

35^{èmes} JOURNÉES NATIONALES DE SANTÉ AU TRAVAIL DANS LE BTP

un
nouveau
souffle
dans le
BTP

**LES
PARTICULES
FINES**

Métrologie des Particules Fines et Ultrafines en Environnement de Travail

du **22** au **24**
MAI 2019

METZ

Centre des Congrès
Robert Schuman

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**

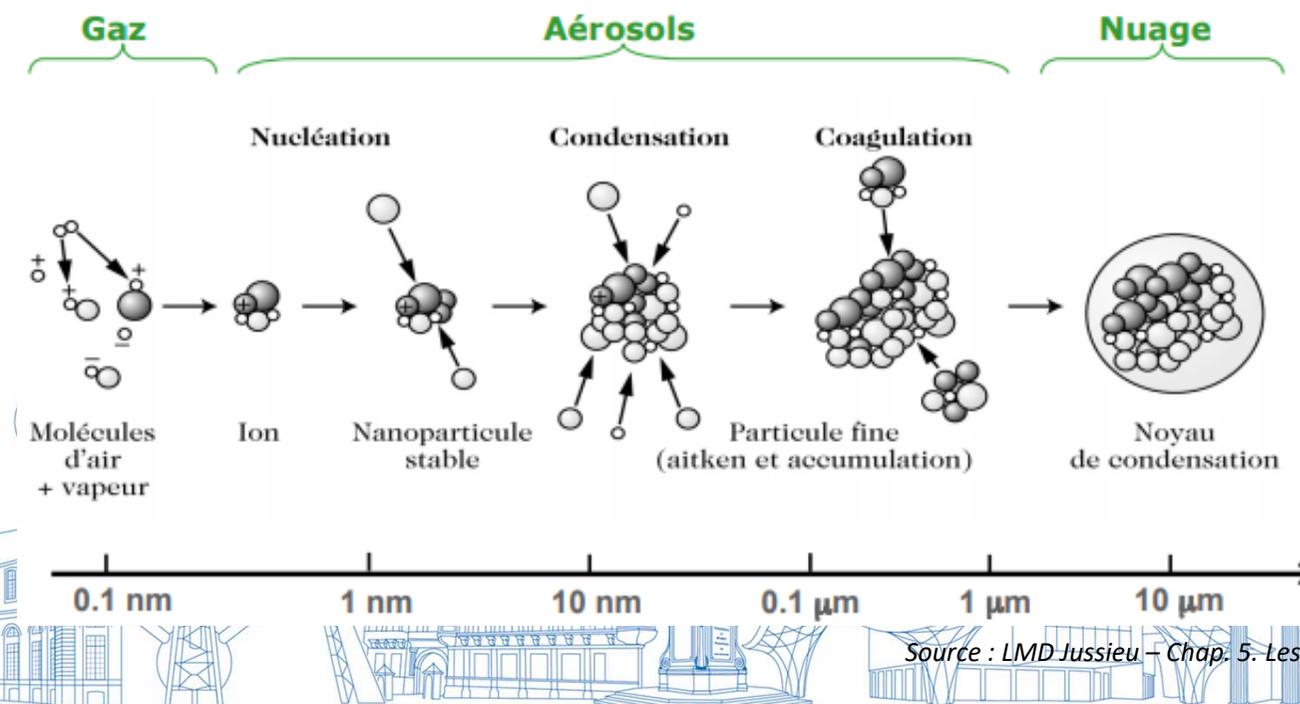
Plan de la présentation

- 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



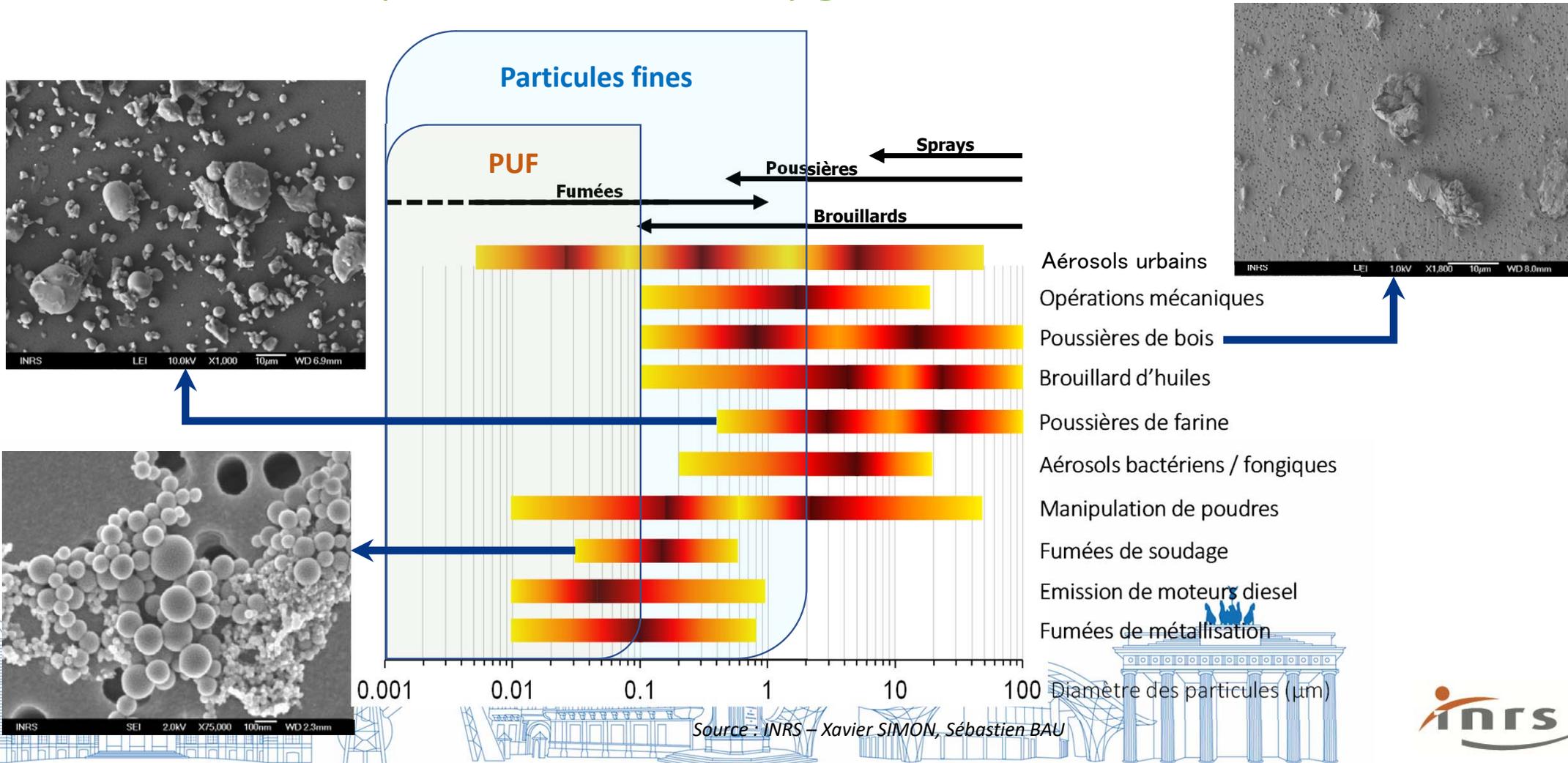
Particules fines et ultrafines

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



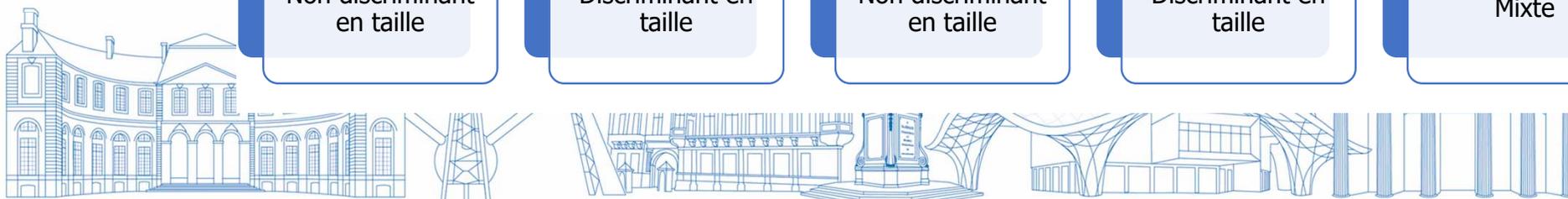
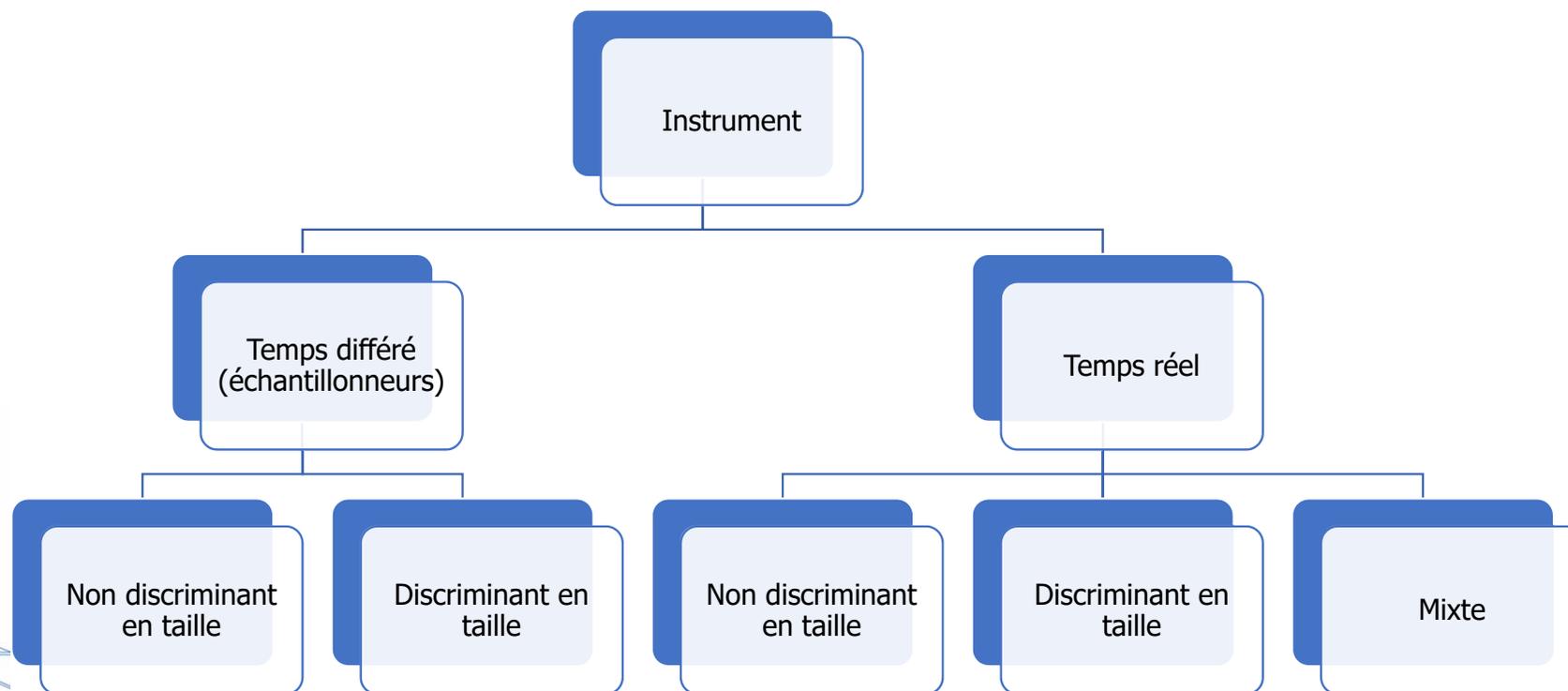
Source : LMD Jussieu – Chap. 5: Les aérosols atmosphériques

Taille des particules en hygiène industrielle



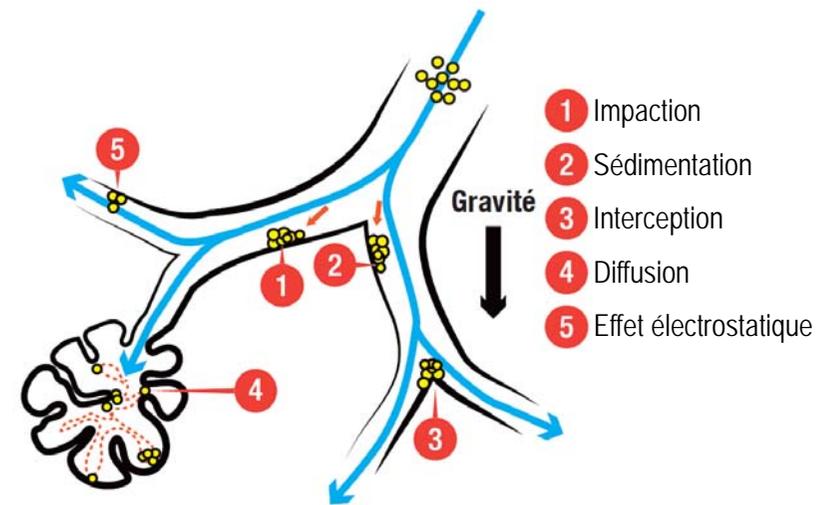
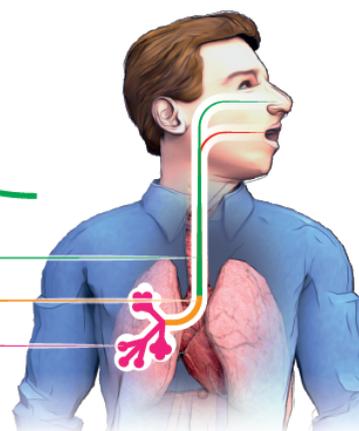
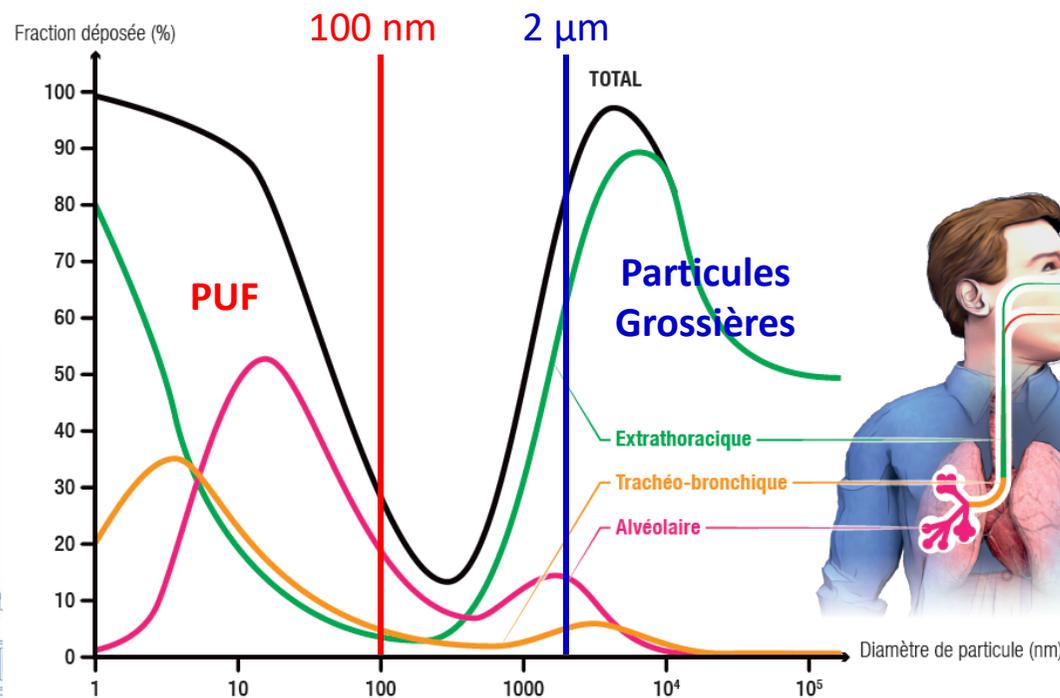
Outils de métrologie

- 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)

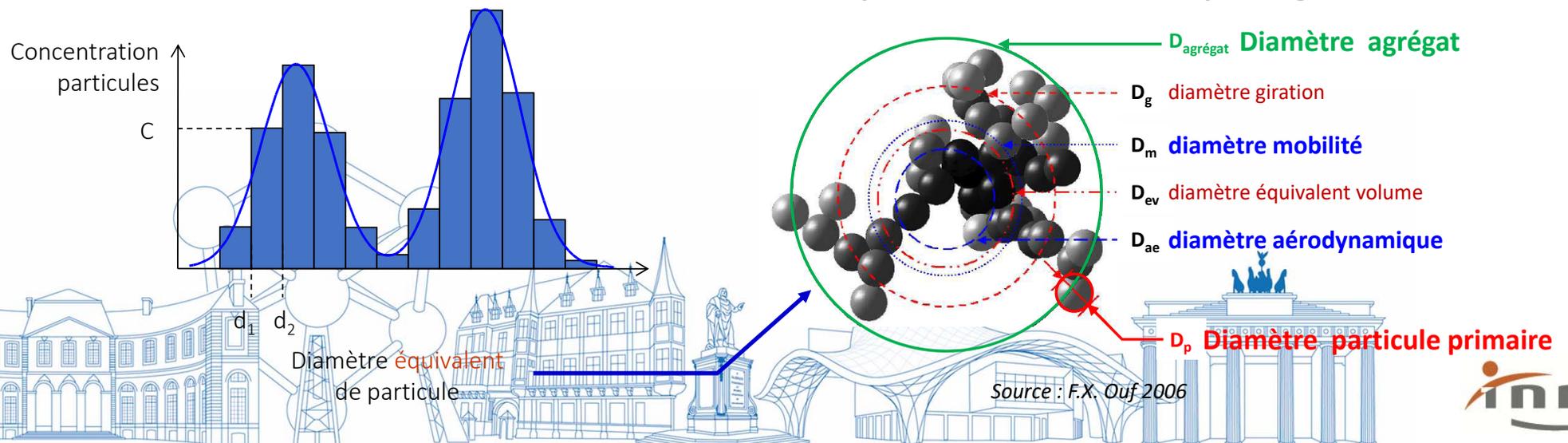


Source: CIPR (1994). Publication n°66

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



Distribution granulométrique d'un aérosol

- Mesure d'une concentration de particules → différentes métriques

- **En nombre:** $\#.m^{-3}$
- **En surface:** $\mu m^2.m^{-3}$
- **En masse:** $mg.m^{-3}$

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

Concentration particules

Distribution en **NOMBRE**

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

Distribution en **MASSE**

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

0,001

0,01

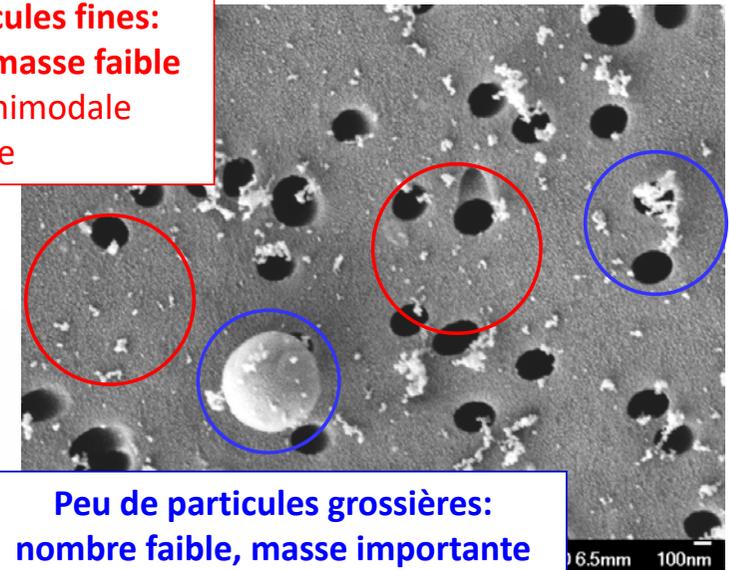
0,1

1

10

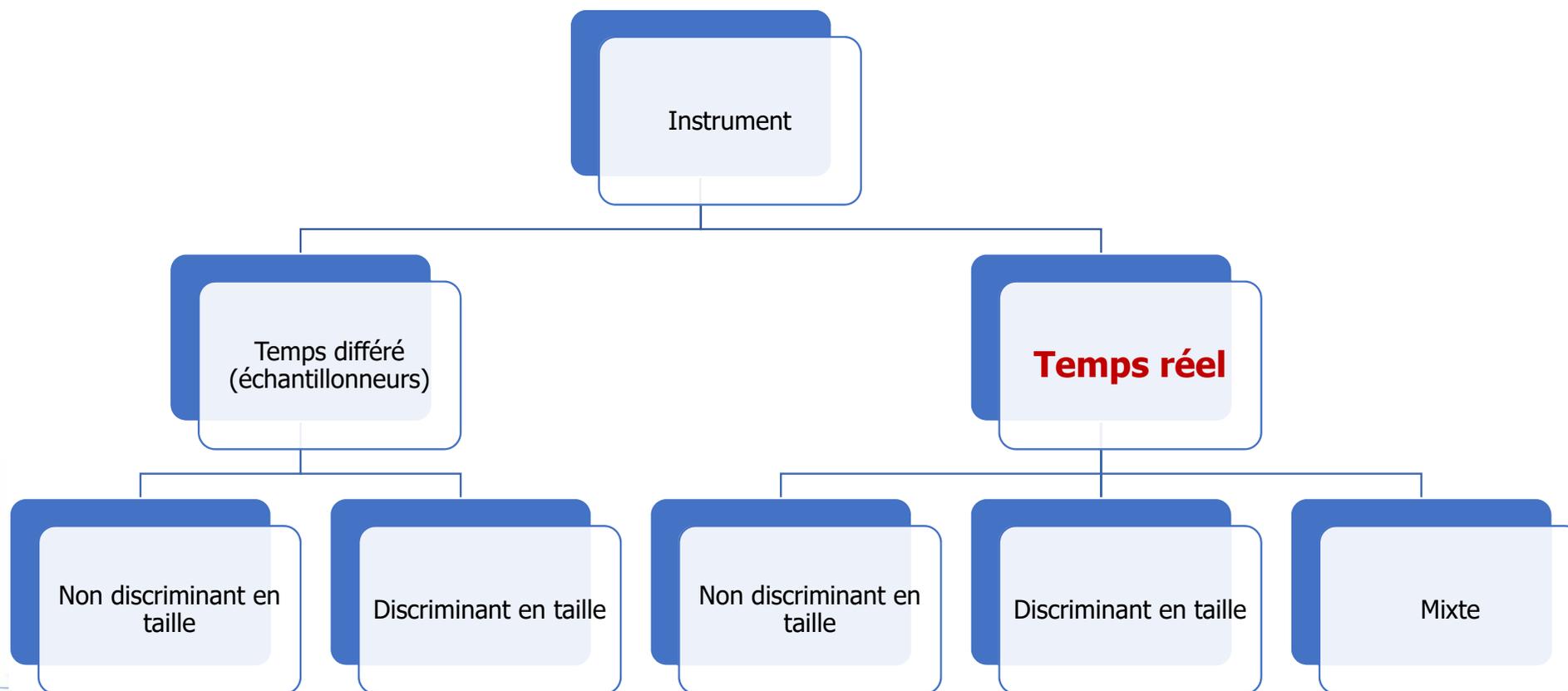
100

Diamètre équivalent de particule (μm)



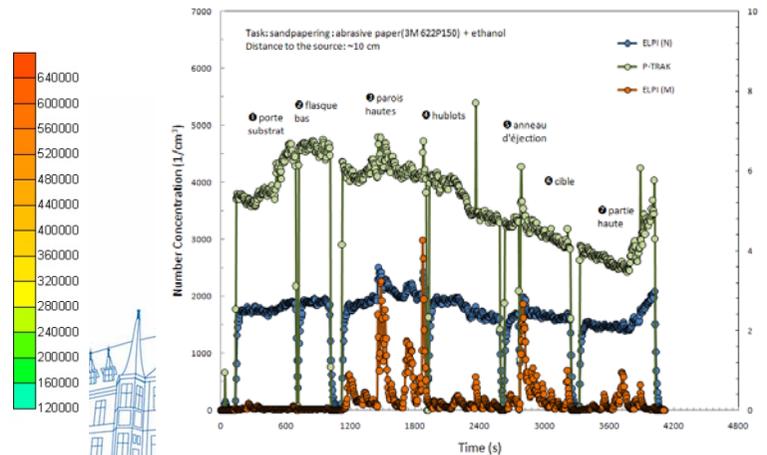
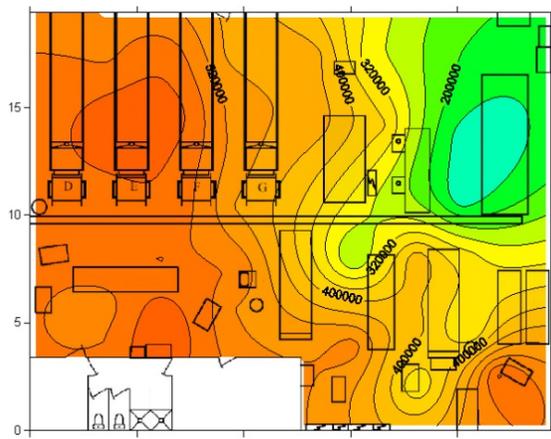
Instrument

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**

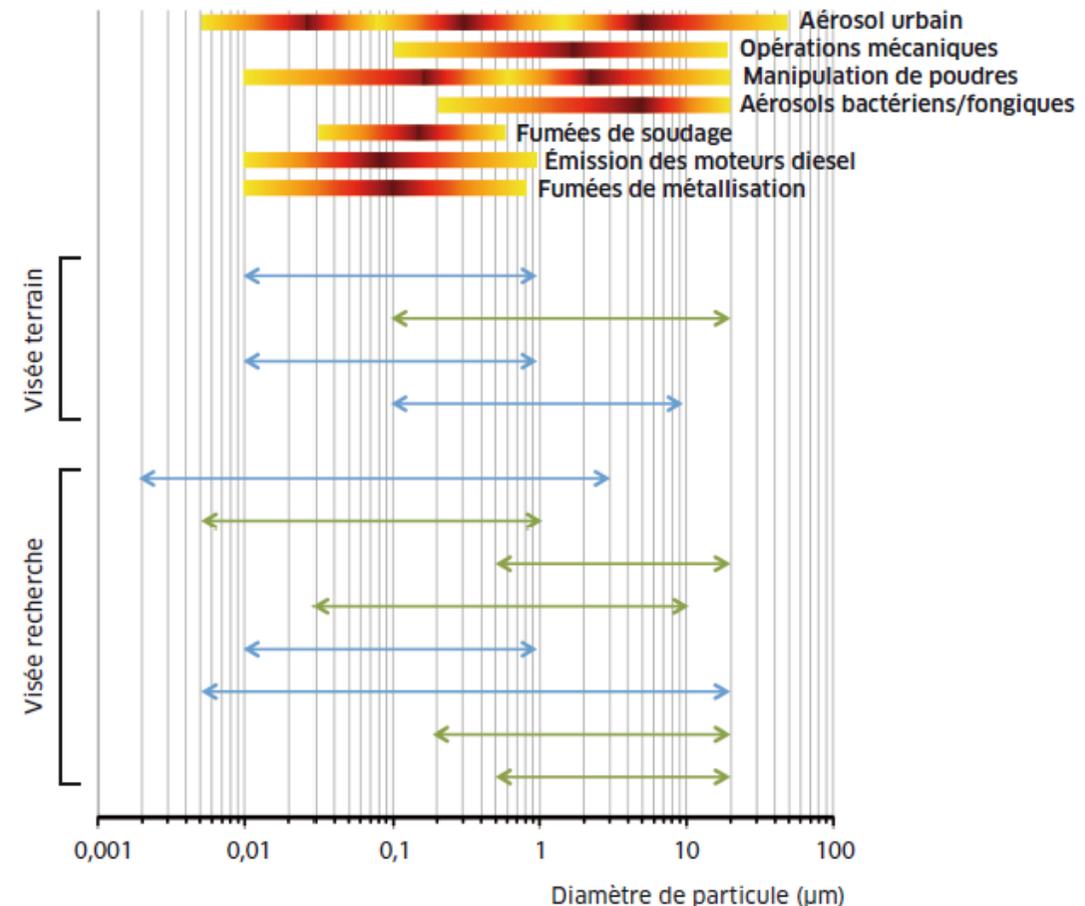
- Particules les plus fines grossies artificiellement pour comptage optique
- CNC, OPC,...

- **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

Instrument 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**

Poids /
Encombrement

>20 kg

~2 kg

~500 g

~10 g

capteurs / sensors

10€

~500€

~5000€

<20000€

>20000€

~80000€

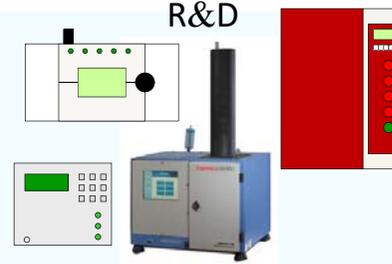
Prix d'achat

instruments portables
mesures de terrain



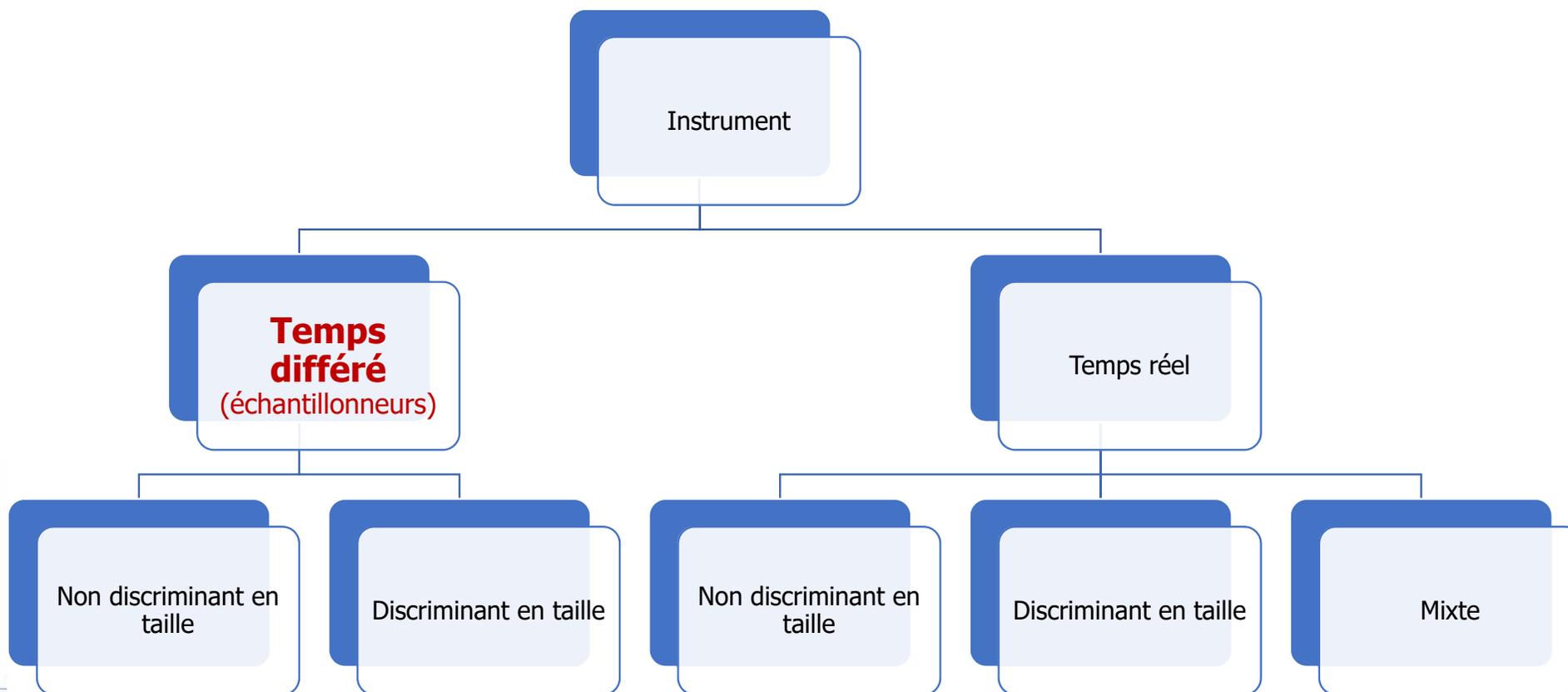
instruments transportables

R&D



Source : INRS – Xavier SIMON

Méthode de Prélèvement et d'analyse en différé



Intérêt des méthodes à mesure différée

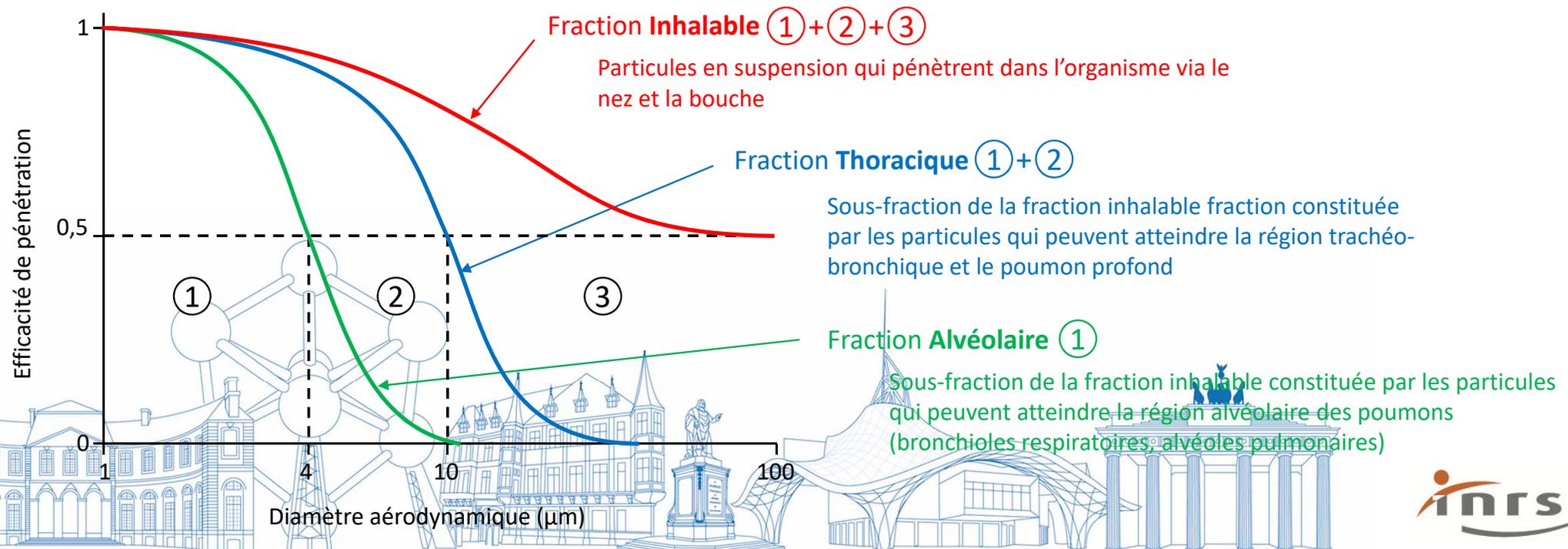
- Evaluation quantitative des expositions
 - Quantification par élément/agent chimique
 - Comparaison à des valeurs limites existantes (dose)
- Analyse d'autres paramètres pour comprendre la toxicité des particules (réactivité, morphologie, solubilité,...) en fonction de la taille

⇒ 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)



Fractions conve

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.



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.

Avvertissement : 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 MétroPol

Recherche dans la base MétroPol

Par substance	Par méthode de prélèvement	Par méthode d'analyse
<p>Famille chimique Choisir une famille</p>		
<p>Substance Chrome VI (composé du), en Cr</p>		
<p>Numéro CAS ex : 7440-47-3</p>		
<p>Numéro de Méthode ex : 268</p>		
<p>Effacer la recherche</p>		<p>Rechercher</p>

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 méthodologique (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 œuvre 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

Prélèvements **individuel / à poste fixe** - Concentration en masse (mg.m⁻³)

Fraction conventionnelle

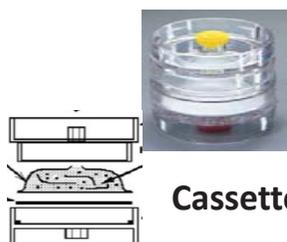
Distribution granulométrique

Inhalable

Thoracique

Alvéolaire

Impacteurs en cascade



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



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

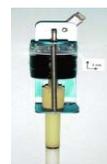


CATHIA-T
7 L.min⁻¹



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



Marple
2 L.min⁻¹



Sioutas
9 L.min⁻¹



Mini-MOUDI
2 L.min⁻¹



DLPI+/ELPI+



MOUDI



ANDERSEN



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



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

**Impacteur individuel SIOUTAS
4 étages + 1 filtre**

- ↗ Résolution
- ↘ Mise en œuvre (individuel)

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)



Photos pour illustration

Métrie / Instrumentation

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

Métrie 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

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)

Métrie en temps réel

Nb particules / diamètre moyen
DiSCmini (Testo®)

- ✓ Le DiSCmini compte les charges électriques des particules :
 - **Diamètre moyen 20 - 300 nm**
 - Concentration 10² - 10⁶ particule/cm³
- ✓ Pas spécifique des particules de silice. Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs



Cyclone
Dorr-Oliver
1,7 L/min



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



MPS (MET)
1 L/min



Concentration massique

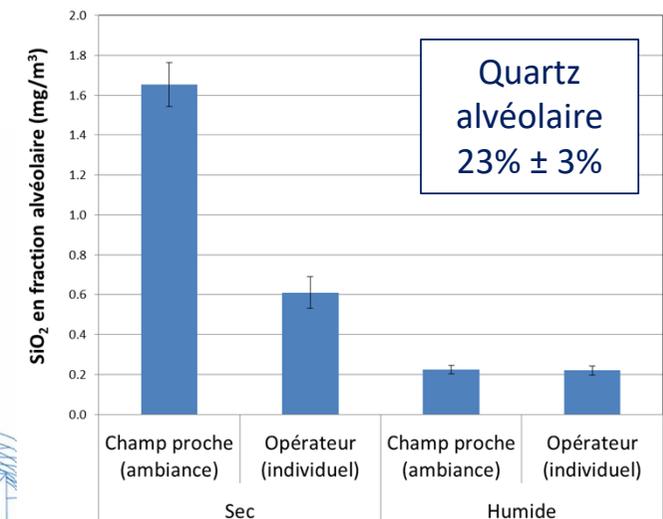
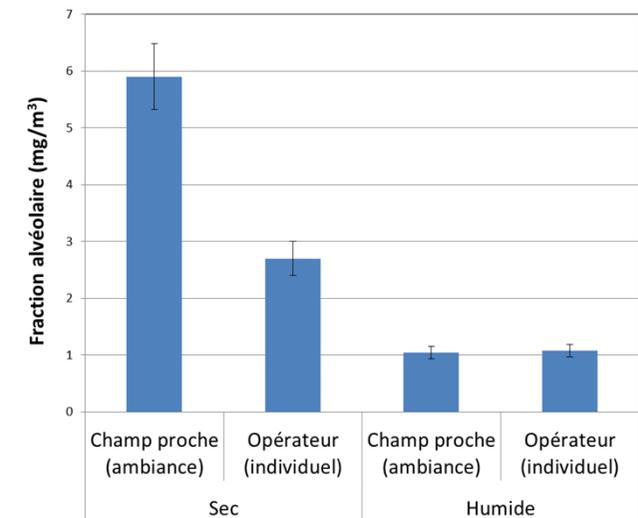
• Découpe à sec

- 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/m ³)	5.90	2.70
	RCS (mg/m ³)	1.65	0.61
Humide	C _M alv. (mg/m ³)	1.04	1.08
	RCS (mg/m ³)	0.22	0.22



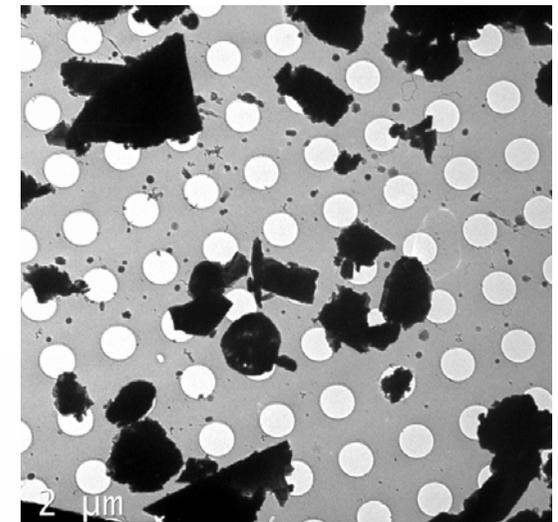
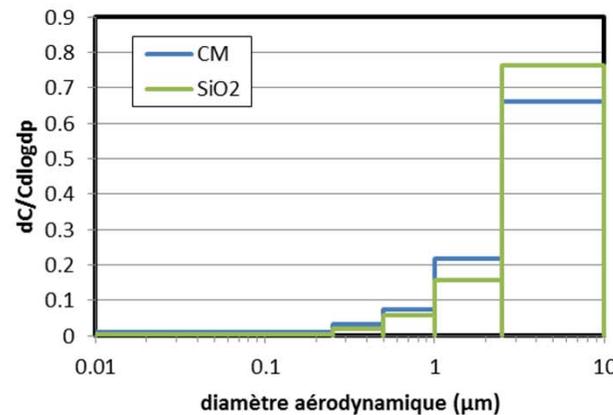
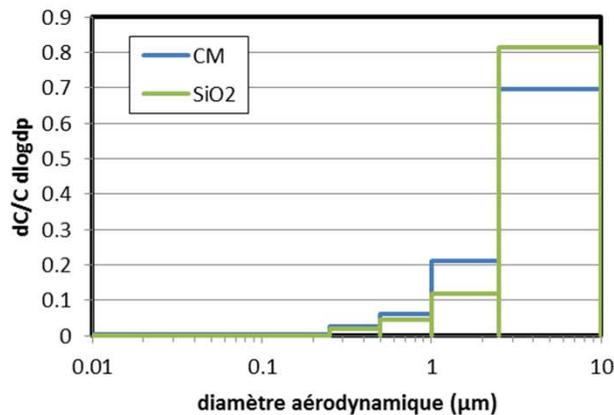
Distribution granulométrique en masse

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

Champ proche

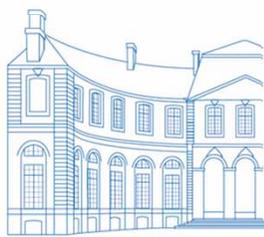
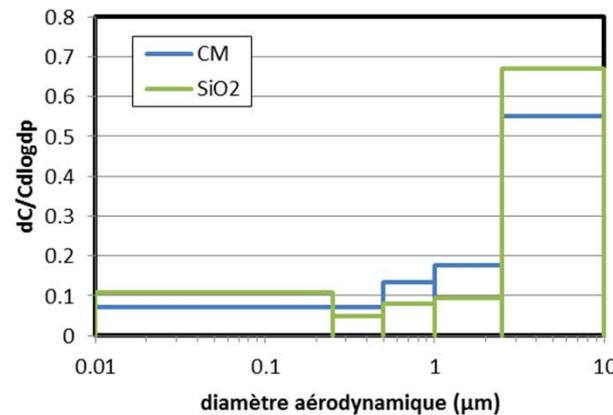
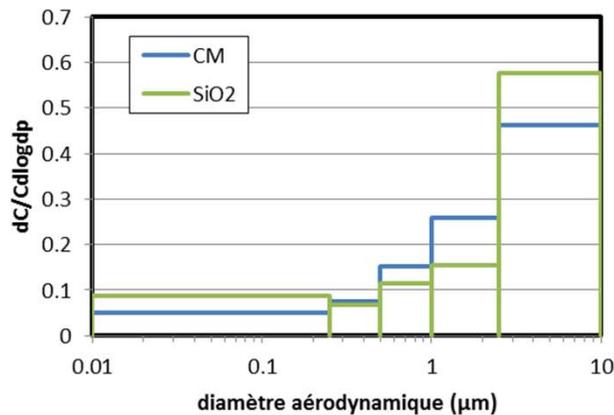
Opérateur

Sec



Crédit photo: INRS®

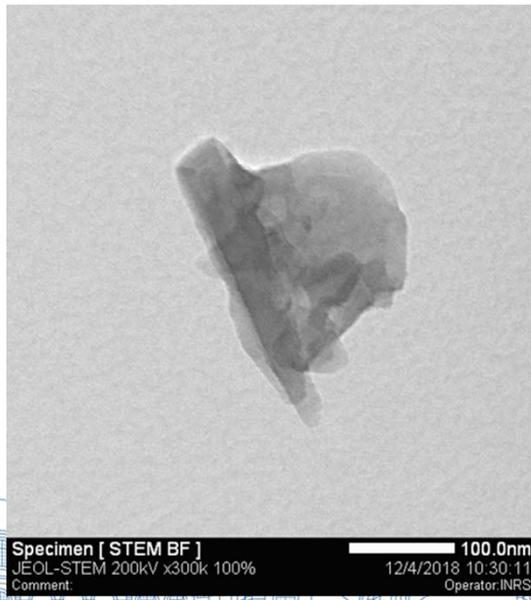
Humide



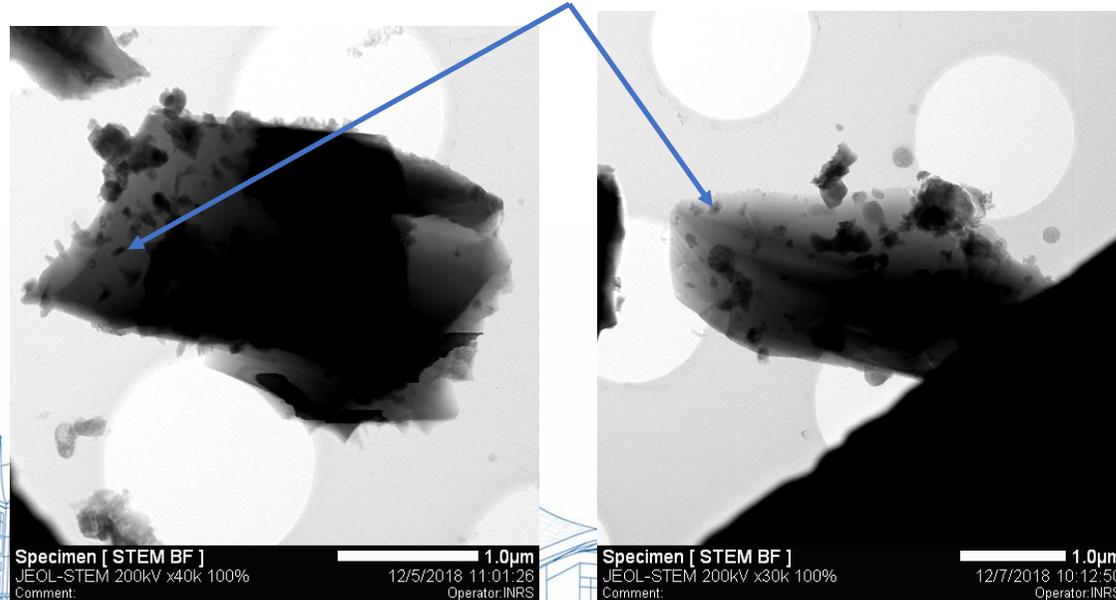
Morphologie/taille des particules

- 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

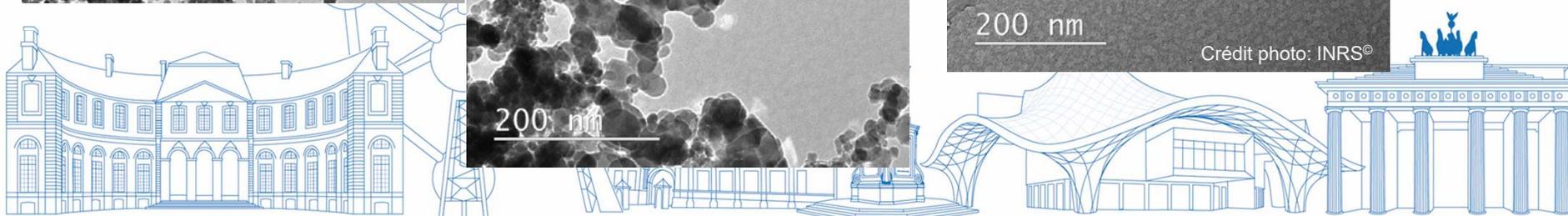
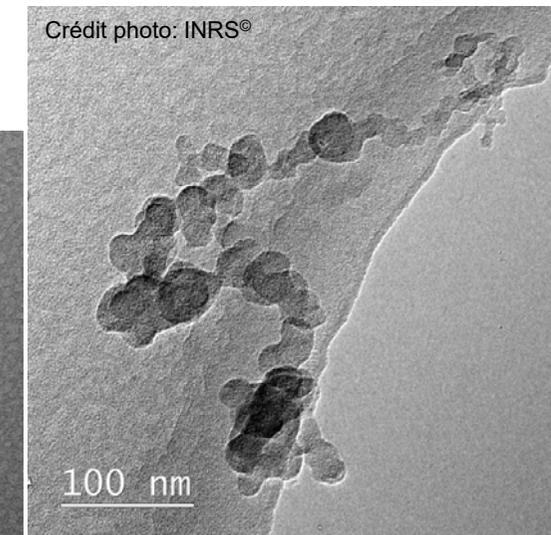
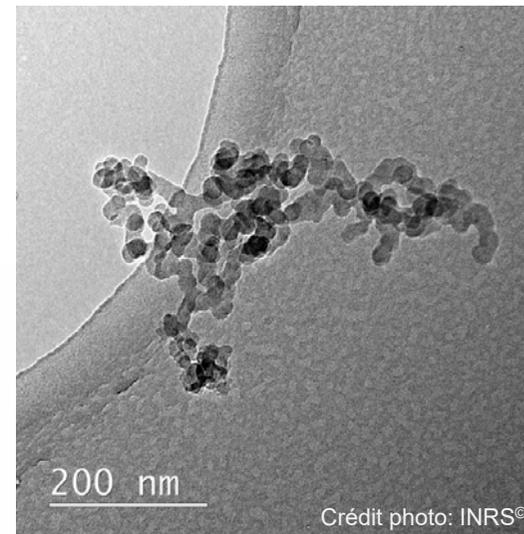
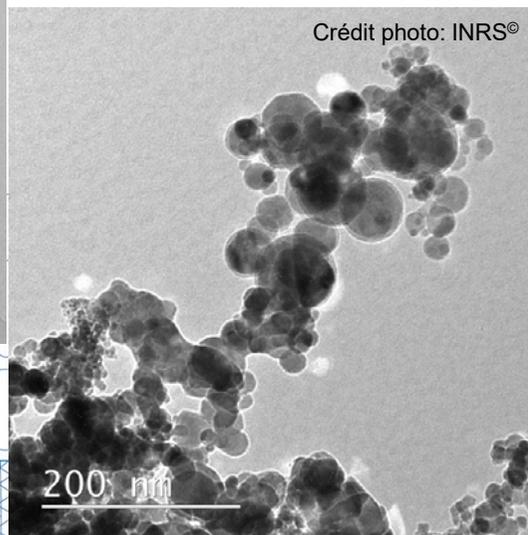
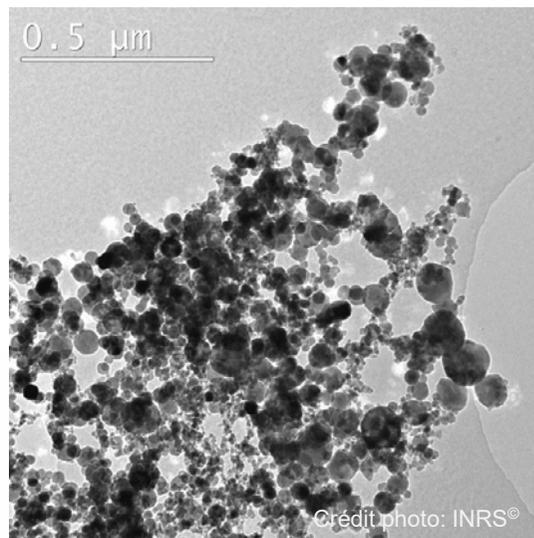


agglomérées sur particules micrométriques (silice?)



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



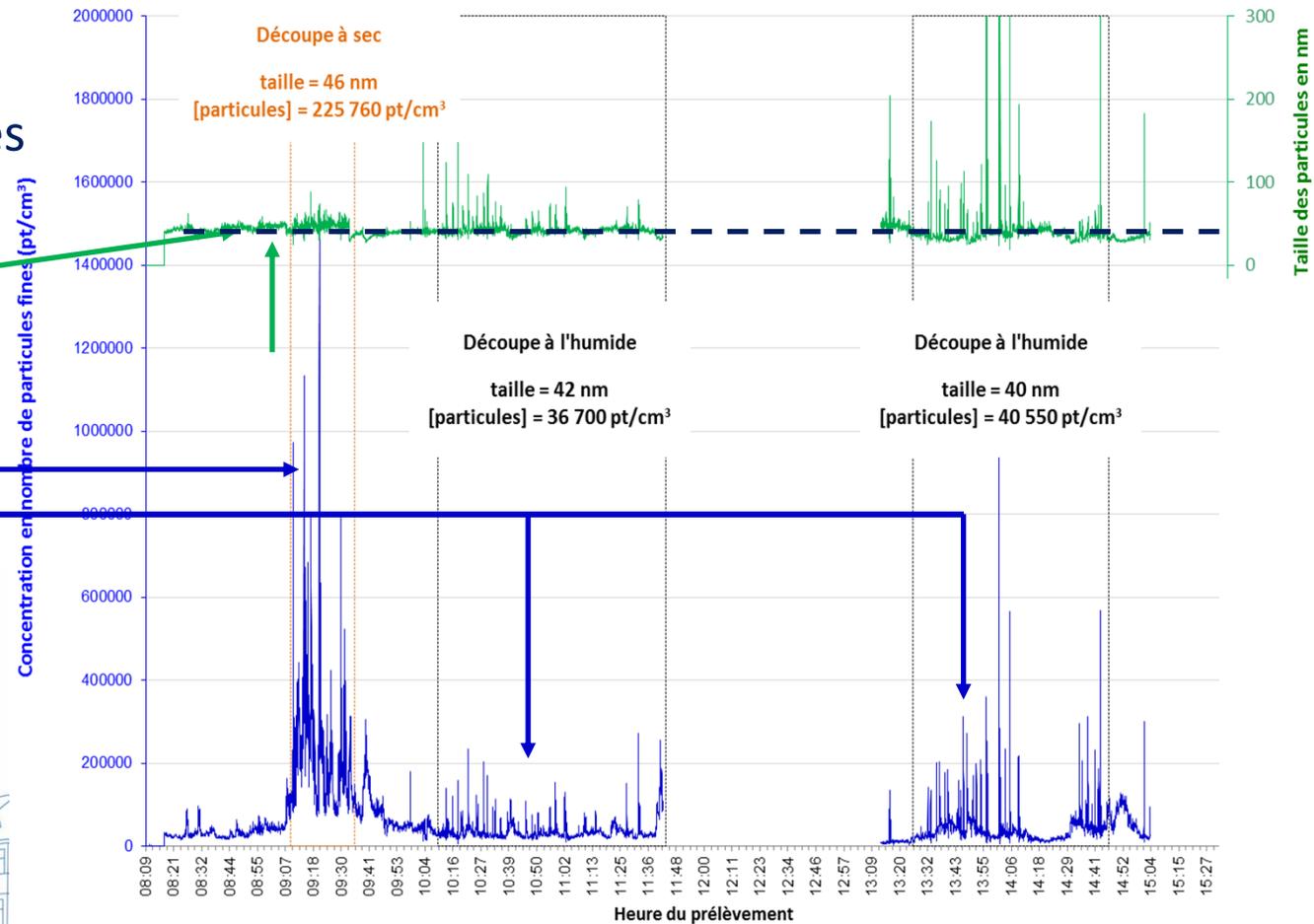
Concentration en nombre – Diamètre moyen

Analyse en temps réel:

Particules fines (< 300 nm) et ultrafines

- Non spécifique: contribution multiple
- Diamètre moyen \approx 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

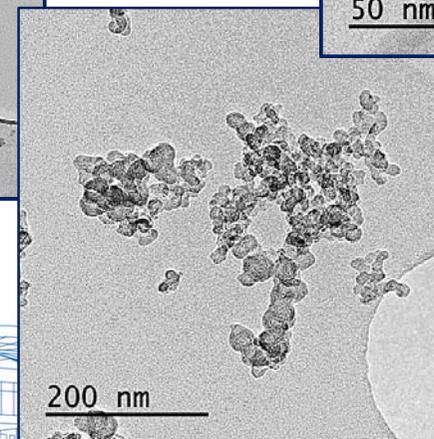
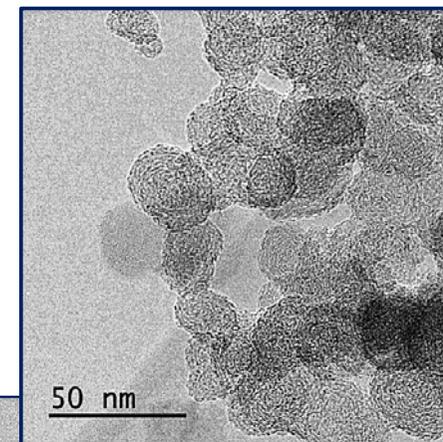
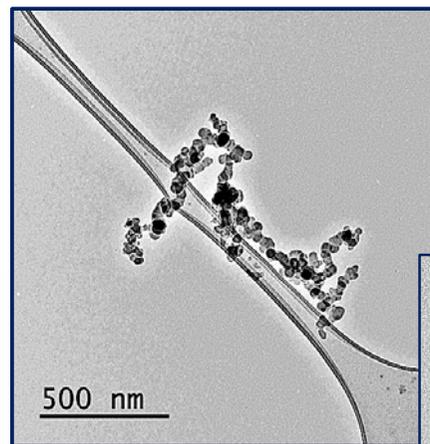
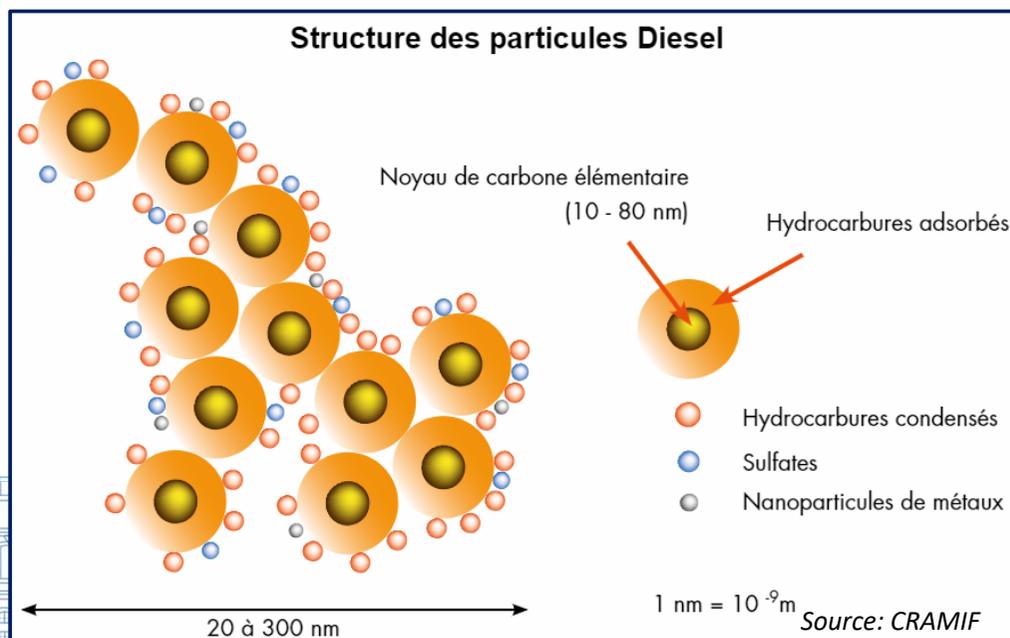
Exemple 2

Exposition aux fumées diesel



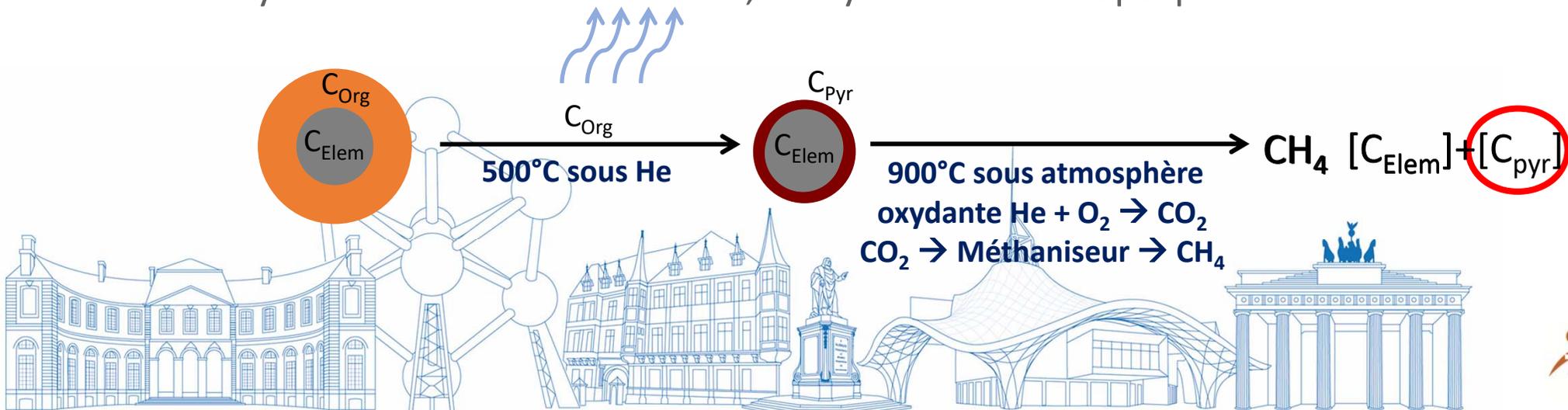
Fumées Diesel: VLEP en Carbone élémentaire

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



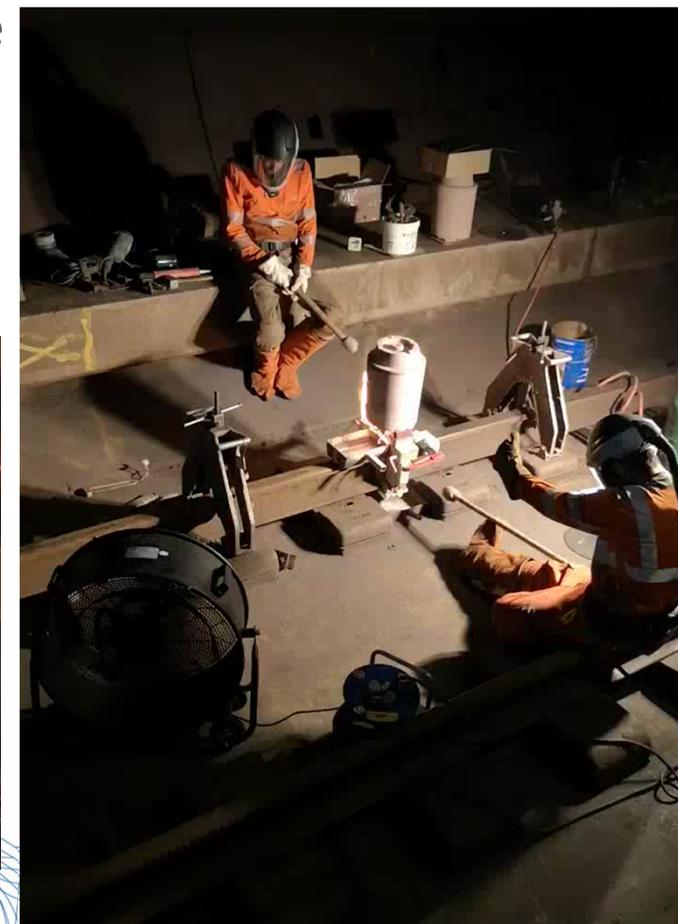
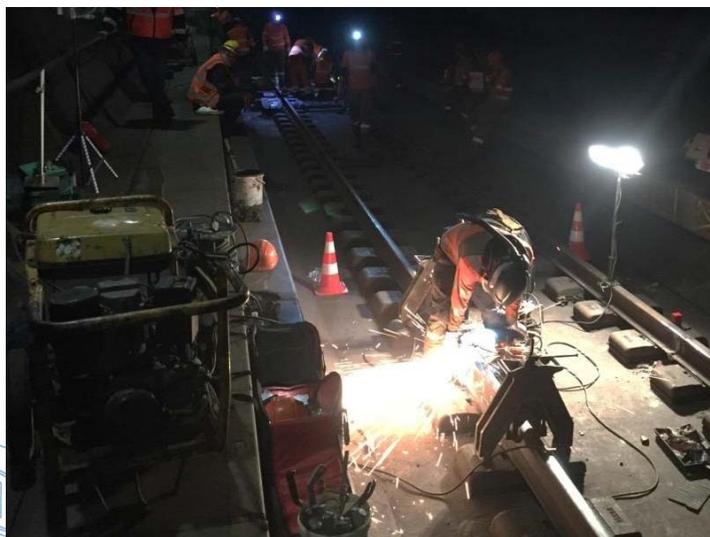
Dosage du carbone élémentaire – analyse indirecte

- 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



Crédit photo: INRS[©]

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 infrarouge (880 nm) au travers d'un filtre téflon.



(Image : ADDAIR)

Concentration en carbone élémentaire

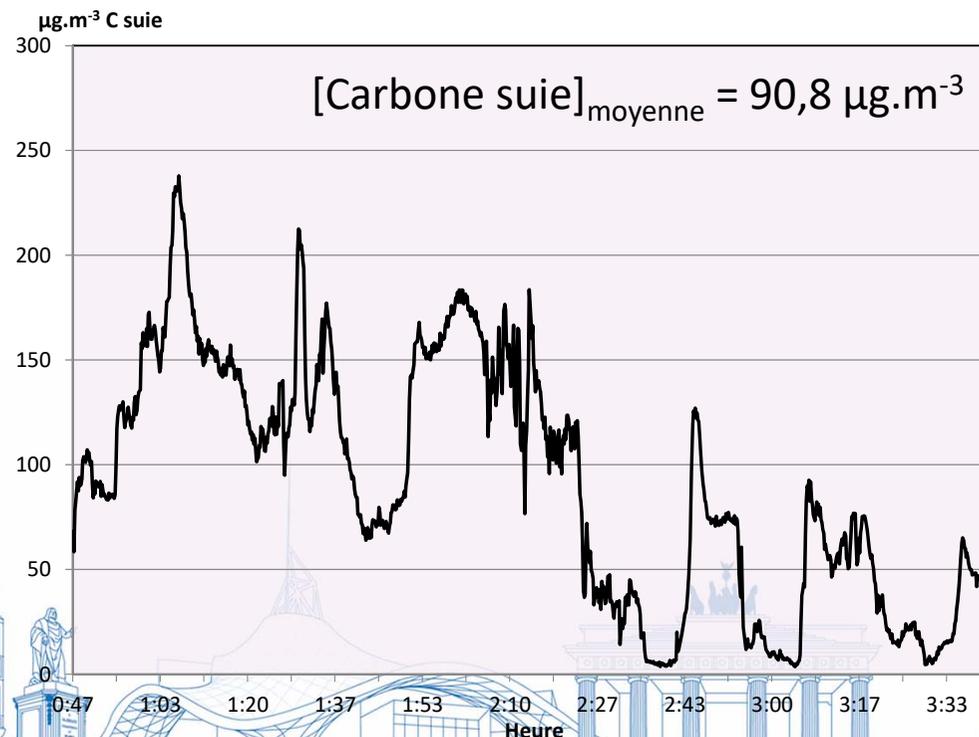


Prélèvement cyclone puis analyse SUNSET

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



μ-Aethalomètre AE 51



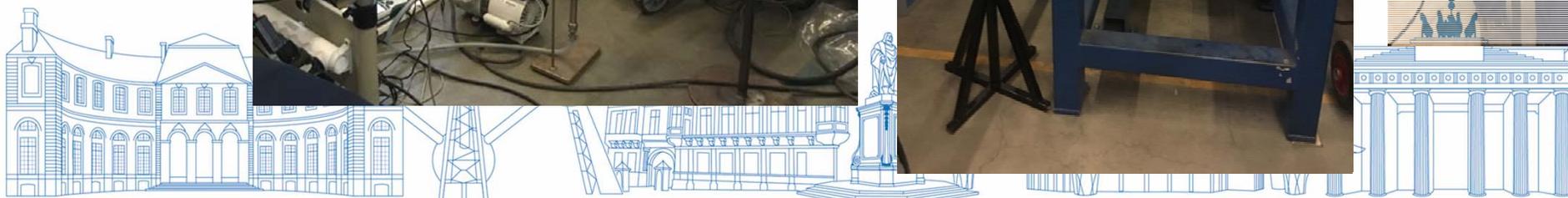
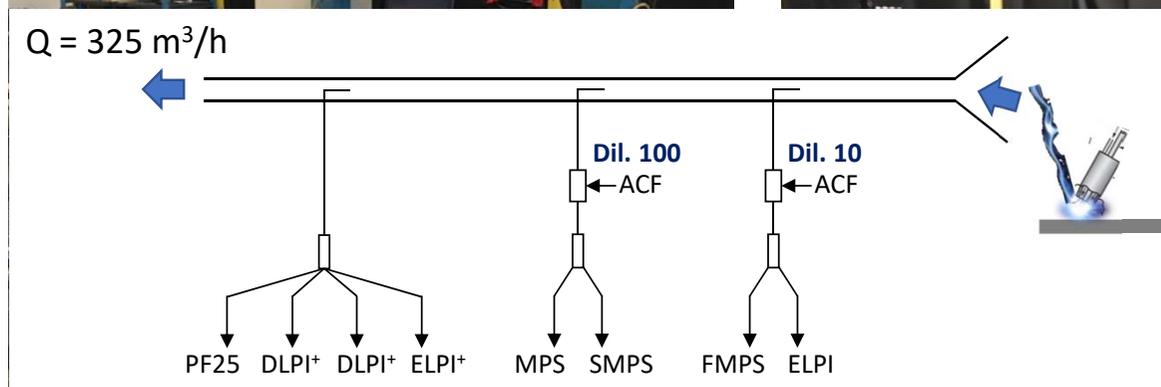
Exemple 3

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

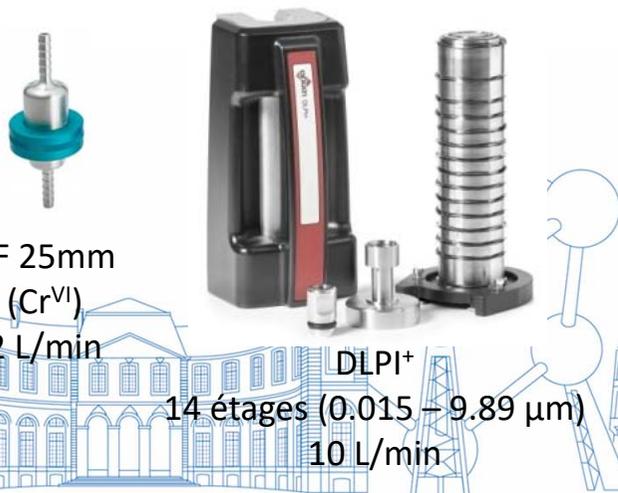
- Caractérisation de l'aérosol produit par un procédé de soudage MIG

Métrieologie 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}



Métrieologie en temps réel

Concentration en nombre et distribution granulométrique

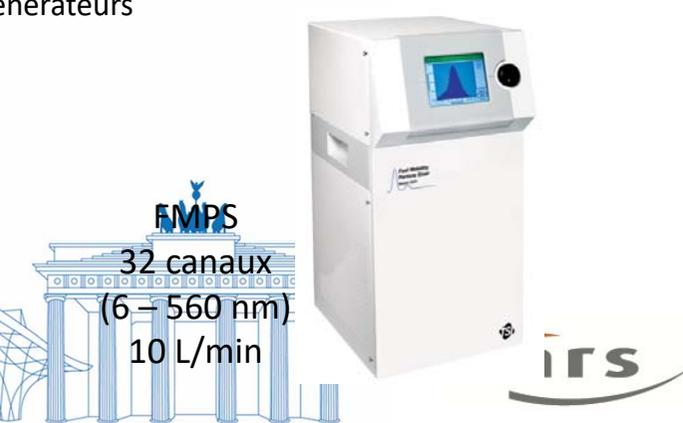
ELPI (Dekati®)

- ✓ L'ELPI est un impacteur en cascade (**diamètre aérodynamique**) avec chargement préalable des particules → mesure de courant
13 étages: **30 nm – 10 µm**,
Concentration **10² – ≈10⁷ particule/cm³**
- ✓ Pas spécifique des particules métalliques.
Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs

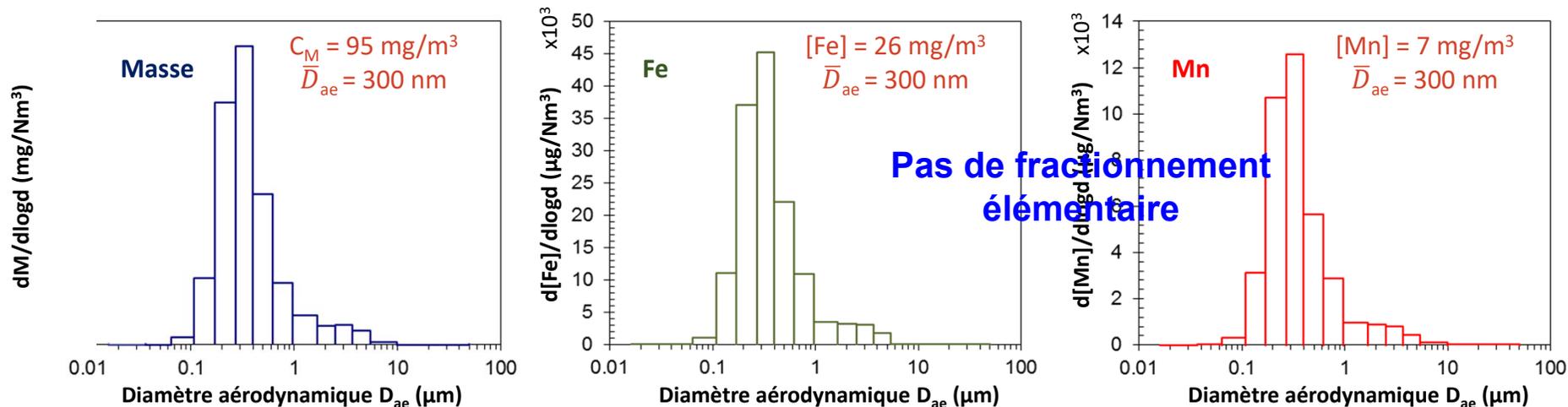


FMPS (TSI®)

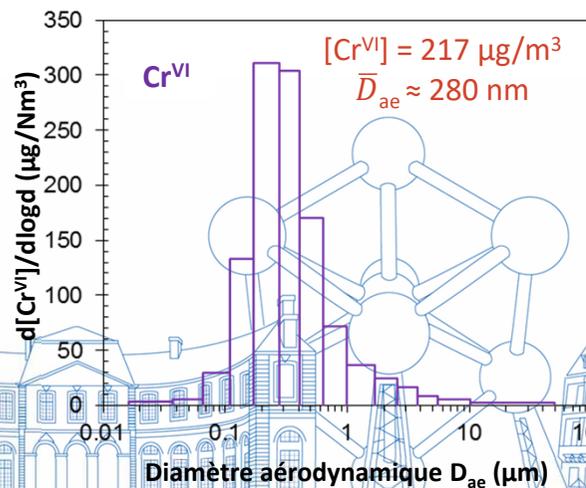
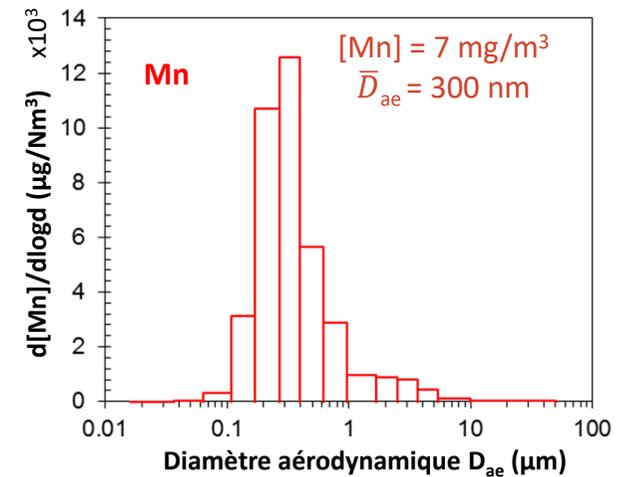
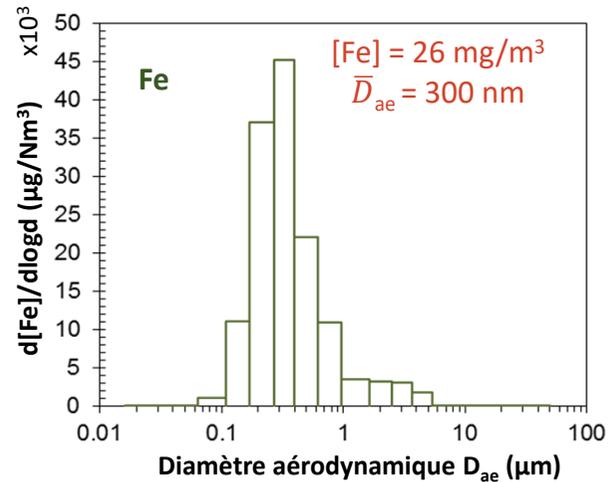
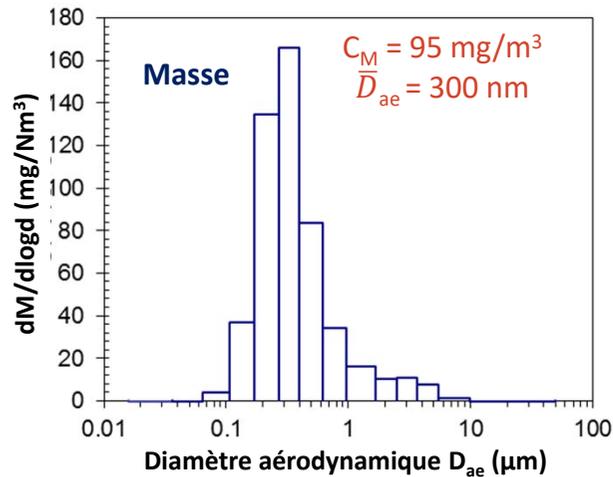
- ✓ Le FMPS sépare les particules préalablement chargées selon leur mobilité électrique → mesure de courant
32 canaux: **6 nm – 560 nm**,
Concentration **10² - 10⁷ particule/cm³ (100 nm)**
- ✓ Pas spécifique des particules métalliques.
Adaptée au suivi des PUF et des événements générateurs



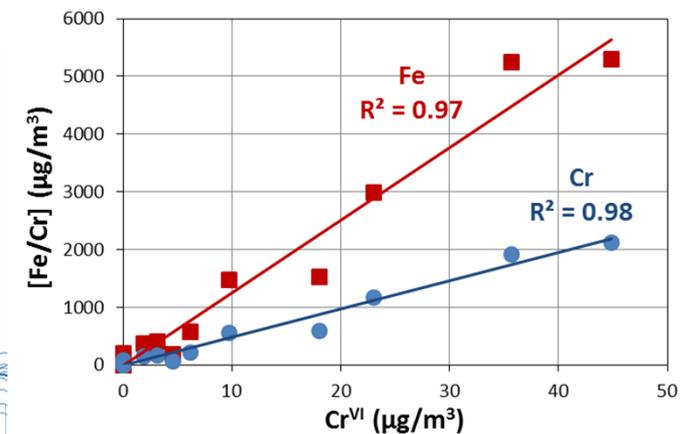
Distribution granulométrique en masse



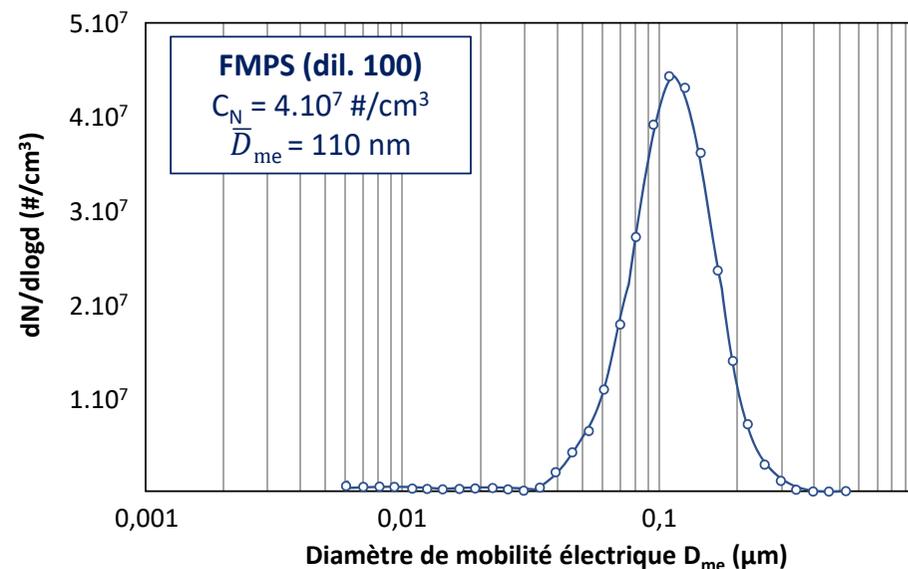
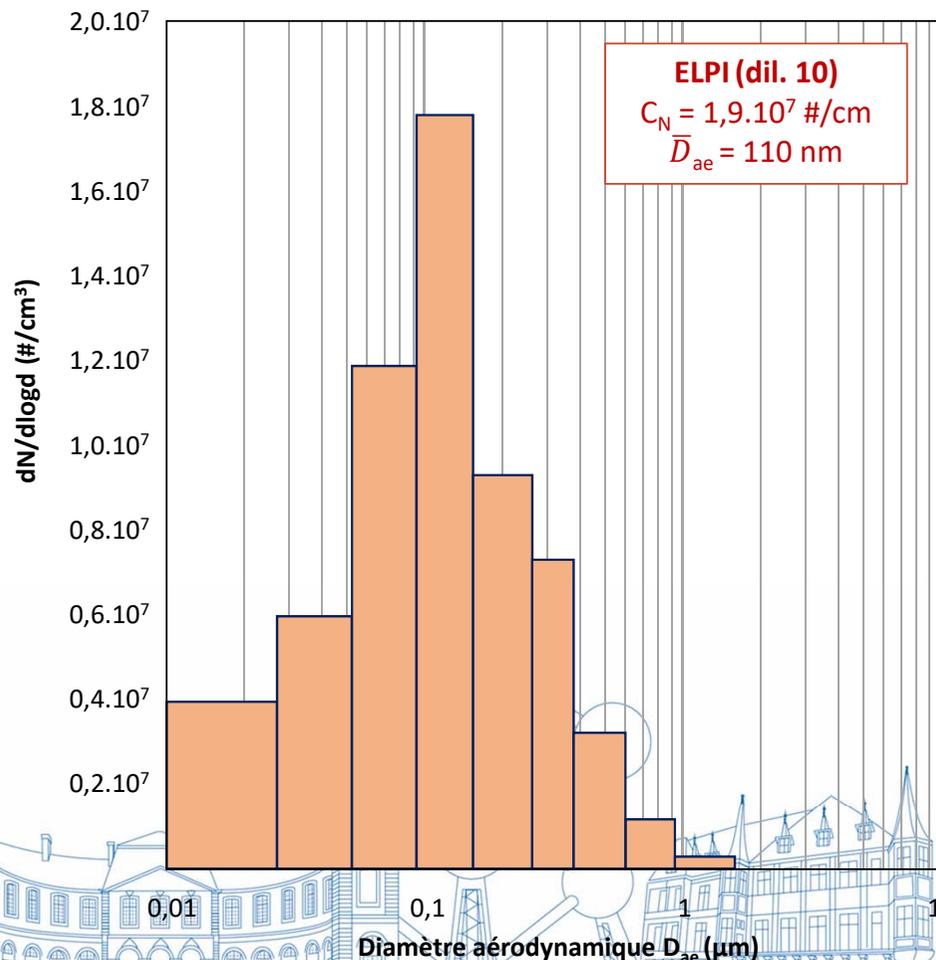
Distribution granulométrique en masse



- $[Cr^{VI}]_{total} (PF) = 185 \pm 20 \text{ µg/m}^3$
- $\bar{\varnothing}_{ae}$ légèrement décalé vers les particules les plus fines pour le Cr^{VI}
→ Non significatif



Distribution granulométrique en nombre



- \bar{D}_{ae} en nombre < \bar{D}_{ae} en masse
- $\bar{D}_{ae} \approx \bar{D}_{me}$ en nombre
- C_N équivalent entre ELPI et FMPS (dilution nécessaire)

→ ELPI (dil. 10): $C_N = 1,9 \cdot 10^7 \text{ #/cm}^3$

→ FMPS (dil. 100): $C_N = 4,0 \cdot 10^7 \text{ #/cm}^3$

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

