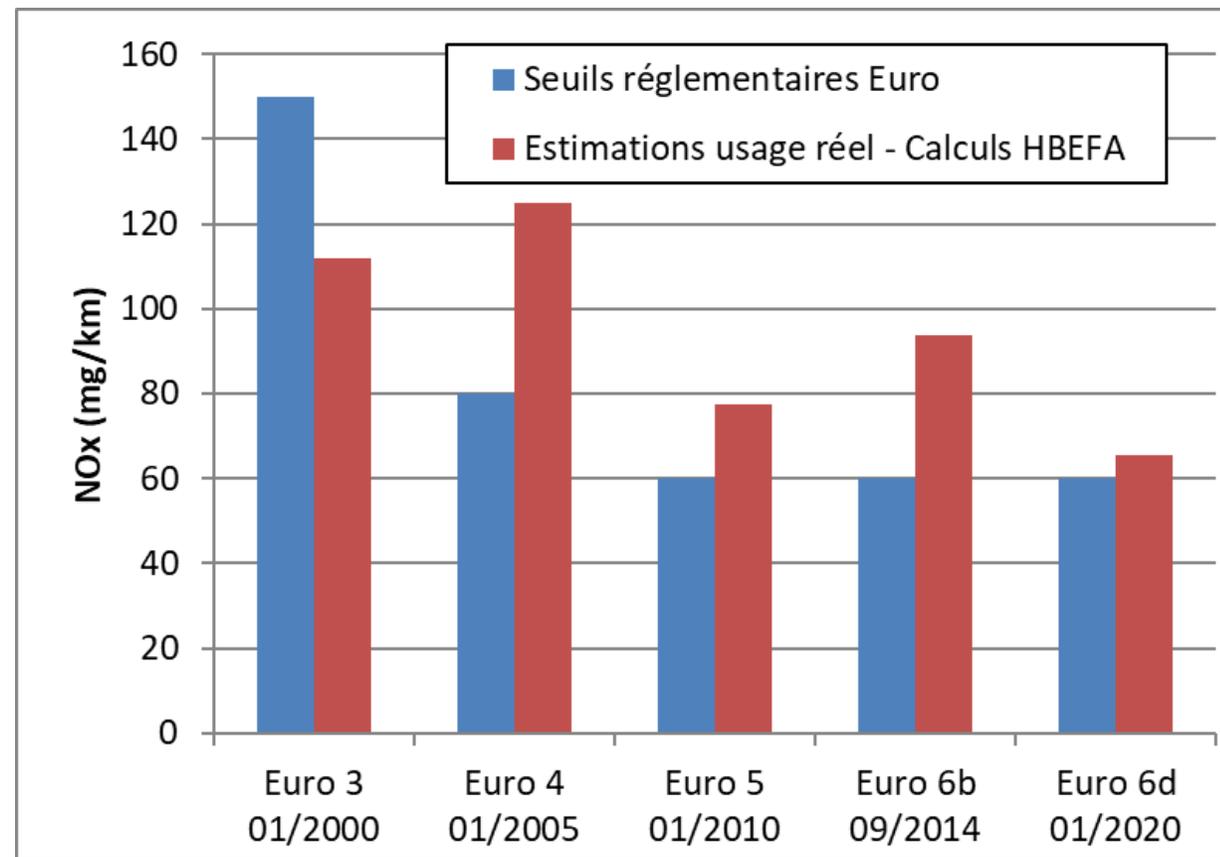
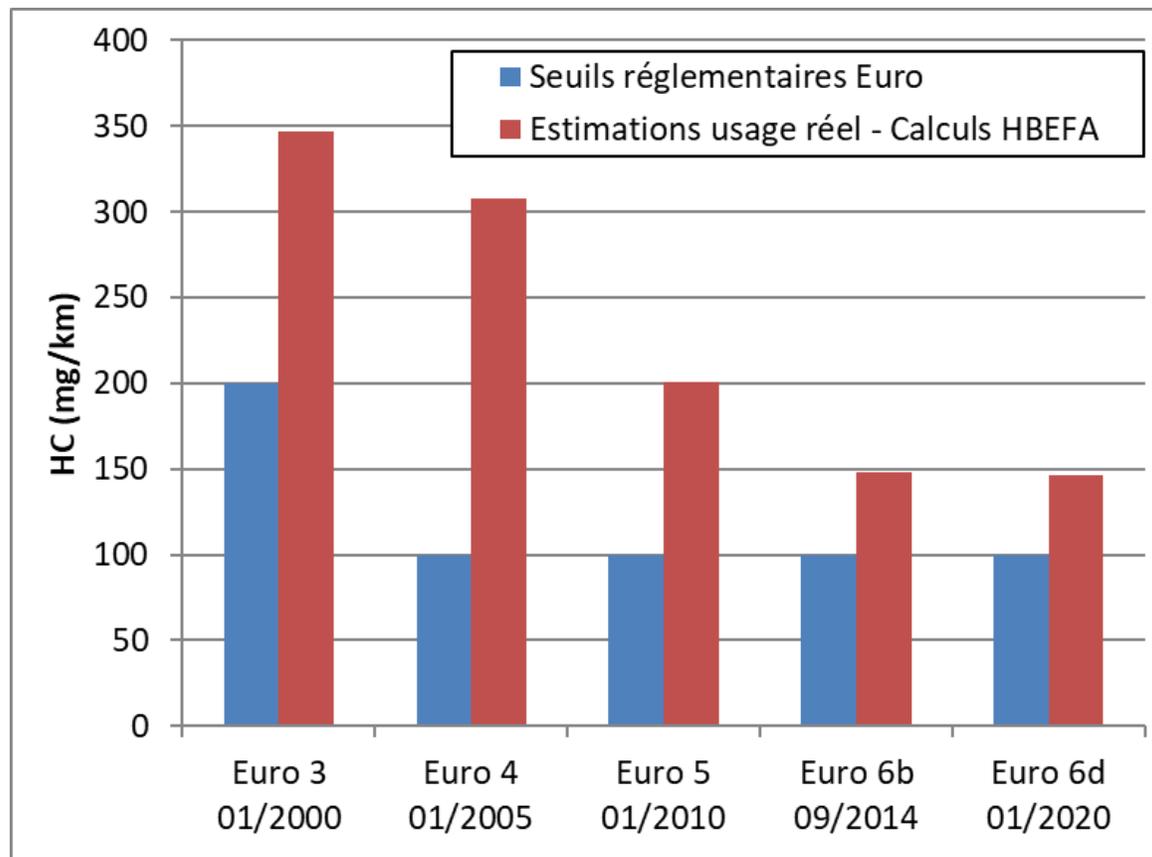


© Stellantis

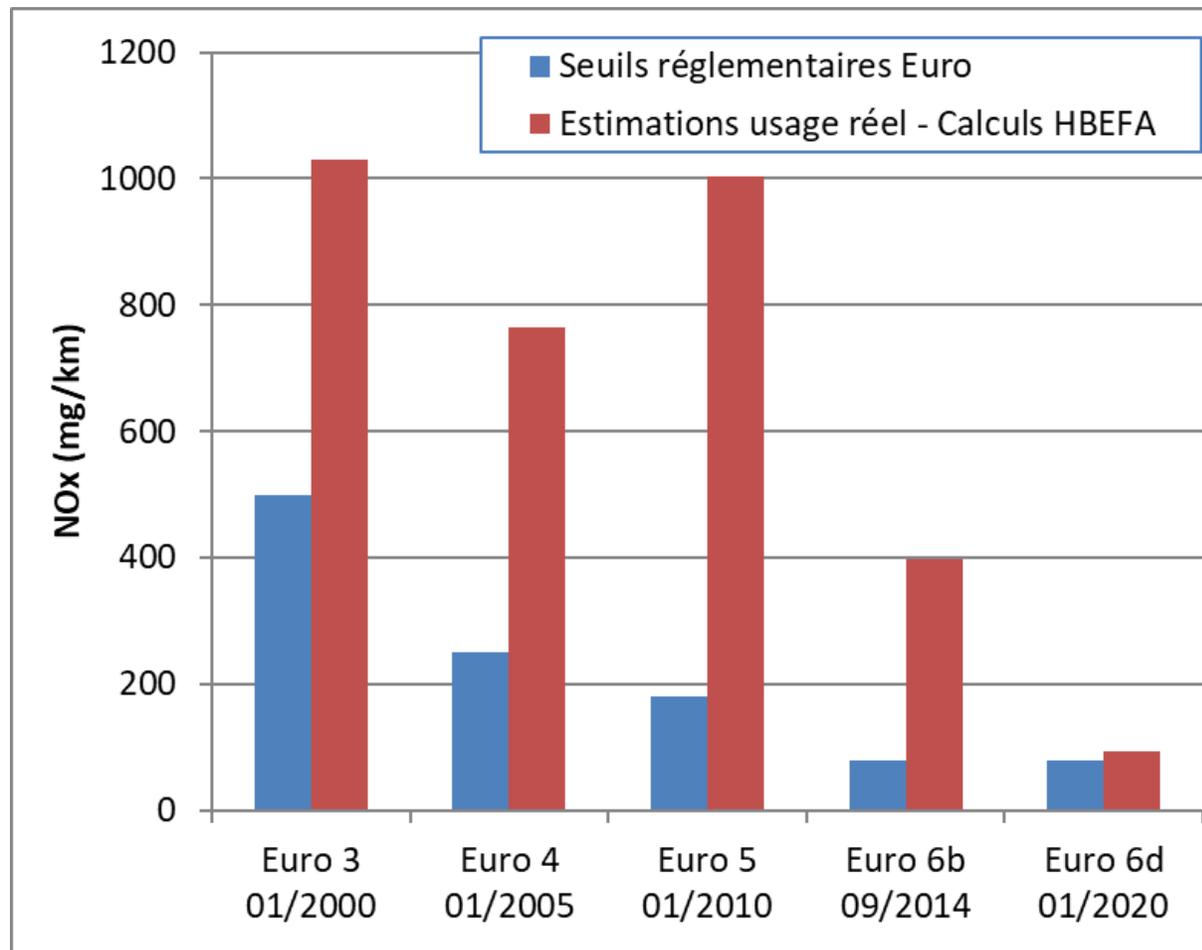
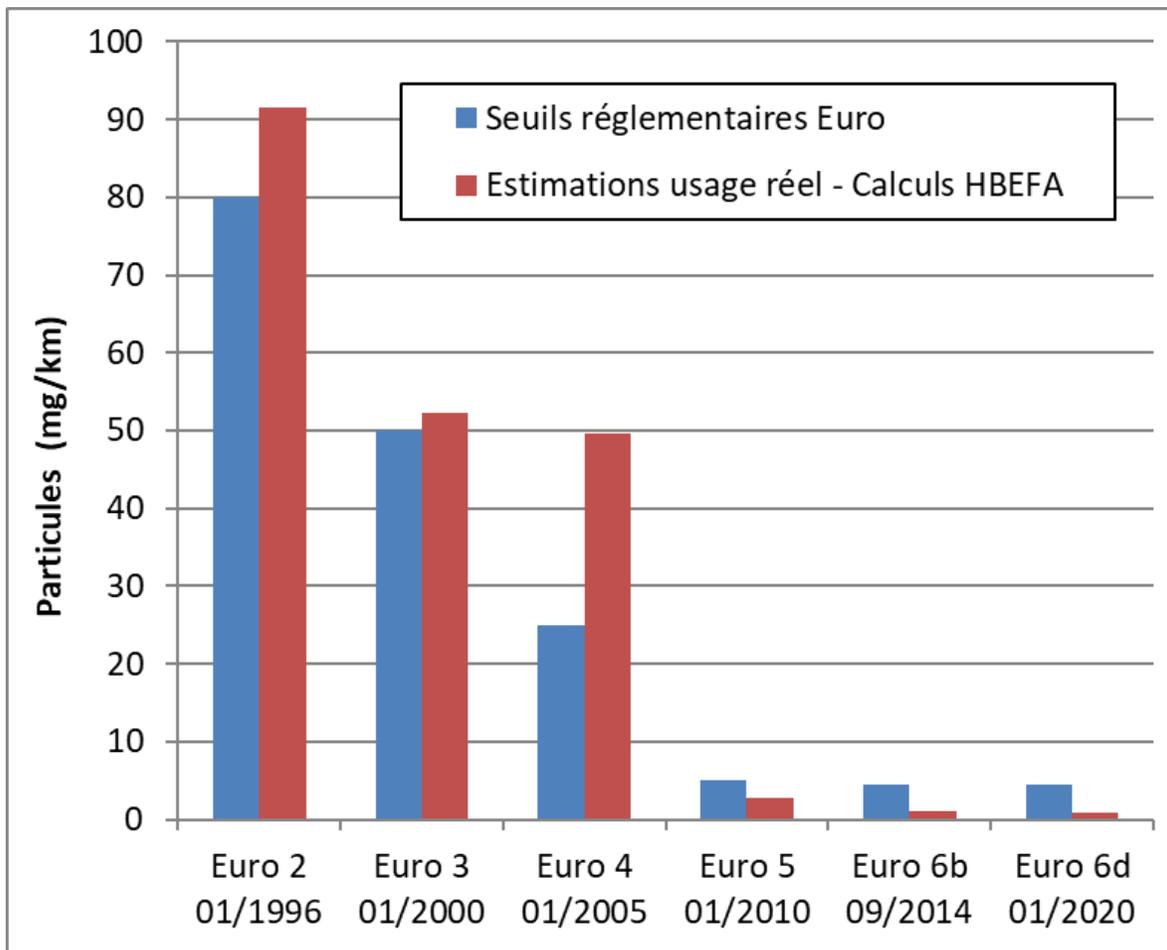


© Usine Nouvelle, JF Prevéraud / Gérard Quévrin

# Impact de la mise en place des normes Euro sur les émissions réelles des voitures essence



# Impact de la mise en place des normes Euro sur les émissions réelles des voitures Diesel



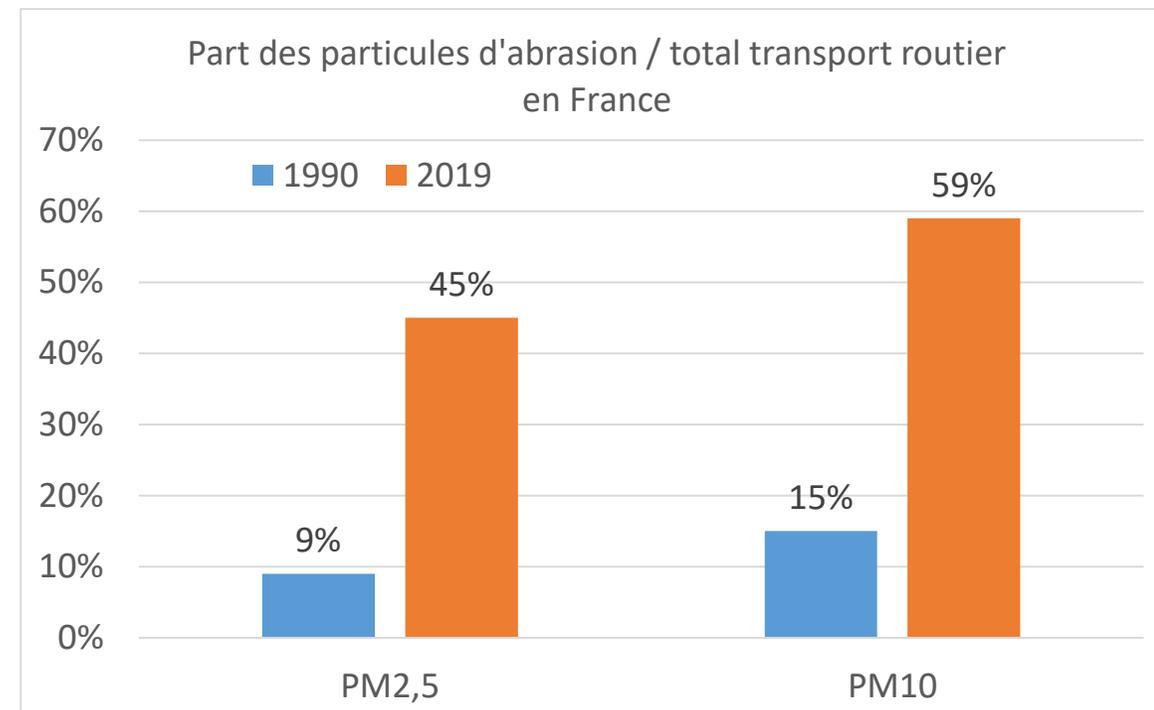
# Conclusion

- Émissions de polluants locaux issues du transport routier en baisse depuis le milieu des années 90 grâce à la mise en place des premiers seuils réglementaires Euro 1
- Réglementations Euro ont été efficaces sauf pour les NO<sub>x</sub> jusqu'à Euro 6b (2015) -> dépassement des seuils OMS pour le NO<sub>2</sub>
- Qualité de l'air ne s'améliore pas aussi vite que la baisse des émissions car
  - présence d'autres sources prépondérantes
  - trafic routier ne baisse pas (autosolisme vs covoiturage et transport en commun)
  - Certains polluants ne sont pas réglementés comme les particules provenant de l'usure des freins, des pneus et de la chaussées.

# 2 - Les particules hors échappement

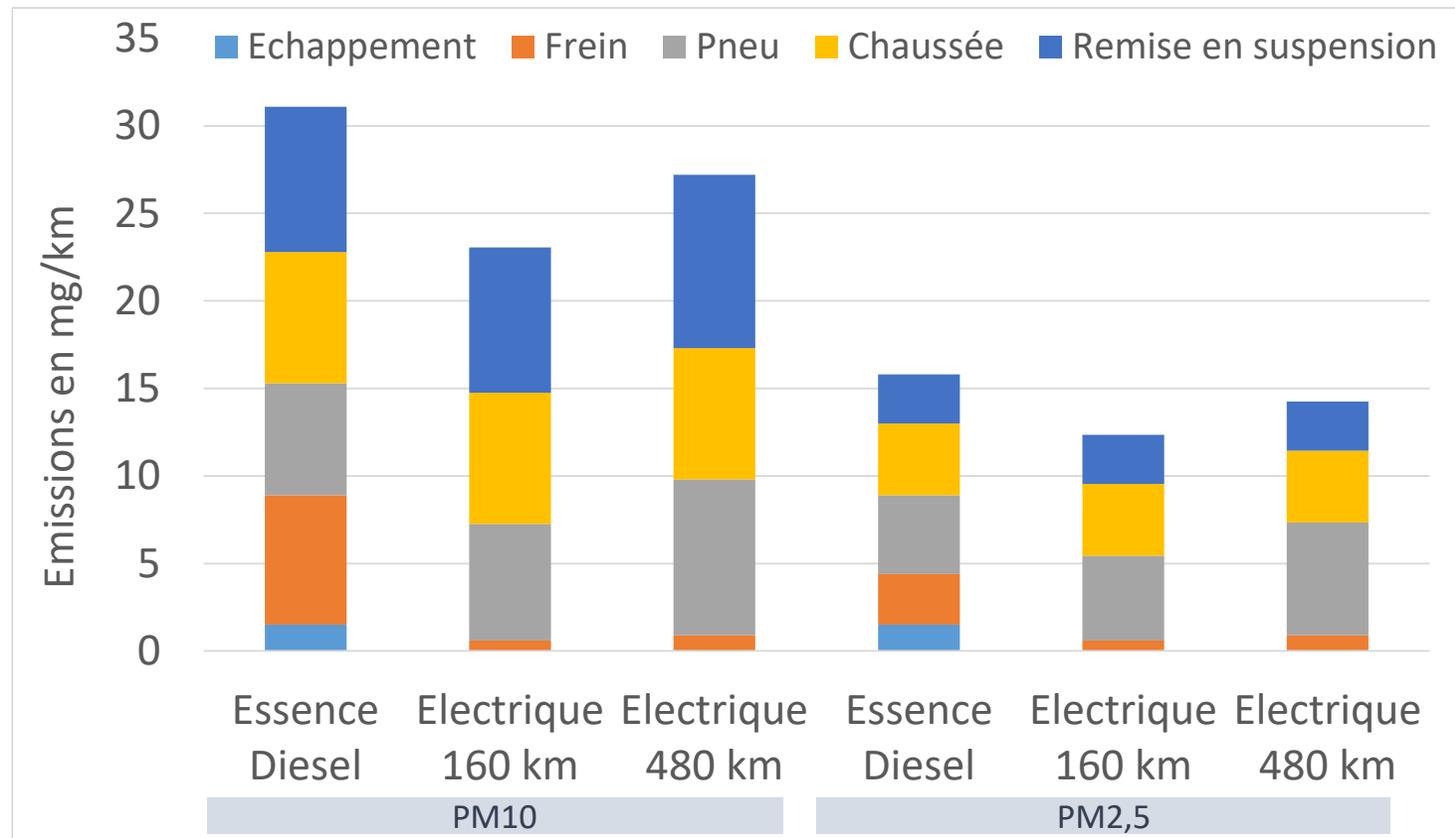
# Particules hors échappement / échappement

- En Europe plus de 50 % des particules générées par le trafic routier ne proviennent pas des émissions à l'échappement :
  - Frein : 16 à 55 % des PM10 ; seulement 3 % sur autoroute
  - Pneu / Chaussée : 5 à 30 %
  - Remise en suspension : 28 à 59 %
- Changement entre 1990 et 2019 dû :
  - Baisse émissions à l'échappement :
    - Généralisation du filtre à particules Diesel
    - Sortie progressive du parc des véhicules Diesel anciens non équipés de FàP
  - À un degré moindre, hausse masses véhicules



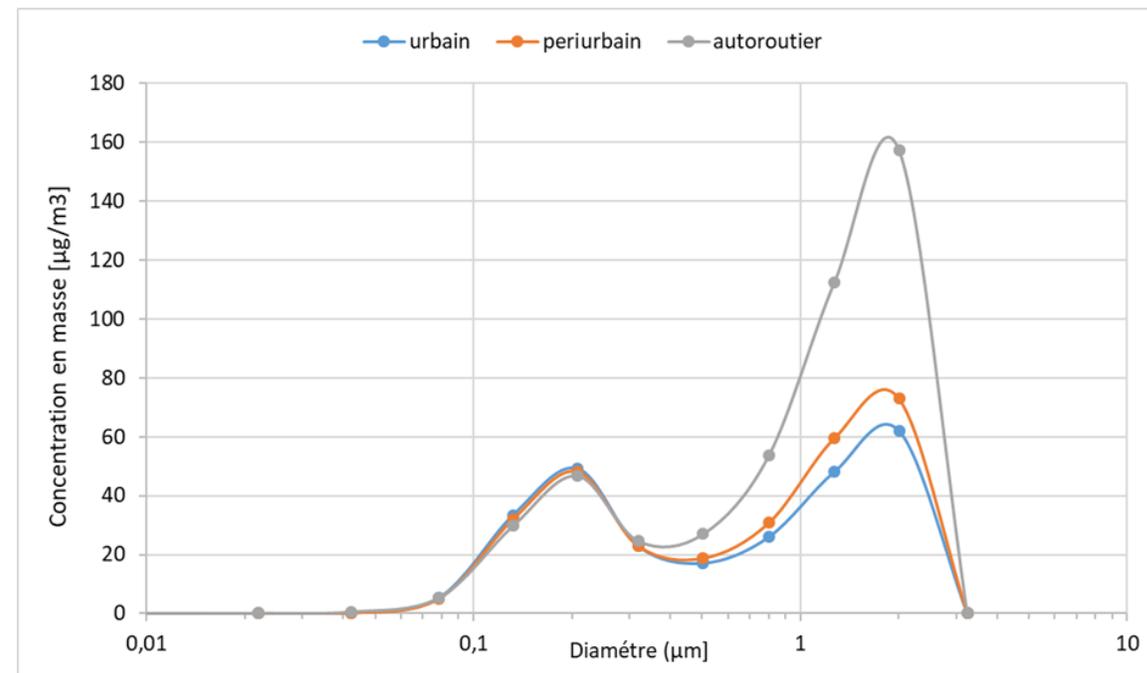
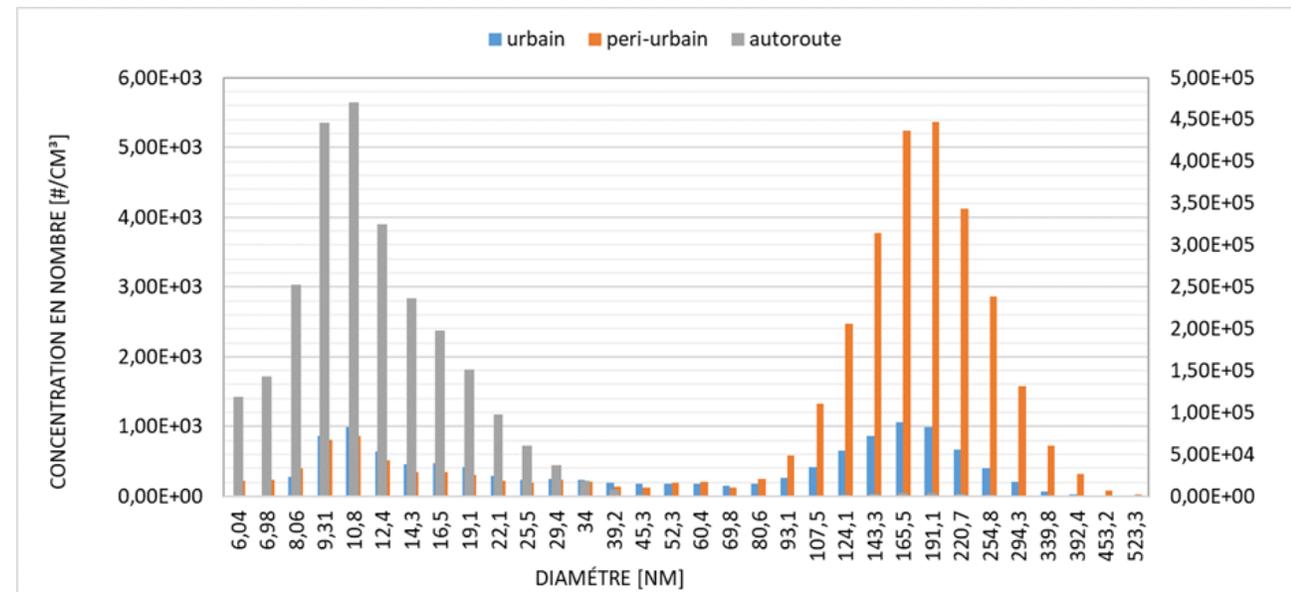
# Quantités de PHE émises

- Diminution des particules de frein pour les véhicules électriques (freinage régénératif)
- Masse des véhicules impacte la taille des pneus donc les émissions pneus / chaussée et remise en suspension
- VE : autonomie ↗ = masse et PM ↗
- Peu d'écart entre VE et VT pour les PHE
- *NOTA* : les VT émettent des particules (1 à 2 mg/km) et contribuent à la formation d'aérosols secondaires



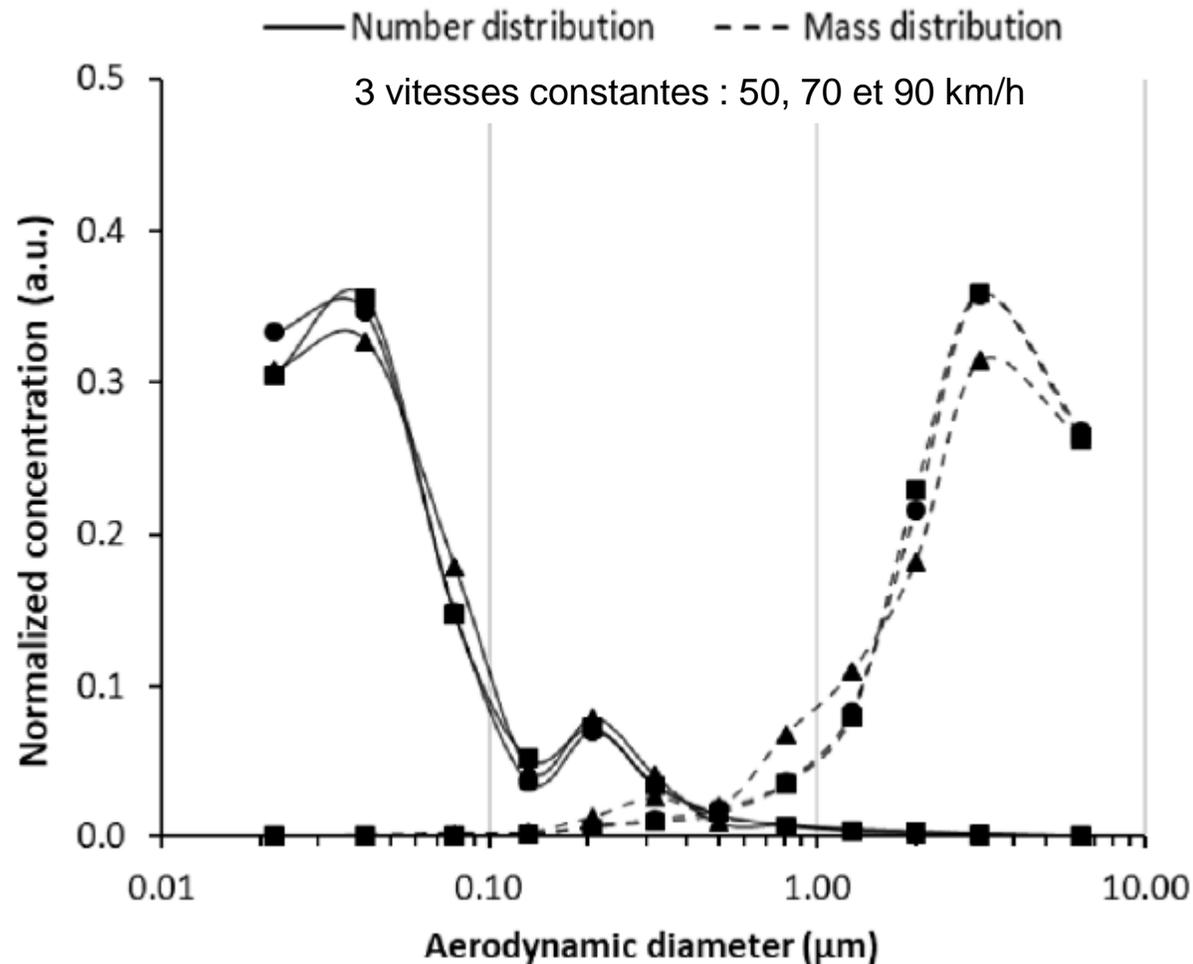
# Distribution des tailles de particules de frein

- Distribution bimodale :
  - En nombre : 10 et 200 nm
  - En masse : 200 nm et 2 µm
- Au cours du freinage :
  - Au début arrachement de matière → particules fines 1 à 2 µm
  - Puis augmentation de la température → évaporation et condensation des composés carbonés des plaquettes → particules autour de 200 nm
  - Au-delà de 250 °C → particules ultrafines autour de 10 nm



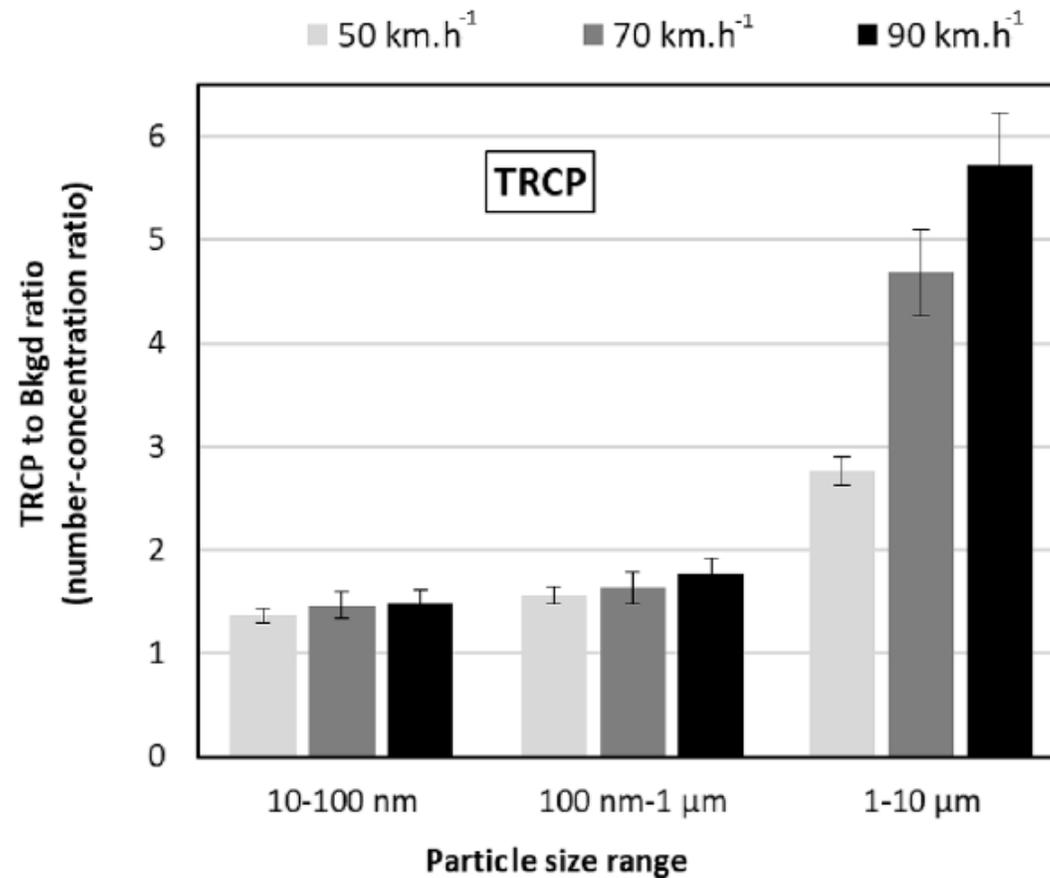
# Distribution des tailles de particules contact pneu - chaussée

- Distribution en nombre bimodale :
  - Mode ultrafin majoritaire autour de 30 nm
  - Mode fin autour de 200 nm
- Distribution en masse bimodale :
  - 300 nm
  - Pic majoritaire autour de 2 – 4  $\mu\text{m}$
- Distribution indépendante de la vitesse constante du véhicule entre 50 et 90 km/h



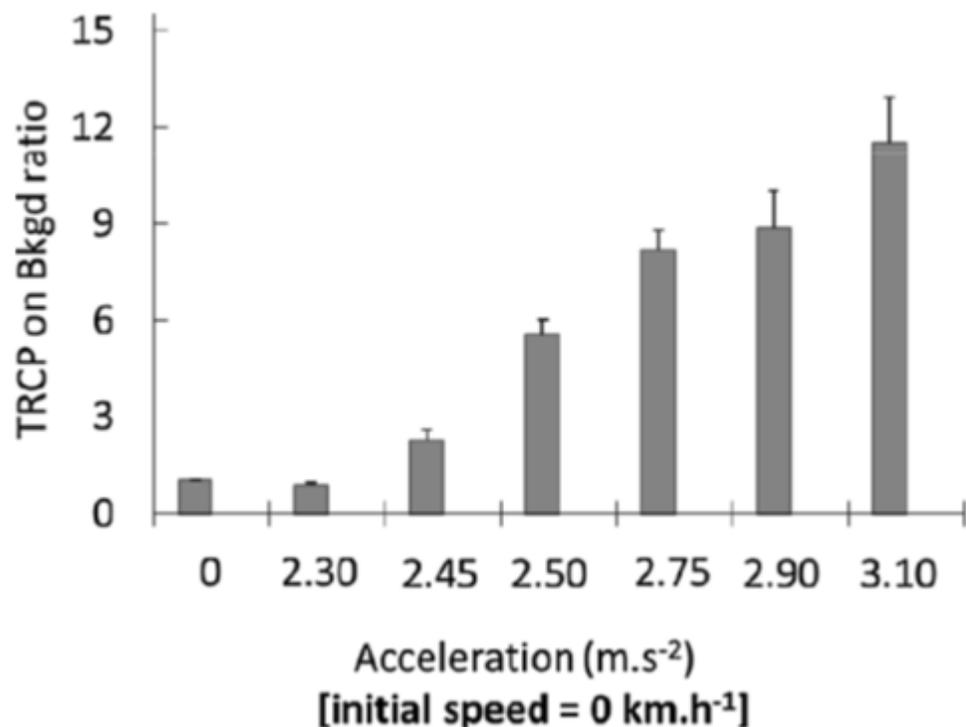
# Impact de la vitesse du véhicule

*Nombre de particules issues du contact pneu – chaussée rapporté au nombre de particules du fond ambiant*

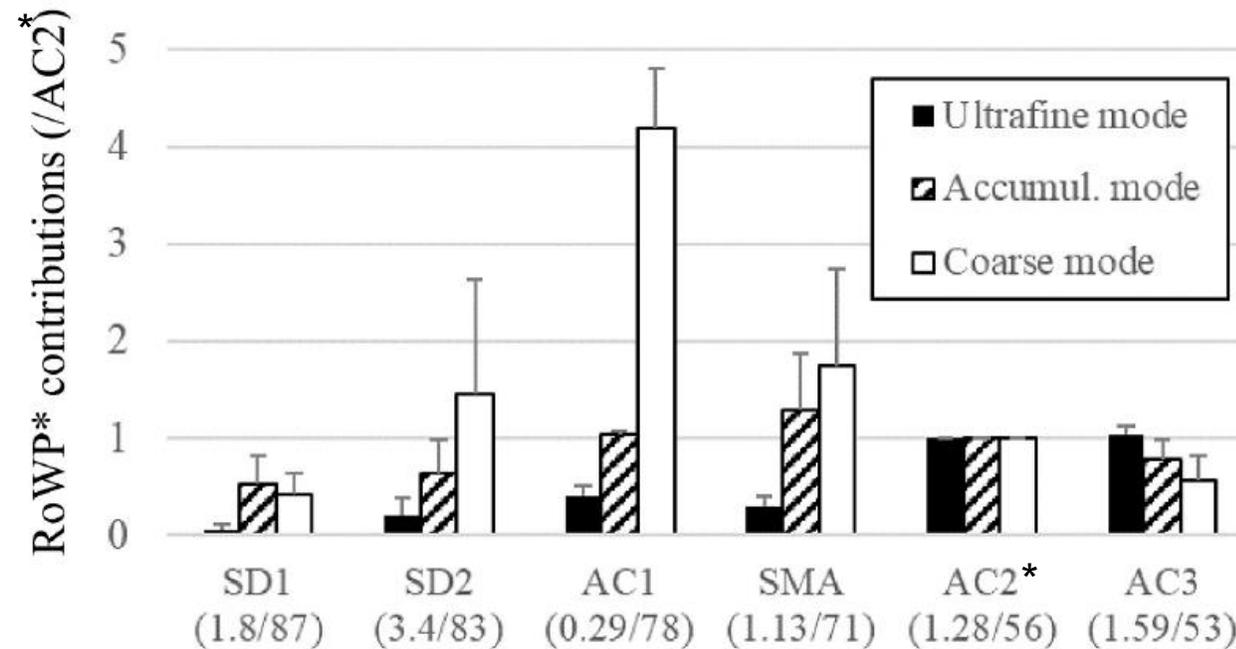


# Impact accélérations véhicule et revêtements routiers

*Nombre de particules issues du contact pneu – chaussée rapporté au nombre de particules du fond ambiant*



*Nombre de particules collectées derrière la roue*

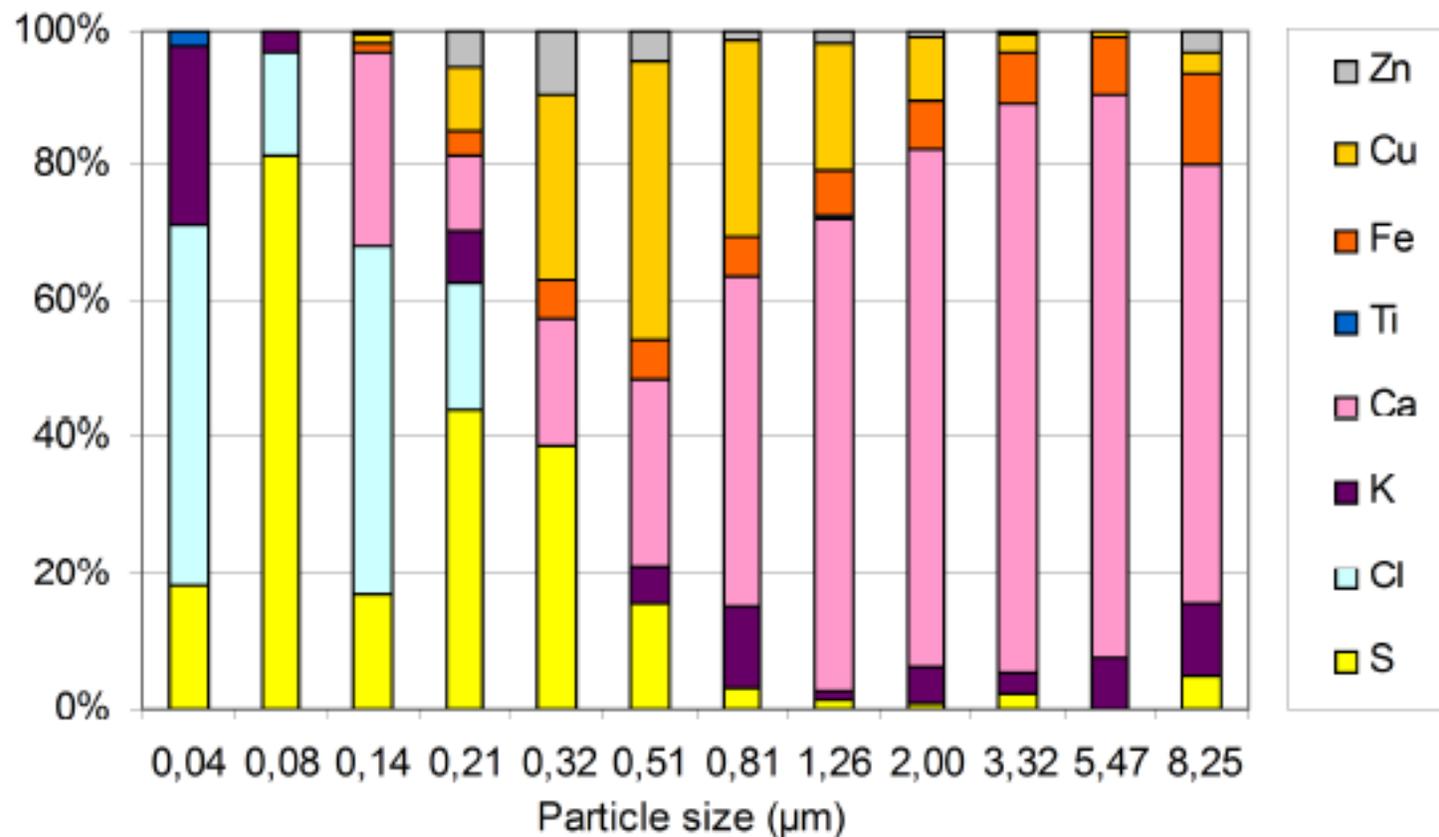


Différents revêtements routiers  
(macro / micro-texture en mm / unité arbitraire)

\* Béton bitumeux conventionnel le plus répandu en Europe

# Composition des PHE en bord de route (hors carbone majoritaire)

- Zinc : pneu, < à 2  $\mu\text{m}$
- Fer et cuivre : frein, de 0,1 à 8  $\mu\text{m}$
- Soufre : frein et pneu, < 0,5  $\mu\text{m}$
- Chlore : salage des routes, < 0,2  $\mu\text{m}$
- Potassium : salage des routes
- Calcium : revêtement routier, > 1  $\mu\text{m}$
- Titane : peinture blanche marquage au sol, ultrafine

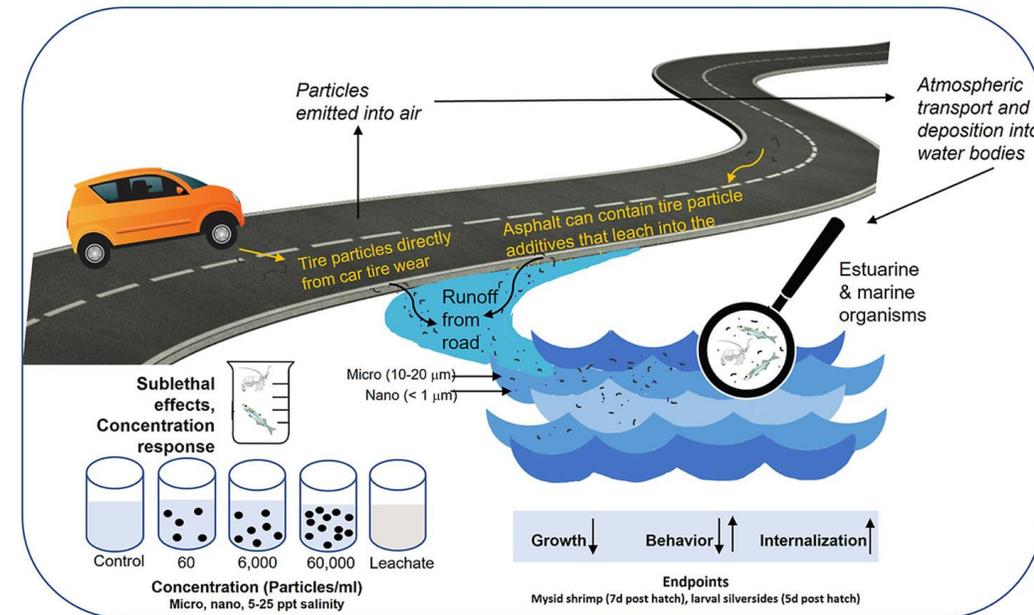


# Impact sanitaire

- Études toxicologiques et épidémiologiques des PHE assez limitées
- Trafic routier (proximité, intensité, concentrations de polluants) effet sur la santé mais quel est le rôle joué par les PHE ?
- Pas certain que les concentrations réelles de PHE aient un impact et que leur nuisance soit similaire à celles émises à l'échappement
  - Etudes toxicologiques : présence d'éléments métalliques (Cu, Ba, Zn, Fe ...) dans les PHE -> impact sur la santé
  - Potentiel oxydant des particules de frein serait supérieur à celui des particules Diesel mais pas de stress oxydant ou de réponse inflammatoire au niveau du système respiratoire
- **Travaux en toxicologie et épidémiologie supplémentaires nécessaires**

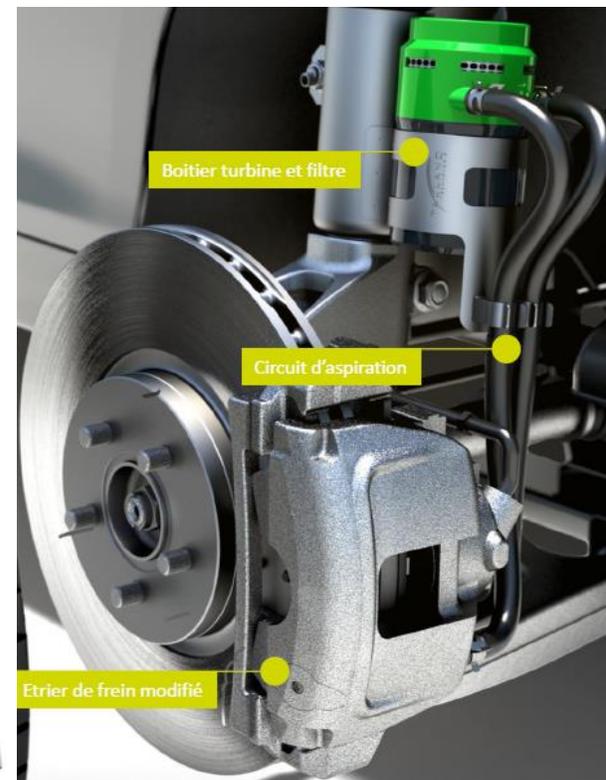
# Impact environnemental

- Zones urbaines :
  - Eaux de pluie et de lavage entraînent la pollution vers les stations d'épuration
  - Perturbation des traitements utilisés dans les stations d'épuration
  - Boues d'épuration utilisées comme fertilisants contiennent des éléments métalliques, chlorés, soufrés et des microparticules de pneus
- Zones non imperméabilisées ou rurale
  - Eaux de ruissellement vers les sols, nappes phréatiques, cours d'eaux et océans
- Effets long terme sur écosystèmes peu documentés
- Des soupçons avec l'accumulation de cette pollution dans la chaîne alimentaire



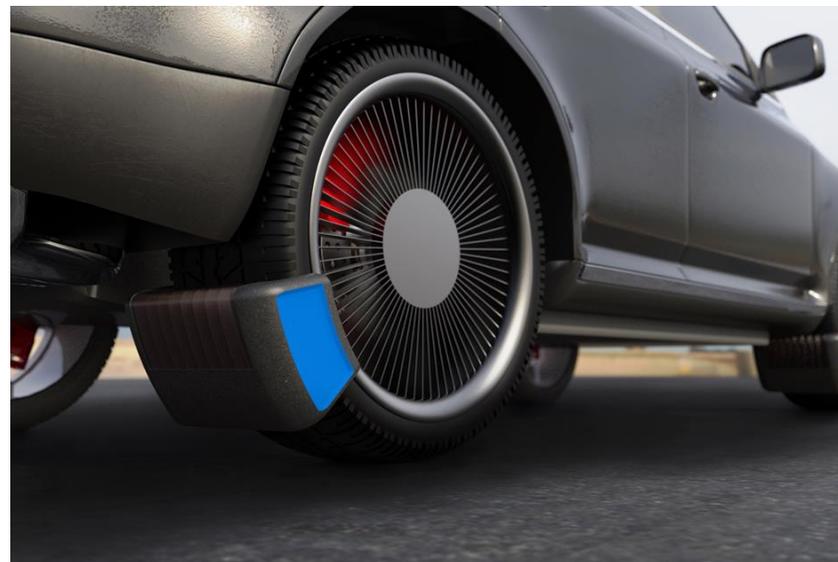
# Solutions de réduction des émissions des freins

- Amélioration des systèmes de freinage actuels :
  - Au niveau des matériaux (plaquettes, surface des disques) : réduction de 50 % du nombre de particules et de 10 à 15 % des PM<sub>10</sub>
  - Accroissement de la taille des disques de frein : meilleure dissipation de la chaleur
  - Retour aux freins à tambour
- Pilotage du freinage pour soulager le freinage mécanique :
  - Freinage régénératif sur les véhicules hybrides et électriques
  - Ralentisseur pneumatique, hydraulique ou électromagnétique : application véhicules et engins non routiers uniquement
- Solutions de captage et filtration :
  - Tallano Technologie en partenariat avec l'équipementier Akwell : aspiration et stockage des particules ; prototypes en test, *expérimentation à venir avec l'ADEME*
  - Mann + Hummel : filtre passif constitué de fibres métalliques ; *ce système est évalué au cours du projet AQACIA 2020 – D-BRAKE, 08/2025, financement ADEME n°2 166D0017*



# Solutions de réductions des émissions des pneus - chaussées

- Amélioration des matériaux du pneu et baisse du taux d'abrasion → hausse de la durée de vie (information à venir sur l'« étiquette énergie » des pneus)
- Choix du revêtement routier et son renouvellement
- The Tyre Collective : utilisation de plaques électrostatiques et stockage des particules dans une cartouche ; efficacité de captation annoncée : 60 %



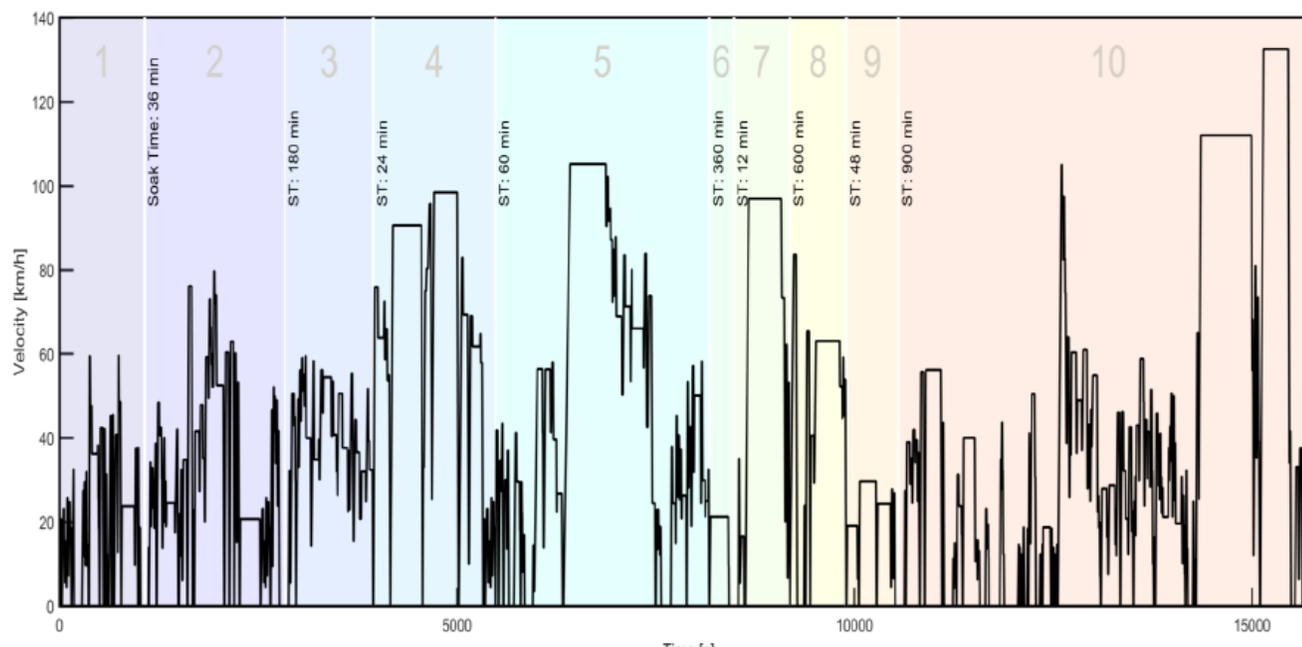
# Solutions pour réduire la remise en suspension

- Lavage des chaussées, pluie mais les particules se retrouvent dans d'autres écosystèmes : rivières, fleuves, mers et océans
- Mann + Hummel : système de captage par aspiration ; prototypes en test
- TrapAparT : pièges à particules placés le long des grands axes routiers urbains ; *ce système est évalué à Strasbourg au cours du projet AQACIA 2020 – AQA3P, 11/2021 -> 11/2023, financement ADEME n°2166D0018*
- Mieux comprendre les paramètres influençant la remise en suspension ; *Projet AQACIA 2020 – CEPARER, 01/2022 -> 07/2025, financement ADEME n°2166D0020*
- Adapter la micro / macro-texture du revêtement routier et procéder à son renouvellement



# Évolution réglementaire - Particules de frein

- Réglementation pour Euro 7 / VII (2025 – 2026) : fort probable
  - Protocole de mesures défini en test : WLTP-Brake Cycle + banc dynamométrique
  - Seuil limite (mg/km) en cours de définition
  - Uniquement les véhicules légers dans un premier temps



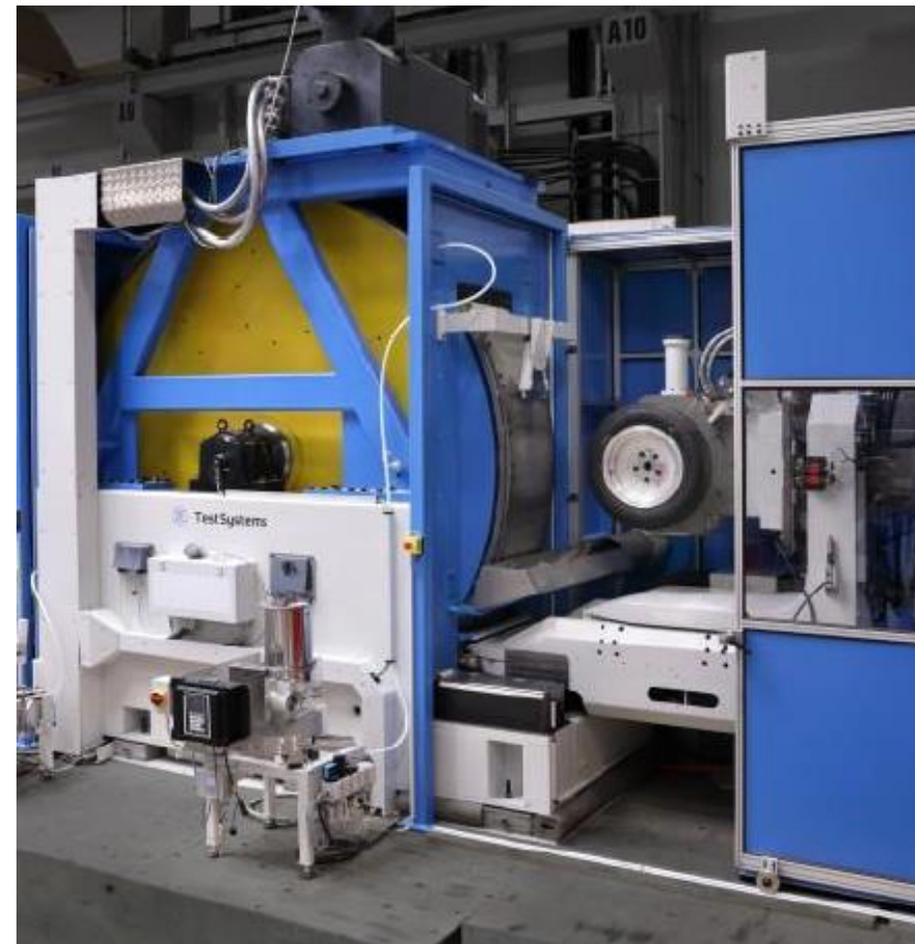
## IN BRIEF

- 10 individual trips
- 303 stops over 192 km
- Duration of 4h 24min
- Average speed of 44 km/h and maximum speed of 133 km/h
- Brake phase deceleration range of 0.5 – 2.5 m/s<sup>2</sup> (mean of 0.97 m/s<sup>2</sup>)

*WLTP-Brake cycle*

# Évolution réglementaire - Particules de pneu

- Réglementation pour Euro 7 / VII (2025 – 2026) : pas certain
  - Suivi des études sur les caractérisations et la distribution en taille des particules
  - Protocole de test à développer ; projet H2020 LEON-T (2021 -> 2024) : <https://cordis.europa.eu/project/id/955387>
- UNECE (Commission économique pour l'Europe des Nations unies)
  - Création d'une *task force tyre abrasion* en janvier 2022
  - Développement d'une procédure de mesure de l'abrasion des pneus (tests sur véhicules vs banc d'essais)



# Conclusion

- Neutralité carbone en 2050 et réduction des PHE, des synergies :
  - Allègement des véhicules -> pneu moins large
  - Véhicules électriques -> freinage régénératif
  - Éco-conduite -> accélération et décélération moins fortes
  - Réduction des vitesses limites autorisées -> freinage moins fort
  - Baisse des déplacements en véhicule individuel -> diminution globale de la circulation
  - Privilégier les modes actifs -> rupture dans les émissions de particules d'abrasion
- La réduction des émissions des PHE est donc possible et sera amplifiée par les réglementations européennes sur les véhicules Euro 7 / VII et suivantes

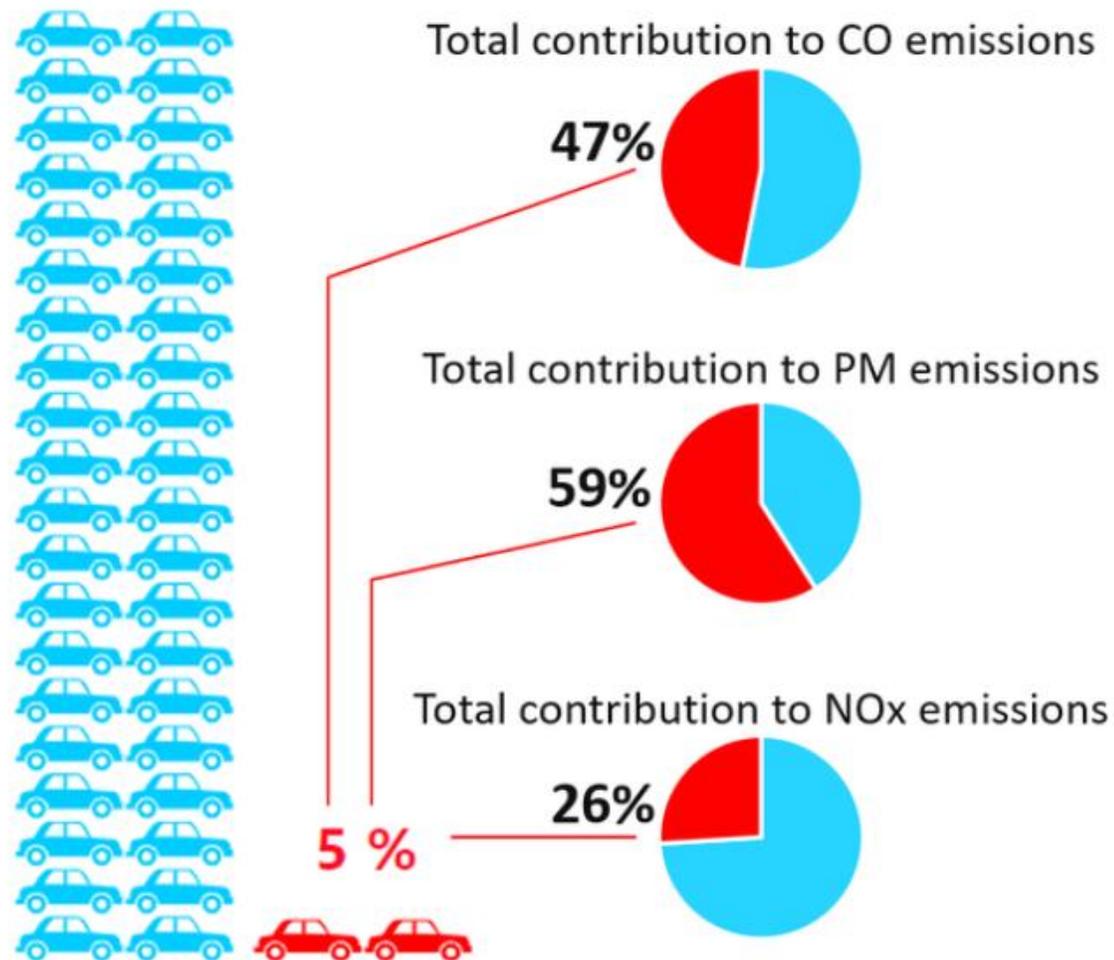


**Pour en savoir plus** : synthèse ADEME *Emissions des véhicules routiers – Les particules hors échappement* avec les sources de la présentation

# 3 - Les véhicules légers aujourd'hui

# Véhicules défectueux, quelles conséquences ?

- 25 % des véhicules les plus émetteurs auraient moins de 6 ans et cela concerne tous les types de véhicules (VP, VUL, Diesel, essence)
- Défaits :
  - Retrait de filtre à particules
  - Admission d'air encrassé
  - injecteurs défectueux
  - Système de NOx SCR trafiqué



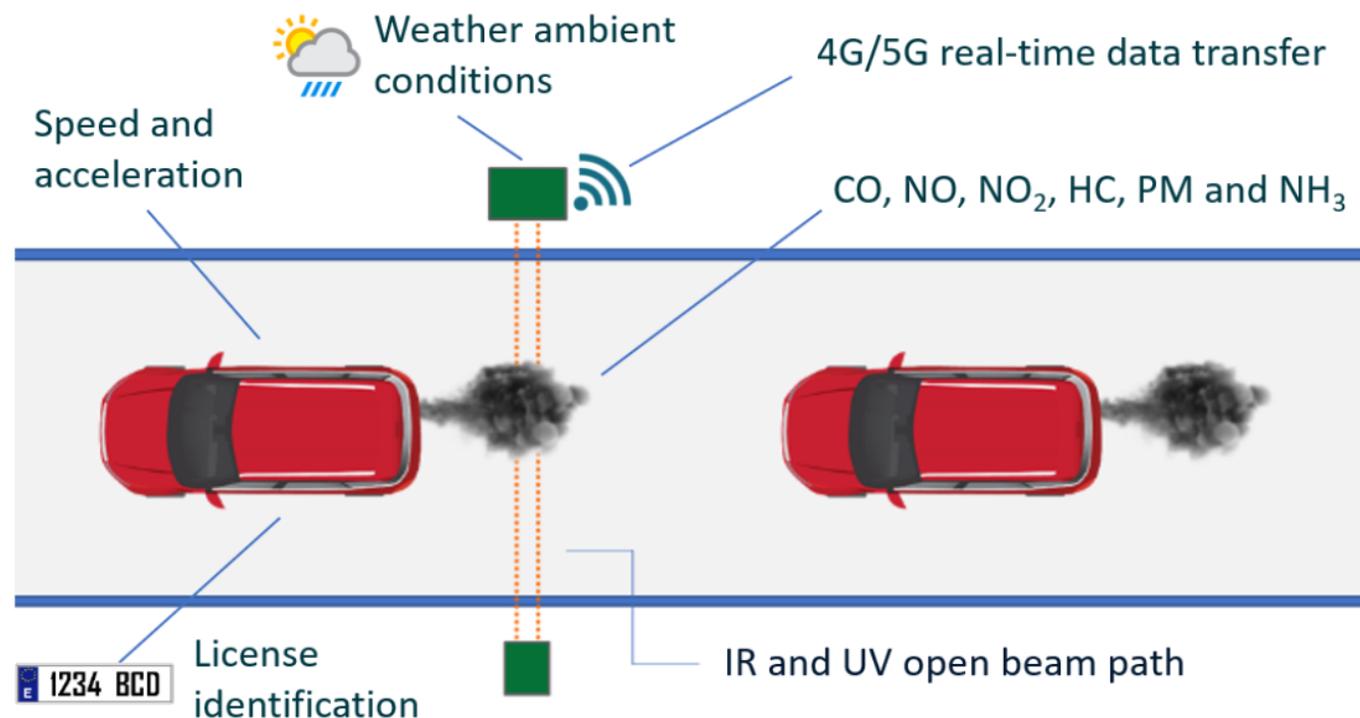
# Contrôle des véhicules – mesures statiques

- Contrôle technique, contrôle pollution pas très sévère :
  - Diesel : opacité des fumées
  - Allumage commandé (essence, GPL, GNV) : CO et contrôle de richesse (lambda)
  - Peu de véhicules mis en défaut
- NPTI (New Periodic Technical Inspection) : rajout de la mesure des PN pour les Diesel permettrait d'identifier les FAP défectueux
- Analyseurs 5 gaz de garage : CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, O<sub>2</sub>
  - Résultats pas toujours en corrélation avec mesures PEMS ou banc à rouleaux
- Actuellement pas de contrôle des NO<sub>x</sub> fiable en mesures statiques



# Contrôle des véhicules – mesures en roulage (1/2)

- RSD - *Remote Sensor Device*
- Installation de part et d'autre d'une voie de circulation
- Mesure ponctuelle dans des conditions de fonctionnement moteur limitées ; mise en place d'une chicane avec accélération du véhicule devant le dispositif
- Nombre limité de véhicules contrôlés



© Opus RSE

# Contrôle des véhicules – mesures en roulage (2/2)

- SEMS - *Smart Emissions Measurement System*
- Système installé dans le coffre du véhicule avec captage et analyse des gaz d'échappement
- Mesures sur route : CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, PN
- Quantification des émissions en g/km et identification si véhicule défaillant à l'issu d'un essai court de 10 km
- **Pour en savoir plus** : projet SESAME, 01/2022, financement ADEME n°2166D0010



© IFPEN – CAPELEC, système REAL-e

# Opportunités d'un contrôle fiable des émissions

- Pour les **vendeurs de véhicules d'occasion** : rassurer les acheteurs sur la bonne santé du moteur et des systèmes de post-traitement
- Pour les **garages et centres d'entretien** des véhicules : proposer un diagnostic moteur plus fiable
- Pour les **collectivités locales** : proposer une alternative à la vignette Crit'Air qui ne prend pas en compte les émissions réelles du véhicule avec la définition de quotas d'émissions mensuels ou annuels



# Comparatif des émissions de polluants locaux pour les VL

	B7	B30	E10	E85	GNV ou Biométhane	GPL	Électrique
Particules primaires							
NOx							
Particules secondaires		?		?			
Ozone	<i>Dépend des concentrations locales en NOx et COV provenant également d'autres sources</i>						

# Impact pollution locale Impact changement climatique du puits à la roue (Métropole)

Impact pollution  
locale / sanitaire

Impact changement climatique

Électrique

GNV Biométhane

GPL

Véhicule léger

Électrique

Biométhane

20 % Biométhane  
E85

Voiture

Électrique

Biométhane

20 % Biométhane  
B30

Fourgonnette

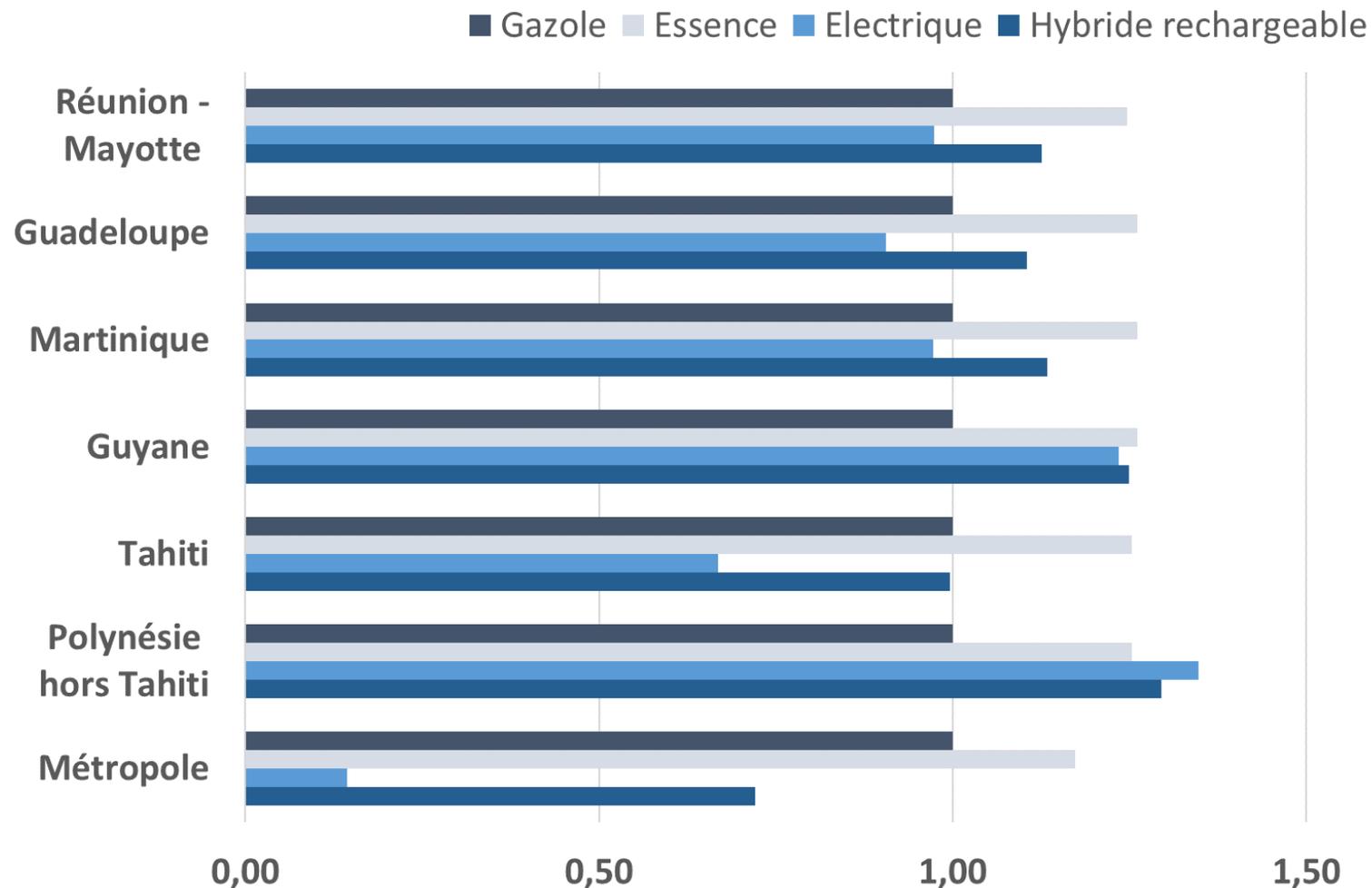
Électrique

Biométhane

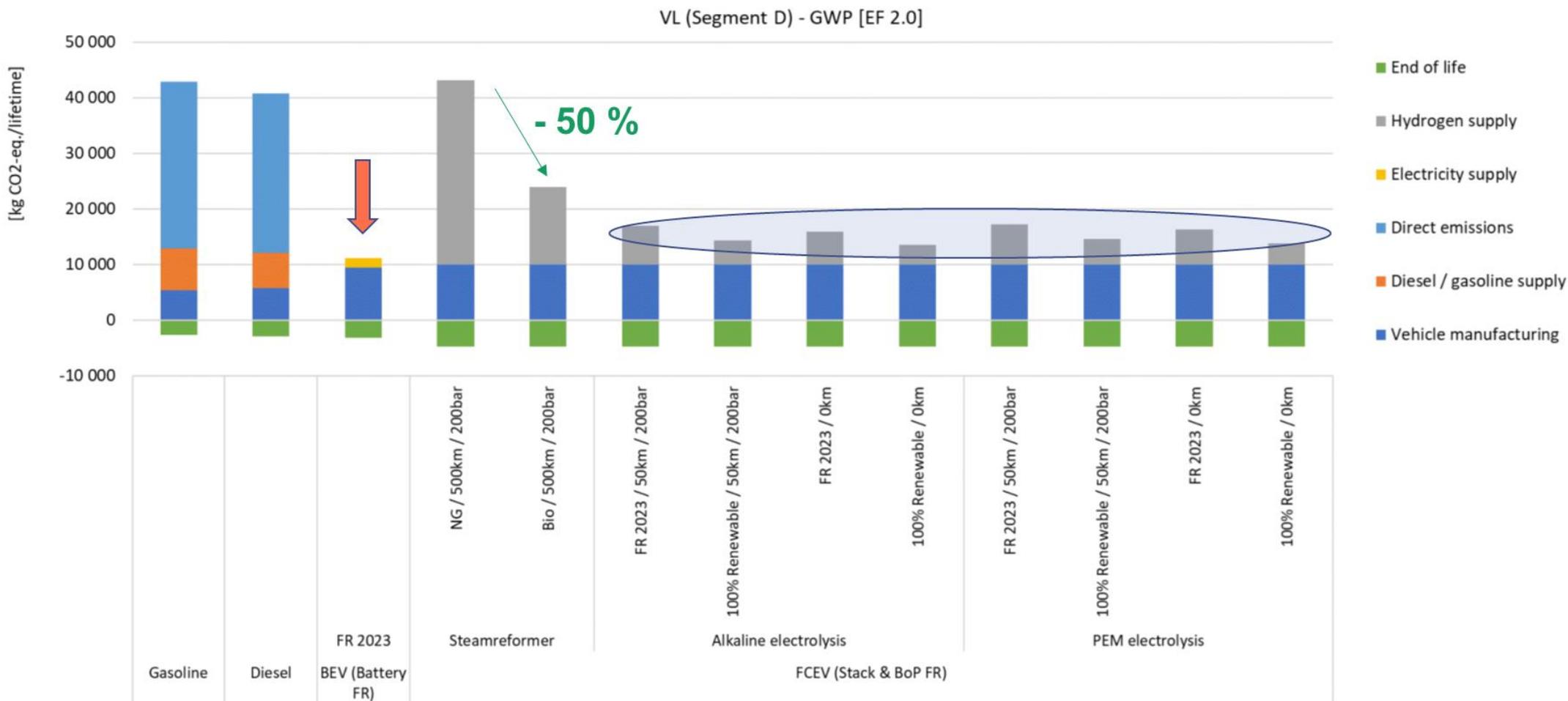
B30

Fourgon - Minibus

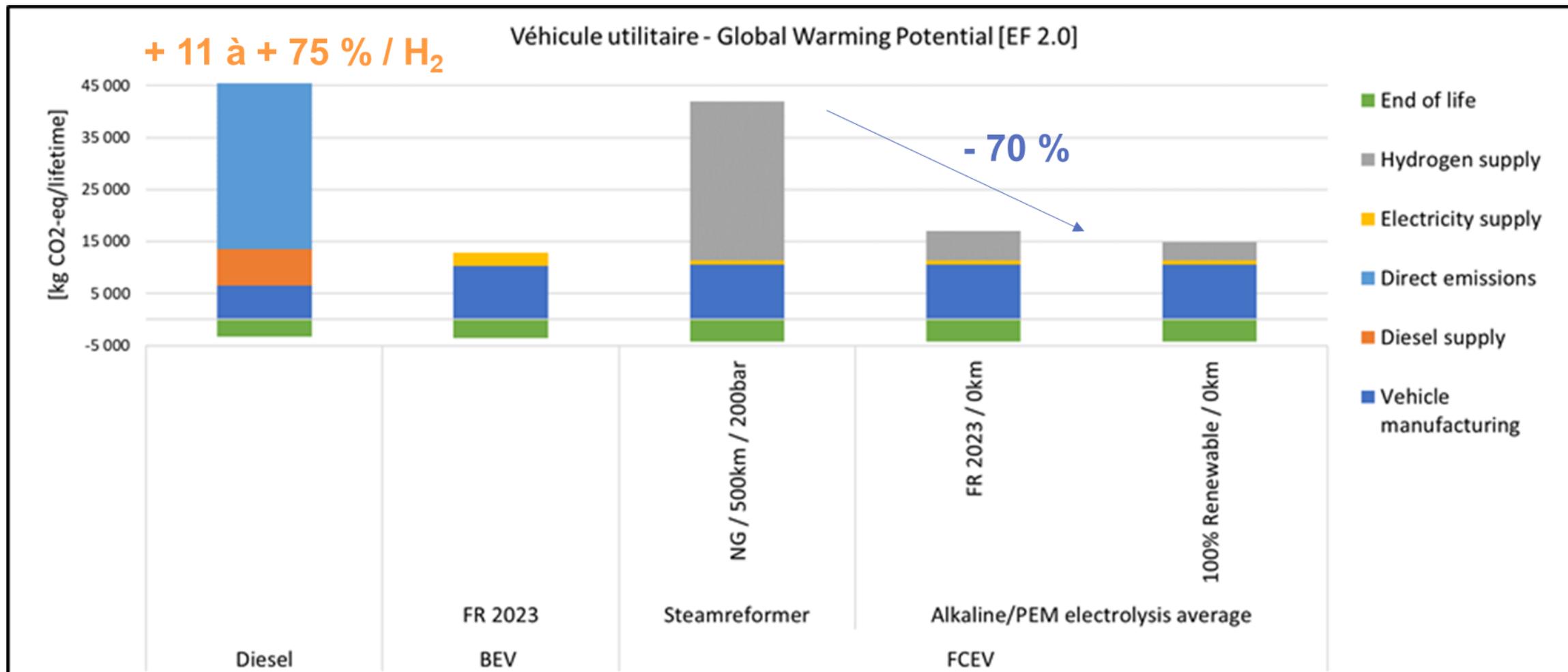
# GES du puits à la roue : Métropole et Outre-mer



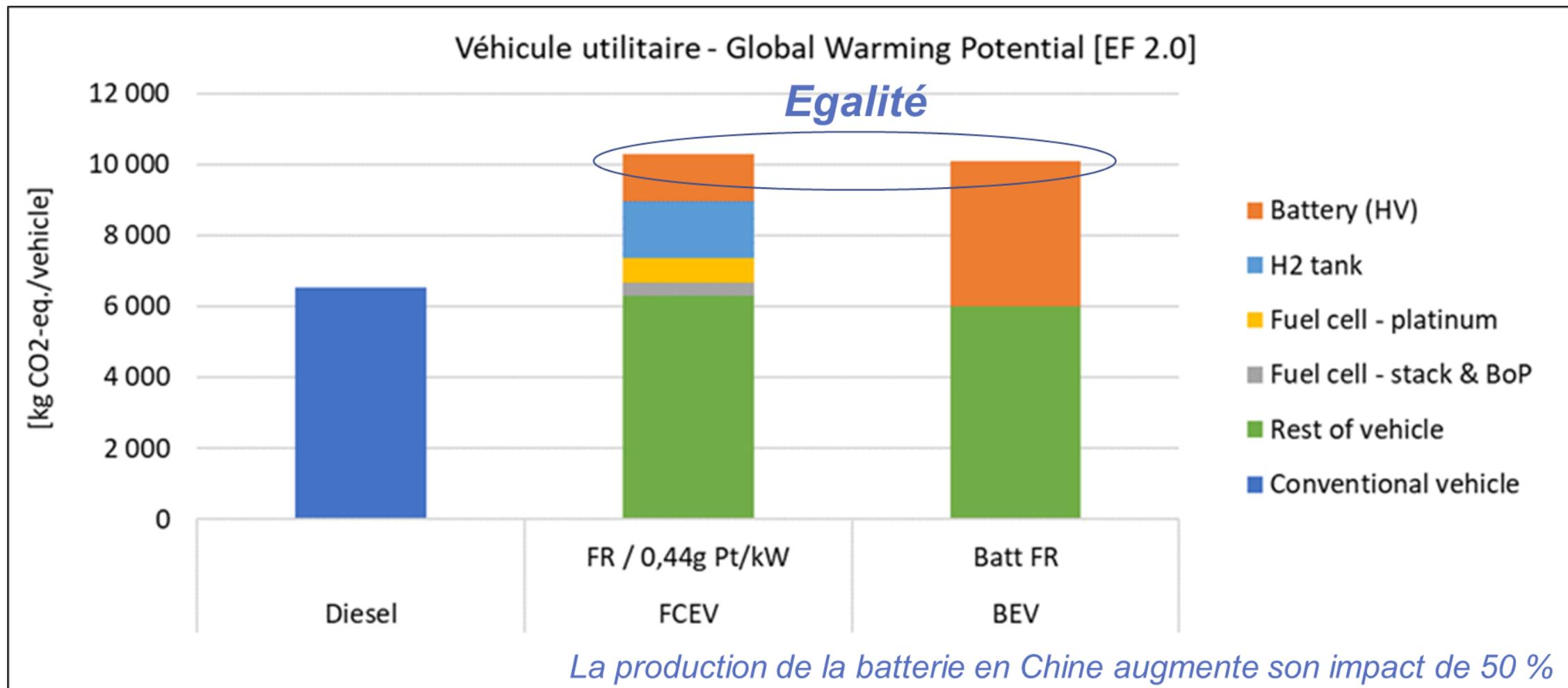
# ACV comparative filières VP – indicateur GES



# ACV comparative filières VUL – indicateur GES



# ACV comparative - indicateur GES, fabrication VUL



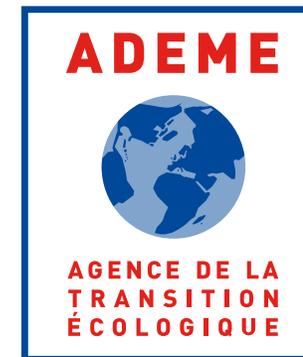
# Conclusion

- La « simplification » de la mesure des émissions en roulage ouvrent de nouvelles opportunités dans le contrôle des émissions et la réglementation
- Les filières biocarburants présentent un intérêt pour l'impact sur le changement climatique mais pas sur la pollution locale
- L'interdiction de la vente de VL avec un moteur thermique dans l'UE à partir de 2035 réoriente tous les développements industriels vers l'électrique
- Les véhicules électriques à batterie présentent un intérêt pour la pollution locale et sur le changement climatique si l'électricité est fortement décarbonée
- Pour la production d'hydrogène, l'électrolyse est à privilégier et à proximité du lieu de distribution
- L'accroissement régulier de l'autonomie des VL électriques à batterie et le déploiement des IRVE condamne à court et moyen terme le développement des VP et VUL H<sub>2</sub>



# RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Merci de votre attention

## CONTACT :

**Direction Villes et Territoires Durables / Service Transports et Mobilité**

[laurent.gagnepain@ademe.fr](mailto:laurent.gagnepain@ademe.fr)