

APPA

# LA PROBLÉMATIQUE DU DIESEL, ENJEUX SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

4 décembre 2019

---

ÉMISSIONS RÉGLEMENTÉES OU NON DES MOTEURS DIESEL :  
IMPACT DES TECHNOLOGIES DE POST-TRAITEMENT

Stéphane Raux - IFPEN



- NO<sub>x</sub> et Particules, les enjeux du Diesel
  - La filtration des particules
  - Le post-traitement catalytique des NOx
- Les espèces chimiques indésirables
- Vers un contrôle des émissions en usage réel
- Technologie moteur : un statu quo ?
- Les biodiesels
- Conclusions et perspectives

## ● Particules

- 2009 / Euro 5 pour le saut en PM : - 80 %
- 2011 / Euro 5b pour le saut en PN : première limitation à  $6.10^{11}$  part./km (solides > 23 nm)
- **Déploiement des filtres à particules**

## ● NO<sub>x</sub>

- 2014 / Euro 6b pour le 1<sup>er</sup> saut : - 55 % (< 30 % aux précédents passages de norme)
- Déploiement de catalyseurs de réduction des NO<sub>x</sub>, **pièges à NO<sub>x</sub> et SCR**
- 2017 / Euro 6c/6d temp pour le 2<sup>ème</sup> saut : NEDC → WLTC + facteur de conformité RDE à 2,1
- **Généralisation de la SCR** au détriment des pièges à NO<sub>x</sub>, augmentation des consommation d'AdBlue
- 2020 / Euro 6d final renforcement sur émissions en conditions réelles : facteur de conformité 1,43, augmentation des consommation d'AdBlue

## ● Evolution de la concentration de particules depuis la sortie moteur jusqu'à la sortie échappement

### ▪ Euro 6b, DOC + SCR + FBC-DPF

### ▪ Gamme de particules étudiée :

**Solides & volatiles** ( $5 \text{ nm} < \varnothing < 1 \mu\text{m}$ )

#### • 3 positions d'analyse :

- Aval catalyseur d'oxydation (DOC)
- Aval catalyseur de réduction sélective (SCR)
- Aval filtre à particules (DPF)

### ▪ Motorisation Diesel:

⇒ *Emet des particules, y compris de  $\varnothing < 23 \text{ nm}$ , en particulier à froid*

### ▪ Catalyseur SCR (réduction NOx):

⇒ *Catalyseur & injection d'AdBlue ne modifient pas les émissions de particules*

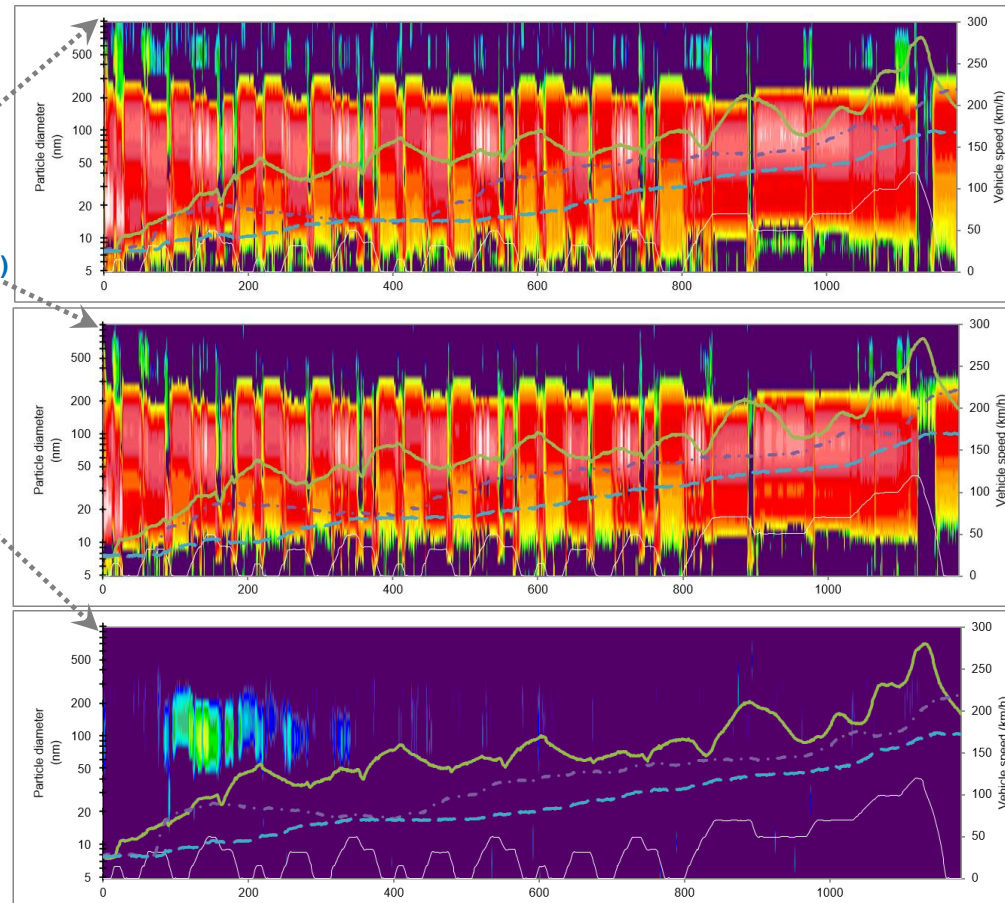
### ▪ Filtre à particules:

⇒ *Extrêmement efficace, malgré émissions à froid*

(\*) DOC: Diesel Oxydation Catalyst

SCR: Selective Catalytic Reduction

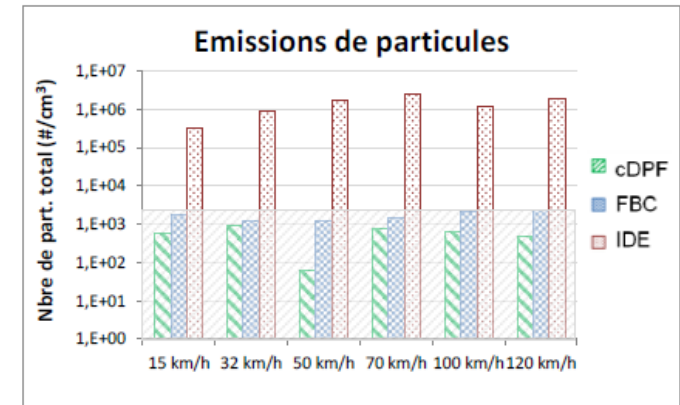
FBC-DPF: Fuel-borne Catalyst Diesel Particulate Filter



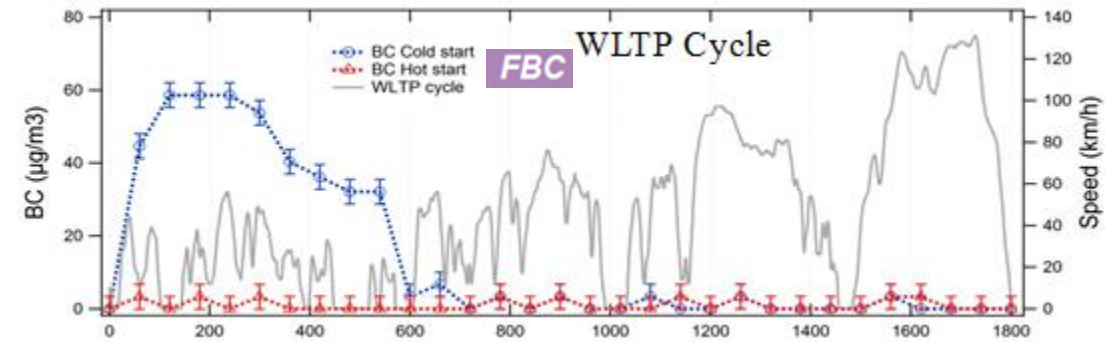
CAPPNOR2 project 

# PARTICULES, LESQUELLES ET DANS QUELLES CONDITIONS

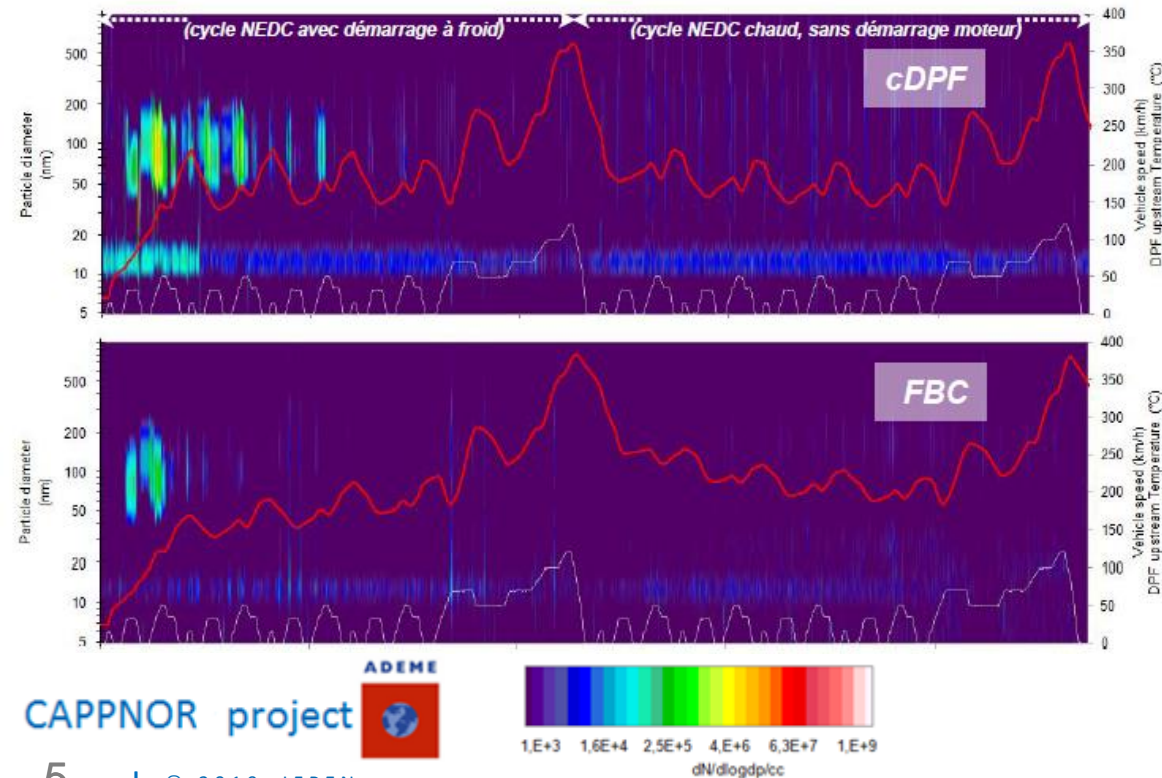
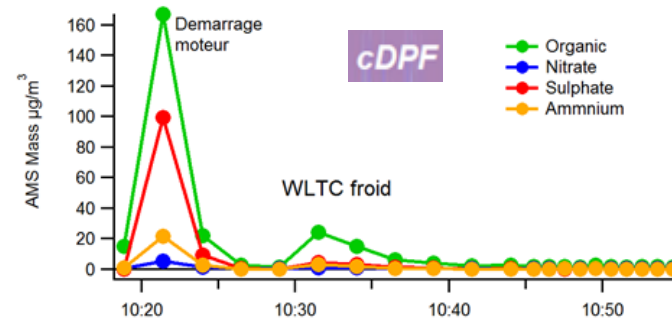
- A vitesse constante, concentrations émises par véhicules Euro 5 (FAP) proches de l'ambient
- Des particules sont observées lors du démarrage du véhicule...



... composées de suie (noir de carbone)...



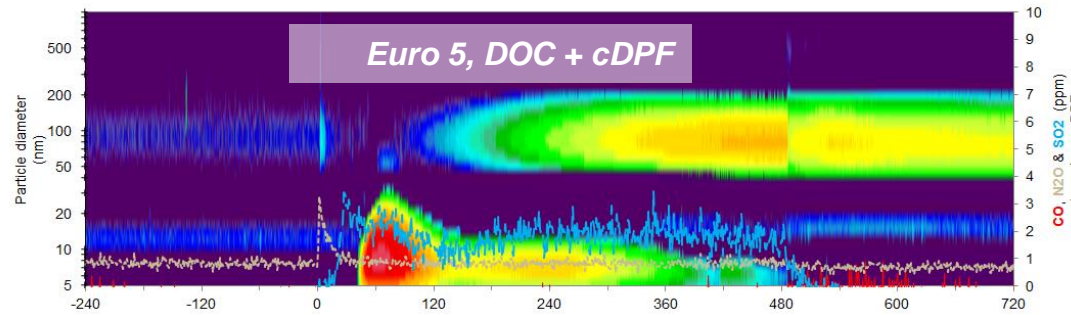
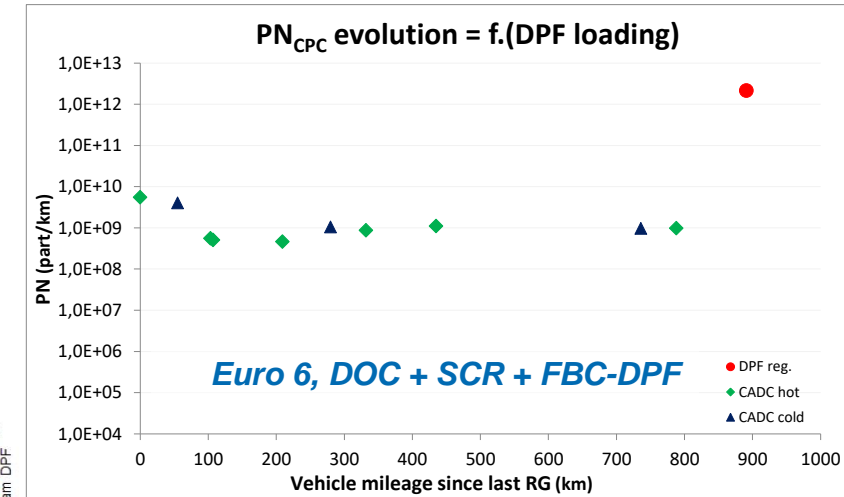
... et de sulfates



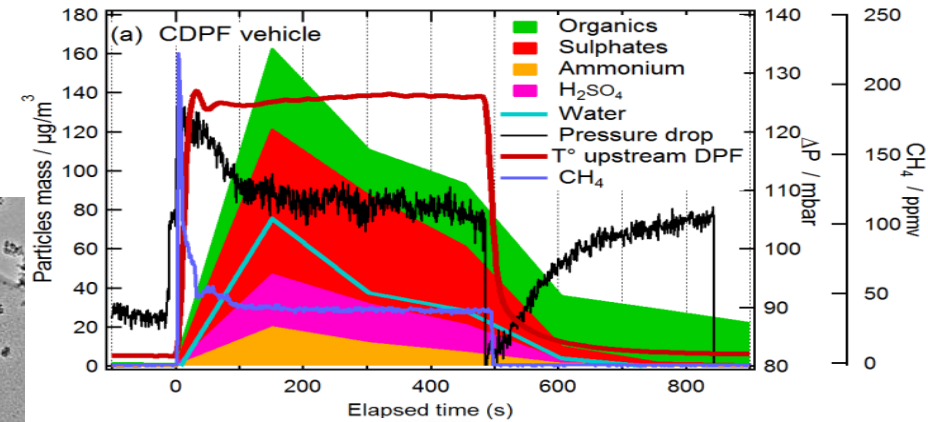
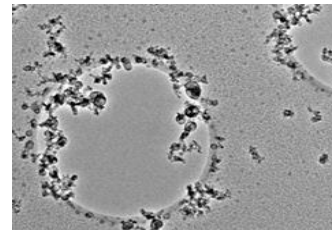
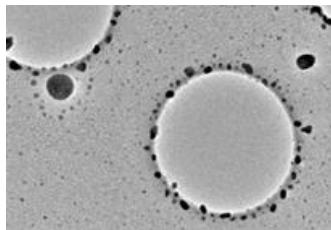
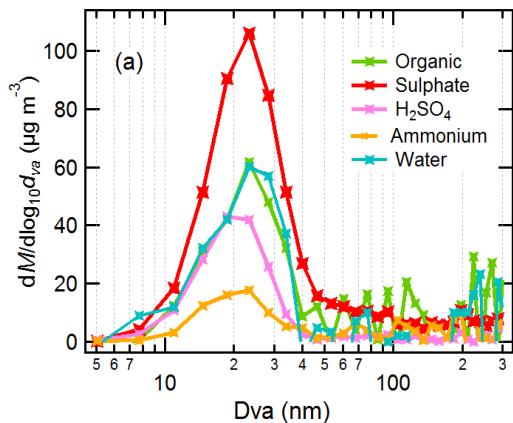


# PARTICULES LORS DES RÉGÉNÉRATIONS DU FAP

- Emissions importantes enregistrées lors des phases de combustion des suies piégées dans le filtre à particules (régénération), peu fréquentes et de courte durée
- Exemple de suivi des émissions lors d'une régénération
  - 2 modes
  - Sulfates, parmi les plus petites



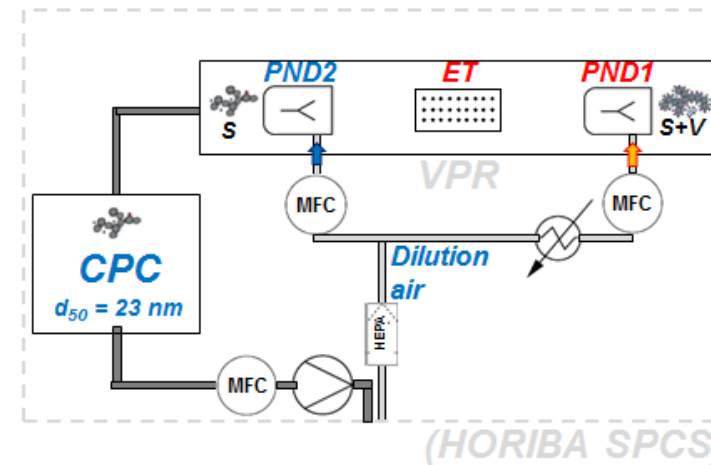
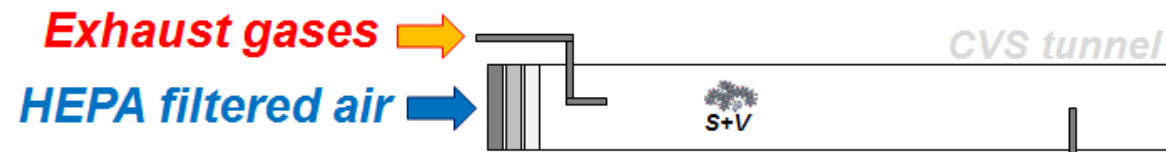
*cDPF, 2 premières minutes*



# NOMBRE DE PARTICULES, LA NORME ET SON DEVENIR

- Ce qu'on mesure pour l'homologation

- Particules solides de plus de 23 nm

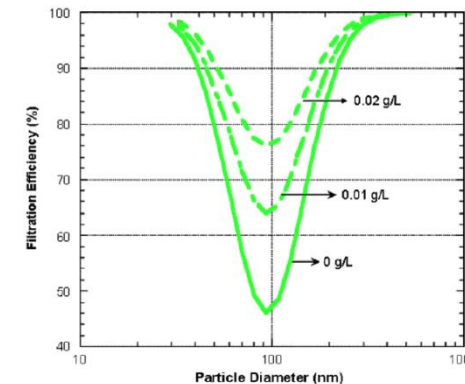
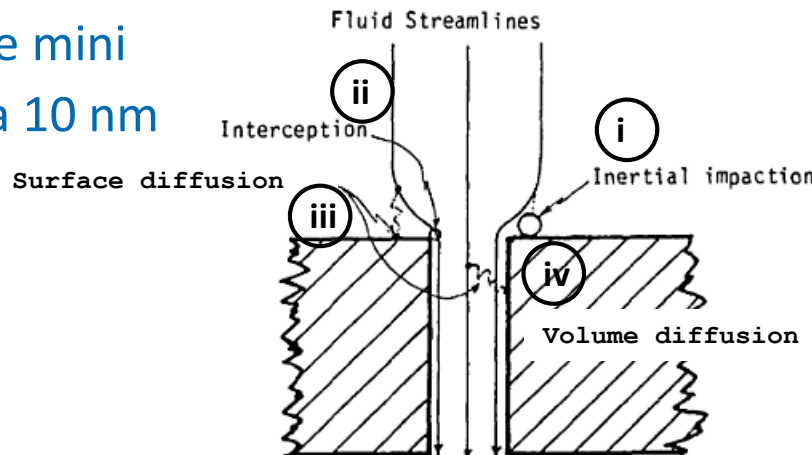


Settings	PND 1	ET	PND 2
Dilution factor (-)	100	-	15
T° (°C)	190	350	35

- Les évolutions probables

- Baisse du diamètre mini de comptage de 23 à 10 nm

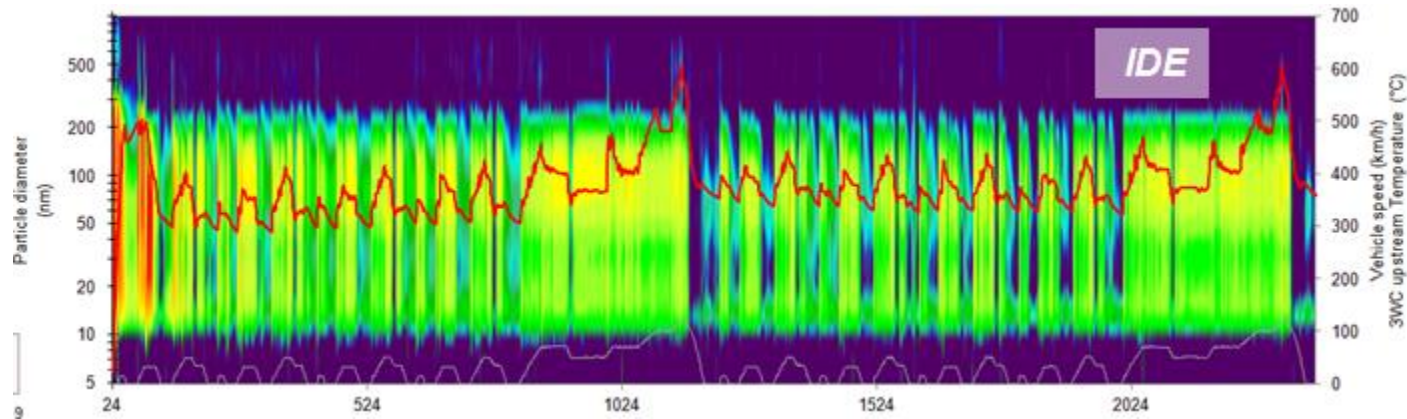
→ Quel effet ?



Tandon P., Chemical Engineering Science 65 (2010) 4751–4760

# ET LES PARTICULES DES MOTEURS À INJECTION DIRECTE D'ESSENCE ?

- En 2014, premier seuil PN à respecter fixé à  $6.10^{12}$  particules par kilomètre (x10 / Diesel)



CAPPNOR project 

Euro 5

- Depuis 2017, limite identique aux Diesel ( $6.10^{11}$  particules par km)
  - Possibilité de limiter les émissions via la combustion mais risque important de dérive (encrassement)
  - Déploiement des GPF (Gasoline Particle Filter) au fonctionnement très différent des DPF
    - Faible tolérance du moteur à la contre-pression → filtre « perméable » pour la durabilité (cendres)
    - Pas ou peu d'accumulation de suies



## ● Particules

- 2009 / Euro 5 pour le saut en PM : - 80 %
- 2011 / Euro 5b pour le saut en PN : première limitation à  $6.10^{11}$  part./km (solides > 23 nm)
- Déploiement des filtres à particules

## ● NO<sub>x</sub>

- 2014 / Euro 6b pour le 1<sup>er</sup> saut : - 55 % (< 30 % aux précédents passages de norme)
- Déploiement de catalyseurs de réduction des NO<sub>x</sub>, **pièges à NO<sub>x</sub> et SCR**
- 2017 / Euro 6c/6d temp pour le 2<sup>ème</sup> saut : NEDC → WLTC + facteur de conformité RDE à 2,1
- **Généralisation de la SCR** au détriment des pièges à NO<sub>x</sub>, augmentation des consommation d'AdBlue
- 2020 / Euro 6d final renforcement sur émissions en conditions réelles : facteur de conformité 1,43, **augmentation des consommation d'AdBlue**

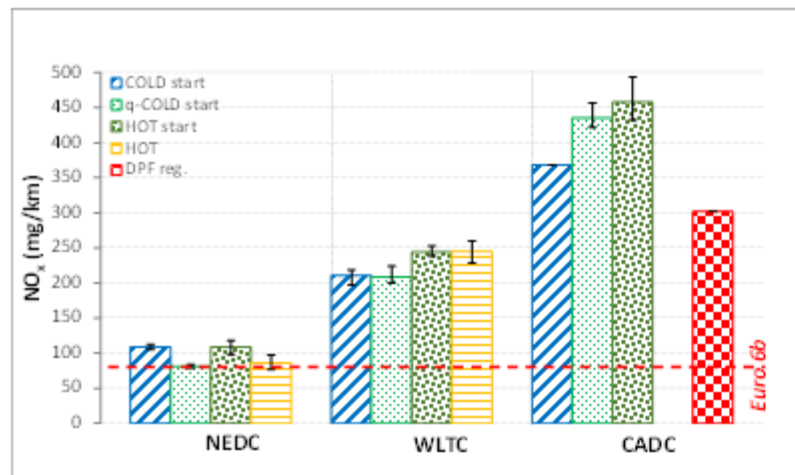
# NO<sub>x</sub> : LES SYSTÈMES ACTIFS DE POST-TRAITEMENT

- En 2014, premiers systèmes actifs de NO<sub>x</sub> pour homologation sur NEDC : SCR ou pièges à NO<sub>x</sub>
  - Efficacité requise de l'ordre de 60 %
  - Sur une plage de température d'environ 200 à 350-400 °C
- 2 Diesel vehicles (Euro 6b) tested on cycles with increasing severity: NEDC, WLTC and Artemis (CADC)
  - NO<sub>x</sub> emissions increase with more aggressive driving

CAPPNOR2 project

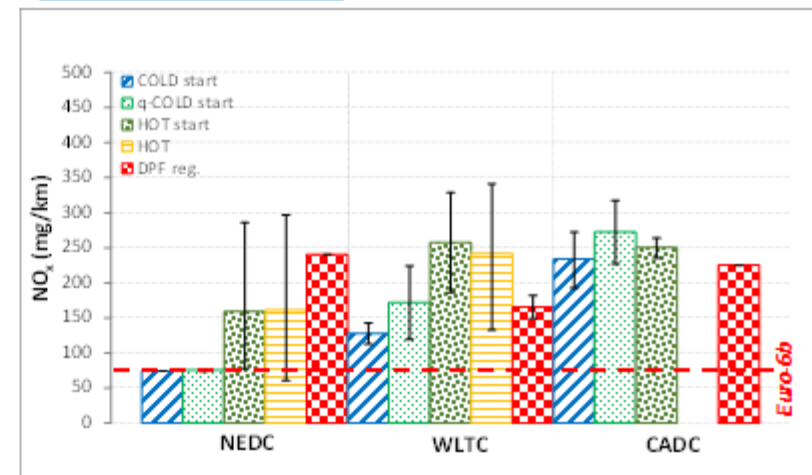


## ➤ 1<sup>st</sup> vehicle: SCR



- 3 to 5 x Euro 6b limit

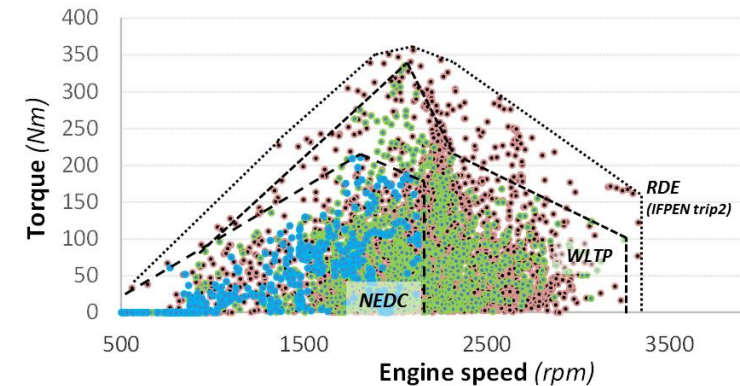
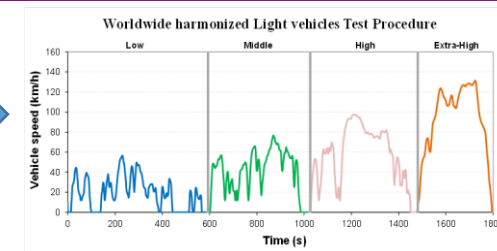
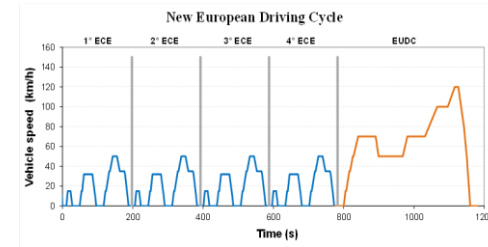
## ➤ 2<sup>nd</sup> vehicle: LNT



- 2 to 3 x Euro 6b limit (cold start tests)

# NO<sub>x</sub> : LA RÉDUCTION CATALYTIQUE SELECTIVE

- En 2017, changement de cycle(s)
  - NEDC remplacé par WLTC, plus exigeant
  - Besoin de traitement sur roulage sur route pour norme RDE (Real Driving Emissions)
    - Malgré un facteur de conformité de 2,1 (168 mg/km), besoin de réduire les NO<sub>x</sub> sur une plage de fonctionnements plus étendue
    - Prévion de CF à 1,43 en 2020
- Exigence forte de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (95 g/km en 2021)
- Couplage avec le filtre à particules et ses régénérations très exothermiques



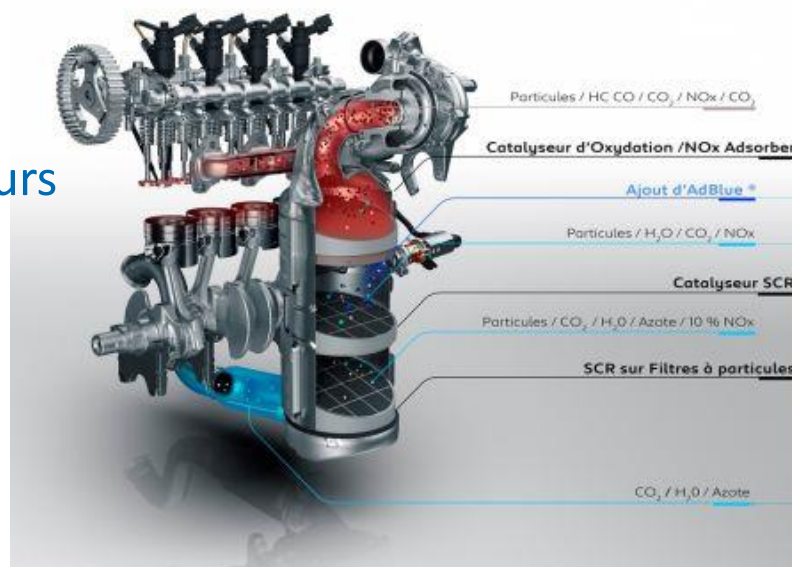
→ SCR très bien adaptée

# SCR, LES ÉVOLUTIONS

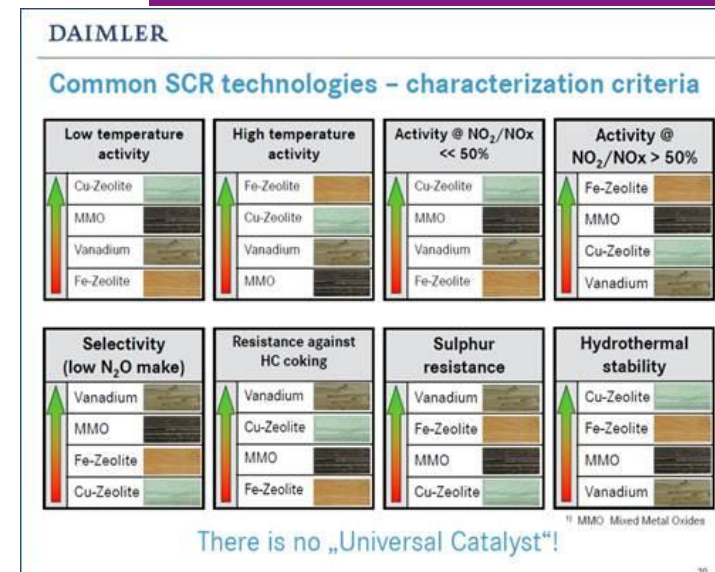
- Cahier des charges pour la formulation catalytique SCR
  - Efficace sur la plus large plage de température, au moins 200 – 500 °C
  - Peu sensible au rapport NO/NO<sub>2</sub>
  - Tenue à des températures très élevées, par ex. 850 °C pendant 1 h
  - Résistant aux empoisonnements chimiques (SO<sub>2</sub>, HC)
  - Capables de stocker l'ammoniac pour le contrôle en transitoire
  - Sélectif, i.e. peu de formation d'espèces chimiques indésirables

- Zéolithes échangées avec un ion d'un métal de transition
  - De Fe-MFI à Cu-CHA

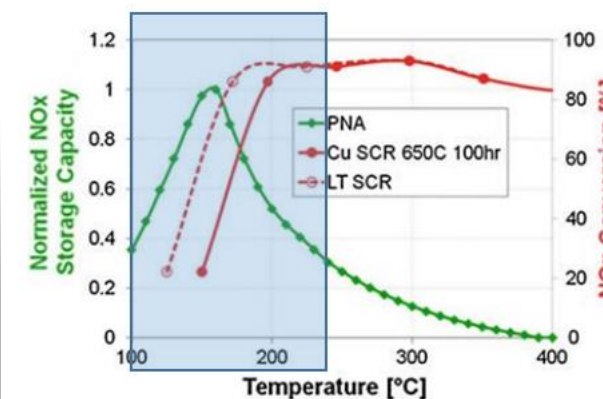
- Couplage avec le filtre à particules
  - Architecture intégrant 3 à 4 catalyseurs
    - DOC/PNA
    - SCRF
    - SCR
    - ASC



Source PSA



Source DAIMLER

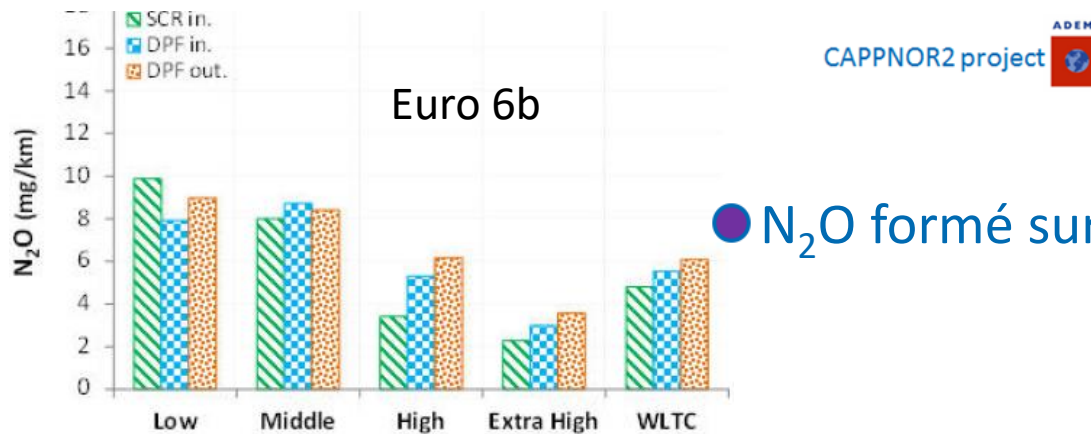


- La combustion des hydrocarbures produit d'autres espèces chimiques que celles réglementées...
  - HAP
  - Aldéhydes
  - Sulfates
- ... ou des molécules « partiellement » réglementées :  $\text{NO}_2$ , parmi les  $\text{NO}_x$
- De plus, aucun système de dépollution catalytique n'est totalement sélectif
  - Formation de  $\text{NH}_3$  et de  $\text{N}_2\text{O}$ 
    - Sur catalyseurs Diesel (DOC, SCR, LNT) mais aussi Essence (Trois-voies)
- Prochaines normes Euro pourraient compter certains de ces polluants
  - $\text{N}_2\text{O}$  : déjà limité en Chine à 20 mg/km (éq.  $\text{CO}_2$  : 6 g/km !)
  - $\text{NH}_3$  : en concentration pic (10 ppm ?) ou en cumulé
  - Formaldéhyde : déjà limité aux USA à 10 mg/mi

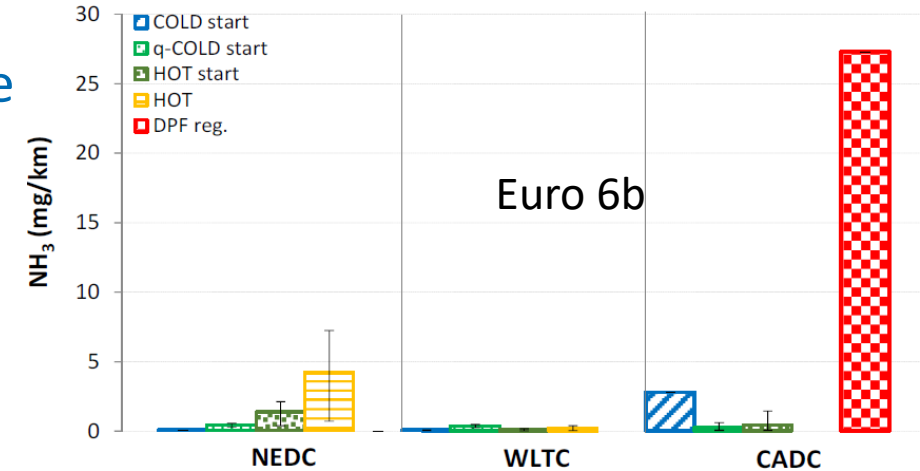


# LES ESPÈCES CHIMIQUES INDÉSIRABLES

- Emissions résiduelles de  $\text{NH}_3$  liées à surinjection d'AdBlue et/ou limites du contrôle
  - Émissions plus significatives lors des régénérations

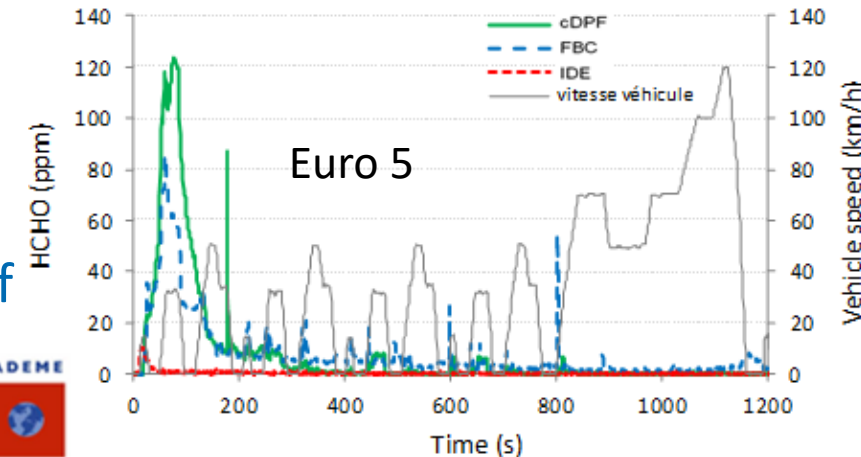


- $\text{N}_2\text{O}$  formé sur le DOC, en amont SCR

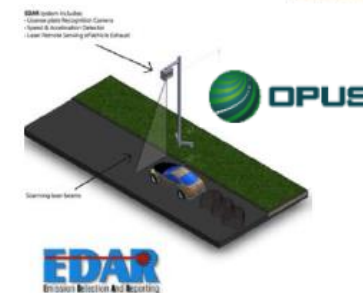


- Aldéhydes formés au démarrage du moteur, catalyseur inactif

CAPPNOR project ADEME



- Homologation des véhicules
  - WLTC sur banc d'essai : analyse de gaz, mesure gravimétrique (PM) et protocole PMP pour PN
  - RDE sur route : PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) pour NOx, PN, CO
- En embarqué pour l'OBD (On-Board Diagnostic)
  - Information indirecte : contre-pression du FAP, sonde à NOx, exotherme...
- En cours de vie des véhicules, détecter les véhicules émissifs
  - Lors du contrôle technique : mesure PN en préparation, pour 2020 ?
  - En bord de route, par Remote Sensing Devices (RSD), dont NOx
  - En embarqué,
    - par des systèmes simples de mise en œuvre...
    - ...permettant la mesure de polluants additionnels (NH<sub>3</sub>)



intégrant la technologie **ELEMENTS**<sup>®</sup>



- Principaux drivers des développements : rendement, NOx, Particules, performances
  - Axes d'amélioration pour dépollution :
    - Exhaust Gas Recirculation (EGR)
    - Optimisation de la suralimentation turbocompressée
    - Aérodynamique interne
    - Pression d'injection
    - Motifs d'injection multiple
    - Abaissement du rapport volumétrique de compression
- ... jusqu'au DieselGate !
  - Arrêt brutal des actions de recherche et de développement Diesel chez les constructeurs
  - Report des budgets sur les moteurs à essence et l'électrification

- Des émissions réglementées très basses, en conditions réelles d'utilisation...
- ...Cependant, d'autres espèces chimiques néfastes pour la santé et l'environnement à surveiller
  - Impact des biocarburants sur PR et PNR à évaluer
    - Projet ADEME CORTEA « RHAPSODIE 2 » (IFPEN/INERIS) : Répartition gazeuse et particulaire des HAPs, nitro-HAP et Oxy-HAP émis par les biocarburants DIEsel
      - Incorporation de EMHV, BTL, HVO et OME-1
      - Véhicule Euro 6d
    - Etude réalisée en 2020
  - Mais aussi, les émissions de précurseurs d'Aérosols Organiques Secondaires

*Innovating for energy*

Find us on:

 [www.ifpenergiesnouvelles.com](http://www.ifpenergiesnouvelles.com)

 [@IFPENinnovation](https://twitter.com/IFPENinnovation)

