35èmes JOURNÉES NATIONALES DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

un nouveau souffle dans le BTP

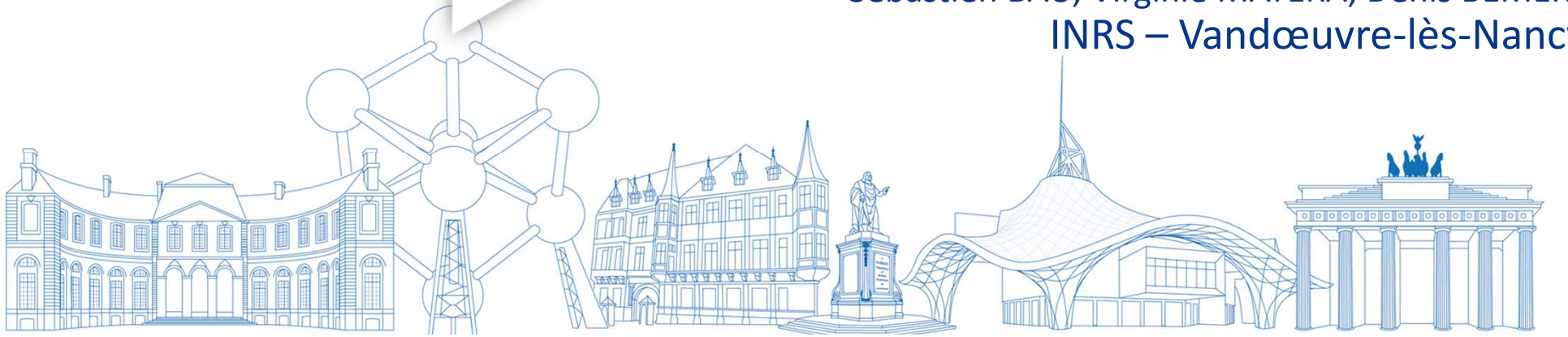
LES PARTICULES FINES

du 22 au 24 MAI 2019

METZ
Centre des Congrès Robert Schuman

Métrologie des Particules Fines et Ultrafines en Environnement de Travail

Davy ROUSSET
Sébastien BAU, Virginie MATERA, Denis BEMER, Benoît OURY
INRS – Vandœuvre-lès-Nancy



SIST Service Interentreprises de Santé au Travail BTP Lorraine

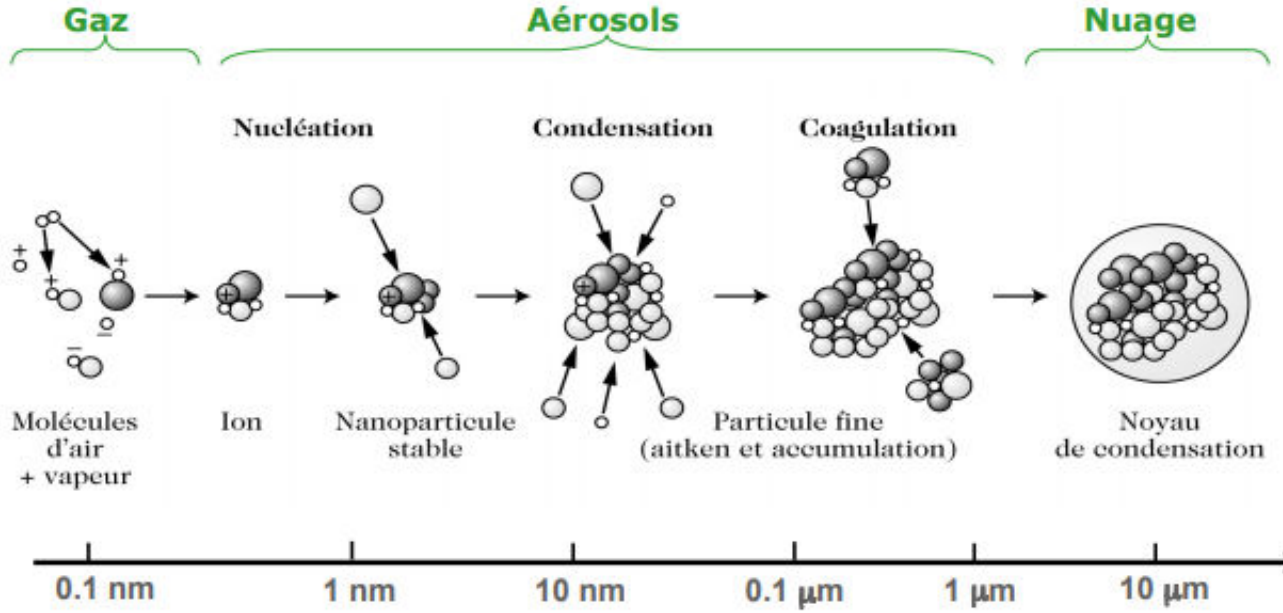
GNMST BTP
GROUPEMENT NATIONAL MULTIDISCIPLINAIRE DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

Plan de la présentation

- Particules fines et ultrafines – Généralités
- Outils de métrologie disponibles
  - Les instruments de mesures en temps réel
  - Prélèvement et analyse en différé
- Exemples de mise en œuvre de ces outils
  - Exposition à la Silice Cristalline
  - Exposition aux Fumées Diesel
  - Caractérisation des Fumées de Soudage

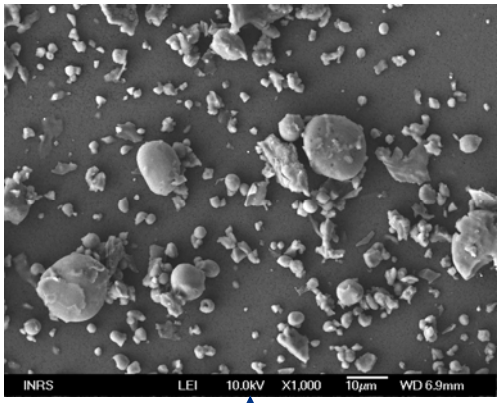
Particules fines et ultrafines

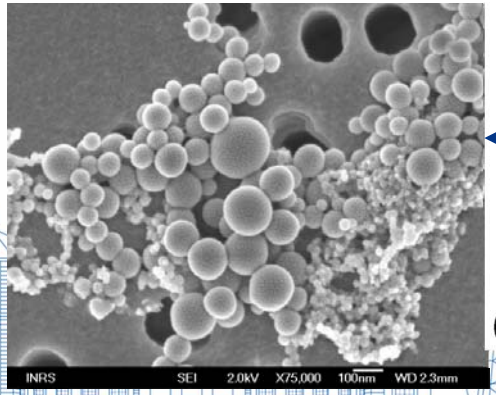
- **Particules ultrafines** (**< 0,1 µm**) par Nucléation → issues pour l'essentiel de la combustion en moteur ou de processus de conversion gaz/particule
- **Particules fines** (**0,1 à 1-2 µm**): issues du grossissement de noyaux par condensation ou de la coagulation de particules du mode nucléation (Accumulation)
- **Particules grossières** (**> 1-2 µm**) : Particules issues pour l'essentiel de processus mécaniques.

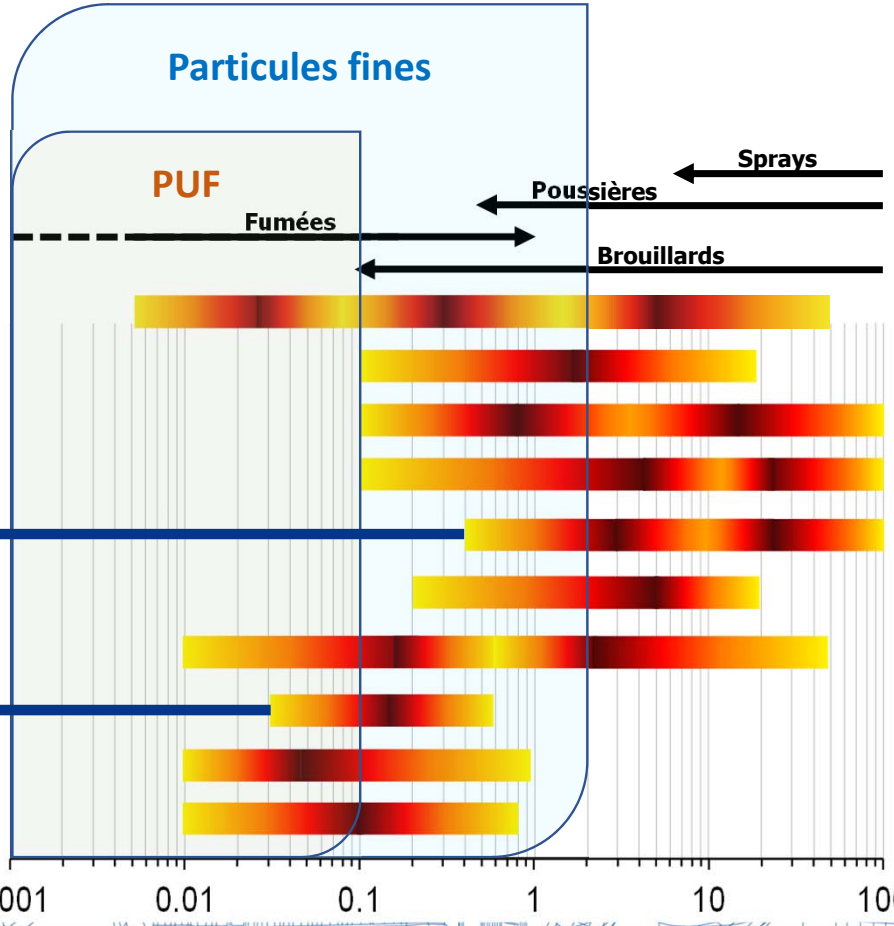


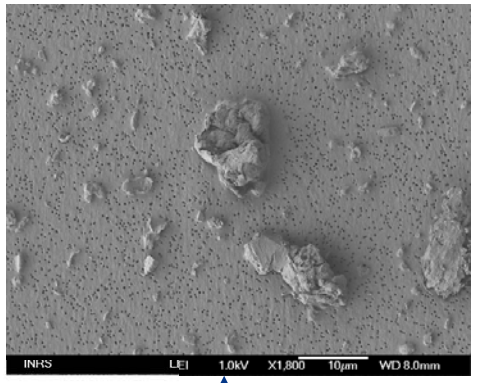
Source : LMD Jussieu – Chap. 5. Les aérosols atmosphériques

Taille des particules en hygiène industrielle







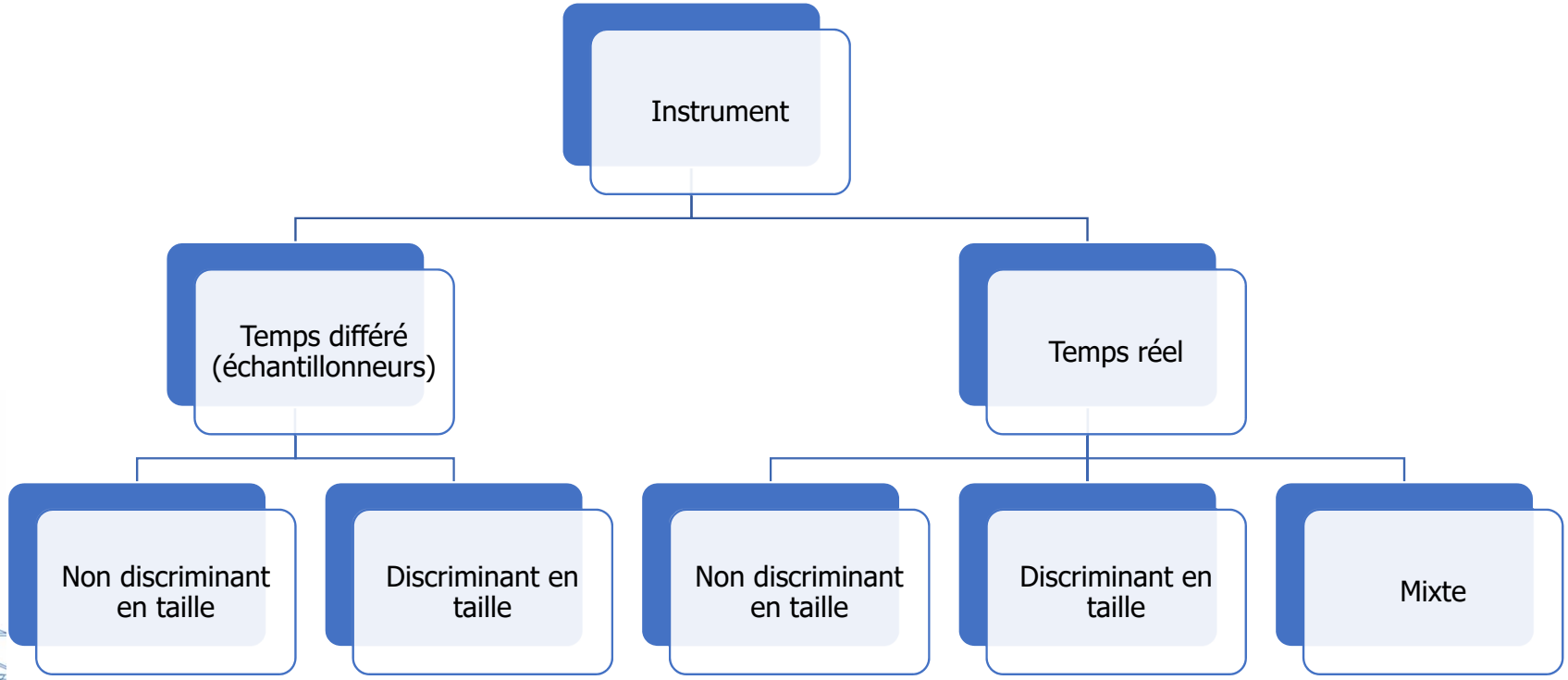


Aérosols urbains
Opérations mécaniques
Poussières de bois
Brouillard d'huiles
Poussières de farine
Aérosols bactériens / fongiques
Manipulation de poudres
Fumées de soudage
Emission de moteurs diesel
Fumées de métallisation

Source : INRS – Xavier SIMON, Sébastien BAU

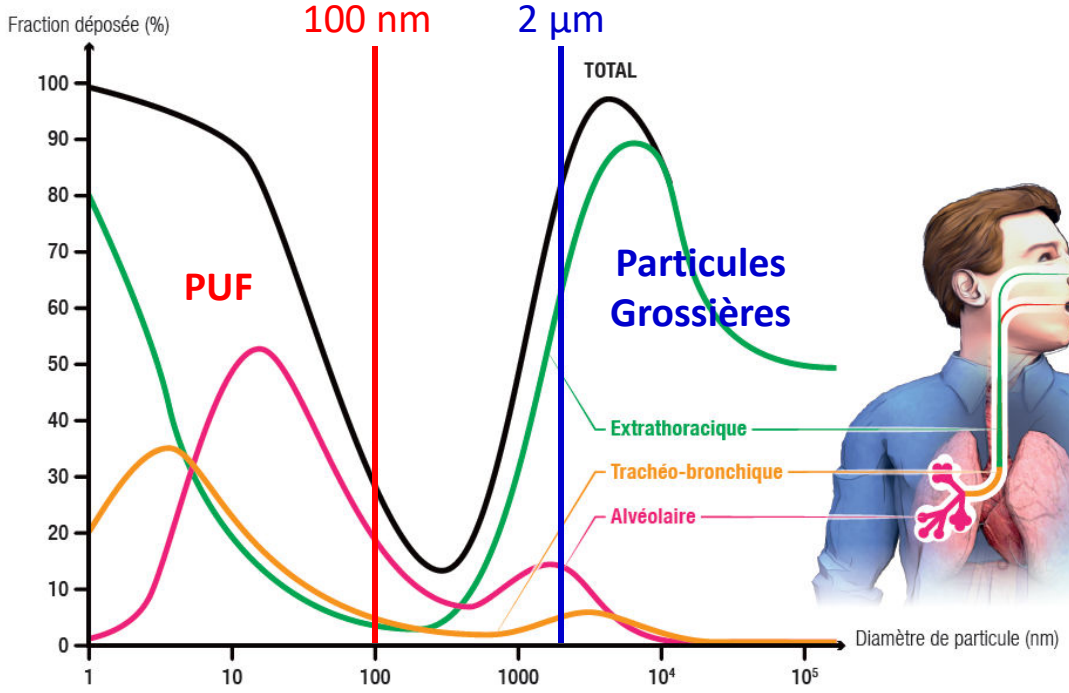
Outils de métrologie

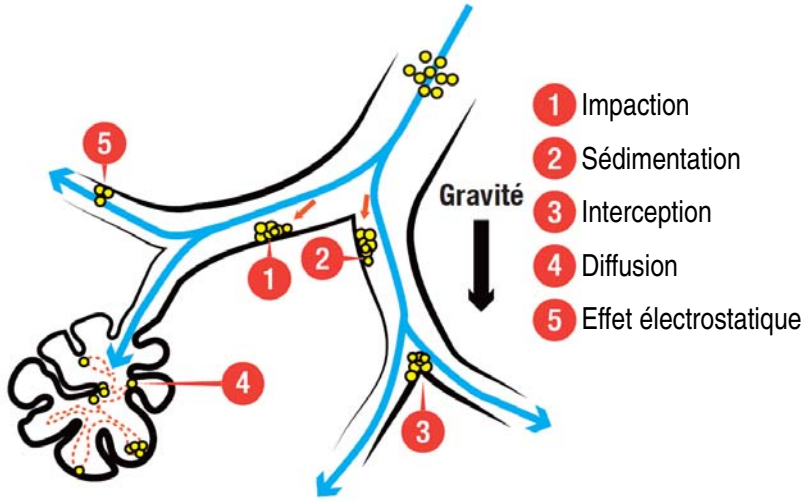
- Pas d'instrument /de méthode universel → **complémentarité des techniques**
- Instrumentation à mettre en œuvre → **fonction des objectifs du mesurage**



Connaitre la distribution granulométrique

- La taille des particules conditionne leur comportement dans l'air (diffusion, agglomération, sédimentation etc.) et dans l'appareil respiratoire (inhalation)

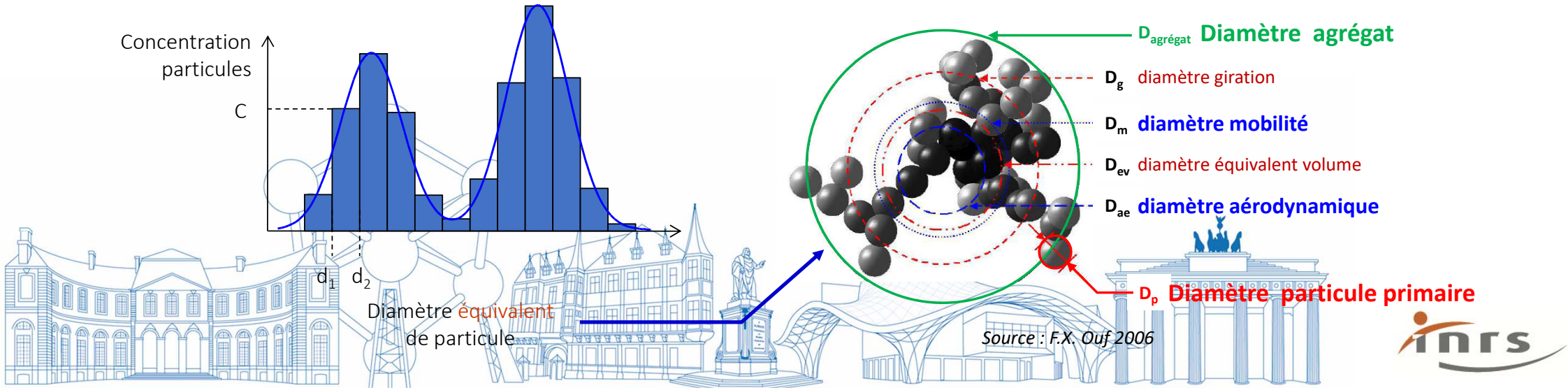




Source: CIPR (1994). Publication n°66

Techniques discriminantes en taille

- La mesure de la distribution en taille des particules (analyse granulométrique) nécessite le couplage de deux étapes:
  - Sélection en taille
  - Détection ou collecte des particules
- Le résultat d'une telle mesure fournit la quantité (nombre, surface, masse) de particules en fonction de leur taille



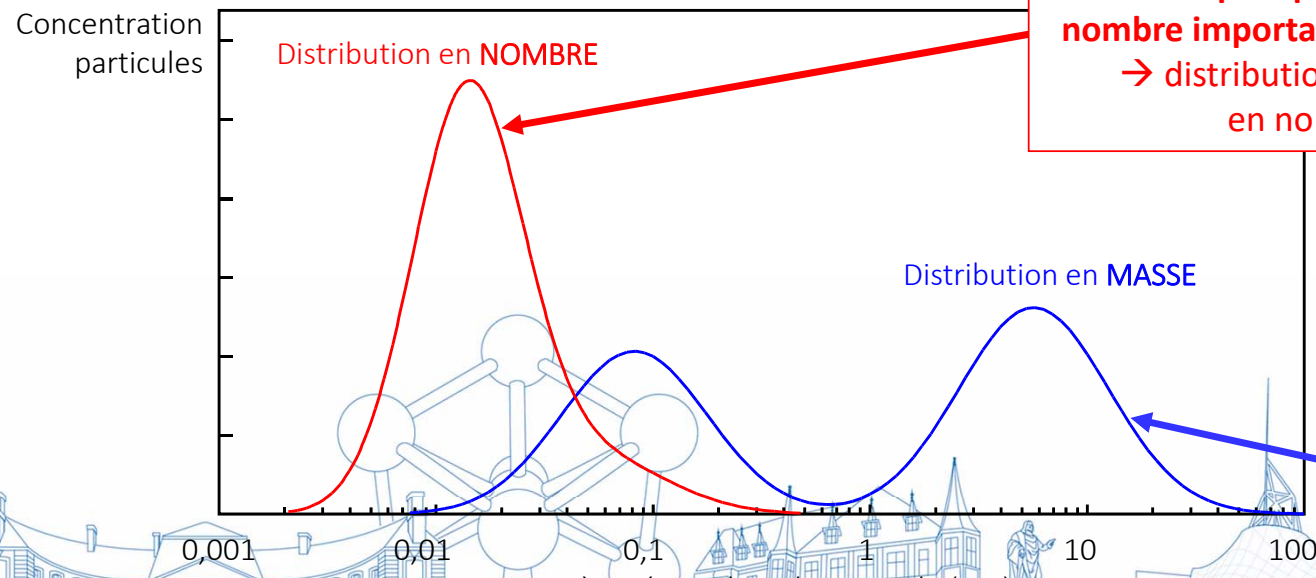
Diamètre équivalent fonction morphologie/densité

Source : F.X. Ouf 2006

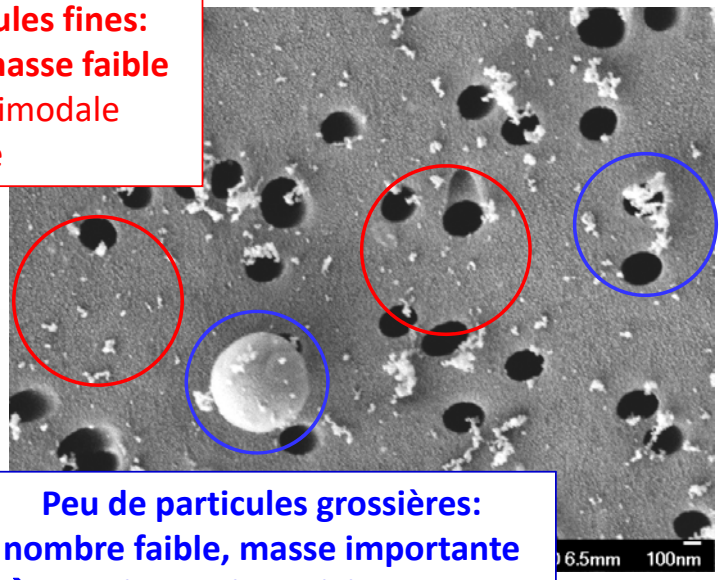
Distribution granulométrique d'un aérosol

- Mesure d'une concentration de particules → différentes métriques
  - **En nombre: #.m^{-3}**
  - **En surface: µm^2.m^{-3}**
  - **En masse: mg.m^{-3}**

→ La représentation graphique de la distribution **change** en fonction de la métrique

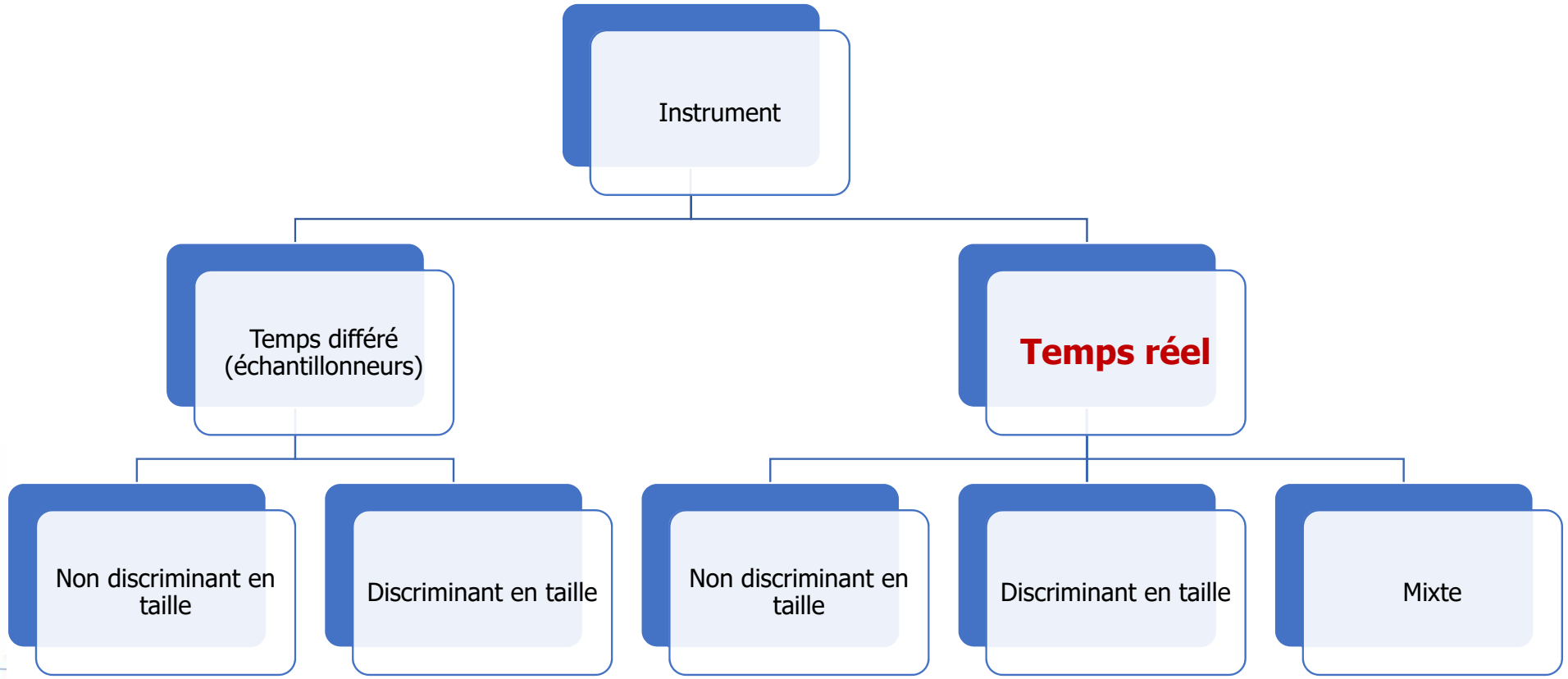


Beaucoup de particules fines: nombre important, masse faible
→ distribution unimodale en nombre



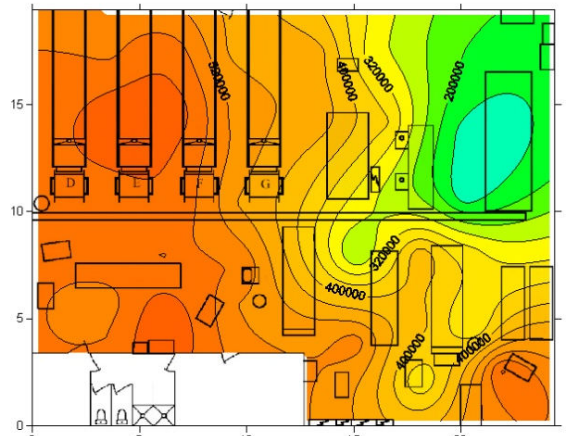
Peu de particules grossières: nombre faible, masse importante
→ Distribution bimodale en masse

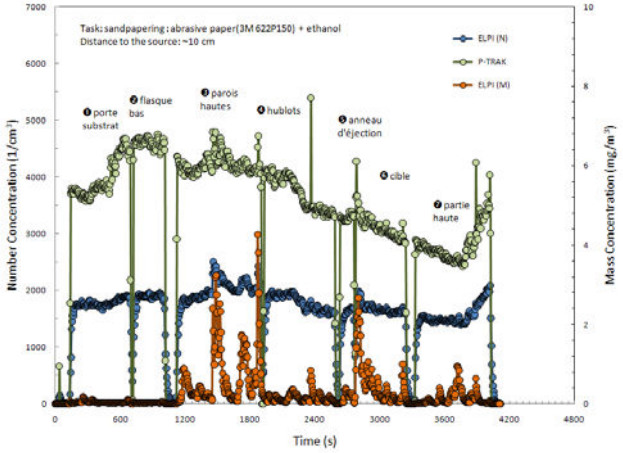
Instruments de mesure en **temps réel**



Apports de l'instrumentation temps réel

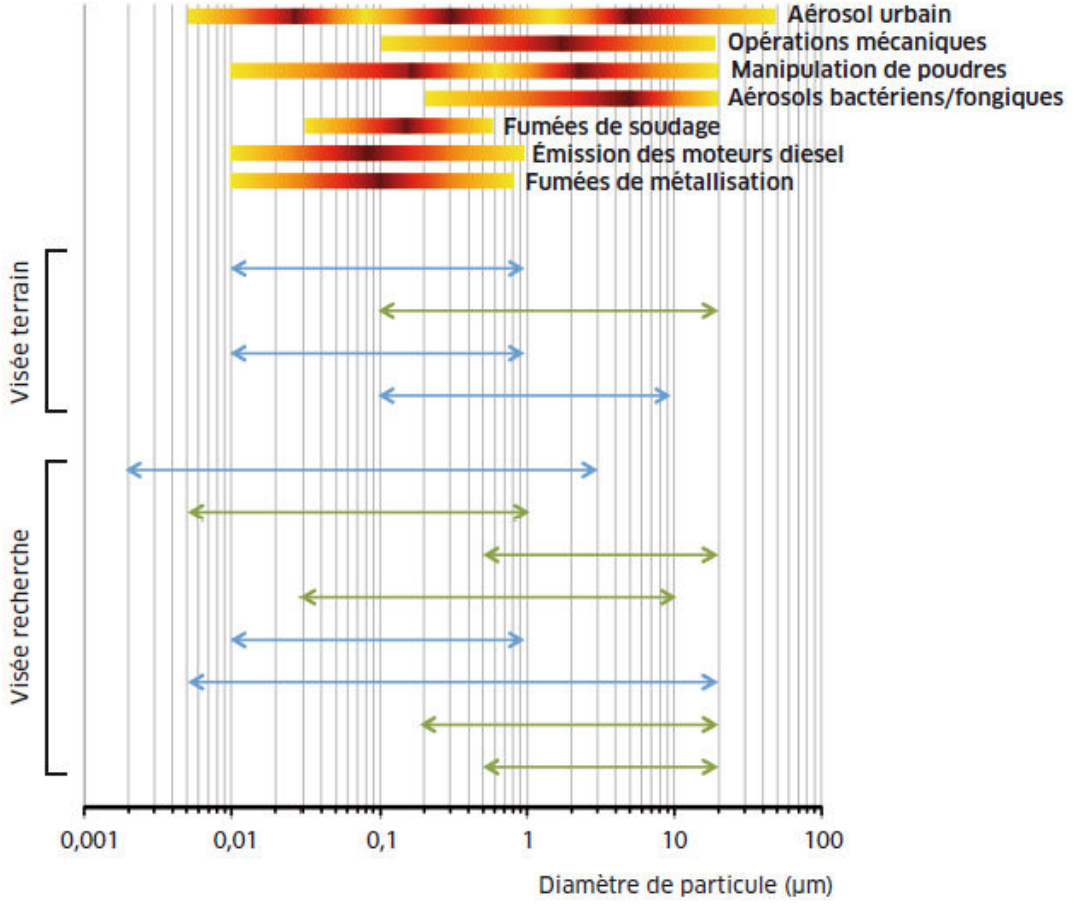
- ⊕ Caractérisation des sources potentielles d'aérosols de (nano)particules de façon qualitative (screening) ou quantitative, dans le temps et dans l'espace (cartographie)
- ⊕ Mise en évidence des tâches associées aux émissions, des pics d'exposition/émission
- ⊕ Détection des dysfonctionnements des dispositifs de protection (alarmes)
- ⊕ Estimation de l'exposition
- ⊖ Pas spécifique – gamme de concentration / taille de particules





Principes de mesure des instruments temps réel

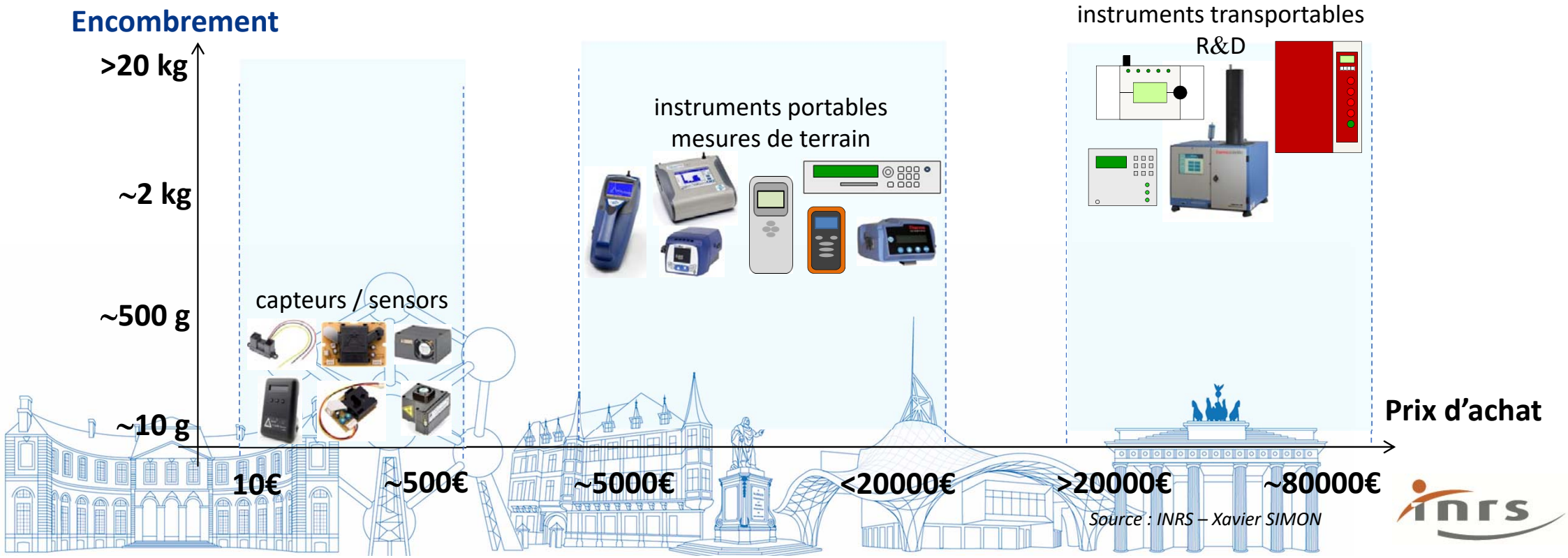
- **Mesure optique**
  - Particules les plus fines grossies artificiellement pour comptage optique
  - CNC, OPC,…
- **Mesure électrique**
  - Particules préalablement chargées pour une détection électrique (courant)
  - ELPI, DiSCmini, FMPS,…
- **Mixte**
  - Particules préalablement chargées pour permettre leur **séparation**
  - Grossissement des particules les plus fines pour un **comptage optique**
  - SMPS, Nanoscan,…



Bau et al., Hygiène et Sécurité du Travail, 239, juin 2015

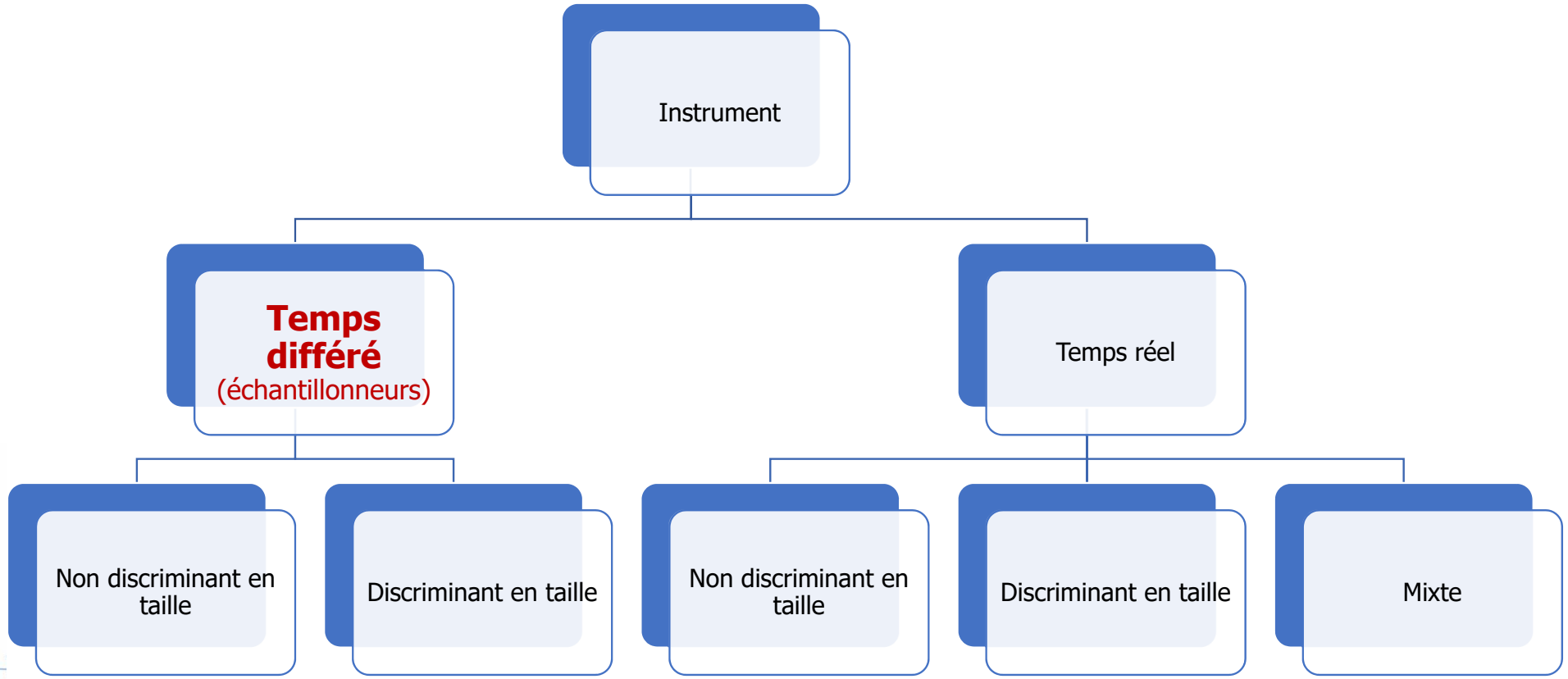
Instruments de mesure en temps réel disponibles

- Nombreux d'instruments / Applications variées
  - Qualité de l'air, salles propres, recherche et développement, rejets atmosphériques / procédés, **santé au travail / prévention**



Source : INRS – Xavier SIMON

Méthode de Prélèvement et d'analyse **en différé**



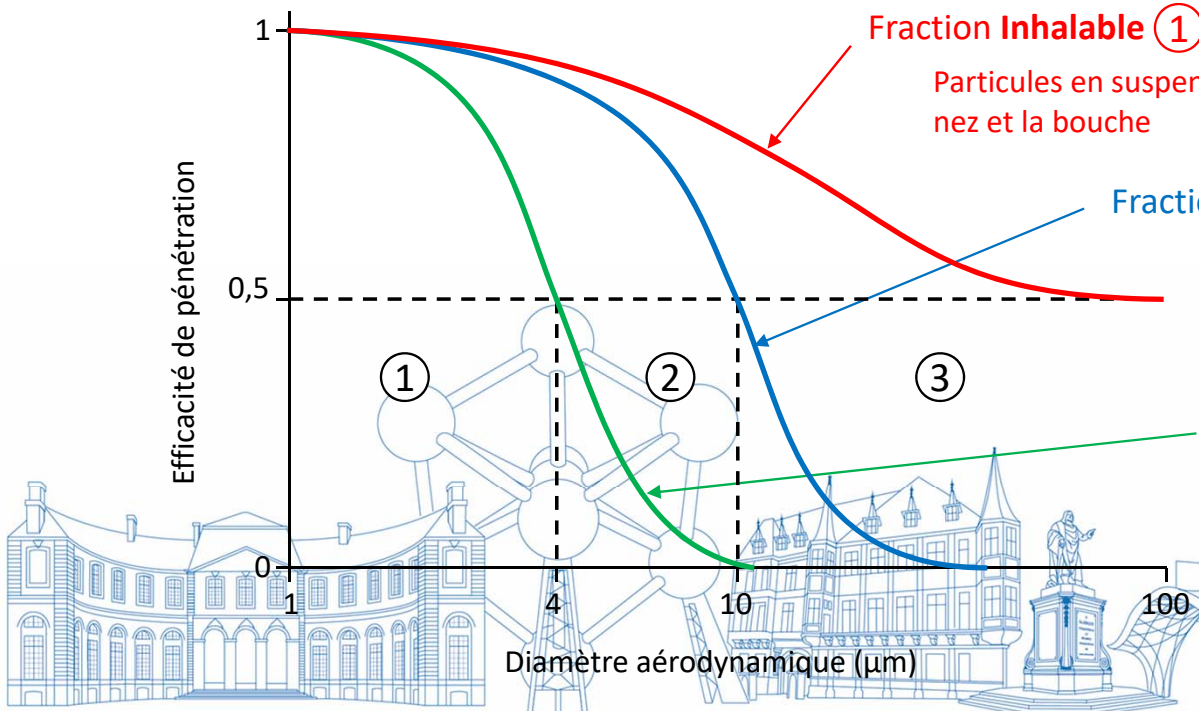
Intérêt des méthodes à mesure différée

- Evaluation quantitative des expositions
  - Quantification par élément/agent chimique
  - Comparaison à des valeurs limites existantes (dose)
- Analyse d'autres paramètres pour comprendre la toxicité des particules (réactivité, morphologie, solubilité,…) en fonction de la taille

⇨Collecte de particules

Fractions conventionnelles: Inhalable, Thoracique, Alvéolaire

- Risques liés à l'exposition des aérosols :
  - Caractéristiques toxicologiques et propriétés physico-chimiques des substances présentes
  - Sites de dépôts à l'intérieur des voies respiratoires
- Pour prévoir plus efficacement les effets biologiques → définition de fractions de l'aérosol liées à la santé
- Consensus international modèle d'efficacité de pénétration de particules en suspension (EN 481:1993)



Fraction **Inhalable** ①+②+③

Particules en suspension qui pénètrent dans l'organisme via le nez et la bouche

Fraction **Thoracique** ①+②

Sous-fraction de la fraction inhalable fraction constituée par les particules qui peuvent atteindre la région trachéo-bronchique et le poumon profond

Fraction **Alvéolaire** ①

Sous-fraction de la fraction inhalable constituée par les particules qui peuvent atteindre la région alvéolaire des poumons (bronchioles respiratoires, alvéoles pulmonaires)

Fractions conve

MétroPol
Chrome VI M-43

SOMMAIRE DE LA FICHE

- Substances
- Principe de prélèvement et d'analyse
- Domaine d'application
- Réactifs
- Méthode de prélèvement
- Méthode d'analyse
- Bibliographie
- Historique

Fiche complète (PDF 380,87 Ko)

Cette méthode décrit le prélèvement en mode Actif sur cassette avec filtres imprégnés et l'analyse par chromatographie ionique détection UV de la (des) substance(s) : Chrome VI (composé du), en Cr.

DONNÉES DE VALIDATION : VALIDATION COMPLÈTE
- Données de validation pour "Chrome VI (composé du), en Cr" (PDF 892,06 Ko)

À TÉLÉCHARGER
- Méthode de prélèvement (PDF 58,66 Ko)
- Méthode d'analyse (PDF 336,24 Ko)

NOUVELLE RECHERCHE
- Retour aux résultats
- Nouvelle recherche

LIENS UTILES
- Grille de lecture Méthode 0

1. Substances

1.1. Informations générales

1.1.1. Propriétés physico-chimiques

NOM	CLASSIFICATION CMR
Chrome VI (composé du), en Cr	C1A C1B M1B M2 R2 CMR-INRS

1.1.2. Plus d'informations

NOM	SYNONYMES	FICHE TOXICOLOGIQUE
Chrome VI (composé du), en Cr	chrome hexavalent	FT Trioxyde de chrome FT Chromates et dichromates de sodium et de potassium FT Chromate de zinc

1.2. Familles de substances
- METALLOIDES
- METAUX

1.3. Principe et informations

Cette méthode permet de réaliser la spéciation du chrome.
Le prélèvement de la fraction inhalable de l'aérosol est effectué sur un filtre en fibre de quartz imprégné d'une solution de carbonate de sodium/sulfate de magnésium. Après extraction des composés solubles à pH 8, les chromates insolubles sont convertis en chromates de sodium solubles par l'action combinée du carbonate de sodium en milieu alcalin et des ultrasons à 40°C (protocole à 2 extractions). Les chromates totaux sont convertis en chromates de sodium solubles par l'action combinée du carbonate de sodium en milieu alcalin et des ultrasons à 60°C (protocole à 1 seule extraction). Les solutions d'extraction sont analysées par chromatographie ionique afin de séparer le chrome hexavalent du chrome trivalent et d'autres cations métalliques.
Les chromates solubles et insolubles peuvent être extraits successivement et analysés séparément mais cette méthode décrit également un protocole permettant d'extraire en une seule fois tous les composés de Cr^{VI}. **Le choix du protocole à utiliser doit être guidé par la meilleure gestion possible des possibilités de conversion Cr^{VI}-Cr^{III} (voir données de validation).**

Base de données MétroPol

MétroPol est le recueil des méthodes d'évaluation de l'exposition professionnelle validées par l'INRS, pour le prélèvement et l'analyse d'agents chimiques et biologiques déposés sur les surfaces ou présents dans l'air et dans certains matériaux.

Réunion des utilisateurs MétroPol 18 JUIN 2019 INRS

Un guide méthodologique complète la base de données avec l'ensemble des conseils et recommandations pour mener à bien une campagne d'évaluation de l'exposition professionnelle, de la stratégie de prélèvement à l'expression des résultats.

Avertissement : Les méthodes proposées sont validées selon les référentiels normatifs liés au développement de méthodes de prélèvement et d'analyses. Elles précisent les performances et les conditions de mise en œuvre telles que déterminées lors de la validation. Les utilisateurs sont tenus de s'assurer de la validité d'une méthode avant sa mise en œuvre et de la conformité des performances attendues avec leurs besoins en termes de sensibilité et de spécificité.

L'INRS organise la première réunion des utilisateurs de la base de données MétroPol le 18 juin 2019. L'objectif est de présenter toutes les fonctionnalités de l'outil et de recueillir les besoins et les attentes. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur ce lien.

L'INRS organise aussi une conférence scientifique sur les risques biologiques du 5 au 7 juin 2019.

Guide méthodologique MetroPol

Recherche dans la base MétroPol

Par substance | Par méthode de prélèvement | Par méthode d'analyse

Famille chimique
Choisir une famille

Substance
Chrome VI (composé du), en Cr

Numéro CAS
ex : 7440-47-3

Numéro de Méthode
ex : 268

Effacer la recherche | Rechercher

Guide méthodologique MétroPol

Le guide méthodologique MétroPol donne des informations sur les étapes nécessaires à la réussite d'une évaluation des expositions aux produits chimiques et agents biologiques en entreprise. Il est composé de cinq volets correspondant aux étapes de la préparation de l'intervention, aux prélèvements au poste de travail, aux analyses au laboratoire et à l'interprétation des résultats et aux protocoles de mise au point des méthodes MétroPol.

La base de données, MétroPol recueille des méthodes d'évaluation de l'exposition professionnelle validées par l'INRS, pour prélever et analyser les agents chimiques et biologiques déposés sur les surfaces ou présents dans l'air et dans certains matériaux. Ce guide méthodologique, découpé en 27 fiches, fournit des conseils et des recommandations pour mener à bien cette évaluation.

– Préparation de mesures d'exposition

- Stratégie de prélèvement (octobre 2015, version 1.0)
- Bonnes pratiques lors d'une intervention en entreprise (octobre 2015, version 1.0)
- Méthode de screening. Un outil de diagnostic métrologique (octobre 2015, version 1.0)
- Préparation du matériel en vue d'une intervention en entreprise (octobre 2018, version 4.0)

– Prélèvements de gaz, vapeurs ou aérosols

- Principe général et mise en oeuvre pratique du prélèvement (août 2018, version 3.0)
- Généralités sur les prélèvements d'aérosols (octobre 2015, version 1.0)
- Utilisation de la cassette fermée pour le prélèvement d'aérosols (octobre 2015, version 1.0)
- Utilisation du cyclone pour le prélèvement d'aérosols (janvier 2019, version 2.0)
- Utilisation du dispositif CIP 10 pour le prélèvement d'aérosols (octobre 2015, version 1.0)
- Utilisation du dispositif CAThIA pour le prélèvement d'aérosols (octobre 2015, version 1.0)
- Dispositifs de prélèvement actif pour le prélèvement de gaz ou vapeurs (octobre 2015, version 1.0)
- Dispositifs de prélèvement passif pour le prélèvement de gaz ou vapeurs (octobre 2015, version 1.0)

+ Analyse atmosphérique de gaz, vapeur ou particules

+ Expression et interprétation des résultats de mesures

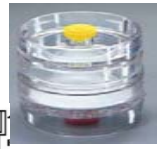
+ Protocoles de mise au point

MétroPol *- http://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html*

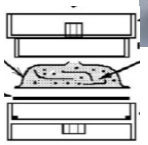
Prélèvements **individuel** / **à poste fixe -** Concentration en masse ($mg.m^{-3}$)

Fraction conventionnelle

Inhalable



Cassette fermée



Cassette + insert

Bouton
4 $L.min^{-1}$

IOM
2 $L.min^{-1}$

CIP 10-I
10 $L.min^{-1}$

CAThIA-I
10 $L.min^{-1}$

Thoracique

Cyclone GK 2.69
1,6 $L.min^{-1}$

Cyclone GK 4.162
3 $L.min^{-1}$

Thor. PPI
2 $L.min^{-1}$

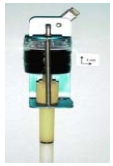
CIP 10-T
7 $L.min^{-1}$

CAThIA-T
7 $L.min^{-1}$

Alvéolaire

Cyclone GK 2.69
4,2 $L.min^{-1}$

Cyclone GK 4.162
9 $L.min^{-1}$



Cyclone Dorr-Oliver
1,7 $L.min^{-1}$

Resp. PPI
2, 4, 8 $L.min^{-1}$

CIP 10-R
10 $L.min^{-1}$

CAThIA-R
10 $L.min^{-1}$

Distribution granulométrique

Impacteurs en cascade

Marple
2 $L.min^{-1}$

Sioutas
9 $L.min^{-1}$

Mini-MOUDI
2 $L.min^{-1}$

DLPI+/ELPI+

MOUDI

ANDERSEN

Source : INRS – Modifié d'après Xavier SIMON

Les impacteurs en cascade

- Distribution granulométrique en masse
  - Masse de particules (gravimétrie)
  - Concentrations élémentaires (analyse)
- Résolution spectrale variable

Impacteur basse pression
DLPI⁺ - 14 étages
⇗ Résolution
⇘ Mise en œuvre (ambiance)

Stage	D50% (µm)
2	0.0151
3	0.0308
4	0.0548
5	0.0956
6	0.156
7	0.257
8	0.382
9	0.603
10	0.948
11	1.63
12	2.47
13	3.66
14	5.37
15	9.89
inlet	

PUF — Particules fines

Impacteur individuel SIOUTAS
4 étages + 1 filtre
⇘ Résolution
⇗ Mise en œuvre (individuel)

Etage	Classe
A	> 2.5 µm
B	1 – 2.5 µm
C	0.5 – 1 µm
D	0.25 – 0.5 µm
FT	< 0.25µm

Particules fines — PUF

Exemple 1

Exposition à la silice cristalline

Exposition Silice cristalline

- Chantier de pose de dalles de granit 60x30 cm (épaisseur 2 à 3 cm)
  - **Intervention du laboratoire de Toxicologie Industrielle (CRAMIF) – Analyse LTI/INRS**
  - Opérations de découpe des dalles : scie à eau et scie portable (à sec)
  - Prélèvement sur opérateur et en champ proche (dans panache)

https://fr.123rf.com

Source: ST BTP35

Photos pour illustration

Métrologie / Instrumentation

- Chantier de pose de dalles de granit 60x30 cm (épaisseur 2 à 3 cm)

Métrologie différée

Poussières + silice cristalline alvéolaire
Concentration et distribution granulométrique
Cyclone / Sioutas (SKC)
+ analyse gravimétrique et DRX

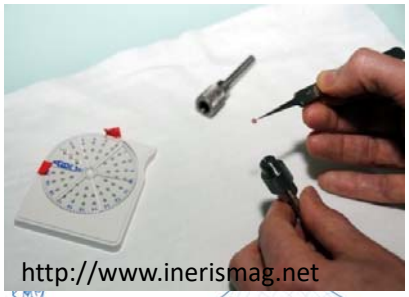
- ✓ Comparaison aux VLEP
  - 5 mg.m^{-3} pour les poussières alvéolaires
  - 0,1 mg.m^{-3} pour le quartz
- ✓ Analyse en silice sur Sioutas semi-quantitative

Cyclone
Dorr-Oliver
1,7 L/min

SIOUTAS
4 étages + 1FT
(<0.25 - >2.5 µm)
9 L/min

Morphologie
Taille des particules
MPS (Ecomesure)
+ observation MET

- ✓ Prélèvement sur grille microscopie pour observation directe de l'aérosol
- ✓ Efficacité de collecte entre 20 et 40% (10 - 150 nm)



MPS (MET)
1 L/min

Métrologie en temps réel

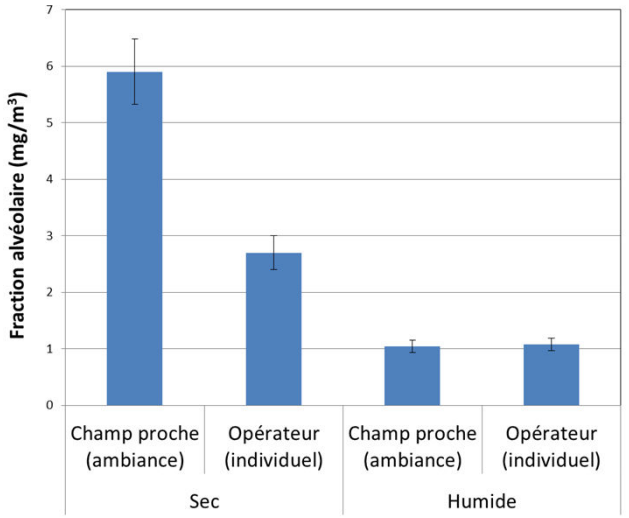
Nb particules / diamètre moyen
DiSCmini (Testo®)

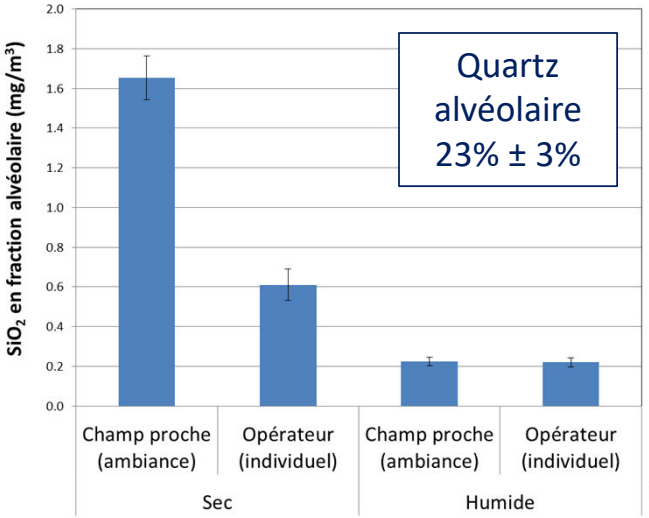
- ✓ Le DiSCmini compte les charges électriques des particules :
  - **Diamètre moyen 20 - 300 nm**
  - Concentration 10^2 - 10^6 particule/cm^3
- ✓ Pas spécifique des particules de silice. Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs

Concentration massique

- **Découpe à sec**
  - Concentrations en poussières alvéolaires et en silice cristalline (RCS) **champ proche > opérateur**
  - Niveaux de **concentration élevés** en fraction alvéolaire
- **Découpe à l'humide**
  - Concentrations en poussières alvéolaires et en silice cristalline (RCS) champ proche ≈ opérateur
  - Niveaux de concentration plus faibles que lors de la découpe à sec mais toujours élevés

		Champ proche	Opérateur
Sec	C_M alv. (mg/m³)	5.90	2.70
	RCS (mg/m³)	1.65	0.61
Humide	C_M alv. (mg/m³)	1.04	1.08
	RCS (mg/m³)	0.22	0.22



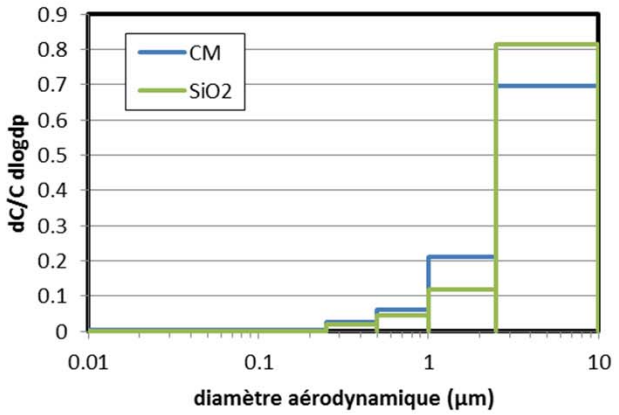


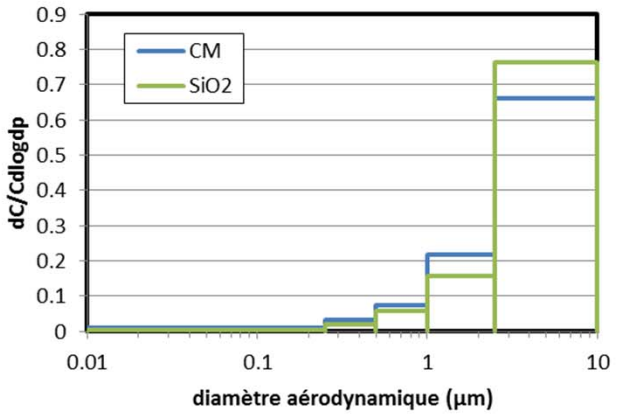
Distribution granulométrique en masse

- **Fraction > 2,5 µm majoritaire**: > 75% à sec et > 60% à l'humide

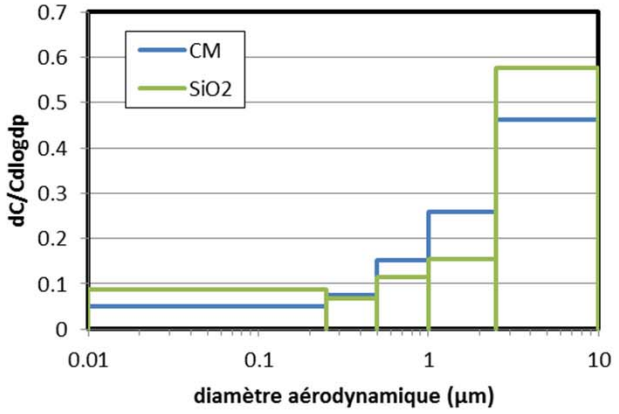
Champ proche | **Opérateur**

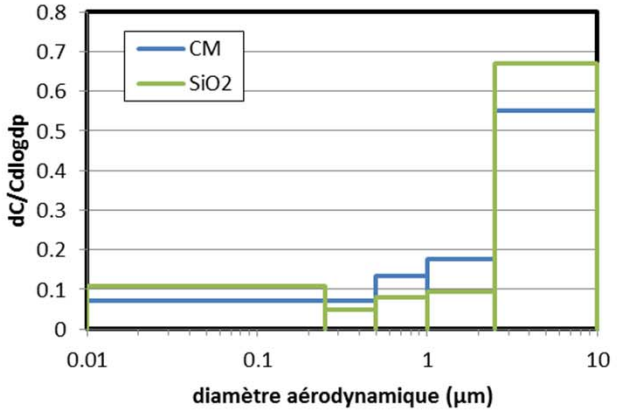
Sec

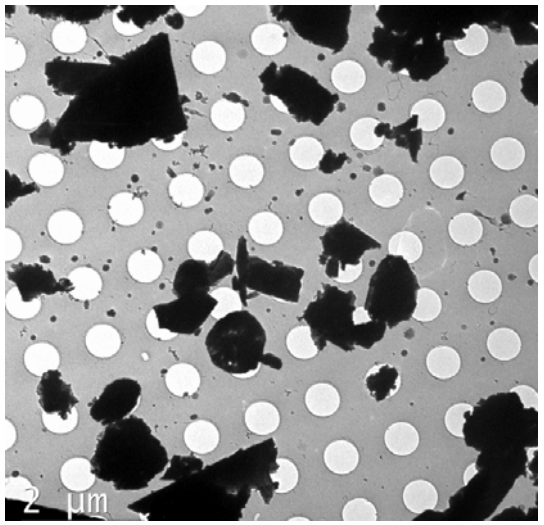




Humide





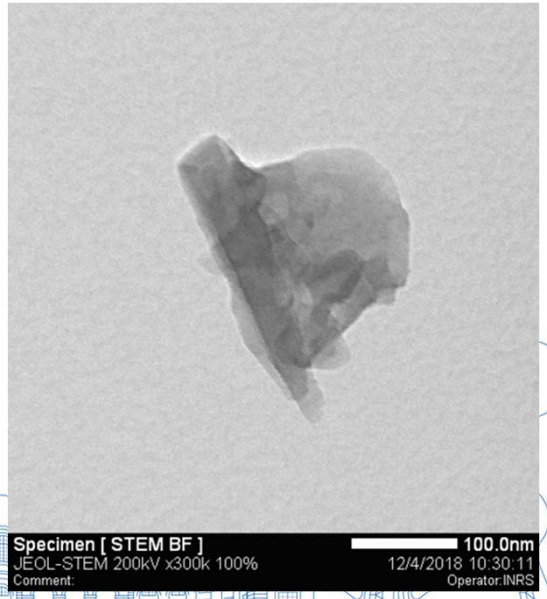


Crédit photo: INRS©

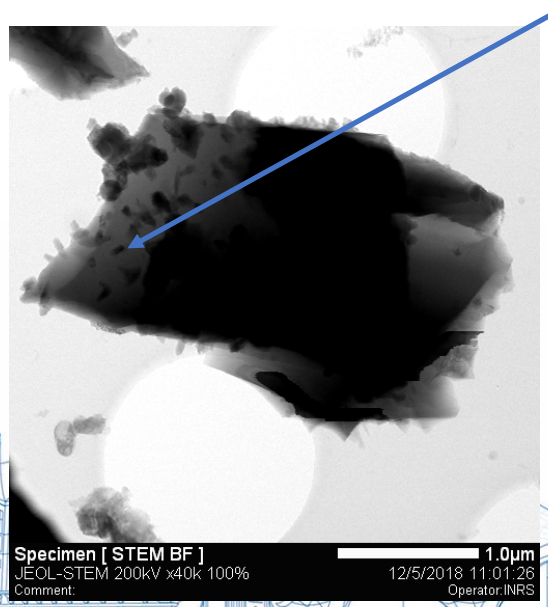
Morphologie/taille des particules

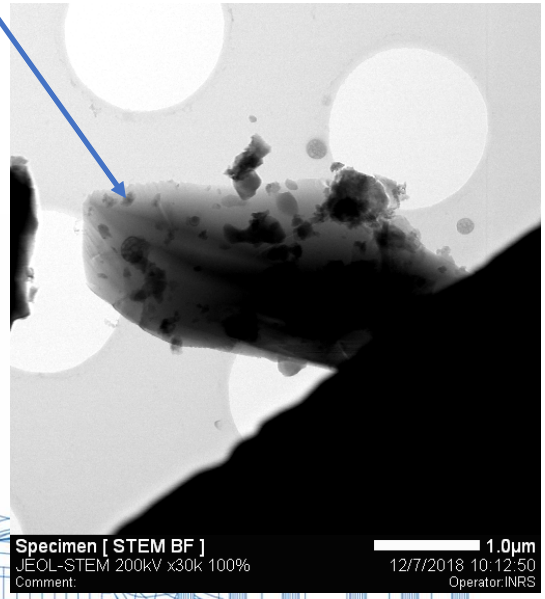
- Morphologie des particules de Silice (Champ proche – découpe à l'humide)
  - Sélection de particules constituées uniquement de silicium (analyse EDS), cristallines (diffraction électronique)
  - Présence de **particules ultrafines de silice cristalline**

individualisées



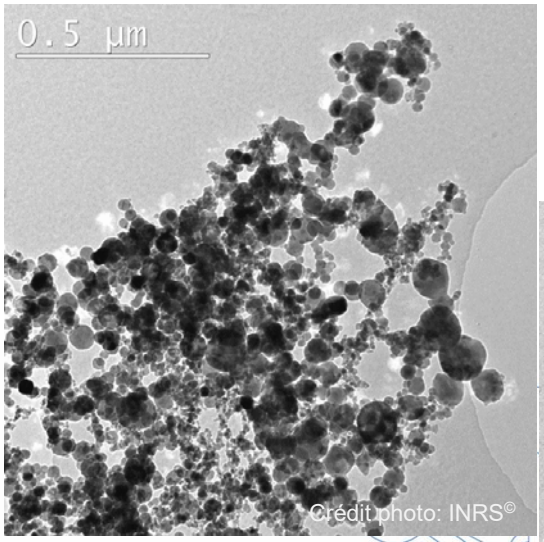
agglomérées sur particules micrométriques (silice?)

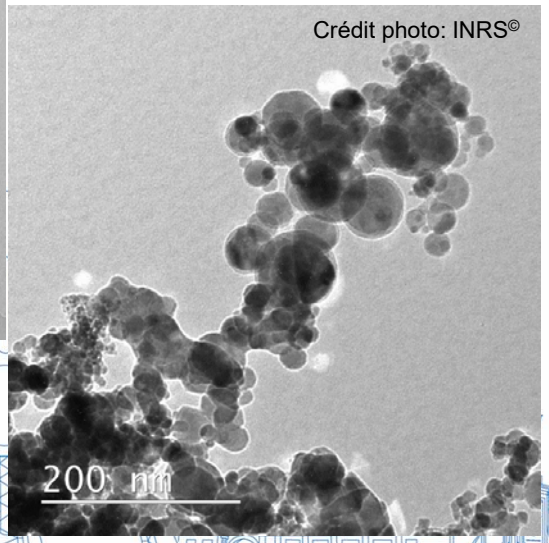


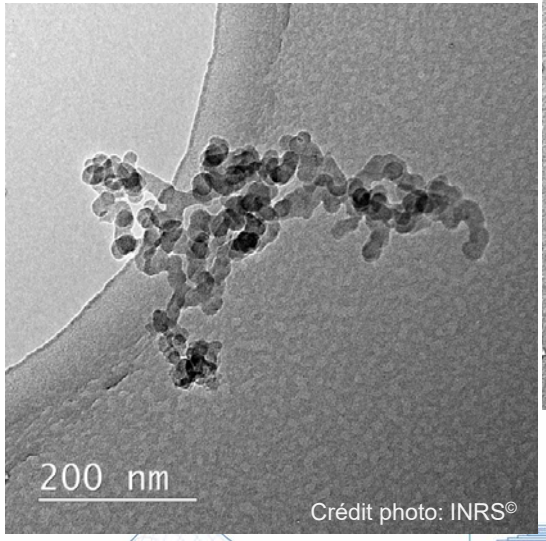


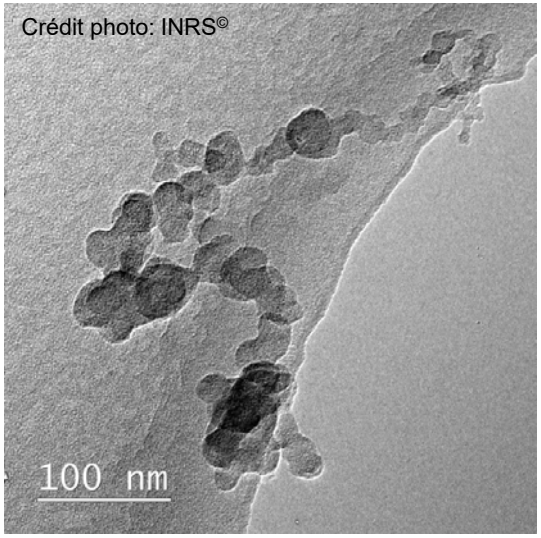
Morphologie/taille des particules

- Autres particules nanostructurées (Champ proche – découpe à l'humide)
  - Particules métalliques de composition proche de celle de l'inox (Fe, Cr, Ni, Mn)
  - Particules de Carbone de morphologie proche de celle des suies





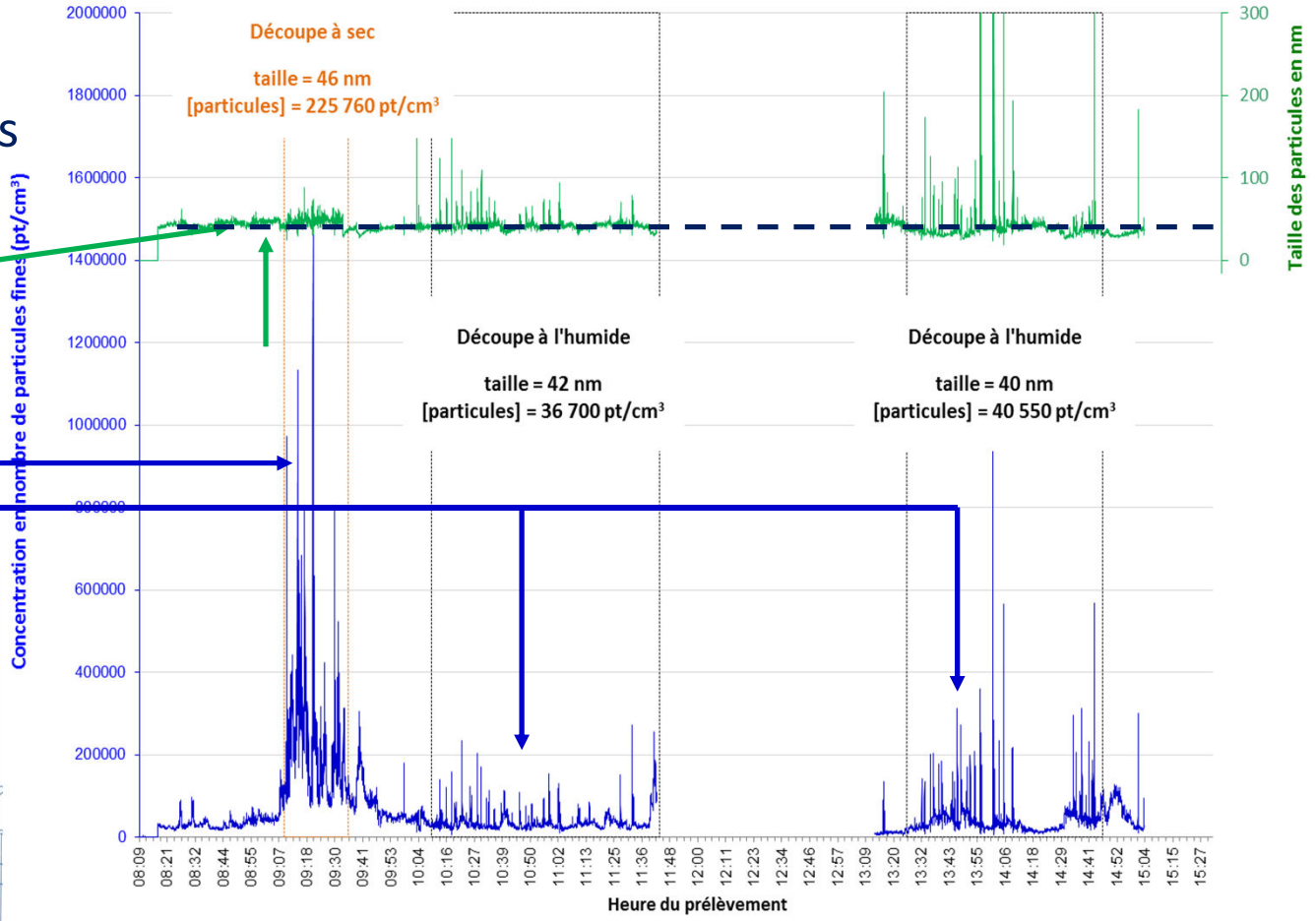




Concentration en nombre – Diamètre moyen

Analyse en temps réel: Particules fines (< 300 nm) et ultrafines

- Non spécifique: contribution multiple
- Diamètre moyen ≈ 40-46 nm (sec et humide)
- Concentration en nombre:
  2.10^5 particules/cm³ (sec)
  $0,4.10^5$ particules/cm³ (humide)



Exposition importante (PUF, silice cristalline) des opérateurs lors de la découpe de granit

Réduction des expositions lors de la découpe à l'humide

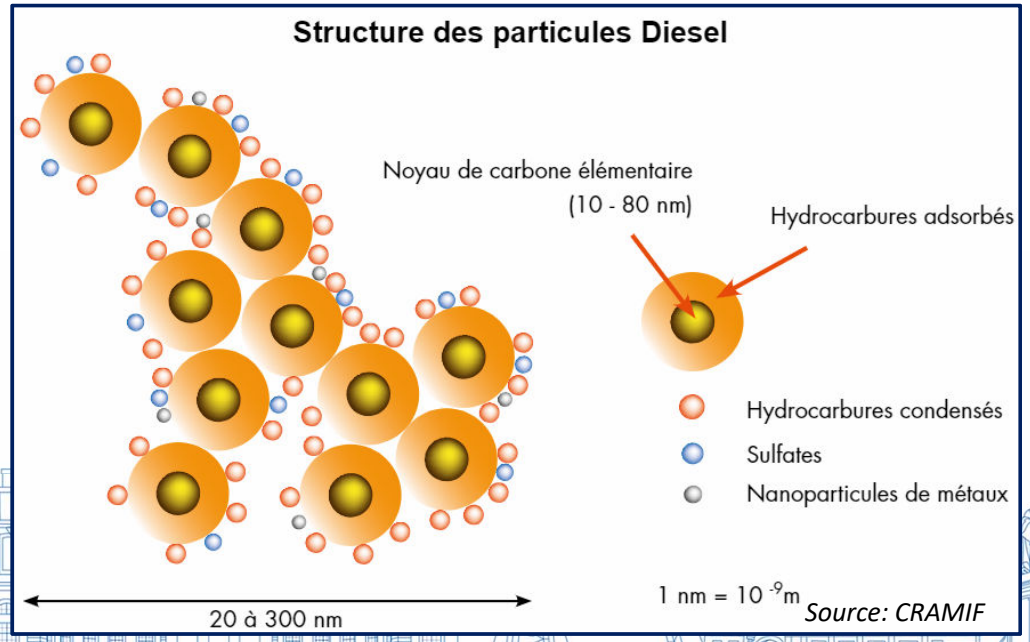
Source : Données CRAMIF - DiSCmini

Exemple 2

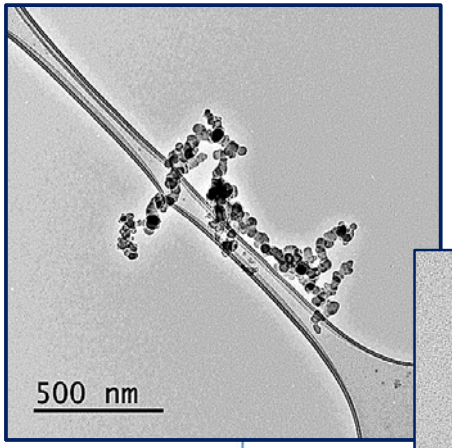
Exposition aux fumées diesel

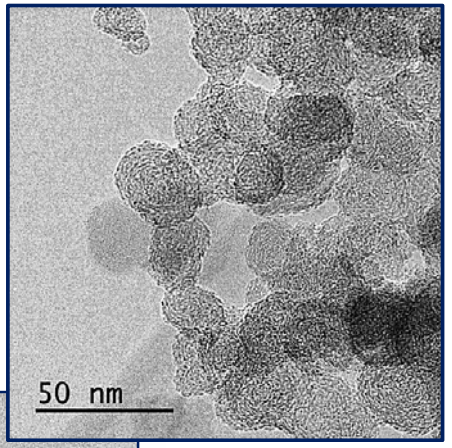
Fumées Diesel: VLEP en Carbone élémentaire

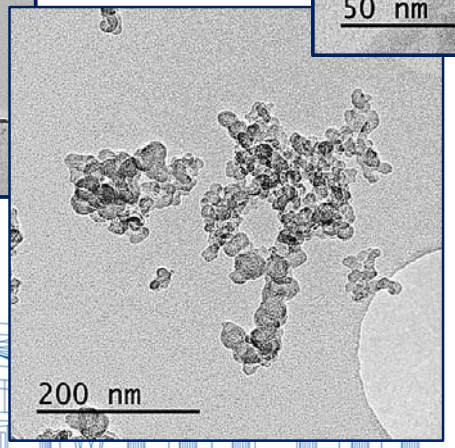
- Carbone élémentaire, traceur de la particule diesel
- Directive UE 2019/130 du 16 janvier 2019 ➔ transposition avant le 16 janvier 2021
  - VLEP-8h : **50 µg.m^{-3}** mesurée sous forme de C élémentaire
  - Application le 21 février 2023 (2026 pour extraction souterraine et tunnels)



Source: CRAMIF



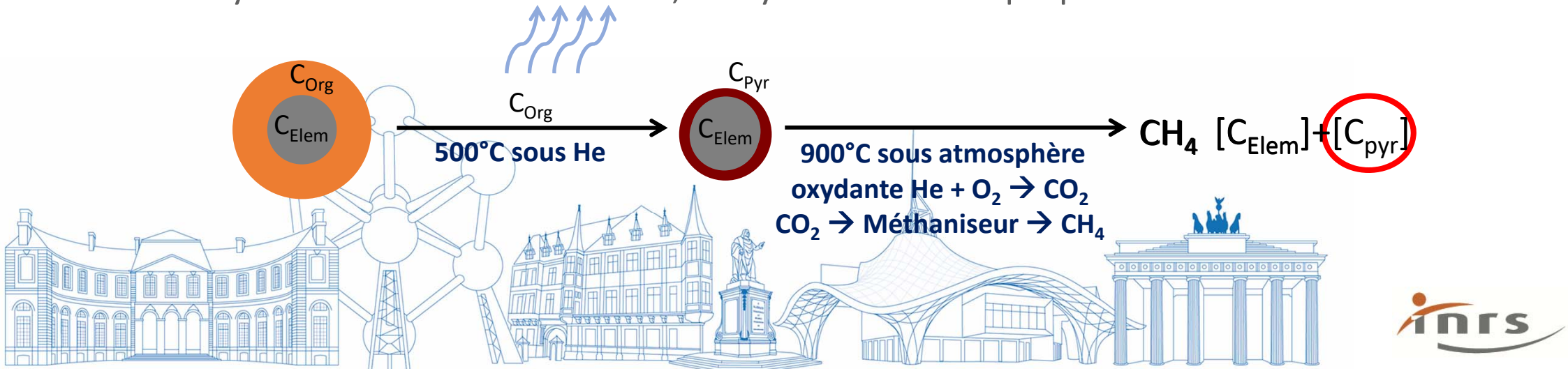




Dosage du carbone élémentaire – analyse indirecte

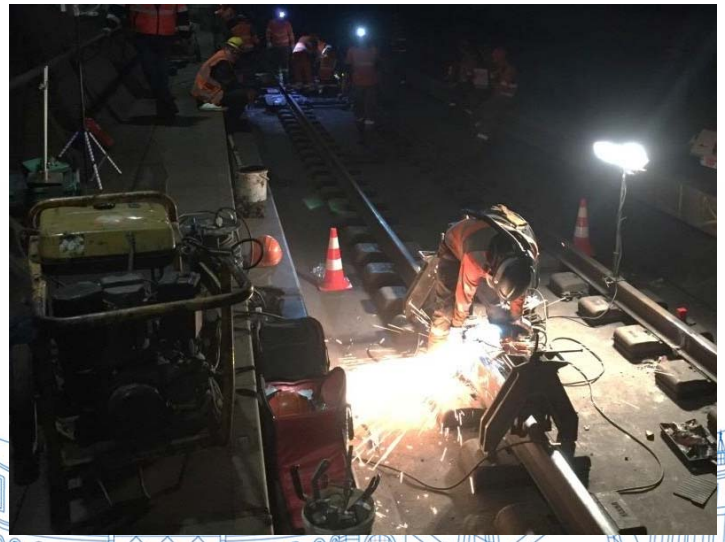
- Prélèvement de la fraction alvéolaire avec un cyclone.
  Particules collectées sur un filtre en fibres de quartz décarboné (48h à 500°C)
  - Mesure de l'exposition moyenne d'un salarié sur une période de 8h
  - Prélèvement aisé, matériel commun en métrologie
  - Métrologie dédiée au contrôle réglementaire

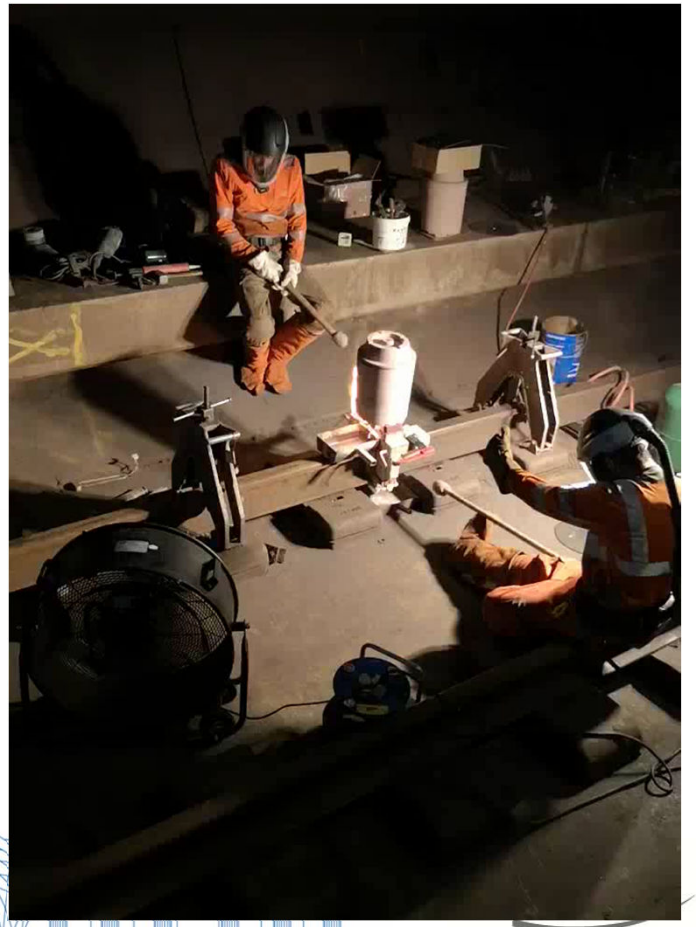
- Analyse du carbone élémentaire, analyseur thermo-optique



Exposition Fumées Diesel - Exemple

- Chantier de maintenance ferroviaire en milieu confiné: remplacement de rails avec sciage, soudage par aluminothermie, meulage et ponçage
  - Sources de particules diesel : Groupes électrogènes et motrices
  - Autres sources de particules : Soudage, meulage, ponçage des rails, environnement des voies et destruction des moules pour les soudures





Métrologie / Instrumentation

- Chantier de maintenance ferroviaire en milieu confiné: remplacement de rails avec sciage, soudage par aluminothermie, meulage et ponçage

Métrologie différée

Carbone élémentaire

Cyclone + analyse thermo-optique (SUNSET)

Cyclone Dorr-Oliver 1,7 L/min

Métrologie en temps réel

Carbone suie

µ-aéthalomètre AE-51 (AethLabs®)

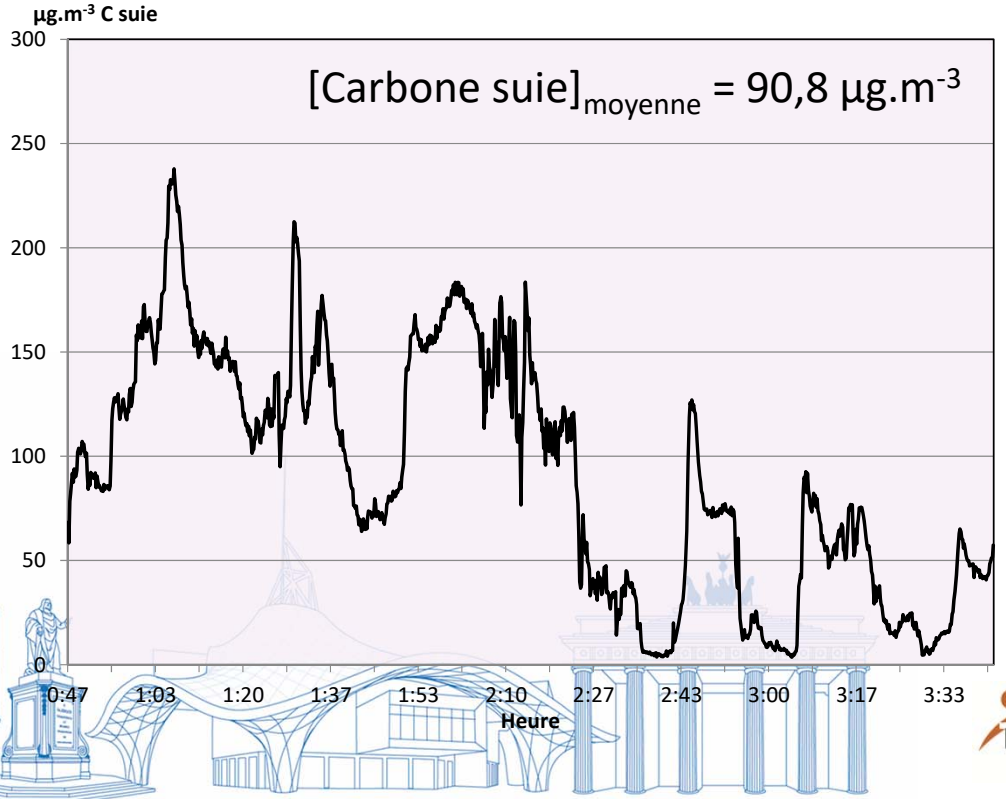
- ✓ Analyseur de poche du **carbone-suie** ou **« black carbon »** : carbone élémentaire + pyrolytique + composés organiques non volatils.
- ✓ Détermination de la masse de **carbone-suie** par mesure de l'extinction d'un rayon infra-rouge (880 nm) au travers d'un filtre téflon.

Concentration en carbone élémentaire

Prélèvement cyclone puis analyse SUNSET

$[\text{Carbone élémentaire}]_{\text{Alvéolaire}} = 79{,}6 \pm 7{,}7\ \mu g.m^{-3}$ **(> VLEP-8h)**

µ-Aethalomètre AE 51



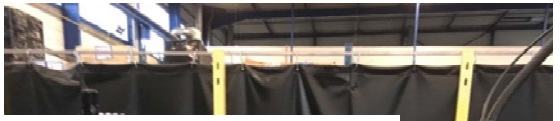
du 22 au 24 MAI 2019
METZ
Centre des Congrès Robert Schuman

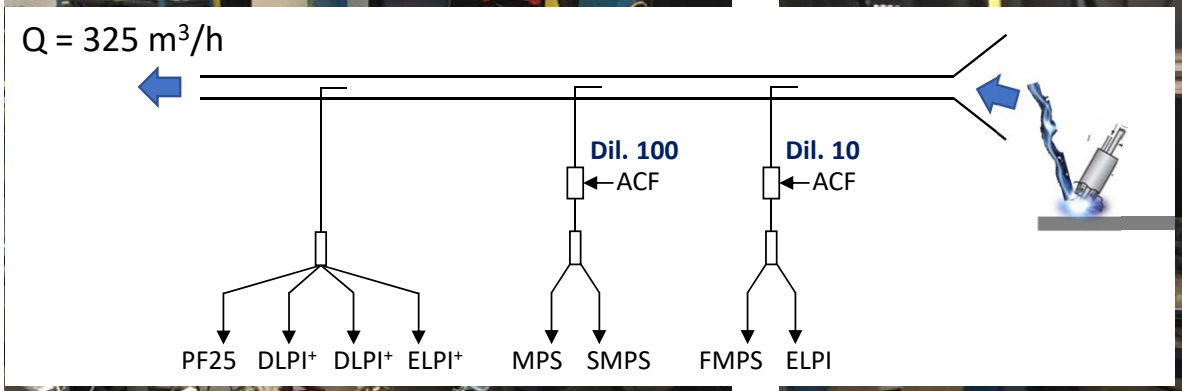
Exemple 3

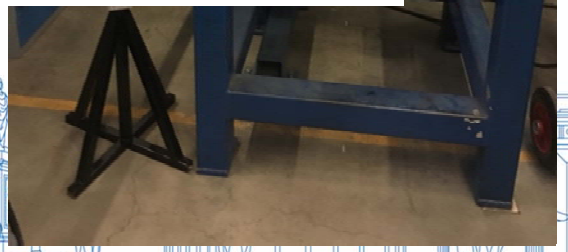
Caractérisation des fumées de soudage à l'émission

Caractérisation fumées de soudage - Exemple

- Caractérisation de l'aérosol produit par un procédé de soudage MIG
  - Caractérisation à l'émission: distribution en taille (nombre, masse, élément dont Cr^{VI})
  - Soudage manuel inox avec fil inox (spray arc mode synergique)







Caractérisation fumées de soudage - Exemple

- Caractérisation de l'aérosol produit par un procédé de soudage MIG

Métrologie différée

Poussières + Métaux + Cr^{VI}
Concentration et distribution granulométrique
PF/DLPI⁺ + gravi., ICP et CI

- ✓ Distribution en taille des particules (totale et élémentaire) de 15 nm à 10 µm
- ✓ Concentration en Cr^{VI}

PF 25mm
(Cr^{VI})
2 L/min

DLPI⁺
14 étages (0.015 – 9.89 µm)
10 L/min

Métrologie en temps réel

Concentration en nombre et distribution granulométrique

ELPI (Dekati®)

- ✓ L'ELPI est un impacteur en cascade (**diamètre aérodynamique**) avec chargement préalable des particules → mesure de courant
  13 étages: **30 nm – 10 µm**,
  Concentration **10^2 – ≈10^7 particule/cm³**
- ✓ Pas spécifique des particules métalliques. Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs

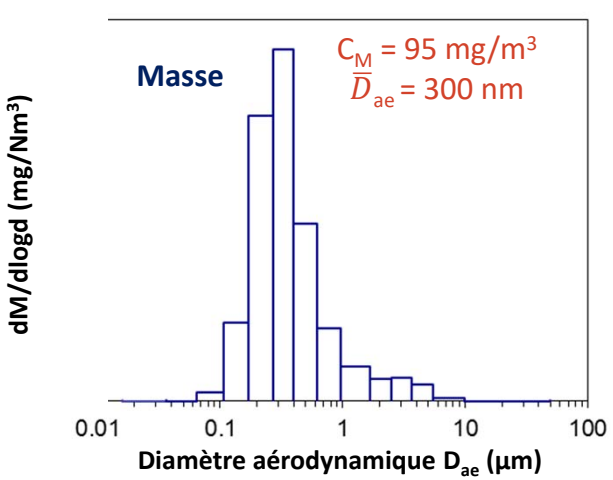
ELPI
13 étages
(0.03 – 10 µm)
10 L/min

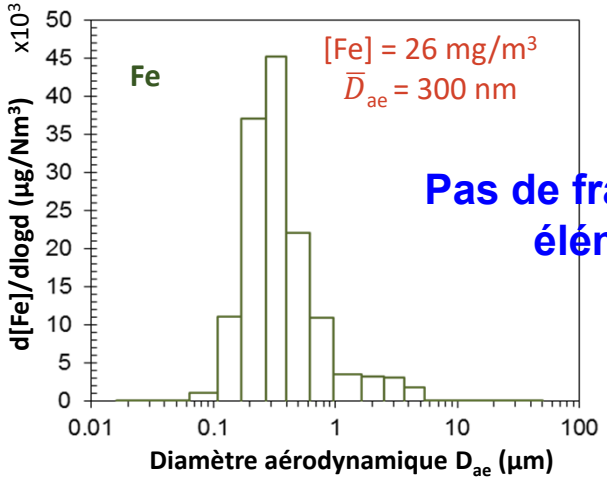
FMPS (TSI®)

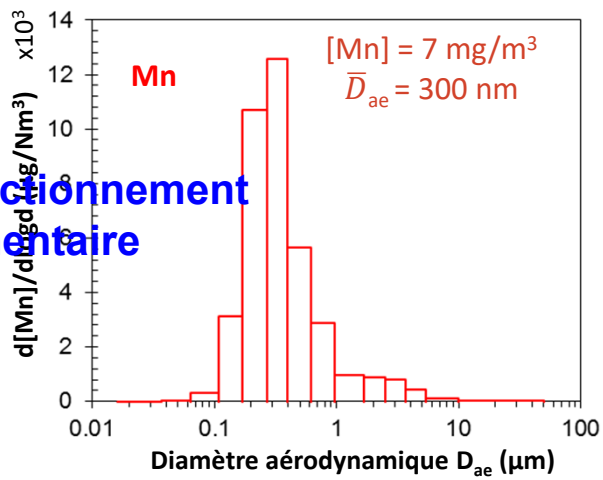
- ✓ Le FMPS sépare les particules préalablement chargées selon leur mobilité électrique
  → mesure de courant
  32 canaux: **6 nm – 560 nm**,
  Concentration **10^2 - 10^7 particule/cm³** (100 nm)
- ✓ Pas spécifique des particules métalliques. Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs

FMPS
32 canaux
(6 – 560 nm)
10 L/min

Distribution granulométrique en masse

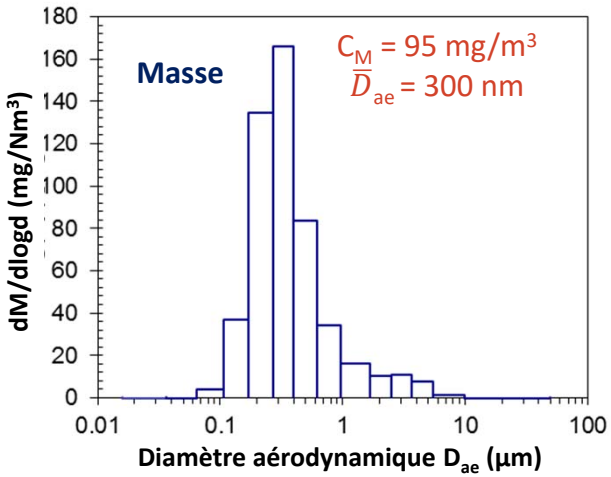


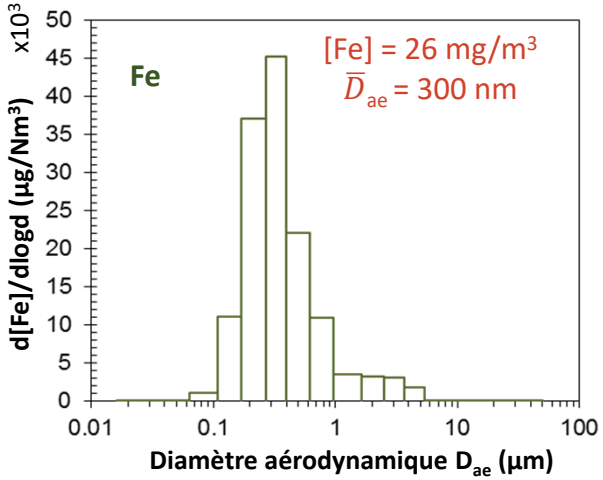


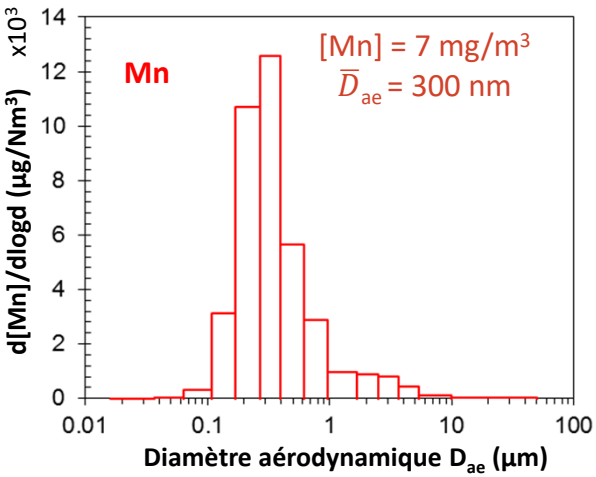


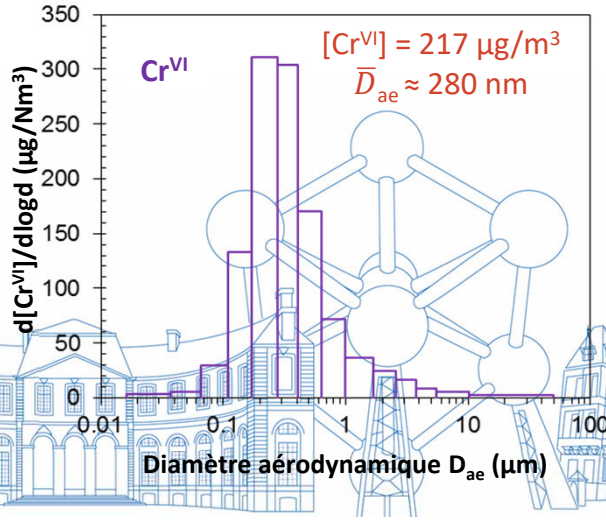
Pas de fractionnement élémentaire

Distribution granulométrique en masse

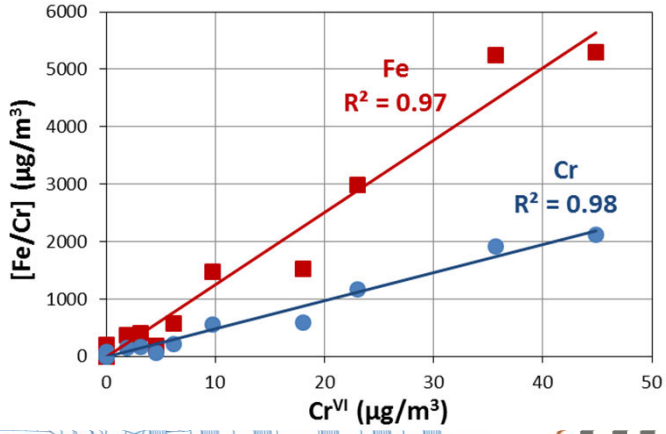




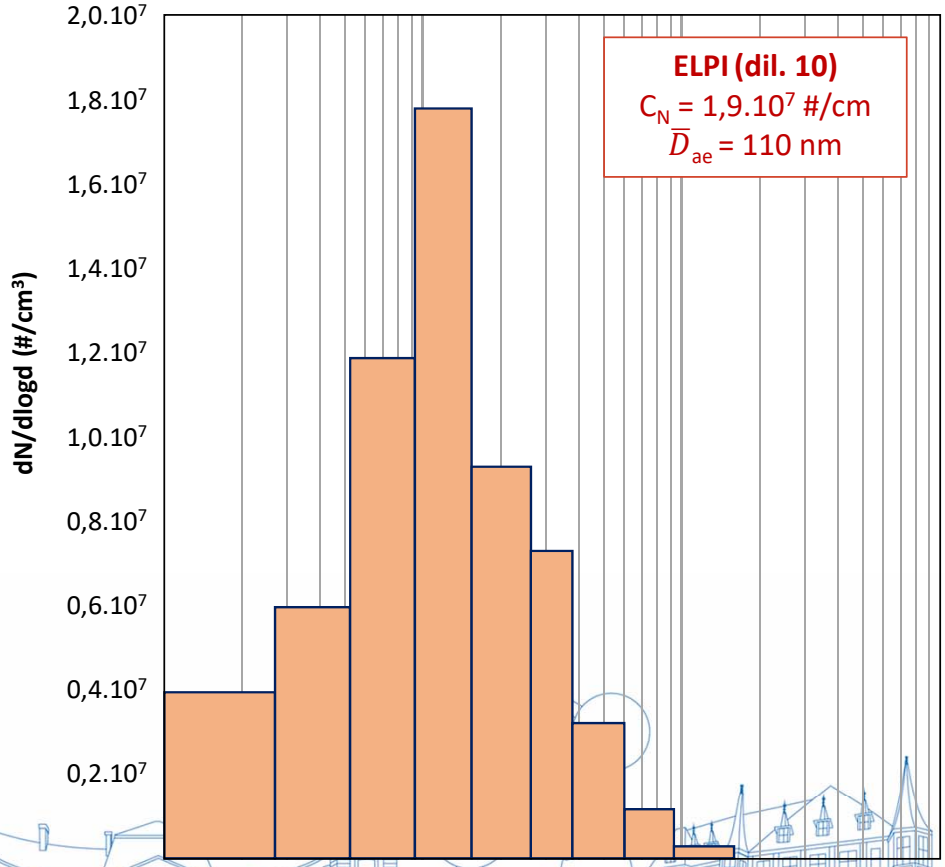


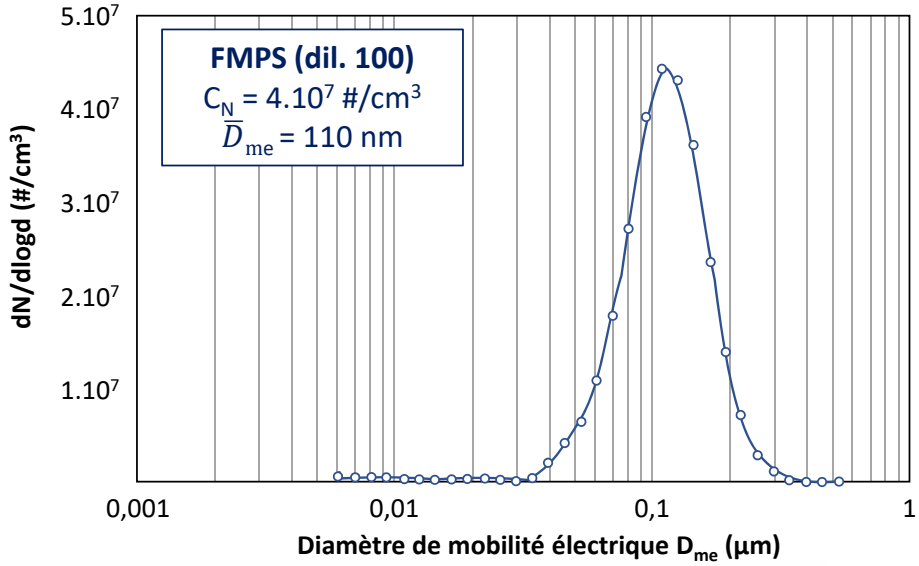


- [Cr^{VI}]$_{total}$ (PF) = 185 ± 20 µg/m³
- $\varnothing_{ae}$ légèrement décalé vers les particules les plus fines pour le Cr^{VI}
  → **Non significatif**



Distribution granulométrique en nombre





- $\overline{D}_{ae}$ en nombre < $\overline{D}_{ae}$ en masse
- $\overline{D}_{ae} \approx \overline{D}_{me}$ en nombre
- C_N équivalent entre ELPI et FMPS (dilution nécessaire)
  - → ELPI (dil. 10): C_N = 1,9.10⁷ #/cm³
  - → FMPS (dil. 100): C_N = 4,0.10⁷ #/cm³

Conclusions

- Pas de méthodes universelles ou d'outils versatiles
- Informations complémentaires
- Les méthodes mises en œuvre doivent s'adapter aux objectifs du mesurage, à l'instar de la stratégie de prélèvement

Merci de votre attention