

Etudes des matériaux nano-additivés dans le cadre bâti

Webinaire NanoMeasureFrance

29/06/26



Contexte

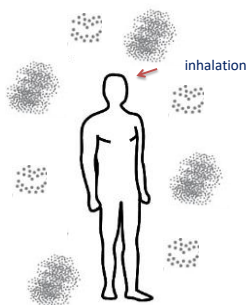
Nanotechnologies appliquées au bâtiment

Usage de matériaux nanocomposites

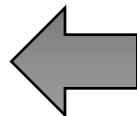


Substances les plus produites en France en 2024: Silice, dioxyde de titane, noir de carbone, dioxyde de zirconium et oxyde d'aluminium,

EFFET SUR LA SANTÉ?



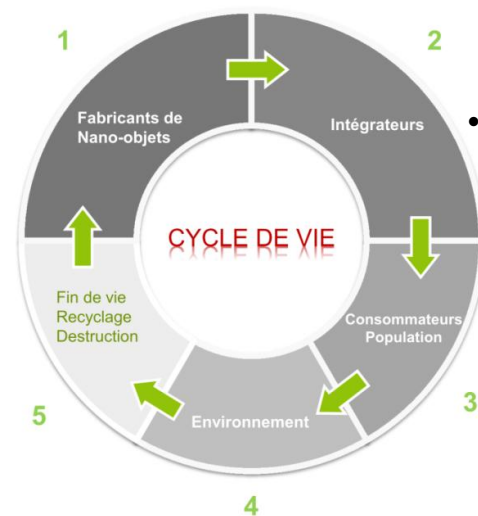
Effets sur la santé inconnus mais les nano-objets inhalés pourraient être transférés directement au cerveau par la voie nasale



Relargage involontaire des nanoparticules durant le cycle de vie des produits (fabrication, usage et élimination) :

Usage normal de peinture

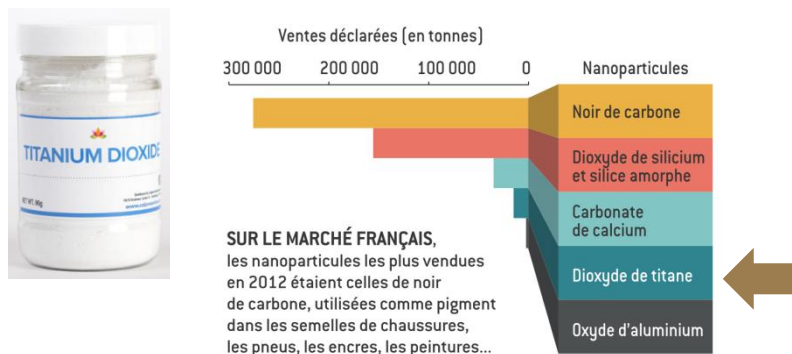
- Vieillissement de la peinture (T° , Hr, exposition à l'ozone...),
- Sollicitation mécanique,



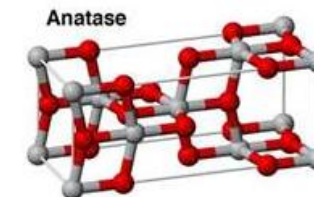
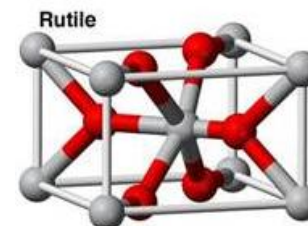
Relargage particulaire ? : Nanoparticules seules et principalement encapsulées dans une matrice (notamment lors d'abrasion)

Le TiO_2

10 000 tonnes commercialisés/ans



Formes cristallines



R-nano en 2017: 420 000 tonnes tout NPs (TiO_2 dans les 5 premiers)

1^{er} août 2025, la Cour de justice de l'Union européenne a annulé la classification du dioxyde de titane comme substance cancérogène suspectée.

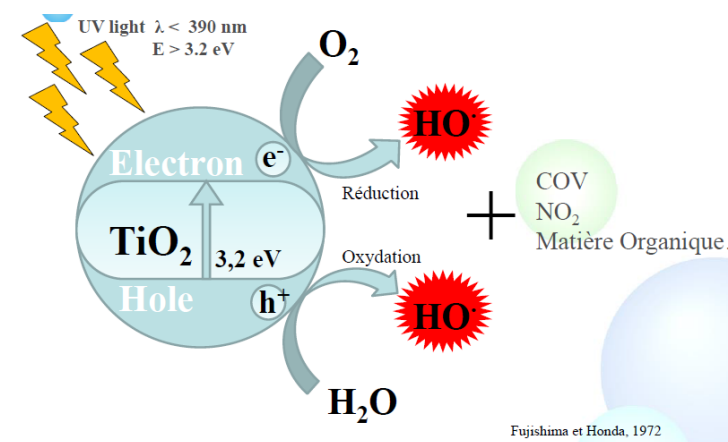


Très utilisé dans le secteur du bâtiment : **peinture murale**

Fonctions :

- Autonettoyant
- Anti-polluant
- Pigment

Propriété physico-chimique : **Photocatalytique**

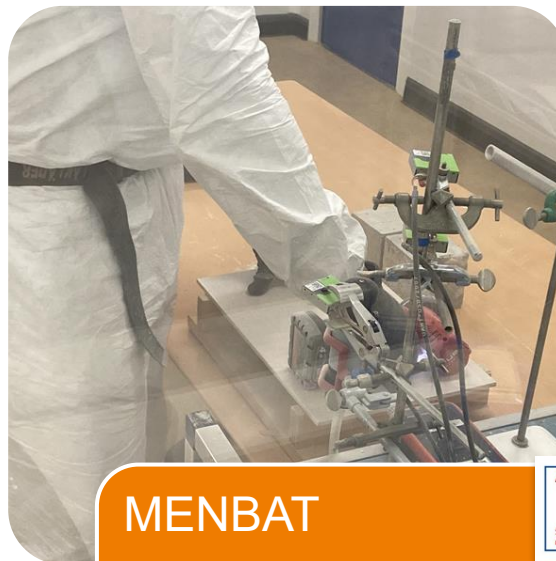


3 projets...



EMANE

- Impact du vieillissement des matériaux nano-additivés sur le relargage particulaire?
- Emission particulaire en conditions standardisées?



MENBAT

- Relargage particulaire en conditions réalistes?
- Stratégies de réduction des émissions particulaires,
- Mesures de l'exposition en situation réaliste?



Release_Nanotox

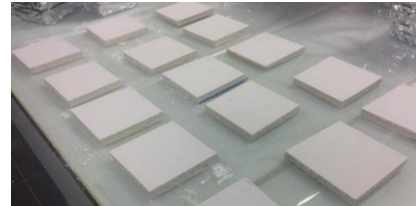
- Impact sur les fonctions cérébrales de particules issues de l'abrasion de matériaux nano-additivés,



Méthodologie expérimentale

Variation de T°C (5 à 42 °C) et
HR (15 à 90 %) au sein de la
chambre climatique

Chambre climatique



3 Types de Peintures appliquées sur placoplatre:

- ➡ Peinture acrylique SANS NPs de TiO_2
- ➡ Peinture acrylique AVEC 5% m de NPs de TiO_2 (Degussa P25)
- ➡ Peinture commerciale AVEC NPs de TiO_2

Exposition à l'ozone

Nettoyage avec des lingettes



Sollicitation mécanique sur les échantillons avec les 4 scénarios (To, T1000h et T2000h)

Sollicitation mécanique : Abrasion



Les scénarios de vieillissement :

- Scénario n° 1 : cycles T° C/HR seuls,
- Scénario n° 2 : cycles T° C/HR + Exposition à l'ozone (24h d'exposition toutes les semaines),
- Scénario n° 3 : cycles T° C/HR + Nettoyage (1 nettoyage toutes les 2 semaines).
- Scénario n° 4 : témoin paille (T = 20 ° C et Hr= 50 % cst)

Caractérisation expérimentale du relargage particulaire selon différents scénarios:

Analyses du matériaux (MEB-EDX, IRTF, ICP-MS, ATG et GC), des lingettes utilisées pour le nettoyage (ICP-MS) et des aérosols produits lors de l'abrasion (DMS-500, CNC, APS et prélèvement par MPS pour analyses MEB-EDX) .

Abrasion et mesure aérosol

Paramètres :

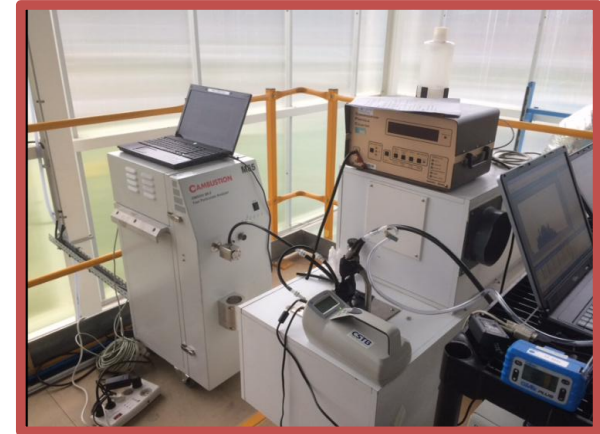
- Longueur de course (7,62 cm)
- Vitesse du bras
- Charge imposée sur le bras (350 et 850 g)
- Durée de l'abrasion
- Tampons abrasifs (H18, vitrifié médium)



Sollicitation mécanique : abrasion
avec un TABER- modèle 5750



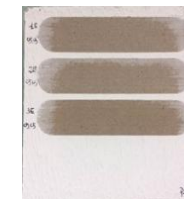
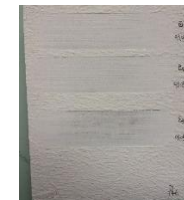
Caractérisation des aérosols émis lors de l'abrasion
(DMS 500, CPC, APS et MPS)



Les masses, vitesses et nombres de cycles déterminés par une étude préliminaire afin d'obtenir 2 conditions d'abrasions: modérée (abrasion partielle) et forte (abrasion totale)

Paramètres d'essais d'abrasion des plaques de peinture réalisés avec un abrasimètre linéaire TABER modèle 5750

Type d'Abrasion	Force normale exercée (N)	Nombres de cycles (aller – retour du bras) /min	Vitesse linéaire maximale / Vitesse moyenne (mm/s)	Temps d'abrasion	Nombre de cycles (aller-retour du bras)
Modérée	3,4	75	299 / 212	2 min	150
Forte	8,3	60	239 / 169	30 s	30



Perte en masse lors des essais d'abrasion a été mesurée

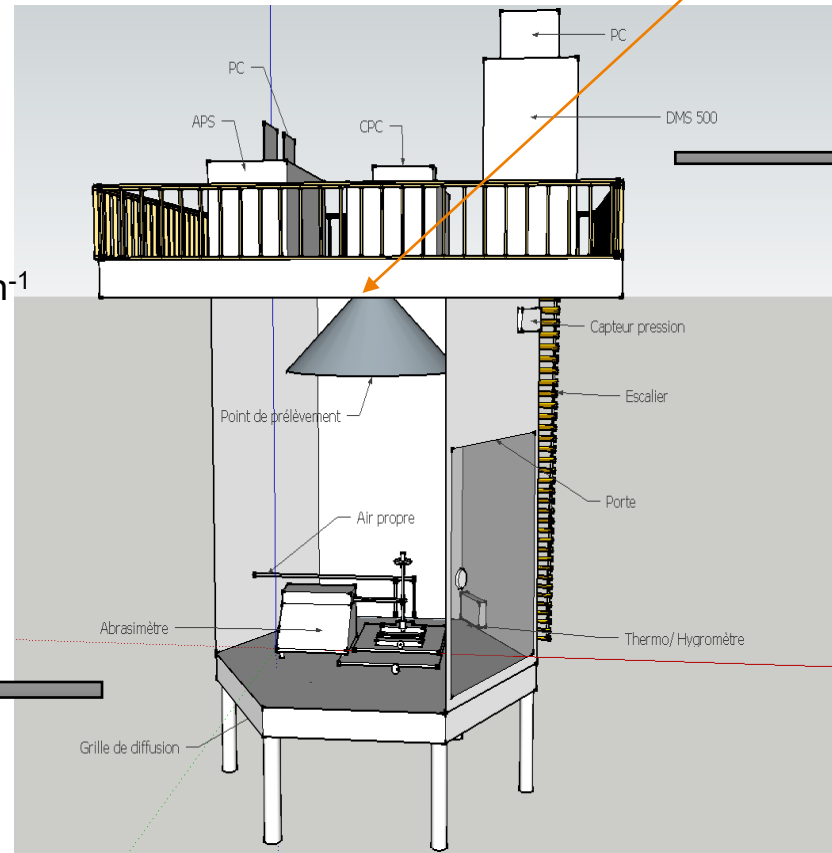
Abrasion et mesure aérosol

/ Banc expérimental

- Forme hexagonale
- Hauteur totale : 3,3 m
- Largeur : 1,56 m
- Surface de la base : 1,9 m²
- Volume intérieur : 2,36 m³
- Taux de renouvellement 45,5 h⁻¹
- $Q = 107 \text{ m}^3 / \text{h}$

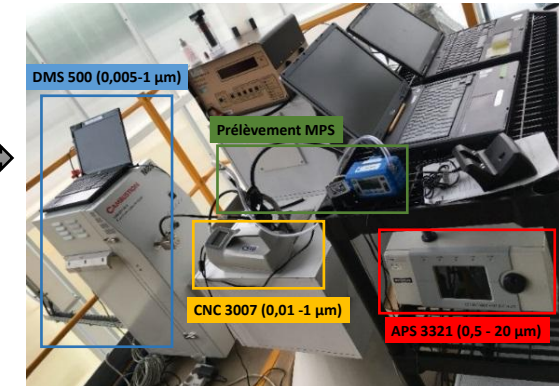


un soufflage d'air filtré de 45L/min appliqué à la base de l'abrasion



Enceinte expérimentale Aérotest
(adapté de Ramalho *et al.*, 2007)

Prélèvement isocinétique



DMS
500



APS
3321



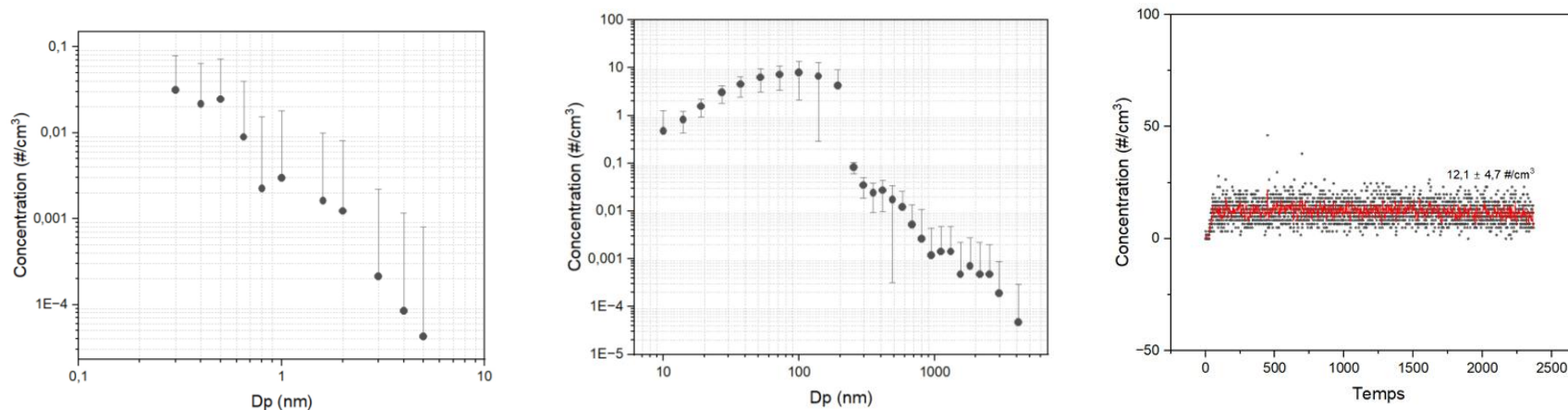
CPC
3007



MPS

Bruit de fond particulaire

Le bruit de fond particulaire dans le banc a été appréhendé à l'aide des différents appareils de mesure.



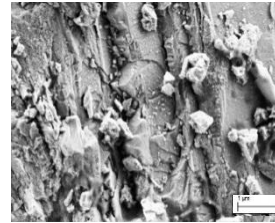
Bruit de fond particulaire mesuré à l'aide des compteurs Grimm 1.108, Miniwras et CNC (de gauche à droite).

Résultats

Caractérisation des peintures

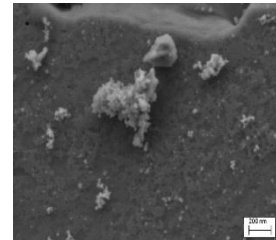
Peinture acrylique SANS NPs de TiO_2

- Pas d'observation de NPs de TiO_2 au sein de l'échantillon
- Présence de carbonate de calcium et de silicate de magnésium dans la peinture.
- $M_{\text{TiO}_2} = 0,23 \pm 0,04 \text{ g} / 100 \text{ g}$ de peinture
- Relargage de TiO_2 dans les lingettes: entre 60 et 140 μg /lingette



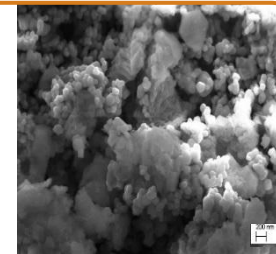
Peinture acrylique AVEC 5% de NPs de TiO_2

- Présence de NPs de TiO_2 au sein de la couche et en surface ($d_p \sim 20 \text{ nm}$)
- Présence de carbonate de calcium, de silicate de magnésium et de traces de potassium
- $M_{\text{TiO}_2} = 3,88 \pm 0,21 \text{ g} / 100 \text{ g}$ de peinture
- Entre 1500 μg et 2500 μg / lingette



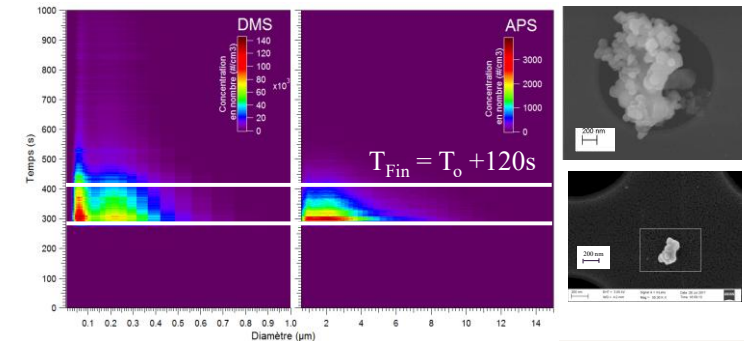
Peinture commerciale AVEC NPs de TiO_2

- NPs de TiO_2 au sein et en surface de l'échantillon ($d_{p,\text{moyen}} = 90,3 \pm 24,2 \text{ nm}$)
- Présence de carbonate de calcium et traces de talc et d'Al
- $M_{\text{TiO}_2} = 9,07 \pm 0,81 \text{ g} / 100 \text{ g}$ de peinture
- Entre 100 μg et 900 μg /lingette
- Relargage dépend des temps de vieillissement



Couche interne

Processus d'abrasion: caractérisation de l'aérosol produit

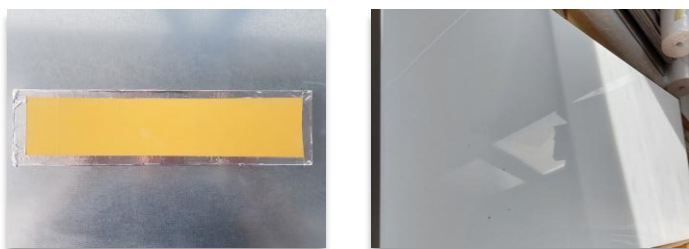


- ❖ 3 populations autour de 60 nm, 200 nm et 2 μm dans le cas des peintures nano-additivées avec du TiO_2
- ❖ Emissivité la plus importante: **Peinture acrylique avec Nps de TiO_2** :
- ❖ Pas de $\neq$ significatives sur l'émission particulaire (nbre part /g de matériau abrasé) entre les abrasions fortes et modérées. Pas de $\neq$ notable sur $N_{\text{tot}}/M_{\text{perdue}}$ entre les $\neq$ scénarios de vieillissement sauf pour la peinture modèle

Questions...

- ⇒ **Quel est le niveau de relargage particulaire lors de la mise en œuvre réalistes?**
- ⇒ **Quel est l'impact de différentes stratégies visant à limiter l'émission particulaire lors des sollicitations mécaniques?**

Scénarios d'usage réalistes



Matériaux	Peinture		Carrelage	
Sollicitations mécaniques	perçage	ponçage	perçage	sciage

Nature de l'action	Outil utilisé/Marque	Condition opératoire	Illustration
Perçage	Perceuse sans fil	Couple: 60 Nm Vitesse de rotation : 0 - 1800 tours/min Ø foret multimatériau: 10 mm Poids: 1,8 kg	
Sciage	Meuleuse	Vitesse de rotation : 20000 tours/min Profondeur de coupe: 16,3 mm Ø disque diamant: 76 mm Poids: 1,3 kg	
Ponçage	Ponceuse orbitale	Puissance absorbée/rendue: 350/180 W Vitesse de fonctionnement à vide min./max.: 4200-9200 min ⁻¹ Nbre d'oscillation fonctionnement à vide min./max.: 8400-18400 min ⁻¹ Diamètre du plateau de ponçage: 150 mm Disque de ponçage: Ø 150 mm, P100 Poids: 2,2 kg	

Note: Matériel brushless pour limiter le bruit de fond particulière lors des sollicitations.

Systèmes visant à limiter les émissions particulaires lors des sollicitations mécaniques

Perçage



Cloche d'aspiration



Poche de gel



Aspirateur

Sciage/Découpe



Carter d'aspiration

Ponçage

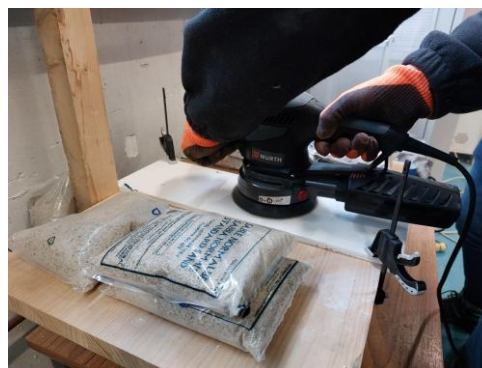


Carter d'aspiration associé à un disque perforé

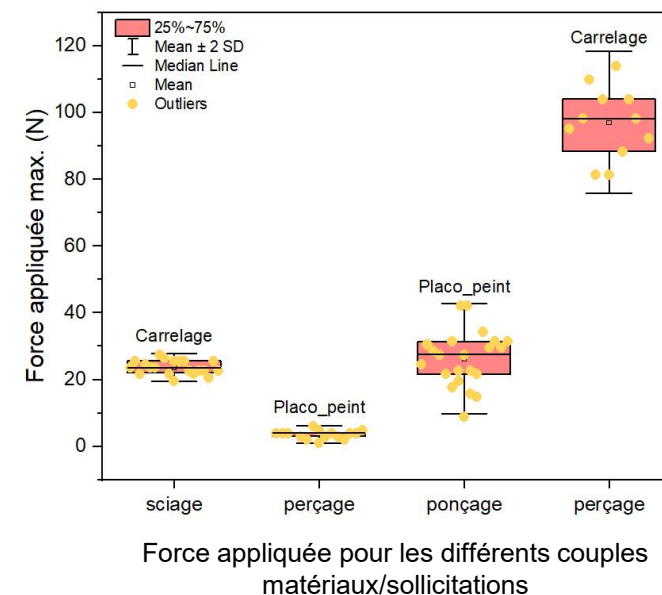
Caractérisation des sollicitations mécaniques

Détermination des forces exercées par pesée:
La valeur maximum est relevée lors de l'opération.

Matériaux	Peinture		Carrelage	
Sollicitations	perçage	ponçage	perçage	sciage
Force appliquée	$3,5 \pm 1,3$ N (n=15)	$29,2 \pm 6,9$ N (n=10)	$96,9 \pm 10,6$ N (n=11)	$23,3 \pm 2,4$ N (n=5)



Balance et réalisation d'une sollicitation mécanique



➡ Les sollicitations ont été réalisées par un seul opérateur.

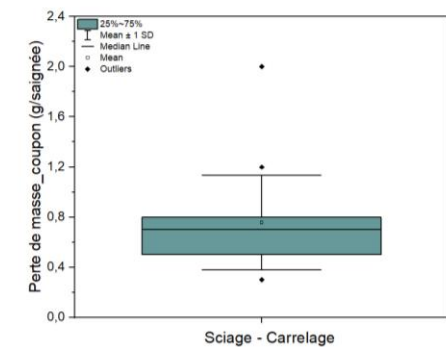
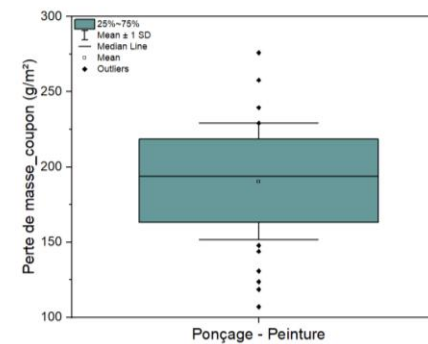
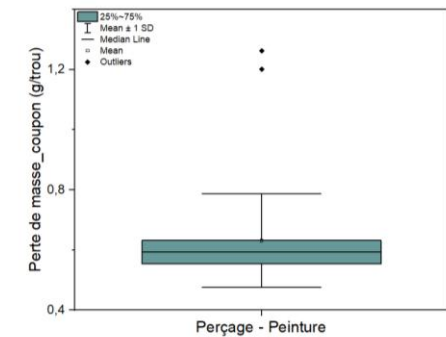
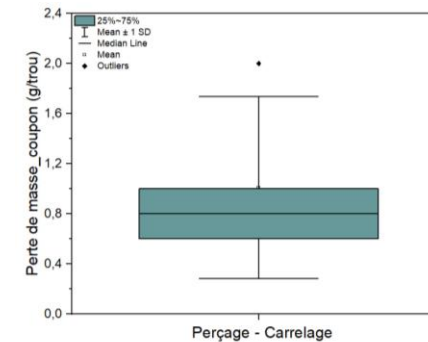
Perte de masse moyen lors des sollicitations mécaniques

➔ / Lors des sollicitations mécaniques, la perte massique des différents coupons de matériaux est de l'ordre de :

- Perçage des carrelages: $1,0 \pm 0,7$ g/trou,
- Perçage des coupons de peintures: $0,6 \pm 0,1$ g/trou,
- Sciage des carrelages: $0,8 \pm 0,4$ g/saignée,
- Ponçage coupons de peintures: $190,3 \pm 38,3$ g/m²,



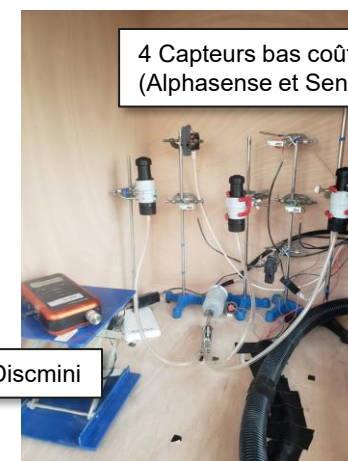
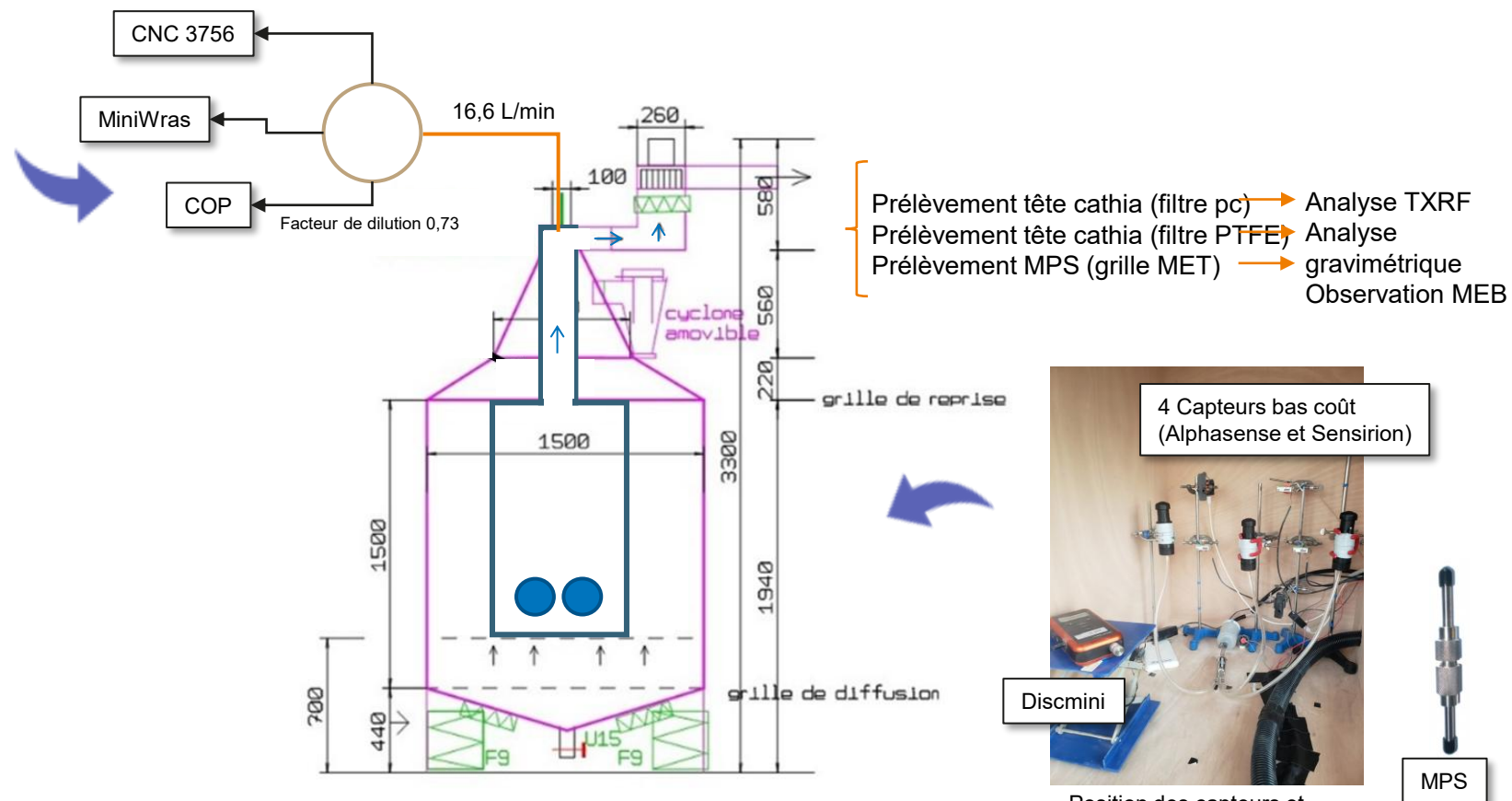
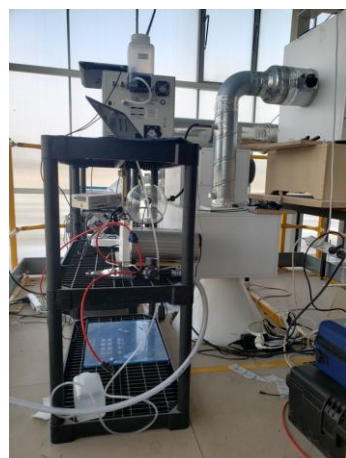
Photographies des perçages et ponçages
des coupons de peinture



Perte en masse des coupons lors des divers sollicitations mécaniques

Instrumentation du banc d'essais semi-réaliste

/ Mise en place des outils métrologiques et systèmes de prélèvement:

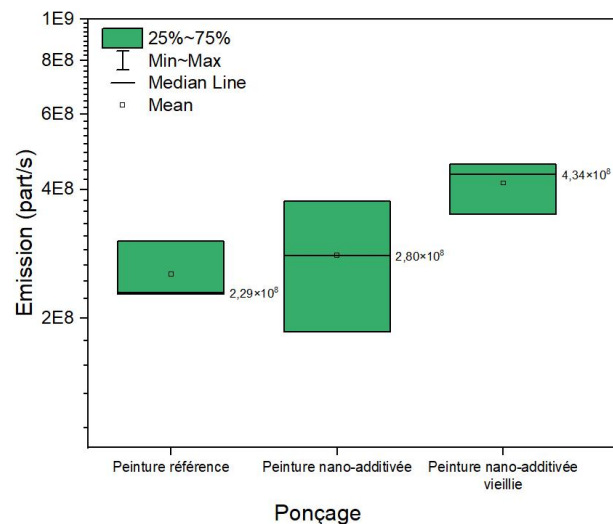


Position des capteurs et systèmes de prélèvement

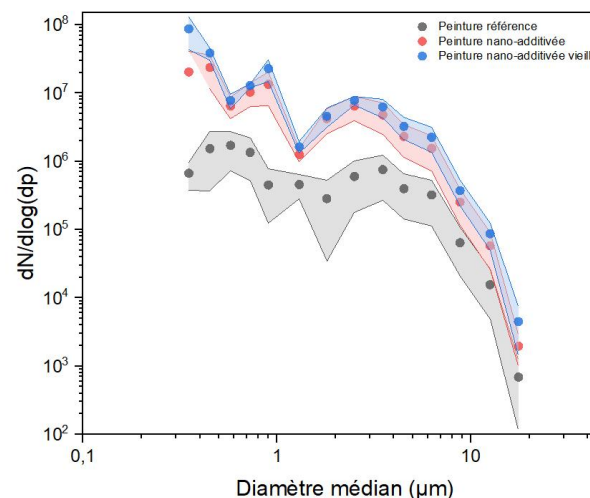


Emission particulaire en nombre et profil granulométrique (ponçage)

/ Les émissions particulaires lors des activités de ponçage, sur différents types de matériaux, sont représentées ci-dessous à travers les taux d'émission et les profils granulométriques.



Taux d'émission particulaire lors du ponçage des différentes peintures (CNC[10-1000nm])



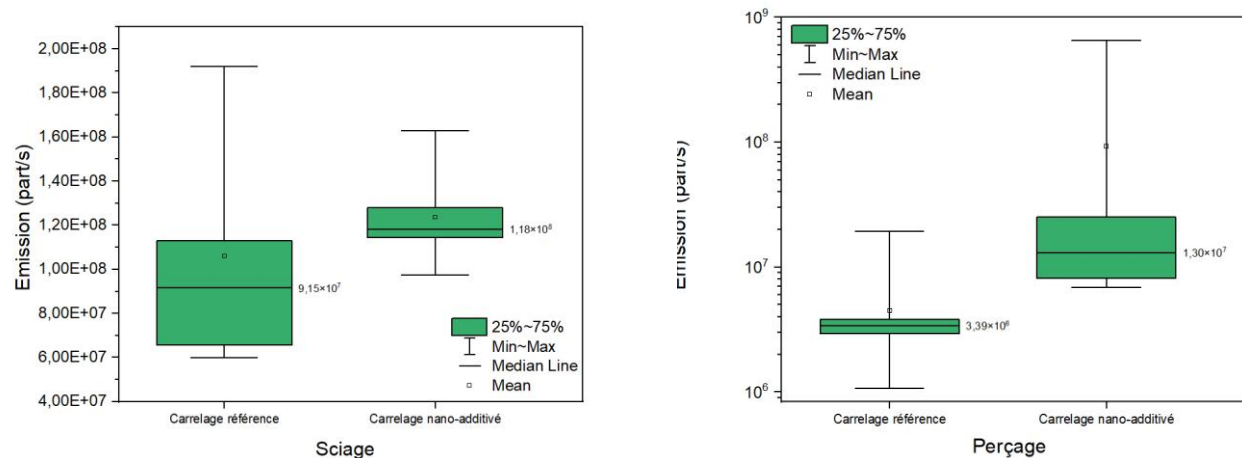
Profil granulométrique lors du ponçage des différentes peintures (COP Grimm[300-20000nm])

➔ De façon similaire à l'analyse en masse, il apparaît une évolution des émissions particulaires en nombre en fonction de la nature du matériau.

Pour les peintures nano-additivées neuves et vieilles, deux modes à 0,3 μm et 1 μm sont observés. Un mode à 3 μm est constaté pour les trois types de peinture.

Emission particulaire en nombre (sciage et perçage)

Les émissions particulaires lors des activités de sciage et de perçage, sur différents types de carrelage, sont représentées ci-dessous à travers les taux d'émission.

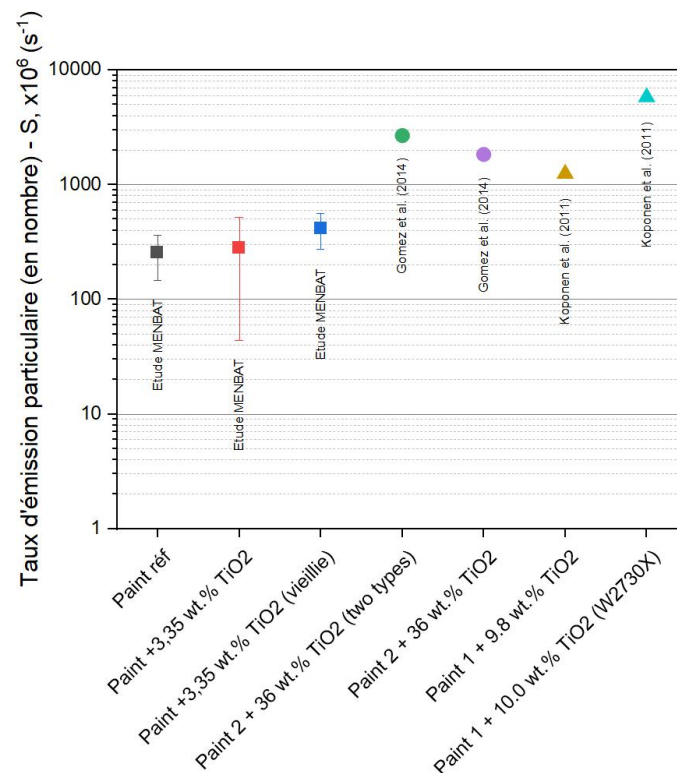


Taux d'émission particulaire lors du sciage et perçage des différentes carrelage (CNC[10-1000nm])

➔ De façon similaire à l'analyse en masse, il apparaît une évolution des émissions particulaires en nombre en fonction de la nature du matériau.

Comparaison des taux d'émission avec les données de la littérature

- / Les taux d'émission relevés lors des activités de ponçage sont mis en regard des travaux de Gomez *et al.*, 2014 et Koponen *et al.*, 2011 qui ont également caractérisés des activités de ponçage de peintures nano-additivées.



➔ Il est observé une différence significative d'environ $1 \log_{10}$. Ce constat est probablement lié:

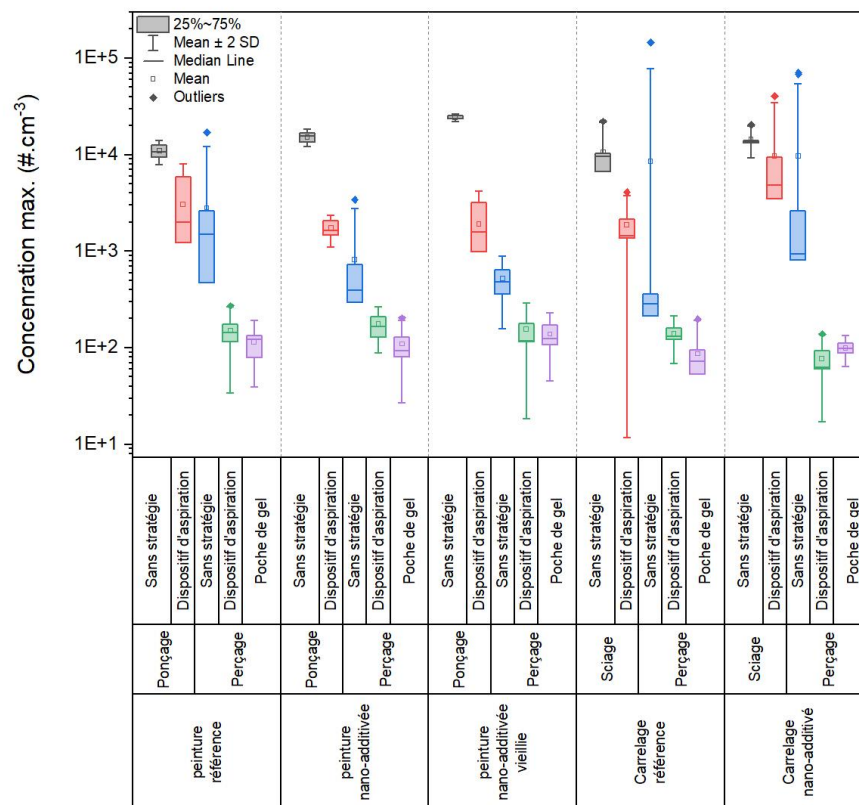
- Aux pourcentages massiques de TiO₂ très différents (3,35%wt, 10%wt et 36%wt),
- Epaisseur de la couche de peinture,
- Mode opératoire (présence du filtre terminal dans le cadre de l'étude MENBAT – absence de filtre ou de rejet pour Koponen et al., 2011).

Grain d'abrasif similaire (240).

Comparaison des taux d'émission obtenus lors des activités de ponçage de peinture (étude MENBAT) et les travaux de Gomez *et al.*, 2014 et Koponen *et al.*, 2011

Impact des stratégies sur les émissions en nombre

Les émissions particulaires en masse ont été évaluées lors de la mise en œuvre de différentes stratégies visant à limiter l'émission particulaire.



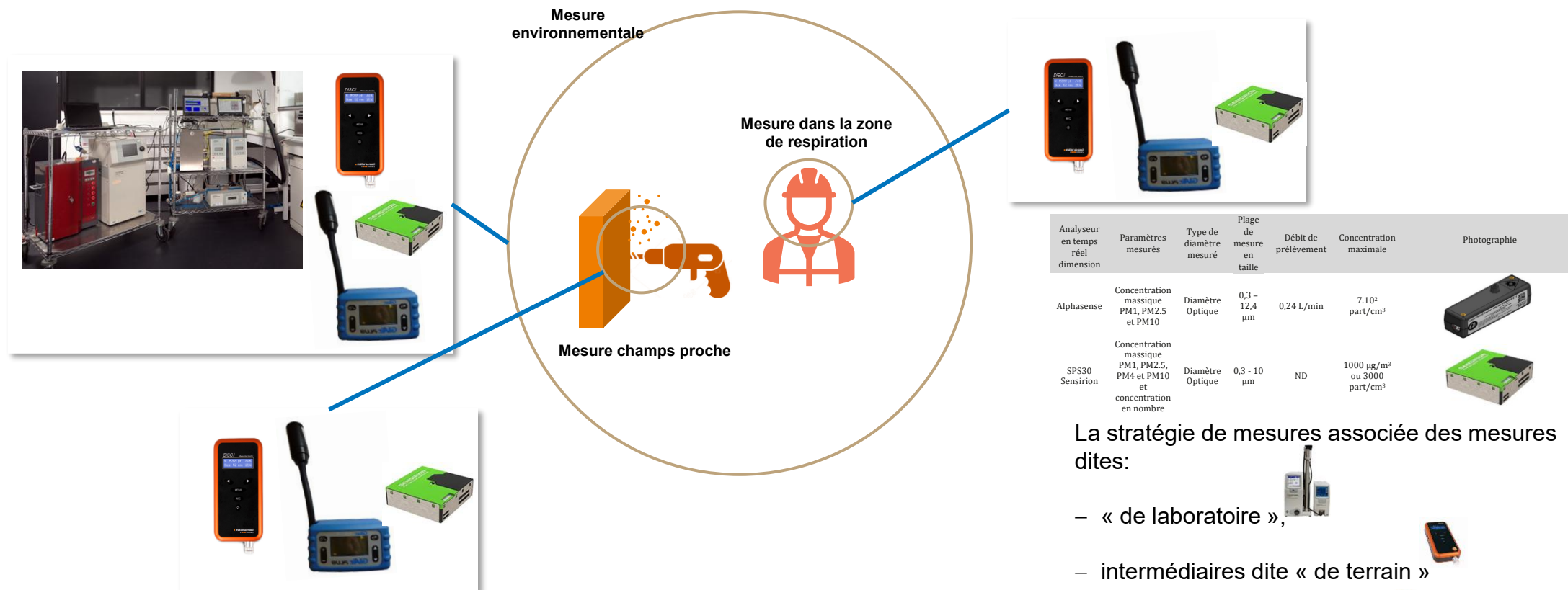
➔ L'impact le plus significatif est observé pour l'aspiration à la source lors des activités de ponçage (99%). Au global, en considérant la concentration maximale observée, la stratégie par « aspiration à la source » a une efficacité de $93\% \pm 4\%$. L'usage de poche de gel pour le perçage permet un abaissement de la concentration max. de $76\% \pm 31\%$.

Questions...

- ⇒ **Quel est le niveau d'exposition aux nano-objets d'un opérateur?**
- ⇒ **Quel est l'impact de différentes stratégies visant à limiter l'émission particulaire su' l'exposition de l'opérateur?**
- ⇒ **Une stratégie de mesure bas coût déployable *in situ* est-elle pertinente?**

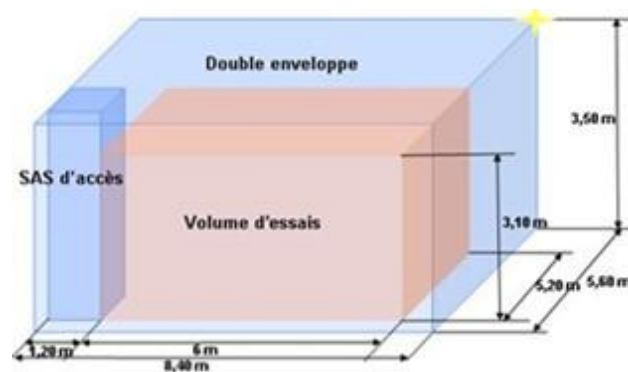
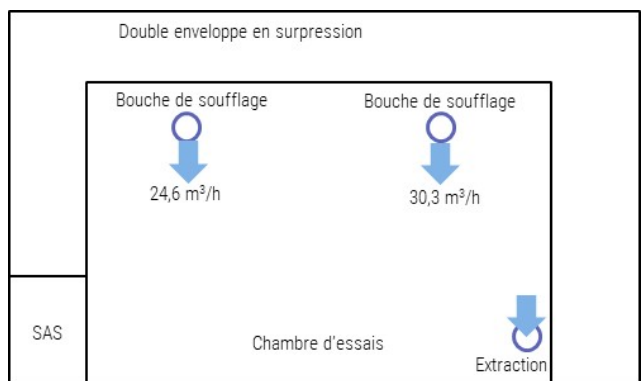
Stratégies de mesures en situation réaliste

La stratégie de mesures se basera sur le guide Français (Revue HST ND 2355 - 226 - 12, 2012), sur le guide OCDE (ENV/JM/MONO(2015)19) ainsi que sur la norme NF EN 17058 (Exposition sur les lieux de travail - Évaluation de l'exposition par inhalation aux nano-objets et à leurs agrégats et agglomérats - 2018).



Description de l'environnement contrôlé

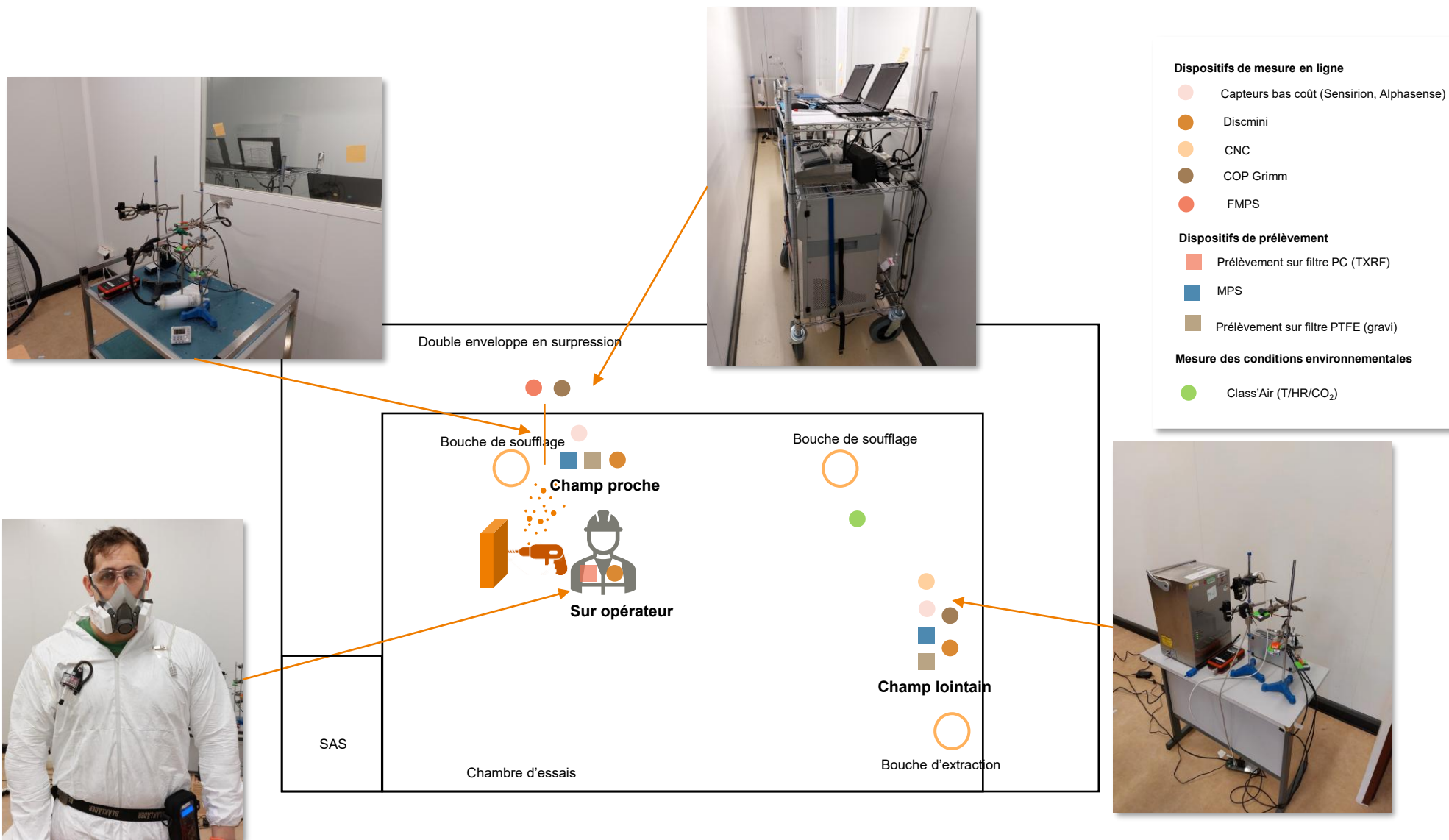
ASTERIA permet de simuler des scénarios d'aérocontamination sous différents modes de ventilation. La ventilation de l'enceinte est assurée par une centrale de traitement d'air.



- / Caractéristiques de l'enceinte ASTERIA
- Hauteur sous plafond : 3,1 m,
 - Largeur : 5,20 m,
 - Longueur: 6 m,
 - Volume intérieur : $\sim 100 \text{ m}^3$,
 - Taux de renouvellement d'air: $\sim 0,5 \text{ h}^{-1}$.

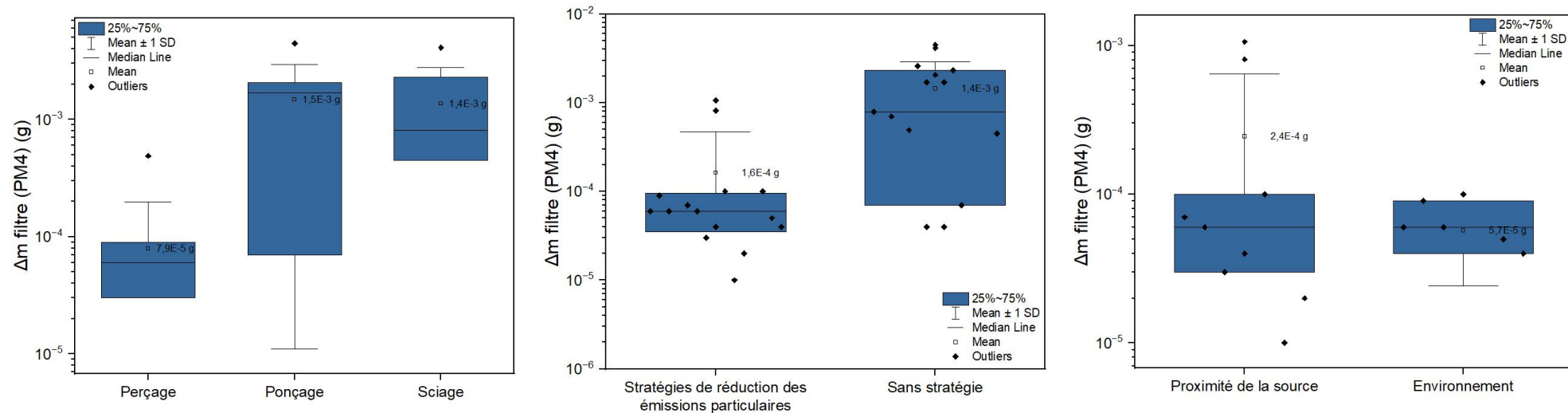
à gauche, vue d'en haut de l'enceinte Astéria, avec les conditions aérauliques dans la chambre d'essais ; à droite, vue 3D de l'ensemble de l'enceinte Astéria

Instrumentation de l'environnement contrôlé



Analyse des prélèvements massiques

/ Les résultats issus des prélèvements sur filtre à proximité du terme source et dans l'environnement, pour analyse gravimétrique, sont synthétisés ci-dessous:

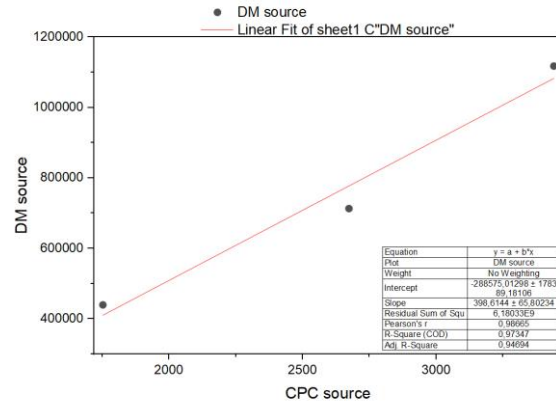


➔ L'activité de ponçage est la plus émettrice en particules (PM4), avec une forte variabilité. Logiquement, les émissions particulaires (PM4) sont nettement réduites, de l'ordre d'1 log10, lorsque les stratégies de réduction des émissions (aspiration et poche de gel) sont mises en œuvre.

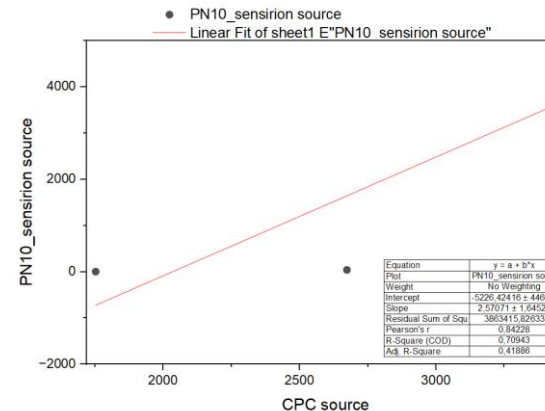
À proximité de la source, la concentration est très variable contrairement à la mesure environnementale. L'exposition est en moyenne 4 fois plus élevée à proximité de la source, soit $2,4 \cdot 10^{-4}$ g (médiane équivalente). L'exposition environnementale n'est pas négligeable, en moyenne $5,7 \cdot 10^{-5}$ g.

Comparaison des données entre les instruments

- / Mise en relation des données d'un instrument laboratoire (CPC) et les données provenant des instruments terrain (Discmini) et capteurs bas-coût (Sensirion).



Discmini



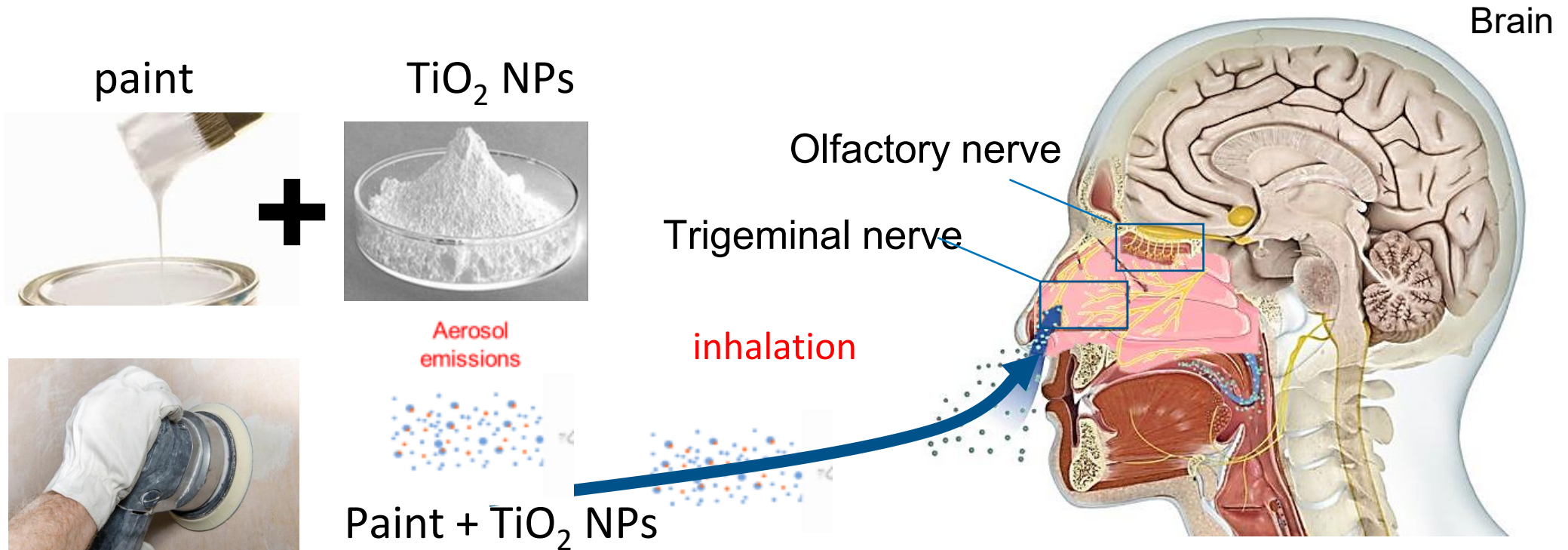
Sensirion

- ➔ Pour l'instrument terrain (Discmini) et le capteur bas-coût, les coefficients de Pearson sont respectivement de 0,98 et de 0,84.
Le capteur bas-coût Sensirion peut être intégrer à une stratégie de mesure de l'exposition d'opérateur.

Question

IMPACT SUR LE CERVEAU DES PARTICULES LIBÉRÉES PAR LES MATÉRIAUX NANOCOMPOSITES?

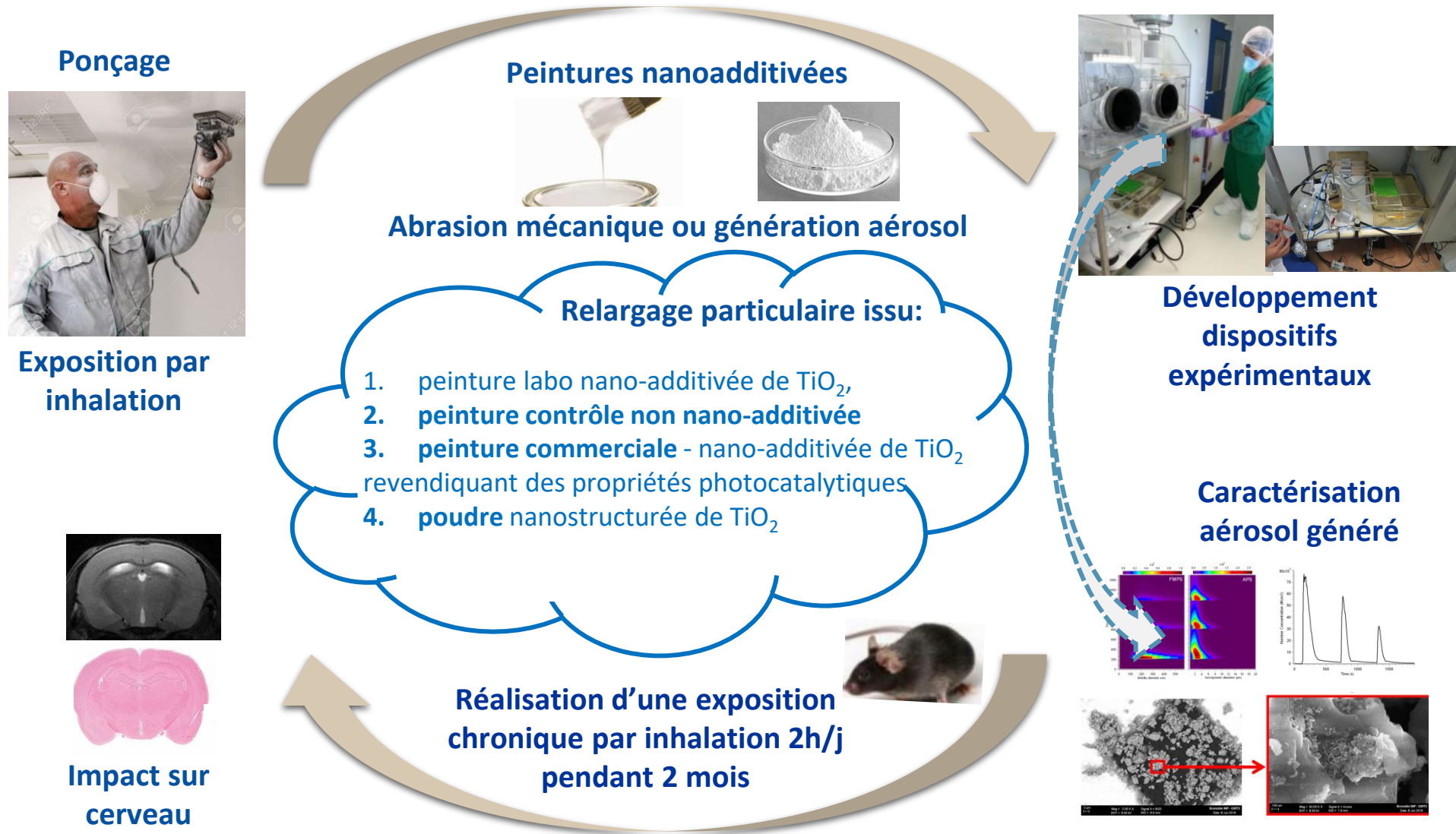
The case of a release from nano-additived paints with TiO_2 NPs during abrasion



Aerosols released from sanding

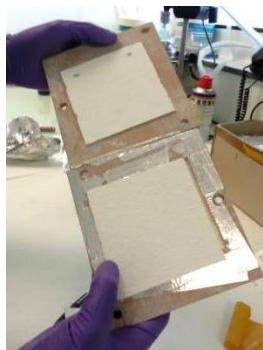
Potential impact on the nervous system ?

Démarche

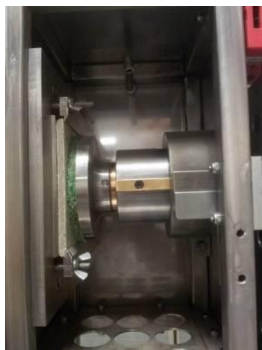


Dispositif d'exposition

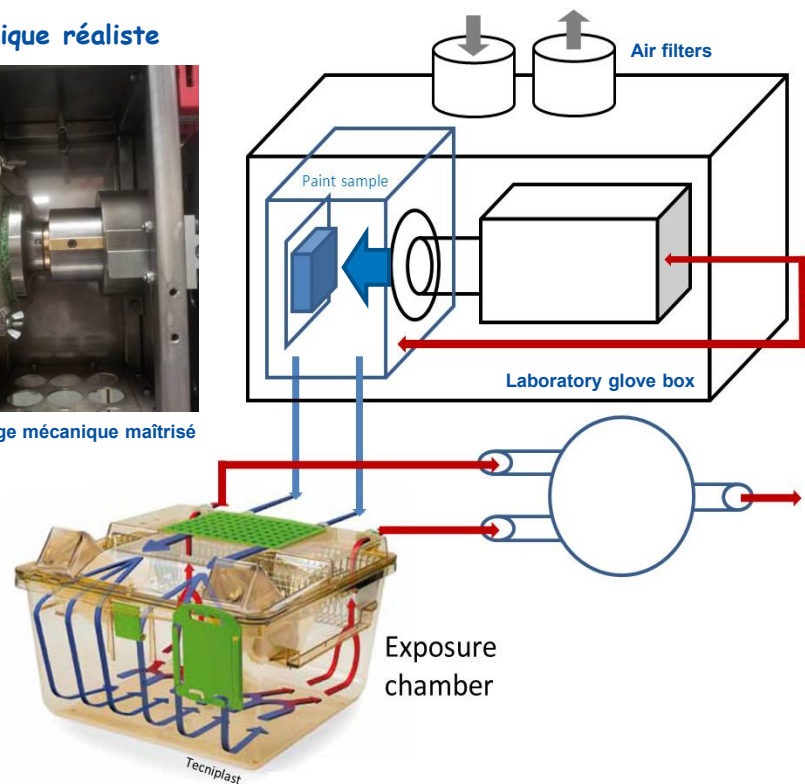
Sollicitation mécanique réaliste



Echantillon de peinture
(10 x 10 cm)
Masse déterminée



Ponçage mécanique maîtrisé



Dry air flow in the abrasion
chamber during 1 min

Material abrasion
during 5s (2bars/13Hz)

10 min

10 min

10 min

Time



Exposition par inhalation **sans anesthésie**, **sans contention**,
utilisation d'une **cage usuelle** (limitation du stress).

Evaluation de l'impact sanitaire

In vivo
suivi longitudinal

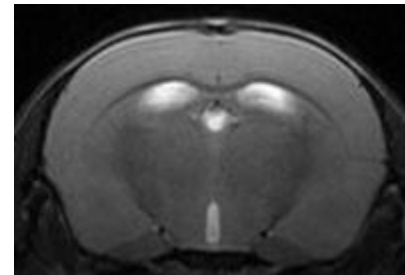
Suivi pondéral



Performances Locomotrices (rotarod)



Intégrité cérébrale (IRM)

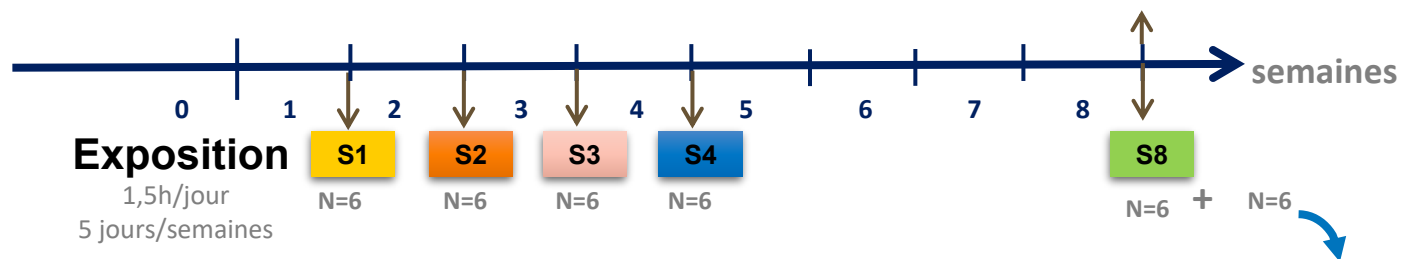


C57Bl/6

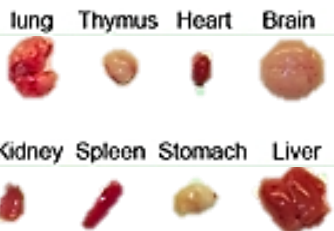
36 souris femelles
8 semaines

Exposition

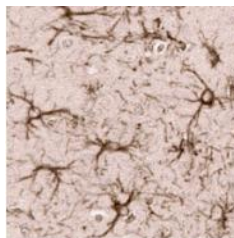
1,5h/jour
5 jours/semaines



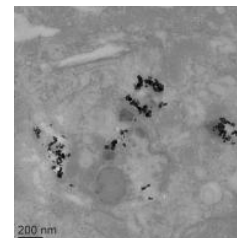
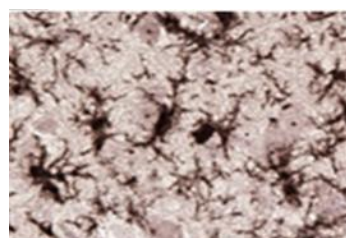
Post-mortem
suivi longitudinal



Poids des organes



Histopathologie



MET



Biodistribution

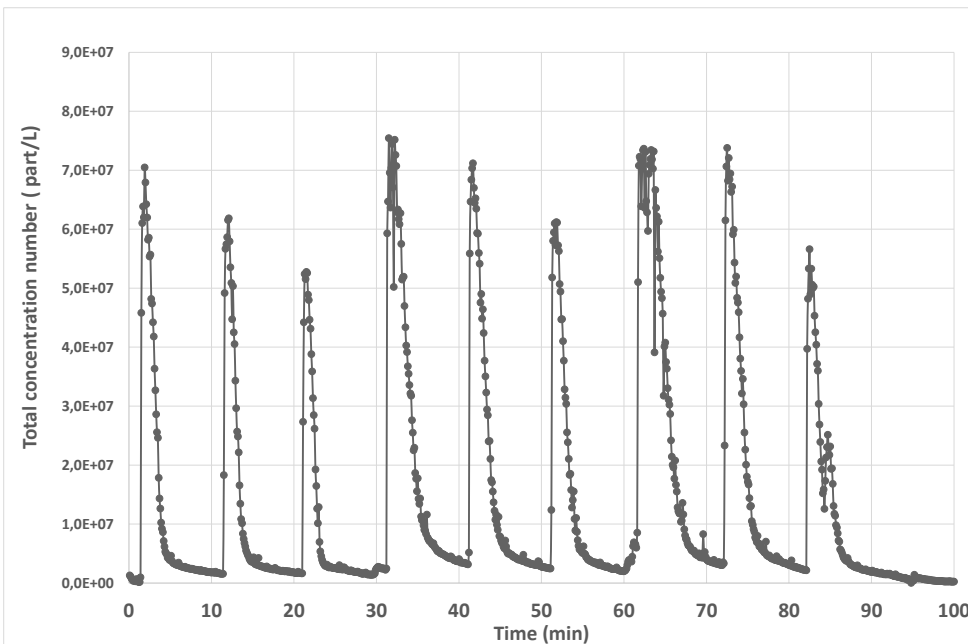
Caractérisation de l'aérosol

peinture labo nano-additivée de TiO_2



aerosol number concentration

$$1.7 \pm 0,4 \cdot 10^7$$

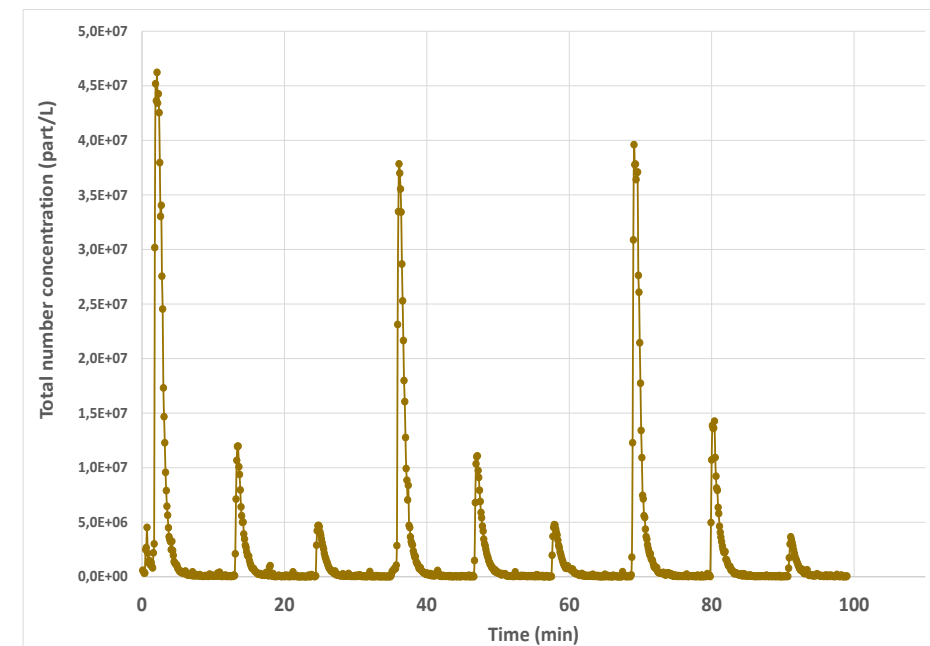


peinture contrôle NON nano-additivée



aerosol number concentration

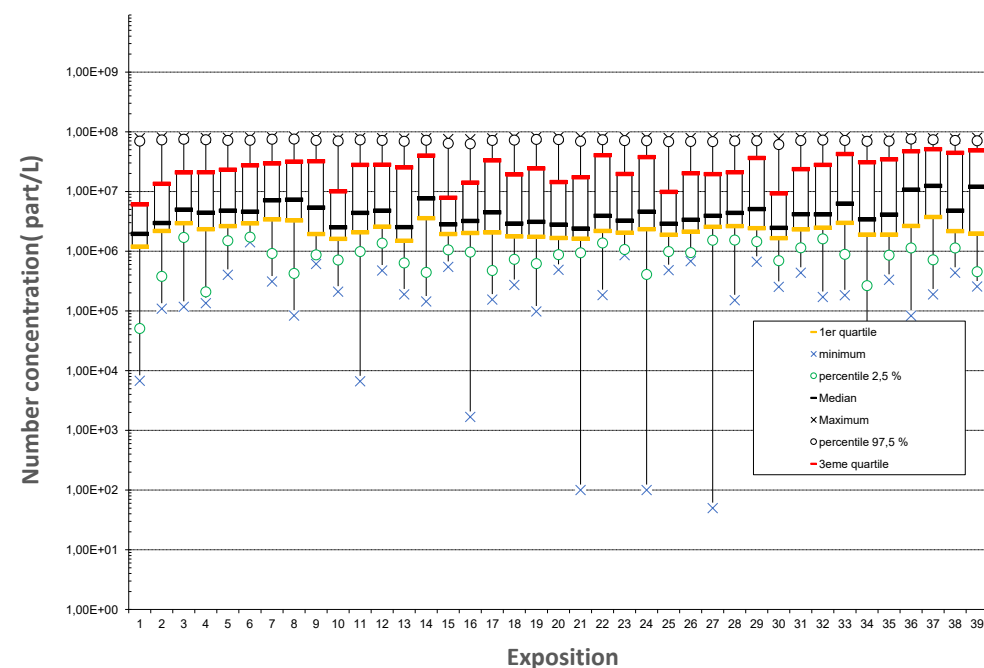
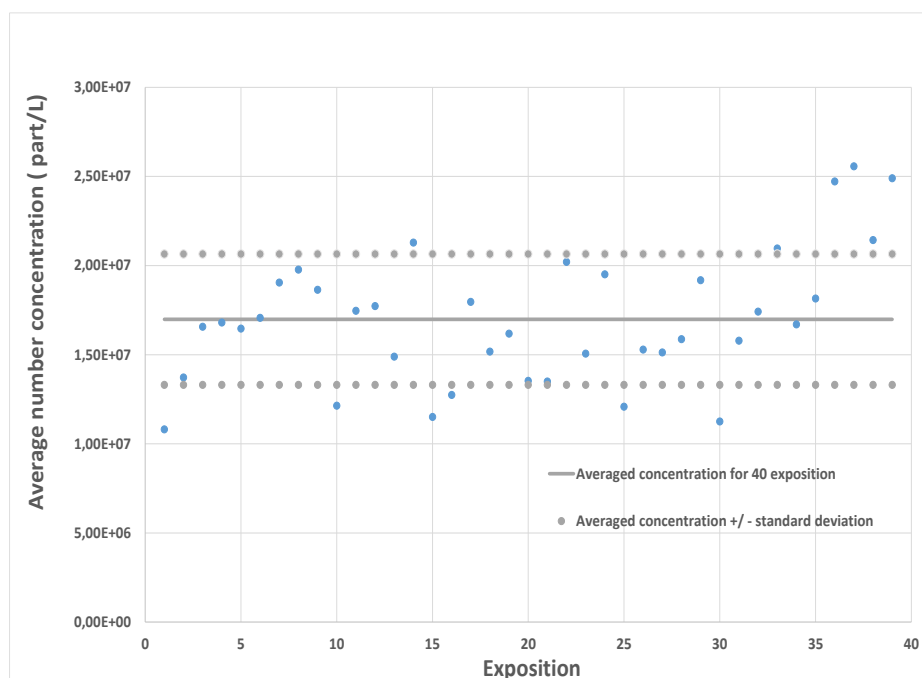
$$1.96 \pm 0.73 \cdot 10^6$$



Emitted aerosol (part/L) between 0.3 and 20 μm for 40 expositions

Reproductibilité de l'émission d'aérosol

Peinture labo nano-additivée de TiO_2



The emission in term of averaged number concentration of particules between 0.3 and 20 μm for 40 expositions is very reproducible all along the 40 daily exposures

Résultats

➡ État général / croissance

Pas d'anomalie comportementale ; croissance normale des souris. Aucune différence de poids entre lots

➡ Fonction locomotrice (rotarod)

Diminution des performances au fil du temps.

Effet significatif de la durée d'exposition.

Suggestion d'un effet neurotoxique chronique des poussières contenant des NOAAs de TiO_2 .



RUN

➡ IRM et microstructure cérébrale

Pas d'anomalie anatomique ni de barrière hématoencéphalique.

Changements microstructuraux détectés (DTI) dans le groupe "Peinture Modèle" (RNTX1), surtout dans le système olfactif.

➡ Analyses post-mortem

Pas d'anomalie globale (poids des organes).

GFAP (astrocytes) : pas de surexpression significative.

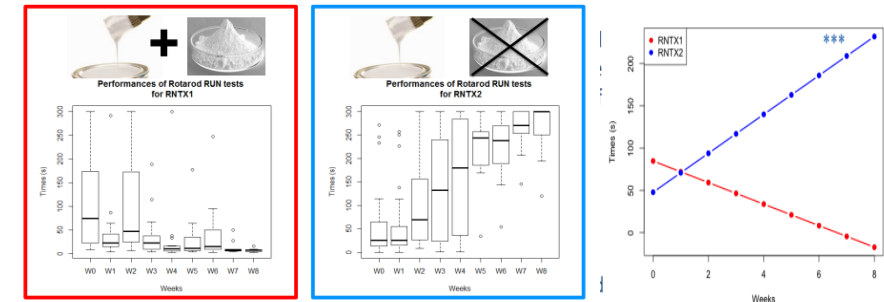
Iba-1 (microglie) : Activation plus marquée dans bulbe olfactif, cortex, hippocampe.

Indices de neuroinflammation hétérogène.

➡ Présence de titane (ICP-MS)

Accumulation faible mais significative dans le cerveau pour RNTX1 et RNTX3.

Concentrations plus élevées dans la moelle épinière → indication de translocation neuronale.



➡ anna.bencsik@anses.fr
marlene.wiart@univ-lyon1.fr

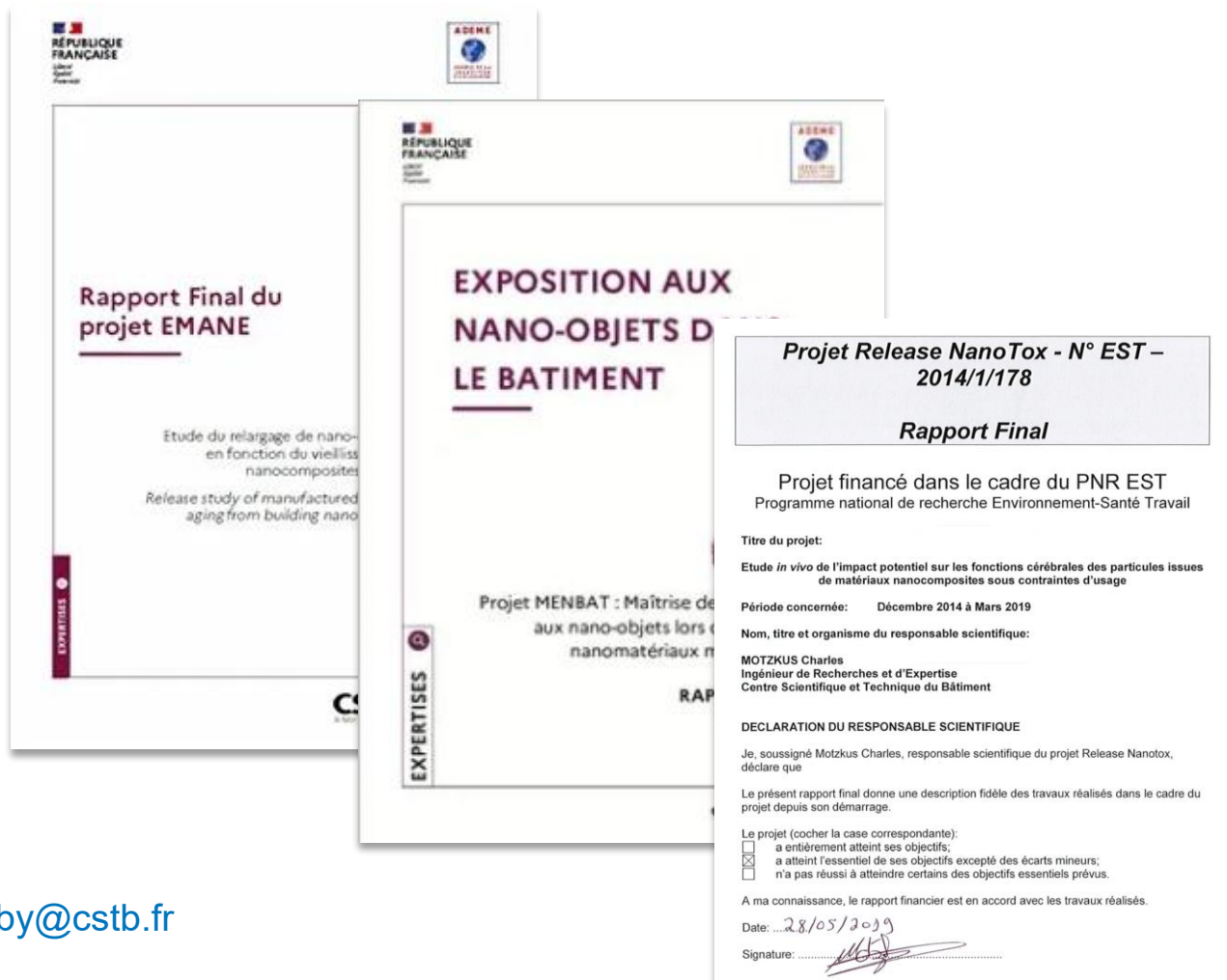
Merci

Contact :

Stéphane DELABY

Tel. : 07 60 82 07 68

Mail : stephane.delaby@cstb.fr



Emilie ANTIER (LNE),
Sébastien ARTOUS (CEA),
Anass BENAYAD (CEA),
Anna BENCSIK (ANSES),
Pauline BORNE (LNE),
Carine CHIVAS-JOLY (LNE),
Fanny DAMON (LNE),
Stéphane DELABY (CSTB),
François GAIE-LEVREL (LNE),
Arnaud GUIOT (CEA),
Bruno LAGUITTON (CEA),
Latifa LAKHDAR (LNE),
D. Le GUELLEC (ANSES),
Marc LELONG (LNE),
Tatjana MACE (LNE),
Stéphane MANIXAY (ANSES),
Maurel Tossa MEDETONGNON (LNE),
Eric MORIGNAT (LNE),
Lucas PINARCI (CSTB),
Sébastien RITOUX (CSTB),
T. ROLLAND (ANSES),
Joséphine STECK (CEA),
Yacine TAOUIS (CSTB),
Marlène WIART (CARMEN Lab Inserm)