

RAPPORT D'ÉTUDE
DRC-19-180746-04536B

12/12/2020

**Campagnes de mesures dans l'air de substances
à l'état nanoparticulaire à l'émission et autour
d'incinérateurs.**

*Annule et remplace le rapport DRC-19-180746-
04536A*

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

**Campagnes de mesures dans l'air de substances à l'état
nanoparticulaire à l'émission et autour d'incinérateurs.**

**Ministère de la transition écologique et solidaire
Tour Séquoïa**

A l'attention de M. Patrice ROUAIX

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Olivier Aguerre-Chariol, Isaline Fraboulet, Adrien Dermigny, Nicolas Karoski, Laurent Meunier,
Jessica Queron, Frédéric Tognet

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.




	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	I. FRABOULET/ O. AGUERRE-CHARIOL	H. BIAUDET	M. DURIF
Qualité	Ingénieurs au Pôle « Caractérisation de l'Environnement » Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité « Méthodes & Développements en analyses pour l'environnement » Direction des Risques Chroniques	Responsable du Pôle « Caractérisation de l'Environnement » Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. GLOSSAIRE	7
2. INTRODUCTION.....	8
2.1 Contexte.....	8
2.2 Objectifs de l'étude.....	8
3. DESCRIPTION DES SITES AYANT FAIT L'OBJET DE CAMPAGNES DE TERRAIN	10
3.1 Unité d'incinération d'Ordures ménagères : site A.....	10
3.2 Unité d'incinération de déchets spéciaux : site B.....	10
3.3 Unité d'incinération d'ordures ménagères : site C.....	10
4. MATERIEL ET METHODES.....	11
4.1 Campagne de mesures à l'émission (site A).....	11
4.1.1 Paramètres mesurés	11
4.1.2 Méthodes de mesure	11
4.2 Campagnes de mesure à l'environnement (sites A, B et C).....	14
4.2.1 Modélisation préalable.....	14
4.2.2 Systèmes de prélèvement mobiles	14
5. RESULTATS.....	16
5.1 Unité d'incinération d'Ordures ménagères : site A.....	16
5.1.1 Site UIOM A : Mesures à l'émission.....	16
5.1.2 Site UIOM A : mesures environnementales	25
5.1.3 Conclusion concernant l'UIOM A.....	29
5.2 Unité d'incinération de déchets spéciaux : Site B	29
5.2.1 Site B : mesures environnementales.....	29
5.2.2 Conclusion concernant l'unité d'incinération B.....	32
5.3 Unité d'incinération d'Ordures ménagères : site C.....	33
5.3.1 Site UIOM C : mesures environnementales	33
5.3.2 Conclusion concernant l'unité d'incinération C.....	36
6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....	37

1. GLOSSAIRE

Aérosol	: ensemble de fines particules, solides ou liquides, d'une substance chimique ou d'un mélange de substances chimiques, en suspension dans un milieu gazeux
ICP	: spectroscopie d'émission à plasma induit
MET	: microscopie électronique en transmission
MPS	: Mini Particle Sampler, préleveur d'aérosols pour grilles MET
Nm ³ = m ³ ₀	: volume ramené aux conditions normales de température (0°C) et de pression (1013 mbars)
PNSE	: Plan National Santé-Environnement
PM	: Particulate matter
PM ₁₀	: particules en suspension de diamètre médian inférieur à 10 µm
PM _{2,5}	: particules en suspension de diamètre médian inférieur à 2,5 µm
PM ₁	: particules en suspension de diamètre médian inférieur à 1 µm
UIOM	: unité d'incinération d'ordures ménagères

2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE

Les nanotechnologies constituent un domaine actuellement en plein essor. Les matériaux formulés à l'échelle nanométrique possèdent en effet des propriétés spécifiques ou des performances améliorées. Ils trouvent aujourd'hui des applications étendues dans de nombreux secteurs industriels (renforcement mécanique de polymères, électronique, cosmétique, pharmacie, catalyse...). Ces nouveaux matériaux peuvent cependant comporter de nouveaux risques pour les populations et l'environnement, qu'il est souhaitable d'apprécier et de maîtriser tout au long du cycle de vie. La caractérisation des expositions est une première étape vers la connaissance de ces nouveaux risques.

L'essor des nanotechnologies concernant également des produits à destination du grand public, il est donc logique d'avoir une augmentation de la fraction de substances à l'état nanoparticulaire en fin de vie, dans les différentes filières d'incinération.

La France a mis en place une obligation annuelle de déclaration de production, importation et distribution sur son territoire de substances à l'état nanoparticulaire.

Une des actions du PNSE3 est de mener des campagnes de caractérisation de la présence de telles substances dans l'environnement de sites industriels producteurs ou transformateurs. Dans ce cadre, l'INERIS a déjà conduit 6 campagnes de terrain de ce type dont 5 en France, en mettant en œuvre un ensemble de méthodes de mesures destiné à caractériser ces substances dans les émissions et dans les milieux environnementaux autour des sites.

Ces 6 campagnes avaient pour but d'estimer l'empreinte environnementale (sous forme de concentrations en nano-objets ainsi que leurs agrégats et agglomérats, dits NOAA) dans les principaux compartiments environnementaux qui sont l'air, l'eau, les sédiments et les sols.

Concernant l'air ambiant et les dépôts atmosphériques totaux, l'approche générale a consisté, lors de ces 6 campagnes, à échantillonner les concentrations présentes en différents points autour du site. La modélisation atmosphérique des rejets canalisés réalisée à l'aide d'un modèle simple de type gaussien (ADMS version 5.2) permet en première approche d'identifier les zones d'impact potentiel des particules fines ($PM_{2.5}$).

Les mesures aux émetteurs permettent d'évaluer la quantité de substances nanoparticulaires émises ainsi que leur nature chimique, morphologie et taille. Elles peuvent aussi permettre d'identifier un traceur (chimique ou morphologique) qui facilitera l'identification des substances dans les prélèvements environnementaux.

2.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les incinérateurs sont susceptibles d'émettre des substances à l'état nanoparticulaire au cours de leur fonctionnement, soit par transfert direct à l'émission d'une nanostructure préexistante, soit, par transformation thermique des matériaux en cours de combustion (rapport Nanofluegas « Caractérisation et réduction des émissions particulières issues de l'incinération des déchets contenant des nanomatériaux manufacturés » : O. Le Bihan, A. Joubert, D. Vendetti, T. Tran, G. Ounoughene, B. Debray, S. Durécu, L. Le Coq. », juillet 2014). Ceci signifie que des UIOM non spécialisées dans le traitement de déchets industriels dangereux pourraient elles aussi émettre des substances à l'état nanoparticulaire.

L'objectif de la présente étude est d'acquérir des connaissances sur les substances à l'état nanoparticulaire présentes dans l'air autour d'incinérateurs de différentes typologies : UIOM et centres de traitement de déchets industriels dangereux. Pour ce faire, il a été choisi de caractériser les émissions particulières en rejet canalisé et de comparer ces émissions avec les particules retrouvées dans l'air ambiant autour des sites.

Cette démarche respecte les principes développés et mis en œuvre pendant les 6 campagnes de terrain menées depuis 2013 par l'INERIS autour de sites industriels.

Son caractère exploratoire nous a conduits dans un premier temps à privilégier l'approche suivante :

- une caractérisation des émissions sur un premier UIOM menée simultanément avec une recherche des phases particulières présentes à l'environnement (décembre 2017);
- uniquement la recherche de phases particulières à l'environnement sur le deuxième UIOM et sur le site d'incinération de déchets spéciaux (janvier 2018).

La modélisation atmosphérique a été utilisée dans tous les cas pour prédire les distances de retombées.

Le retour d'expérience sur les résultats de cette première phase doit permettre d'envisager les suites à donner et notamment d'évaluer la pertinence et la configuration de nouvelles campagnes de terrain.

3. DESCRIPTION DES SITES AYANT FAIT L'OBJET DE CAMPAGNES DE TERRAIN

3.1 UNITE D'INCINERATION D'ORDURES MENAGERES : SITE A

Cette unité traite les déchets d'une agglomération du Sud-Ouest de la France. Il s'agit en grande majorité de déchets ménagers.

Le traitement des fumées est de type sec avec deux cheminées. Il fait intervenir un électrofiltre et un filtre à manche PTFE avec décolmatage à air comprimé.

Les paramètres d'entrée utiles pour la modélisation atmosphérique de la zone de retombée du panache sont les suivants (données transmises par l'exploitant) :

Température de sortie : 218 °C

Humidité relative : 7 %

Vitesse d'éjection en sortie de cheminée : 18 ms⁻¹

Hauteur des cheminées : 58 m

Diamètre des cheminées : 1 m

Le site a fait l'objet d'une campagne de terrain complète (émission + environnement) en décembre 2017.

3.2 UNITE D'INCINERATION DE DECHETS SPECIAUX : SITE B

Cette unité, basée dans le Sud-Ouest de la France, possède deux lignes d'incinération :

- Une ligne à traitement sec pour déchets dangereux
- Une ligne qui utilise un traitement humide par laveurs et dont le panache est très humide.

Compte tenu de la spécificité des entrants, les métaux sont surveillés à l'émission (ce qui n'est pas le cas des UIOM).

Les paramètres d'entrée utiles pour la modélisation atmosphérique de la zone de retombée du panache sont les suivants :

- Température de sortie : 72 °C
- Humidité relative : 32 %
- Vitesse d'éjection en sortie de cheminée : 14 m.s⁻¹
- Diamètre cheminée : 1,12 m

Le site a fait l'objet d'une campagne de terrain environnement en décembre 2017.

3.3 UNITE D'INCINERATION D'ORDURES MENAGERES : SITE C

Cette unité, basée dans le Sud-Ouest de la France, traite majoritairement des déchets ménagers. Elle possède deux cheminées.

Les paramètres d'entrée utiles pour la modélisation atmosphérique de la zone de retombée du panache sont les suivants :

- Température de sortie : 60 °C
- Humidité relative : 21 %
- Vitesse d'éjection en sortie de cheminée : 18-20 ms⁻¹
- Hauteur des deux cheminées : 23 m
- Diamètre des deux cheminées : 1,16 m

Le site a fait l'objet d'une campagne de terrain environnement en janvier 2018.

4. MATERIEL ET METHODES

L'ensemble des prélèvements et mesurages réalisés sur site ont été mis en œuvre par l'INERIS.

4.1 CAMPAGNE DE MESURES A L'EMISSION (SITE A)

4.1.1 Paramètres mesurés

Les mesurages effectués sur les rejets atmosphériques sont les suivants :

- granulométrie en nombre entre 7 nm et 2,5 µm, répartition en 13 tranches après dilution de l'effluent,
- concentration massique en fractions particules PM_{2,5}, PM₁, PM_{0,5} et PM_{0,2} par prélèvements manuels impacteur DGI après dilution de l'effluent
- concentration massique en fractions particules PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, par prélèvements manuels impacteur manuel Dekati selon ISO 23210
- caractérisation par microscopie à transmission des PM_{2,5} sur grilles après dilution de l'effluent, par mise en œuvre de préleveurs MPS.
- mesurages périphériques de vitesse/débit gaz et température des gaz, pression atmosphérique.

Les espèces identifiées en microscopie électronique à transmission ont été par la suite quantifiées dans les prélèvements Dekati et DGI.

Les prélèvements Dekati et DGI ayant été réalisés dans des conditions de matrices différentes, ils ne peuvent être considérés comme équivalents. En effet, les prélèvements Dekati sont réalisés dans le conduit sur effluent non conditionné à la température des fumées, il permet donc de collecter les espèces présentes à l'état solide dans l'aérosol. Alors que les prélèvements DGI sont effectués après dilution des fumées ce qui peut engendrer des phénomènes de condensation de la phase gazeuse, les espèces présentes sous forme solide et condensée de l'aérosol sont donc, dans ce cas, collectées. Pour une gamme de taille donnée, les concentrations massiques en particules, et déterminées après dilution sont donc susceptibles d'être plus importantes après dilution (prélèvement DGI) que lors d'un prélèvement sur gaz brut à chaud (prélèvement DEKATI). Cette observation est également valable pour les espèces présentes sous forme solide, liquide et gazeuse dans l'aérosol, telles que les métaux. Elle vaut aussi pour les prélèvements MPS qui sont également effectués après dilution.

4.1.2 Méthodes de mesure

4.1.2.1 DETERMINATION DES CONCENTRATIONS MASSIQUES EN PM_{10/2,5/1} SOLIDES PAR PRELEVEMENT A CHAUD SELON ISO 23210 ET ANALYSE DES ELEMENTS CU, CR, FE, NI, ZN SUR LES FRACTIONS PRELEVEES

La détermination a été effectuée au moyen d'un impacteur Dekati (figure 1). L'aérosol est prélevé de manière isocinétique « In situ » à l'aide d'une pompe équipée d'un compteur à gaz sec en plaçant l'impacteur dans le conduit. Le débit de prélèvement est de 30L/min

L'impacteur Dekati permet la caractérisation en masse des PM_{10/2,5/1} en fractionnant l'aérosol en 4 tranches et par pesée avec une balance de précision de 10 µg. La séparation par impaction est basée sur les propriétés aérodynamiques des particules. Il est équipé de filtres de quartz ou de Teflon.

Un blanc de prélèvement est réalisé par jour en chaque point, afin de vérifier la qualité des supports de prélèvements et la propreté du matériel de prélèvement. Les blancs de prélèvement sont réalisés en suivant le mode opératoire pour échantillonner, sans étape d'aspiration, ni introduction de la sonde dans le conduit.

Après minéralisation (NF-EN-14385) des filtres, le dosage de Cu, Cr, Ni a été effectué par ICP-MS (NF-EN-17294-2) et par ICP-OES (NF-EN-11885) pour Fe, Zn.

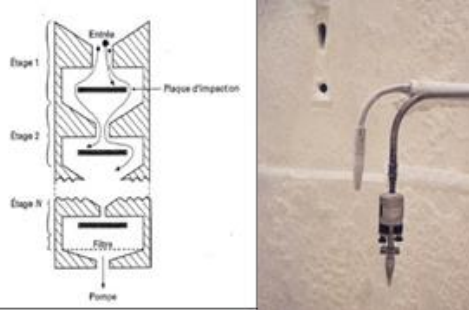


Figure 1: schéma descriptif et photo de l'impacteur Dekati

4.1.2.2 DETERMINATION DE LA GRANULOMETRIE MASSIQUE ET EN NOMBRE DES PM_{2,5} SOLIDES ET CONDENSABLES APRES DILUTION ET ANALYSE DES ELEMENTS CU, CR, FE, NI, ZN SUR LES FRACTIONS PRELEVEES

SYSTEME DE DILUTION

Les essais sur site ont été réalisés au moyen d'un cyclone positionné dans le conduit, combiné à une double étape de dilution appliquée en amont des mesurages et prélèvements. Le système utilisé est un Dekati FPS (Fine Particle Sampler).

La sonde de prélèvement du FPS est chauffée et équipée d'un cyclone (figure 2) dont le diamètre de coupure est compris entre 2, 5 et 10 µm.

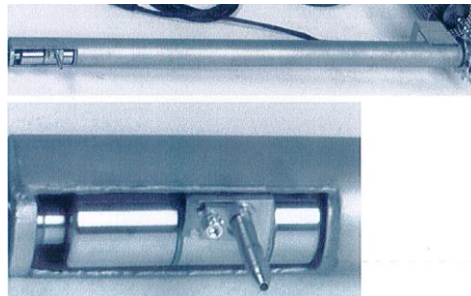


Figure 2 : Photographie de la sonde chauffée et du cyclone

En aval des modules de dilution du FPS, des prélèvements manuels et des mesurages en continu ont été réalisés (figure 3).

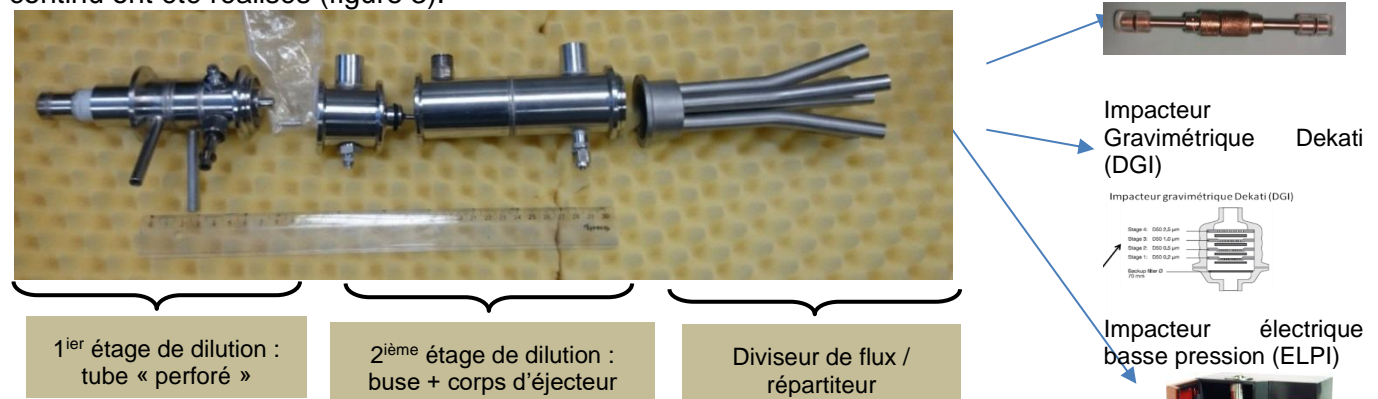


Figure 3 : Schéma du système de dilution connecté aux systèmes de prélèvement et de mesurage en continu

Afin d'éviter toute condensation de l'aérosol avant prélèvement, une première étape de dilution est réalisée à une haute température, la seconde étape de dilution permet de ramener les conditions de température, d'humidité et de concentrations à un niveau compatible avec les gammes d'utilisation des systèmes de mesurage et de prélèvement.

Le diviseur/répartiteur de flux permet d'alimenter plusieurs instruments en parallèle. Chaque instrument est équipé d'une pompe qui permet de réaliser le prélèvement au débit approprié. Une des sorties du répartiteur est conservée libre à pression atmosphérique afin de permettre une compensation des pressions et garantir des flux constants dans les différents appareils.

Le taux de dilution est déterminé en continu pendant les essais, par le suivi, en amont et en aval de la dilution, du taux de CO₂, gaz traceur présent dans l'effluent.

4.1.2.3 MESURES EFFECTUEES EN AVAL DU SYSTEME DE DILUTION

CONCENTRATION MASSIQUE PAR IMPACTEUR DGI ET ANALYSE DES ELEMENTS CU, CR, FE, NI, ZN SUR LES FRACTIONS PRELEVEES

L'impacteur Dekati DGI (figure 4) permet la caractérisation en masse des PM_{2,5}, PM₁, PM_{0,5} et PM_{0,2} en fractionnant l'aérosol en 5 tranches et par pesée avec une balance de précision de 10 µg. Le débit de prélèvement est compris entre 70 l/min et 90 l/min. La séparation par impaction est basée sur les propriétés aérodynamiques des particules. Il est équipé de filtres de quartz ou de Teflon.

Un blanc de prélèvement est réalisé par jour en chaque point, afin de vérifier la qualité des supports de prélèvements et la propreté du matériel de prélèvement. Les blancs de prélèvement sont réalisés en suivant le mode opératoire pour échantillonner, sans étape d'aspiration, ni introduction de la sonde dans le conduit. Cinq éléments identifiés en microscopie en transmission (cf. paragraphe 6.1.1), Cu, Cr, Ni, Fe et Zn ont été quantifiés à l'émission.

Après minéralisation (NF-EN-14385) des filtres, le dosage de Cu, Cr, Ni a été effectué par ICP-MS (NF-EN-17294-2) et par ICP-OES (NF-EN-11885) pour Fe, Zn.

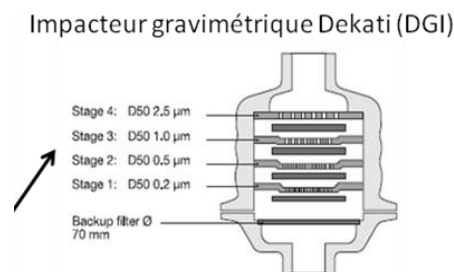


Figure 4 : Schéma descriptif de l'impacteur DGI

MICROSCOPIE DES PM_{2,5}

Les grilles de cuivre prélevées à l'émission par MPS sont analysées en MET (Microscopie Electronique en Transmission). Cet examen permet de classer les différentes particules émises par des critères de taille, morphologie et composition chimique locale. S'il y a plusieurs natures de nanoparticules émises, chacune d'elles peut être caractérisée (de manière qualitative) par sa distribution granulométrique, ses caractéristiques morphologiques et sa composition élémentaire. Cette technique a déjà été mise en œuvre sur des matrices atmosphériques concentrées (Ounoughene, 2015).

MESURAGES EN CONTINU PAR ELPI

L'impacteur ELPI (*Electrical Low Pressure Impactor*) combine le prélèvement par impaction à la détection électrique des particules, qui sont chargées par effet Corona avant d'entrer dans l'impacteur. Il permet de déterminer en temps réel la granulométrie de l'aérosol sur un large spectre de tailles (13 étages entre 7 nm et 2,5 µm). La sélection des particules les plus fines (< 0,1 µm) est réalisée en atmosphère basse pression.

4.2 CAMPAGNES DE MESURE A L'ENVIRONNEMENT (SITES A, B ET C)

4.2.1 Modélisation préalable

La modélisation réalisée ne permet pas de simuler directement les nanoparticules. En effet, les processus physiques impliqués dans le comportement des nanoparticules dans l'air présentent actuellement des verrous (estimation de la vitesse de déposition, prise en compte des processus de coagulation et de condensation) qui ne permettent pas leur modélisation à l'aide d'outils simples et rapides à mettre en œuvre, ce qui était l'objectif recherché ici. Cependant une modélisation en première approche permet d'identifier rapidement les zones de retombées de particules de diamètre 2.5 µm et donc de positionner plus judicieusement les systèmes de prélèvement en prenant l'hypothèse d'une durée de vie des nanoparticules assez faible, c'est-à-dire en considérant qu'un grossissement très rapide des nanoparticules a lieu lors de leur transfert atmosphérique.

Cette modélisation utilise les caractéristiques des émetteurs listées au paragraphe 4 et les conditions météorologiques observées au moment du prélèvement. La zone de retombée est calculée en temps réel par les modélisateurs de l'INERIS et transmise par téléphone aux opérateurs de prélèvement.

Ce type de méthode est décrit dans le guide INERIS « Surveillance dans l'air autour des installations classées : retombées des émissions atmosphériques », référencé DRC - 16 - 158882 - 12366A (rapport disponible sur le site de l'INERIS).

4.2.2 Systèmes de prélèvement mobiles

Les prélèvements ponctuels (sur filtres horaires ou sur grille MET par MPS avec des durées de quelques minutes) peuvent facilement être multipliés sur le terrain du fait de leur faible durée et de leur facilité de mise en œuvre. On peut ainsi récolter un assez grand nombre de prélèvements en situation exposée (sous le vent des émetteurs) et en situation de fond (non exposée). Ces prélèvements ponctuels sont réalisés en zones exposées et non exposées sur la base de la direction des vents conformément à la modélisation réalisée au préalable. L'intervalle de temps qui sépare les prélèvements exposés et non-exposés est réduit au maximum possible (moins d'une heure).

Les prélèvements ponctuels d'aérosols sur grille MET ont été mis en œuvre autour des sites sur une durée de quelques minutes. Ils sont ensuite analysés en MET (pour identifier la taille et la nature des particules). Ces prélèvements sont sans coupure en taille de particules. Le débit de prélèvement est de 0,3 L/min.

Des prélèvements ponctuels sont également réalisés au moyen de systèmes Nanobadge (figure 5) développés par la société PARTICLEVER. D'après PARTICLEVER, ils prélèvent la fraction alvéolaire (correspondant approximativement à une fraction PM₄) sur filtre Teflon, pendant 1 à 2 heures. Les filtres sont ensuite retournés à la société PARTICLEVER qui en effectue l'analyse élémentaire par TXRF (analyse en fluorescence X par incidence rasante). On obtient ainsi des concentrations élémentaires (par exemple en titane) dans l'air, de façon semi-quantitative (l'ensemble du processus d'analyse ne fait pas encore l'objet d'une norme). Ils ont été utilisés autour des sites avec une durée de prélèvement d'une heure.



Figure 5 : Préleveur portatif Nanobadge.

5. RESULTATS

5.1 UNITE D'INCINERATION D'ORDURES MENAGERES : SITE A

5.1.1 Site UIOM A : Mesures à l'émission

Le tableau 1 ci-dessous décrit les mesures réalisées sur les deux émetteurs du site.

Tableau 1 : mesures effectuées à l'émission sur le site de UIOM A.

Point de mesure	Jour	Période de prélèvement	Méthodes
Ligne 1	13/12/2017	10:20 à 17:30	<ul style="list-style-type: none">• Tube de Pitot : mesure de vitesse• Prélèvement DGI : Métaux dans fractions granulométriques (PM2,5/PM1/PM0,5/PM0,2)• ELPI : granulométrie en nombre• Prélèvement MPS pour observation MET• ISO 23210 : PM10/2,5/1
Ligne 2	14/12/2017	10:30 à 17:30	<ul style="list-style-type: none">• Tube de Pitot : mesure de vitesse• Prélèvement DGI : Métaux dans fractions granulométriques (PM2,5/PM1/PM0,5/PM0,2)• ELPI : granulométrie en nombre• Prélèvement MPS pour observation MET

5.1.1.1 LIMITES DE QUANTIFICATION ET BLANCS DE SITE

LIMITE DE DETECTION (LD) ET DE QUANTIFICATION (LQ)

Les LD et LQ déterminées pour les prélèvements manuels DEKATI et DGI sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Limite de détection et de quantification déterminées pour la pesée des filtres DGI

Limites de quantification DGI					
Masse (mg/filtre)	Cr (µg/filtre)	Fe (µg/filtre)	Ni (µg/filtre)	Cu (µg/filtre)	Zn (µg/filtre)
1	0,13	0,5	0,13	0,13	0,13

REGLES DE PRISES EN COMPTE DES LD ET LQ

La règle de prise en compte des LD et LQ appliquée ici est issue du document LAB REF 22 qui définit des règles pour calculer et exprimer les résultats de mesurage pour les paramètres réglementés à l'émission atmosphérique de sources fixes. Les modalités de gestion des calculs des moyennes, des sommes de composés et des flux sont définies ci-après.

Dans le cas des paramètres $PM_{0,5}$, PM_1 et $PM_{2,5}$ dont la détermination résulte d'une somme de pesées de plusieurs supports de prélèvements, la somme est calculée en prenant en compte pour chaque support :

- La valeur de la concentration si elle est supérieure à la LQ ;
- La valeur correspondant à $LQ/2$ si la concentration est comprise entre $LQ/3$ et la LQ ;
- 0 si la concentration est inférieure à $LQ/3$.

Ce calcul s'applique aux mesures et aux blancs de site.

VALEURS DE BLANCS DE SITE

Les valeurs de blancs de site exprimées en fractions granulométriques après application des règles du LAB REF 22 sont présentées dans les Tableaux 3 et 4. Le tableau 3 présente les résultats de pesée des supports de prélèvement du DGI ainsi que les résultats de l'analyse élémentaire des filtres. Le tableau 4 présente les résultats de pesée des supports de prélèvement du DEKATI ainsi que les résultats de l'analyse élémentaire des filtres. Ces résultats indiquent des niveaux de blanc de site très faibles ce qui élimine tout risque de contamination des échantillons par le système de prélèvement.

Tableau 3 : Valeurs des blancs de site impacteur DGI, Q : quartz, T :PTFE

Paramètre	Blanc de site					
	Masse (mg/filtre)	Cr (µg/filtre Quartz/PTFE)	Fe (µg/filtre Quartz)	Ni (µg/filtre Quartz)	Cu (µg/filtre Quartz)	Zn (µg/filtre Quartz)
PM _{0,2}	< LD= LQ/3 (0,3)	Q 1,05	Q 14,2/	Q 0,47	Q <LQ	Q 6,57
		T <LQ	T 8,53	T <LQ	T <LQ	T 0,82
0,2 µm < D < 0,5 µm	< LD= LQ/3 (0,3)	Q 0,97	Q 8,5	Q 0,86	Q <LQ	Q 1,32
		T 0,34	T 1,42	T <LQ	T < LQ	T <LQ
0,5 µm < D < 1 µm	< LD= LQ/3 (0,3)	Q 0,97	Q 8,5	Q 0,86	Q <LQ	Q 1,32
		T 0,34	T 1,42	T <LQ	T < LQ	T <LQ
1 µm < D < 2,5 µm	< LD= LQ/3 (0,3)	Q 0,97	Q 8,5	Q 0,86	Q <LQ	Q 1,32
		T 0,34	T 1,42	T <LQ	T < LQ	T <LQ

Tableau 4 : Valeurs des blancs de site Impacteur DEKATI, support PTFE

Paramètre	Blanc de site					
	Masse (mg/filtre)	Cr (µg/filtre)	Fe (µg/filtre)	Ni (µg/filtre)	Cu (µg/filtre)	Zn (µg/filtre)
PM ₁	< LD= LQ/3 (0,3)	0,41	6,24	0,21	<LQ	0,53
1 µm < D < 2,5 µm	< LD= LQ/3 (0,3)	0,15	1,22	<LQ	<LQ	0,14
2,5 µm < D < 10 µm	< LD= LQ/3 (0,3)	0,15	1,22	<LQ	<LQ	0,14

5.1.1.2 RESULTATS DE CARACTERISATION

CARACTERISATION MET DES PARTICULES PRESENTES DANS L'EFFLUENT

La figure 6 illustre l'aérosol prélevé sur la ligne 2. Les observations faites sur la ligne 1 sont similaires.

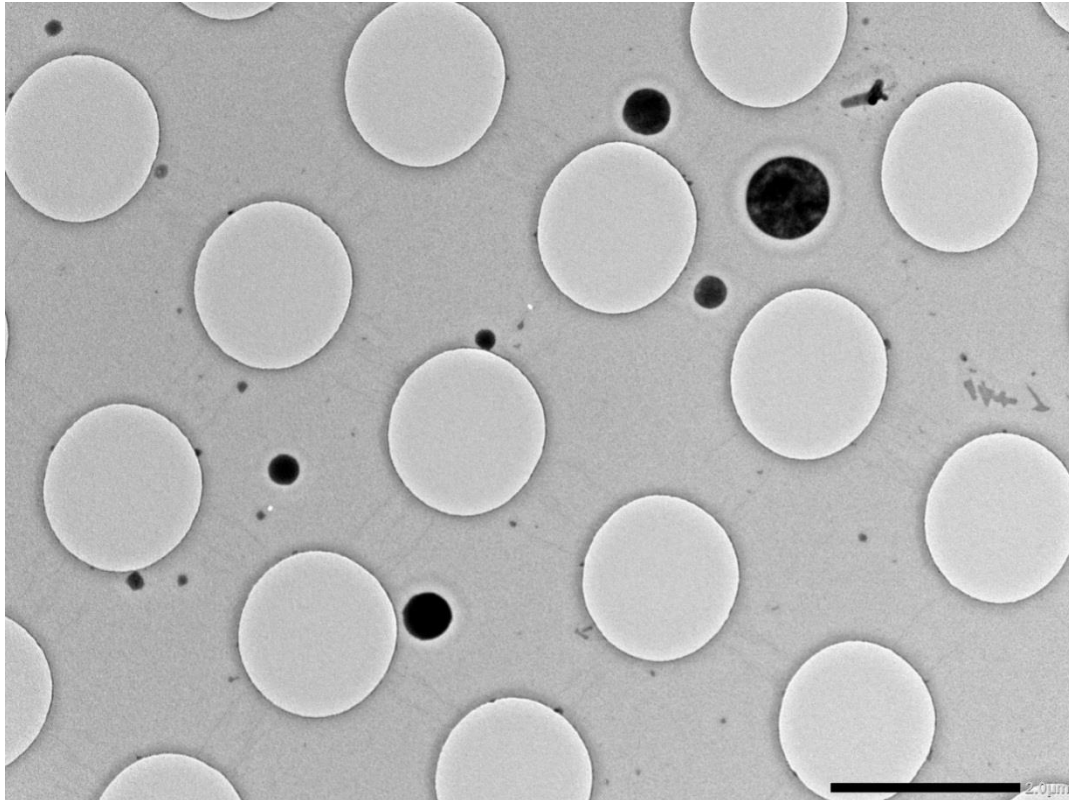


Figure 6 : Aérosol prélevé par MPS sur la ligne 2, temps de prélèvement 1 minute. Barre d'échelle : 2 μ m.

On note la présence d'objets sphériques dont la taille varie entre 50 et 500 nanomètres (une partie minoritaire de ces objets se situe donc dans la gamme nanométrique). Cette morphologie est souvent la signature de processus de condensation survenant dans la phase de refroidissement de fumées après combustion.

On trouve également (figure 7) un petit nombre de particules non-sphériques.

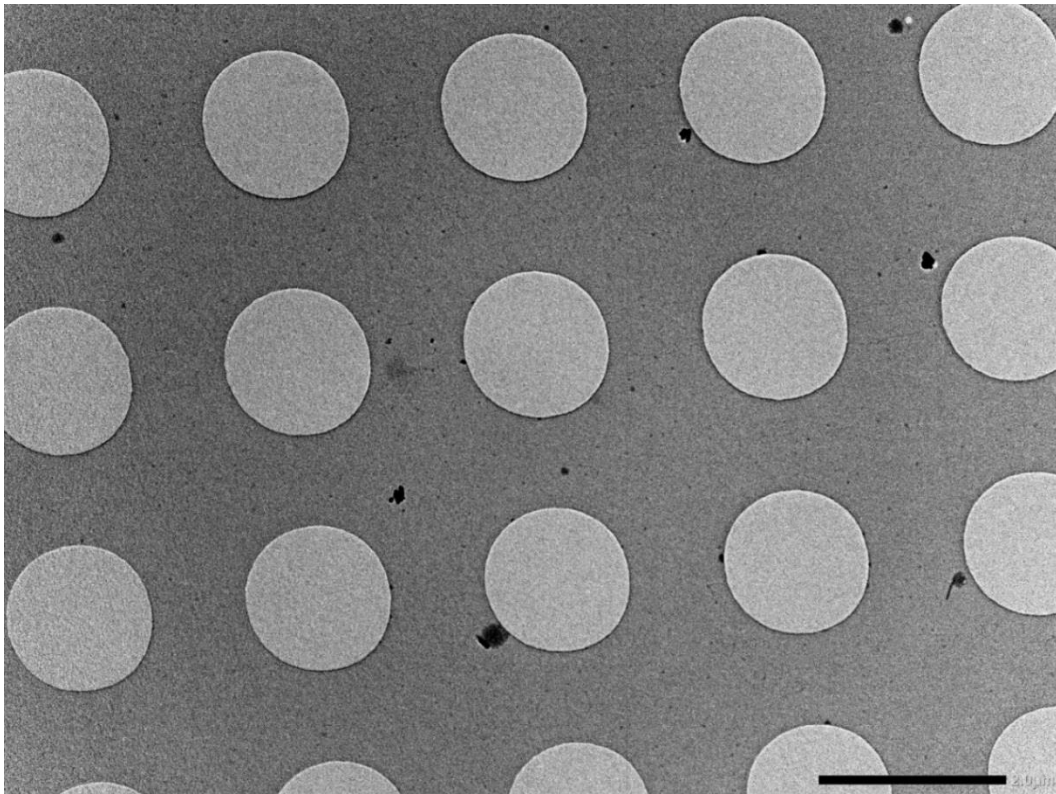


Figure 7 : Aérosol prélevé par MPS sur la ligne 1, temps de prélèvement 1 minute. Barre d'échelle : 2 μm .

La microanalyse EDS permet d'identifier la composition chimique élémentaire de ces différents objets.

La figure 8 illustre le spectre EDS obtenu sur les particules sphériques :

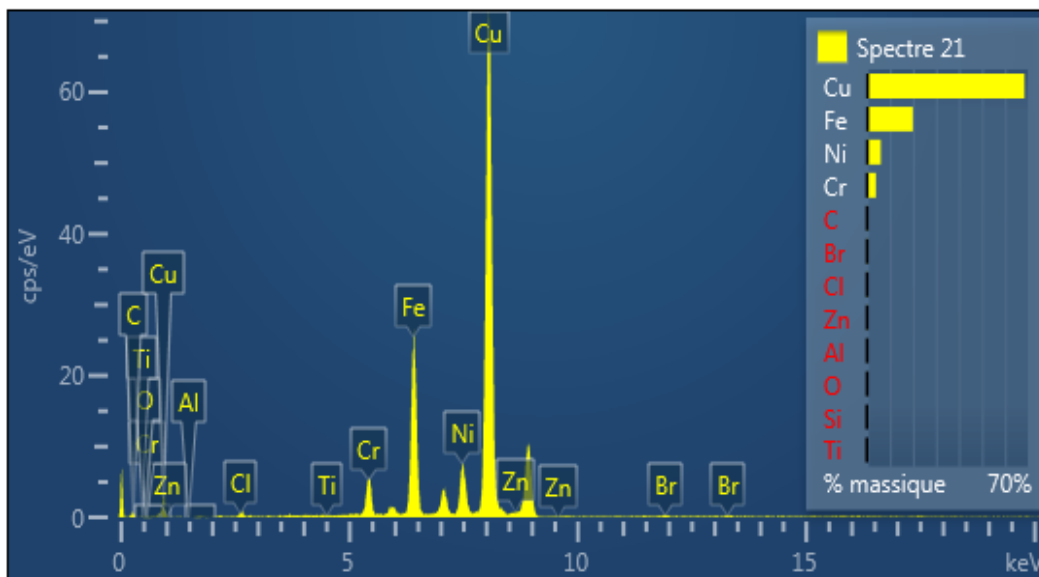


Figure 8 : Microanalyse EDS des particules sphériques de la figure 6.

On constate que ces particules sphériques ont une composition métallique dominée par le fer, avec présence de chrome, nickel et zinc. La présence de cuivre est hypothétique car un pic parasite de cuivre est toujours présent sur les prélèvements car les grilles support utilisées sont en cuivre.

Ce constat nous a amenés à sélectionner ces 5 éléments pour l'analyse quantitative des filtres impacteurs (détaillée précédemment).

Les petites particules montrées sur la figure 7 s'avèrent constituées d'éléments ubiquitaires en proportion variable : Ca, Si, K, S, O...

Ces particules sphériques métalliques pourraient constituer un traceur susceptible de repérer l'empreinte environnementale dans l'air autour d'un incinérateur. Elles sont cependant émises en très faible quantité et, compte tenu du facteur de dilution important qui affecte les panaches avant leur retombée, on peut s'attendre à n'en retrouver qu'une très faible quantité qu'il faudra rechercher dans un fond particulaire ambiant parfois riche, surtout en milieu urbain.

CARACTERISTIQUES MESUREES DE L'EFFLUENT

Le tableau 5 ci-dessous rassemble les caractéristiques physiques et chimiques mesurées sur l'effluent.

Tableau 5 : Caractéristiques physiques et chimiques mesurées sur l'effluent, lignes 1 et 2.

	CO	CO ₂	O ₂	H ₂ O	Température	Débit
	(ppm sec)	(%)	(%)	(%)	(°C)	(m ³ o/h)
Ligne 1 13/12/217 10 :30 à 17 :30	14	8,76	10,79	16,7	218	39455
Ligne 2 14/12/2017 10 :30 à 17 :30	7	8,51	11,16	17,4	231	43139

RESULTATS DE CARACTERISATION EN NOMBRE, MASSE ET GRANULOMETRIE

Le tableau 6 ci-dessous rassemble les résultats obtenus en termes de nombre total de particules (données ELPI) et de masse (données impacteurs DGI et DEKATI).

Tableau 6 : Nombre total et masse de particules, lignes 1 et 2.

	N total ELPI	Total DGI	PM2,5	PM1	PM0,5	PM 0,2	Total DEKATI	PM1 0	PM2, 5	PM1	VLE TSP
	(#/cm ³) O ₂ ref	(mg/ m ³) O ₂ ref					(mg/ m ³) O ₂ ref				
Ligne 1	7,35E+05	0,23	0,23	0,23	0,22	0,2 2	0*	0*	0*	0*	10
	- Flux (g/h)	8,9	8,9	8,9	8,4	8,4	0*	0*	0*	0*	-
Ligne 2	2,85E+05	0*	0*	0*	0*	0*	0,26	0,26	0,26	0,26	10
	Flux (g/h)-	0*	0*	0*	0*	0*	10,4	10,4	10,4	10,4	

Au niveau de la ligne 1, on observe que les concentrations masses de particules mesurées par l'impacteur DEKATI sont inférieures à $LQ/3$ (valeur de la limite de quantification divisée par trois). Elles sont donc assignées à la valeur 0 conformément aux règles d'application des limites de détection et quantification du référentiel LAB REF 22 (Exigences spécifiques qualité de l'air - émissions de sources fixes). Sur la ligne 2, les concentrations sont également très faibles, de l'ordre des limites de quantification. Les résultats obtenus avec l'impacteur DGI sont également très faibles, proches des limites de quantification sur les deux lignes. Les résultats obtenus avec les deux impacteurs sont très inférieurs à la VLE TSP UIOM de $10 \text{ mg/m}^3 \text{ O}_2 \text{ ref}$ et du même ordre de grandeur que ceux du dernier contrôle réglementaire TSP ($0,06 \text{ mg/m}^3 \text{ O}_2 \text{ ref}$).

Un flux d'une dizaine de grammes par heure est quantifié par les deux impacteurs.

L'ELPI mesure un nombre total de $7,35 \cdot 10^5 \text{ \#/cm}^3$ (particules par centimètre cube) sur la ligne 1 et $2,85 \cdot 10^5 \text{ \#/cm}^3$ sur la ligne 2, ce qui est cohérent avec les niveaux observés en incinération (Kumar et al, 2013) et de l'ordre de ceux rencontrés dans l'air ambiant en fond urbain. Les distributions granulométriques observées sont présentées dans les figures 9 et 10 ci-après.

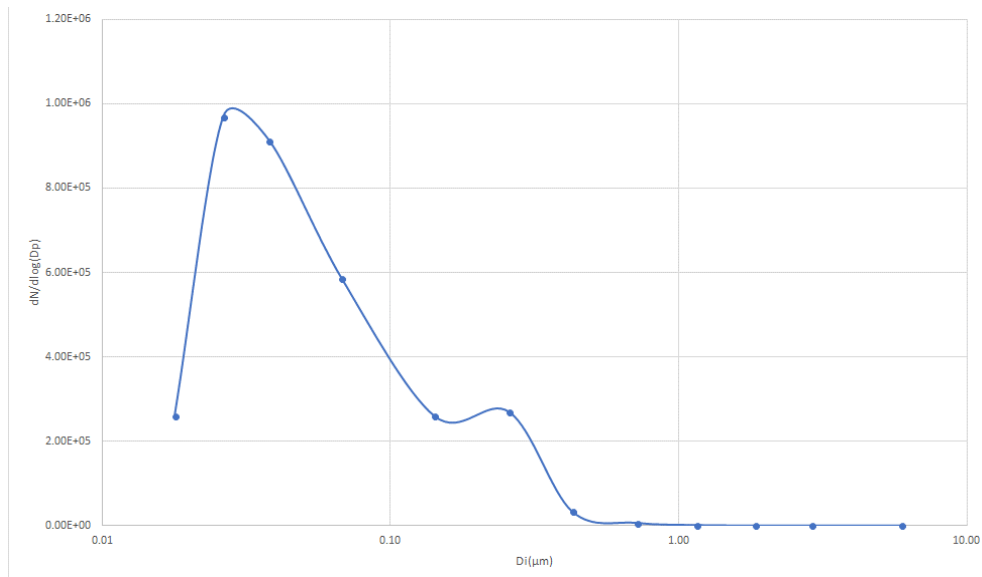


Figure 9 : Granulométrie ELPI obtenue site A sur la ligne 1.

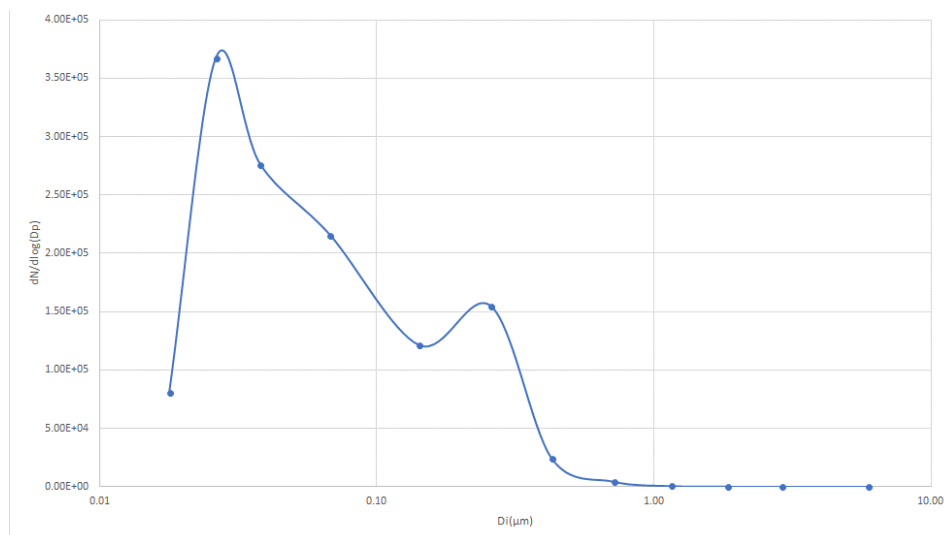


Figure 10 : Granulométrie ELPI obtenue sur site A la ligne 2.

On constate que la granulométrie est dominée par de très petites particules (inférieures à 100 nm) et dans une moindre mesure par des particules de taille autour de 300 nm, ce qui, associé au nombre total relativement faible est cohérent avec les masses très faibles déterminées par impaction manuelle.

RESULTATS DE CARACTERISATION EN CR, CU, NI, FE ET ZN

L'examen MET ayant relevé la présence de quelques métaux à l'émission (paragraphe 5.1.1.7), les éléments Cr, Cu, Ni, Fe et Zn ont été analysés par ICP/OES (norme NF-EN-11885). Les résultats sont rassemblés dans les tableaux 7 et 8 ci-dessous.

Tableau 7 : Analyses quantitatives des éléments Cr, Cu, Ni, Fe et Zn dans les filtres impacteurs, ligne 1.

		DGI					Dekati PM10			
		Total DGI	PM2,5	PM1	PM0,5	PM0,2	Total	PM10	PM2,5	PM1
Cu	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,46	1,32	1,18	1,00	0,66	0,93	0,56	0,48	0,4
	<i>Blanc</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,33	0,27	0,22	0,16	0,11	0,04	0,03	0,02	0,01
	Flux (g/H)	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02
	Répartition		90 %	81 %	68 %	45 %		60 %	52 %	43 %
Cr	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22,47	21,27	19,03	13,83	4,27	0,30	0,27	0,21	0,17
	<i>Blanc</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4,21	3,38	2,55	1,73	0,90	0,12	0,10	0,08	0,06
	Flux (g/H)	0,89	0,84	0,75	0,55	0,17	0,01	0,01	0,01	0,01
	Répartition		95 %	85 %	62 %	19 %		90 %	70 %	57 %
Ni	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	20,83	18,58	15,45	10,02	2,09	0,28	0,25	0,19	0,16
	<i>Blanc</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,28	0,23	0,18	0,14	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03
	Flux (g/H)	0,82	0,73	0,61	0,40	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01
	Répartition		89 %	74 %	48 %	10 %		89 %	68 %	57 %
Fe	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	102,60	94,61	82,79	59,79	27,81	8,85	8,22	7,07	6,1
	<i>Blanc</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10,26	9,23	8,21	7,18	6,16	1,39	1,22	1,05	0,87
	Flux (g/H)	4,05	3,73	3,27	2,36	1,10	0,35	0,32	0,28	0,24
	Répartition		92 %	81 %	58 %	27 %		93 %	87 %	69 %
Zn	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15,67	13,38	11,39	9,11	6,63	16,42	15,3	14,84	14,29
	<i>Blanc</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,78	0,73	0,69	0,64	0,59	0,13	0,11	0,09	0,07
	Flux (g/H)	0,62	0,53	0,45	0,36	0,26	0,66	0,62	0,60	0,58
	Répartition		85 %	73 %	58 %	42 %		93 %	90%	87 %

Tableau 8 : Analyses quantitatives des éléments Cr, Cu, Ni, Fe et Zn dans les filtres impacteurs, ligne 2.

		DGI					Dekati PM10			
		Total DGI	PM2,5	PM1	PM0,5	PM0,2	Total	PM10	PM2,5	PM1
Cu	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	0,84	0,78	0,73	0,50	0,27	1,06	1,03	0,97	0,89
	Blanc ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	0,33	0,27	0,22	0,16	0,11	0,04	0,03	0,02	0,01
	Flux (g/H)	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,04	0,04	0,04	0,03
	Répartition		93 %	87 %	60 %	32 %		97 %	92 %	84 %
Cr	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	20,84	16,87	6,74	1,86	1,24	0,59	0,57	0,54	0,49
	Blanc ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	4,21	3,38	2,55	1,73	0,90	0,12	0,10	0,08	0,06
	Flux (g/H)	0,89	0,72	0,29	0,08	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
	Répartition		81 %	32 %	9 %	6 %		97 %	92 %	83 %
Ni	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	12,58	11,86	11,50	8,51	2,36	0,40	0,36	0,34	0,31
	Blanc ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	3,34	2,61	1,87	1,14	0,40	0,06	0,05	0,04	0,03
	Flux (g/H)	0,54	0,50	0,49	0,36	0,10	0,02	0,01	0,01	0,01
	Répartition		94 %	91 %	68 %	19 %	100 %	90 %	85 %	78 %
Fe	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	94,96	89,20	84,61	60,97	20,09	11,15	10,64	9,66	7,64
	Blanc ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	41,18	33,92	26,65	19,39	12,13	1,39	1,22	1,04	0,87
	Flux (g/H)	4,04	3,80	3,60	2,59	0,86	0,44	0,42	0,38	0,30
	Répartition		94 %	89 %	64 %	21 %		95 %	87 %	69 %
Zn	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	8,00	7,40	6,31	4,04	2,93	7,51	7,34	6,83	6,10
	Blanc ($\mu\text{g}/\text{m}^3_0$)	10,12	9,00	7,87	6,74	5,61	0,13	0,11	0,09	0,07
	Flux (g/H)	0,34	0,31	0,27	0,17	0,12	0,29	0,29	0,27	0,24
	Répartition		93 %	79 %	51 %	37 %	100 %	98 %	91 %	81 %

On observe sur les deux lignes un écart entre les concentrations et flux des métaux Cr, Ni et Fe, déterminés par les deux méthodes d'impaction manuelle. Les niveaux déterminés avec l'impacteur DGI sont systématiquement plus élevés que ceux déterminés avec l'impacteur DEKATI. On rappelle ici que comme indiqué en §1, que l'impacteur DEKATI utilisé dans le conduit permet de collecter la fraction solide uniquement alors que l'impacteur DGI utilisé après dilution permet de collecter la fraction solide et les espèces semi volatiles ayant subi des phénomènes de condensation lors de l'étape de dilution. Il est donc logique si certains métaux sont présents simultanément dans les phases solides et semi volatiles, que les niveaux obtenus avec l'impacteur DGI soient plus élevés.

Si l'on tient compte des résultats DGI, le fer est le métal majoritaire avec des concentrations de l'ordre de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$ et un flux de l'ordre de $4 \text{ g}/\text{h}$, ce qui reste relativement faible.

Le chrome, le nickel et le zinc sont présents à des niveaux de concentrations environ 5 fois moindres. Pour ces métaux réglementés, les résultats sont inférieurs aux valeurs limite (VLE Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V $500 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$) et sont conformes aux niveaux mesurés (respectivement Cu $5,33 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Ni $3,32 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Cr $7,2 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Zn $68,2 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$ pour la ligne 1 et Cu $2,97 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Ni $1,98 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Cr $6,06 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$; Zn $45,8 \mu\text{g}/\text{m}^3_0$ pour la ligne 2) lors des derniers contrôles réglementaires réalisés en 2017 avec la méthode de référence NF EN 14385 (méthode qui permet de déterminer les concentrations des métaux présents sous forme solide, et semi-volatile dans l'aérosol).

En termes de répartition des métaux dans les différentes fractions granulométriques, on observe des résultats homogènes entre les résultats obtenus avec l'impacteur DEKATI et l'impacteur DGI pour les deux fractions qu'ils ont en commun (PM_{2,5} et PM₁). Les résultats obtenus sur les deux lignes indiquent que le Cu, le Zn et dans une moindre mesure le Fe sont les métaux les plus présents dans la fraction de taille inférieure à 200 nm, jusqu'à 45 % pour le Cu et 42 % pour le Zn, alors que les autres métaux sont très faiblement répartis dans la fraction inférieure à 200 nm.

5.1.2 Site UIOM A : mesures environnementales

Sept prélèvements MPS et Nanobadge ont été effectués le 13/12/2017 en zone non-exposée (en-dehors de la zone de retombée des panaches) et sept autres ont été effectués en zone exposée. La modélisation préalable indiquait une distance de retombée dans la gamme 400 – 1000 m.

La figure 11 ci-dessous montre l'emplacement des points de prélèvement. Ces points sont situés à des distances du site variant entre 500 et 1000 m.

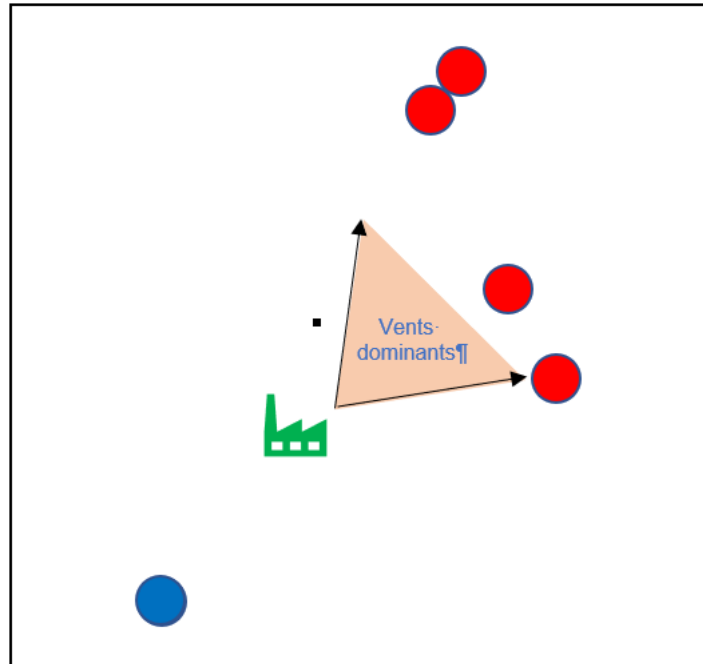


Figure 11 : Localisation des points de prélèvement autour de l'UIOM A (en vert). Points rouges : situations exposées. Point bleu : situation non exposée.

Les figures 12 à 15 illustrent l'aspect des prélèvements MPS examinés en MET, en situation exposée et en situation non exposée.

On constate que la typologie des particules présentes est très comparable entre les deux situations. On note dans les deux cas la présence de particules de chlorure de sodium (aérosol marin très fréquemment retrouvé en situation météorologique dépressionnaire, ce qui était le cas au moment des prélèvements) et de particules ubiquitaires systématiquement retrouvées en air urbain (et souvent aussi en air non-urbain, en concentrations moindres) : suies (sous forme d'agrégats de particules nanométriques), imbrûlés de combustion (sous forme de particules plus ou moins sphériques, d'aspect liquide ou pâteux, disparaissant sous le faisceau d'électrons et contenant les éléments carbone et soufre). On note également un nombre important de particules de sulfates divers, également très fréquemment rencontrées en air urbain ou industriel.

Il n'a pas été possible de retrouver des particules métalliques sphériques comparables à celles vues à l'émission et susceptibles de servir de traceur de l'empreinte environnementale de l'activité du site.

Ces prélèvements MPS ne mettent donc pas en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

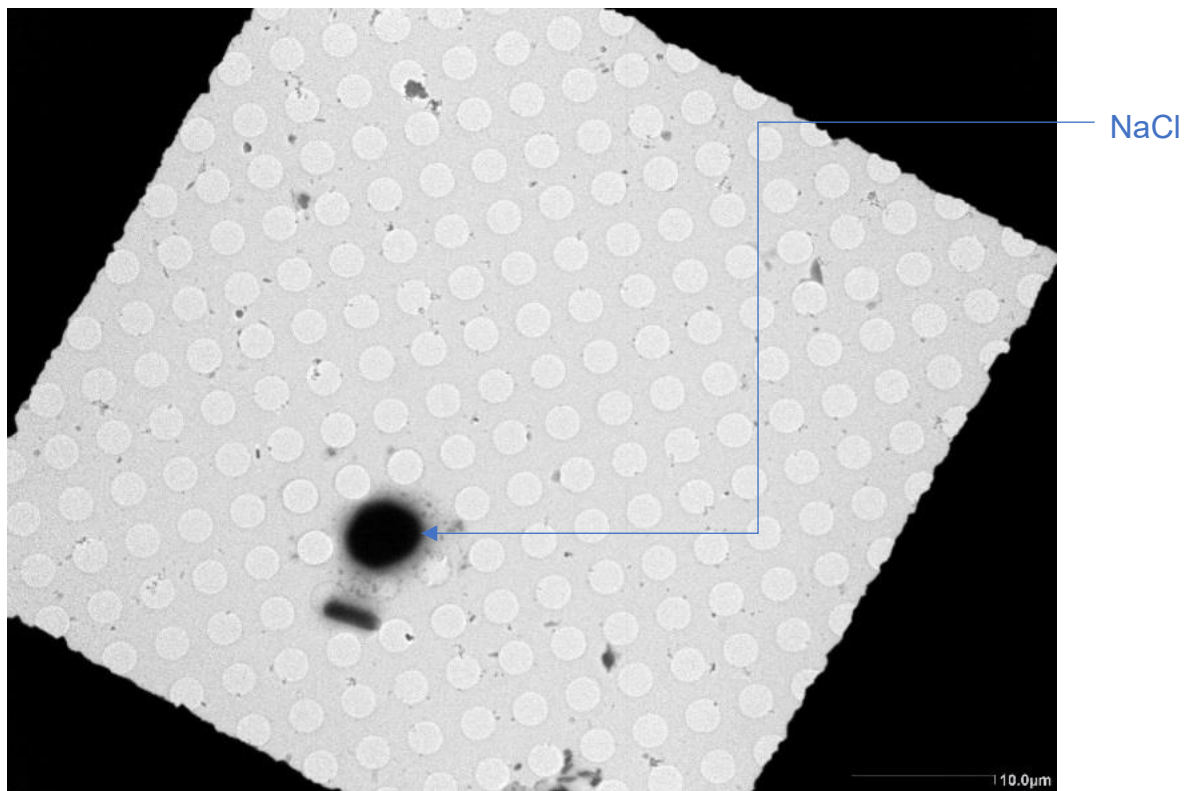


Figure 12 : Aérosol prélevé en situation non exposée. Barre d'échelle : 10 μm.

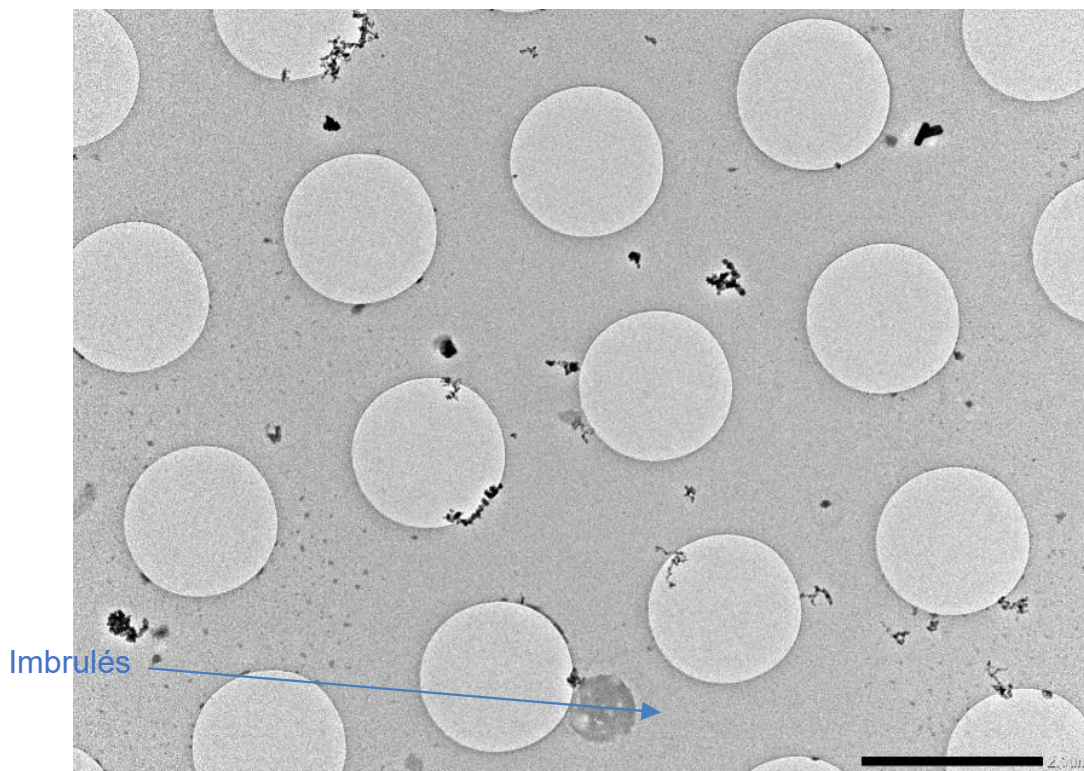


Figure 13 : Aérosol prélevé en situation non exposée (plus fort grandissement) . Barre d'échelle : 2 μm.

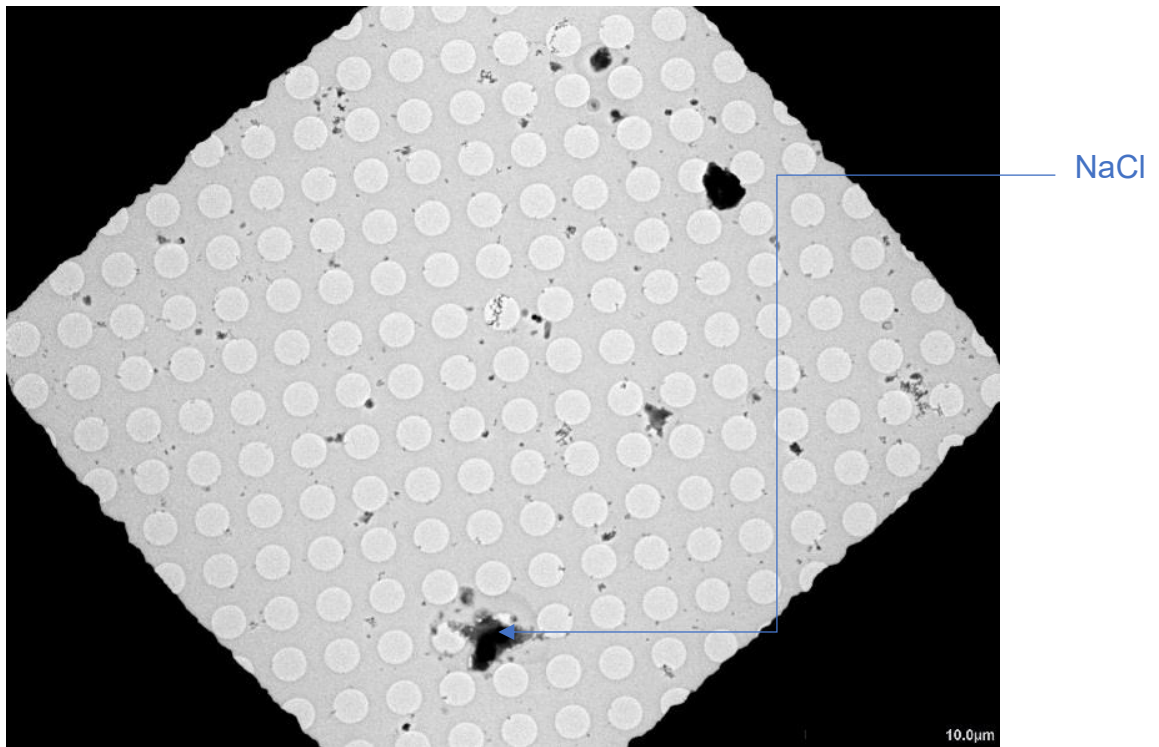


Figure 14 : Aérosol prélevé en situation exposée. Barre d'échelle : 10 μm.

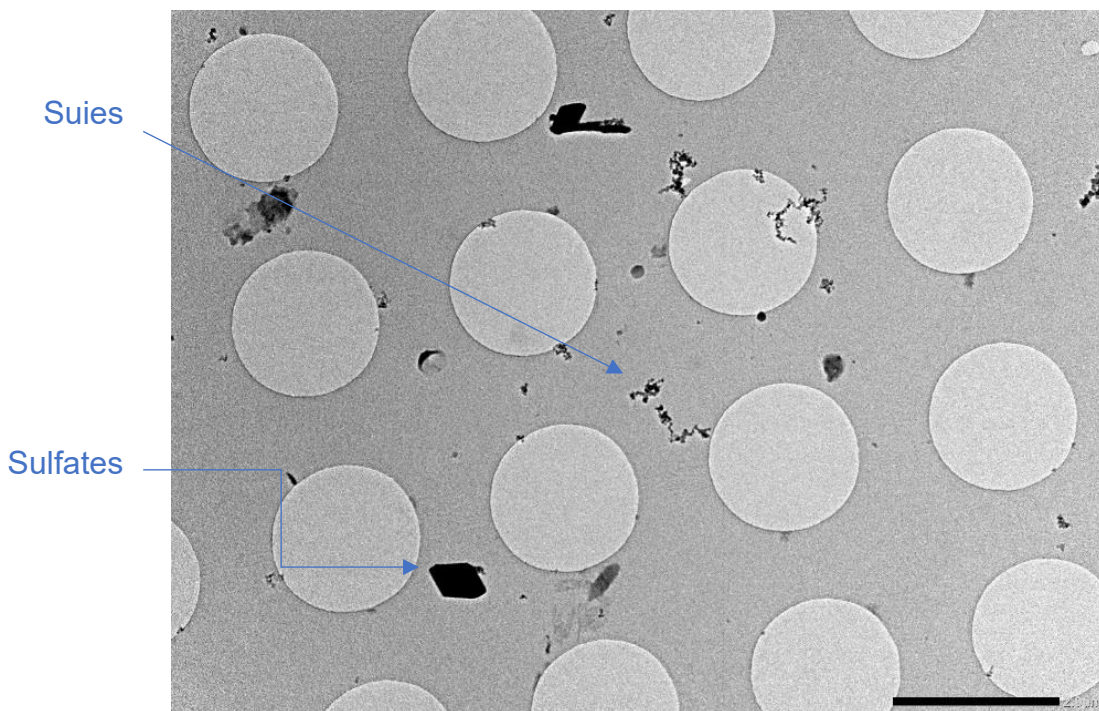


Figure 15 : Aérosol prélevé en situation exposée (plus fort grandissement) .
Barre d'échelle : 2 μm.

Les prélèvements Nanobadge effectués autour du site montrent la présence systématique de l'élément silicium à des teneurs de l'ordre de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le cuivre et le fer sont parfois détectés à des teneurs très faibles ($0,1$ à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et sans corrélation avec le caractère exposé ou non des prélèvements). Ces prélèvements Nanobadge ne mettent donc pas en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

5.1.3 Conclusion concernant l'UIOM A

Les émissions particulières sont relativement faibles avec des flux particuliers totaux de l'ordre de la dizaine de grammes par heure, dont environ la moitié est constituée par des métaux, majoritairement du fer. La fraction métallique de ces émissions est émise sous forme de particules sphériques de taille submicronique, voire nanométrique pour une minorité d'entre elles. Ces particules sont susceptibles de servir de traceurs dans l'environnement autour du site.

Cependant, ni les prélèvements MPS ni les prélèvements Nanobadge ne mettent en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

5.2 UNITE D'INCINERATION DE DECHETS SPECIAUX : SITE B

5.2.1 Site B : mesures environnementales

Deux prélèvements MPS et Nanobadge ont été effectués le 12/12/2017 en zone non-exposée (en-dehors de la zone de retombée des panaches) et deux autres ont été effectués en zone exposée. La modélisation préalable indiquait une distance de retombée dans la gamme 400 – 1000 m.

La figure 16 ci-dessous montre l'emplacement des points de prélèvement. Ces points sont situés à des distances du site variant entre 500 et 1000 m.

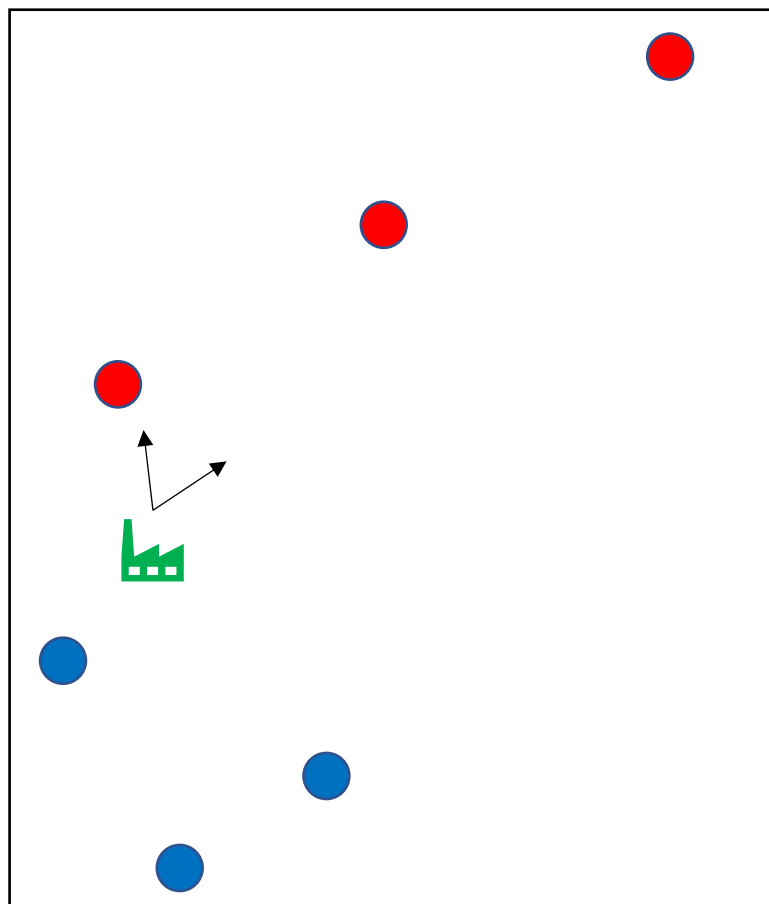


Figure 16 : Localisation des points de prélèvement autour de du site B (en vert). Points rouges : situations exposées. Points bleus : situation non exposée.

Les figures 17 à 20 illustrent l'aspect des prélèvements MPS examinés en MET, en situation exposée et en situation non exposée.

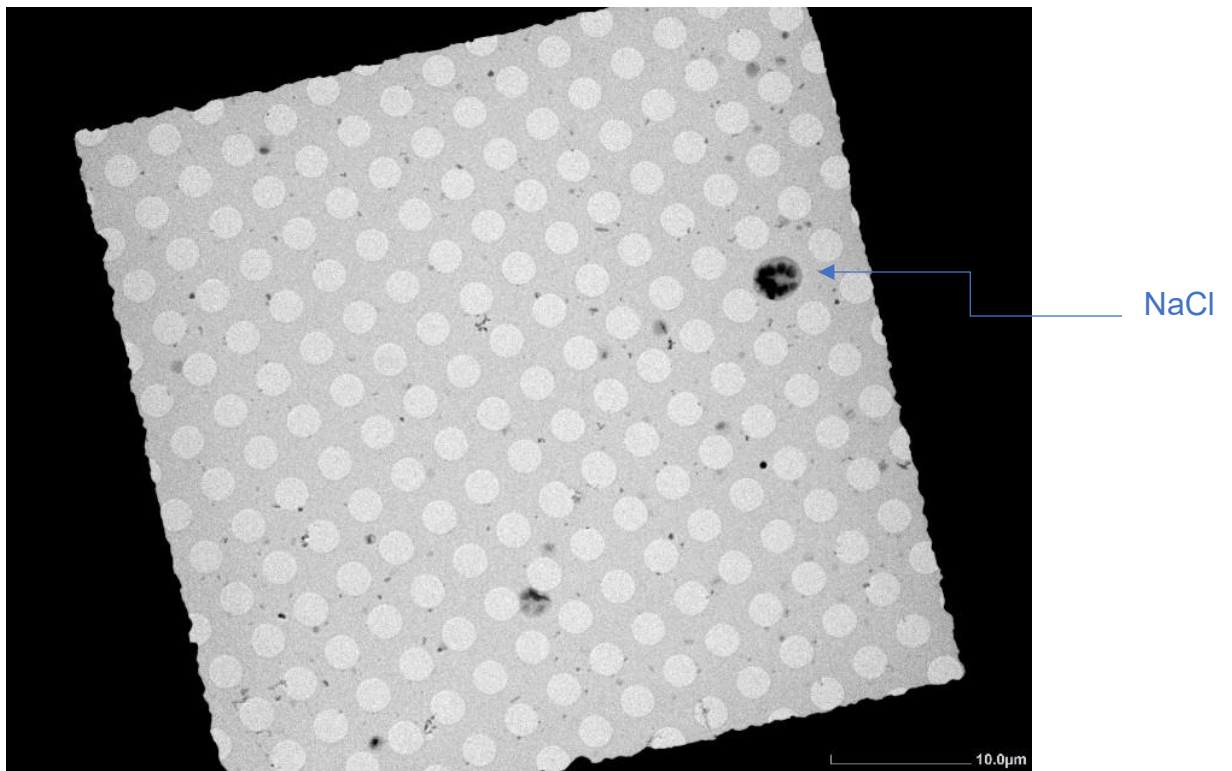


Figure 17 : Aérosol prélevé en situation non exposée. Barre d'échelle : 10 μm.

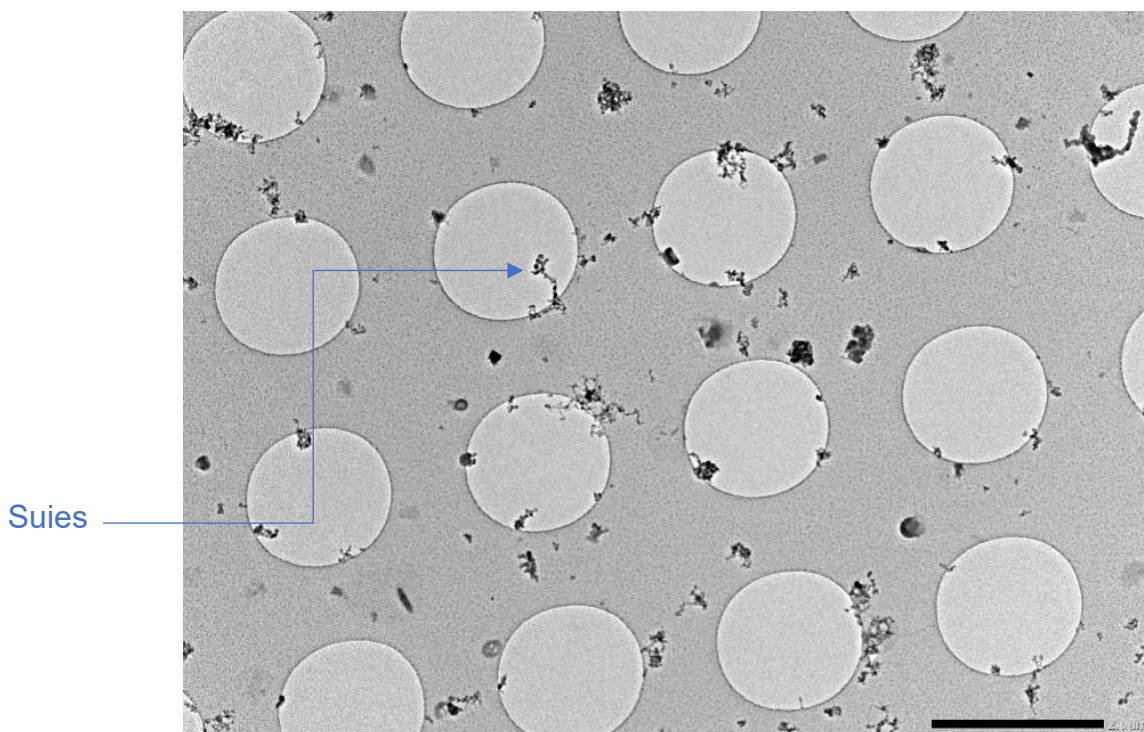


Figure 18 : Aérosol prélevé en situation non exposée (plus fort grandissement). Barre d'échelle : 2 μm.

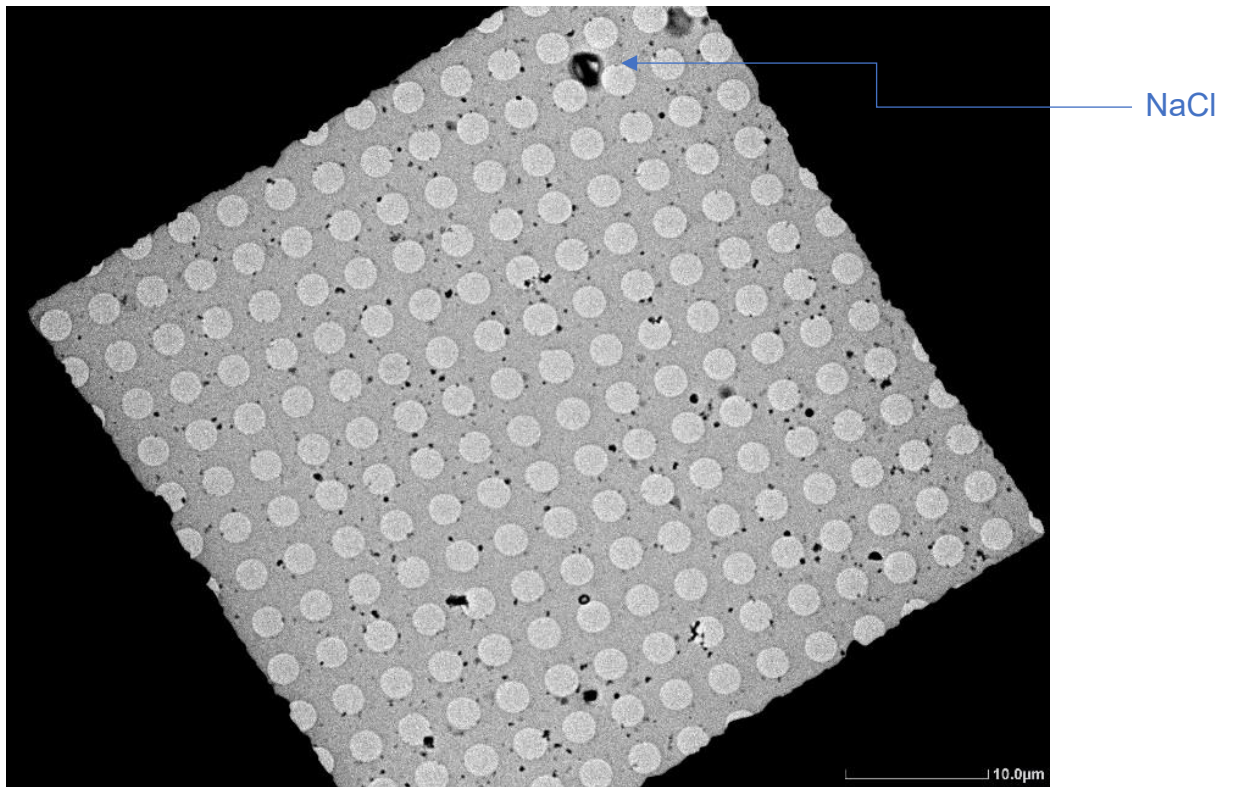


Figure 19 : Aérosol prélevé en situation exposée. Barre d'échelle : 10 μm.

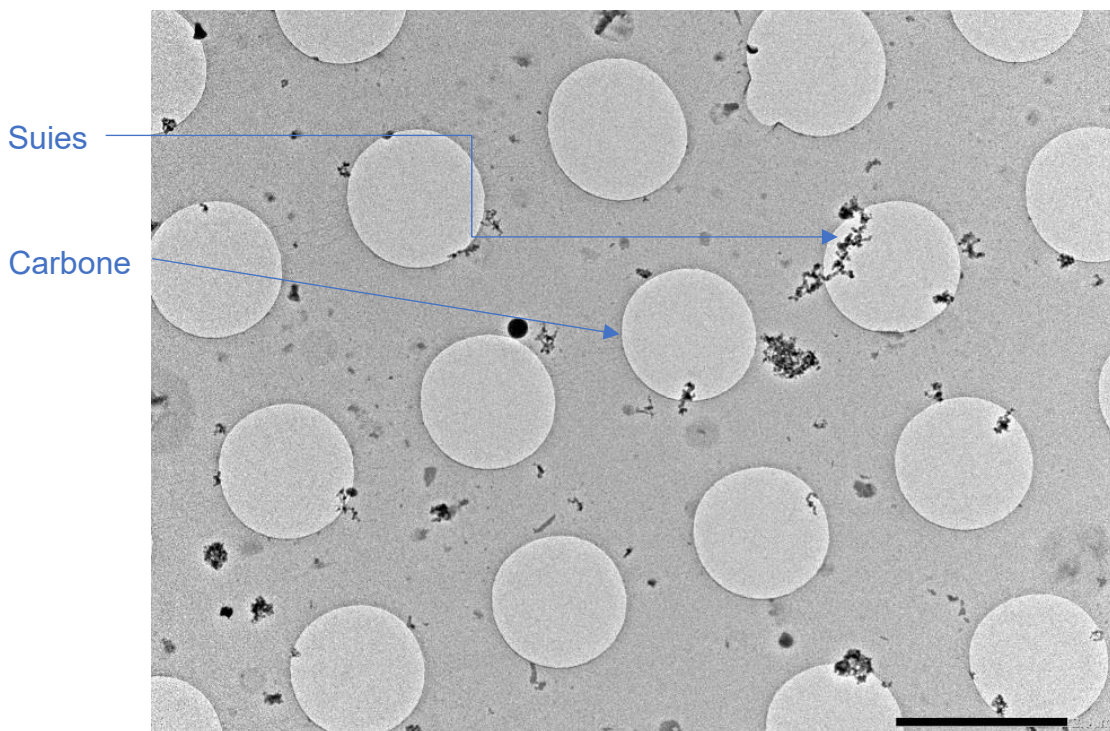


Figure 20 : Aérosol prélevé en situation exposée (plus fort grandissement). Barre d'échelle : 2 μm.

On constate que la typologie des particules présentes est très comparable entre les deux situations. On note dans les deux cas la présence de particules de chlorure de sodium (aérosol marin très fréquemment retrouvé en situation météorologique dépressionnaire, ce qui était le cas au moment des prélèvements) et de particules ubiquitaires systématiquement retrouvées en air urbain (et souvent aussi en air non-urbain, en concentrations moindres) : suies (sous forme d'agrégats de particules nanométriques), imbrûlés de combustion (sous forme de particules plus ou moins sphériques, d'aspect liquide ou pâteux, disparaissant sous le faisceau d'électrons et contenant les éléments carbone et soufre). On note également un nombre important de particules de sulfates divers, également très fréquemment rencontrées en air urbain ou industriel. De façon générale, on retrouve les mêmes particules autour de cette installation que celles observées autour de l'UIOM A.

Ces prélèvements MPS ne mettent donc pas en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

Les prélèvements Nanobadge effectués autour du site montrent la présence systématique de l'élément silicium à des teneurs de l'ordre de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le cuivre et le fer sont parfois détectés à des teneurs très faibles ($0,1$ à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et sans corrélation avec le caractère exposé ou non des prélèvements). Ces prélèvements Nanobadge ne mettent donc pas en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

5.2.2 Conclusion concernant l'unité d'incinération B

Ni les prélèvements MPS ni les prélèvements Nanobadge ne mettent en évidence un marquage environnemental par l'activité du site. L'ensemble des particules observées en MET sont attribuables à un fond particulaire ambiant. Les prélèvements Nanobadge ne montrent pas de différenciation significative, notamment en métaux, entre les situations exposées et les situations de fond.

5.3 UNITE D'INCINERATION D'ORDURES MENAGERES : SITE C

5.3.1 Site UIOM C : mesures environnementales

Deux prélèvements MPS et Nanobadge ont été effectués le 23/01/2018 en zone non-exposée (en-dehors de la zone de retombée des panaches) et trois autres ont été effectués en zone exposée. La modélisation préalable indiquait une distance de retombée dans la gamme 400 – 1000 m.

La figure 21 ci-dessous montre l'emplacement des points de prélèvement. Ces points sont situés à des distances du site variant entre 500 et 1000 m.

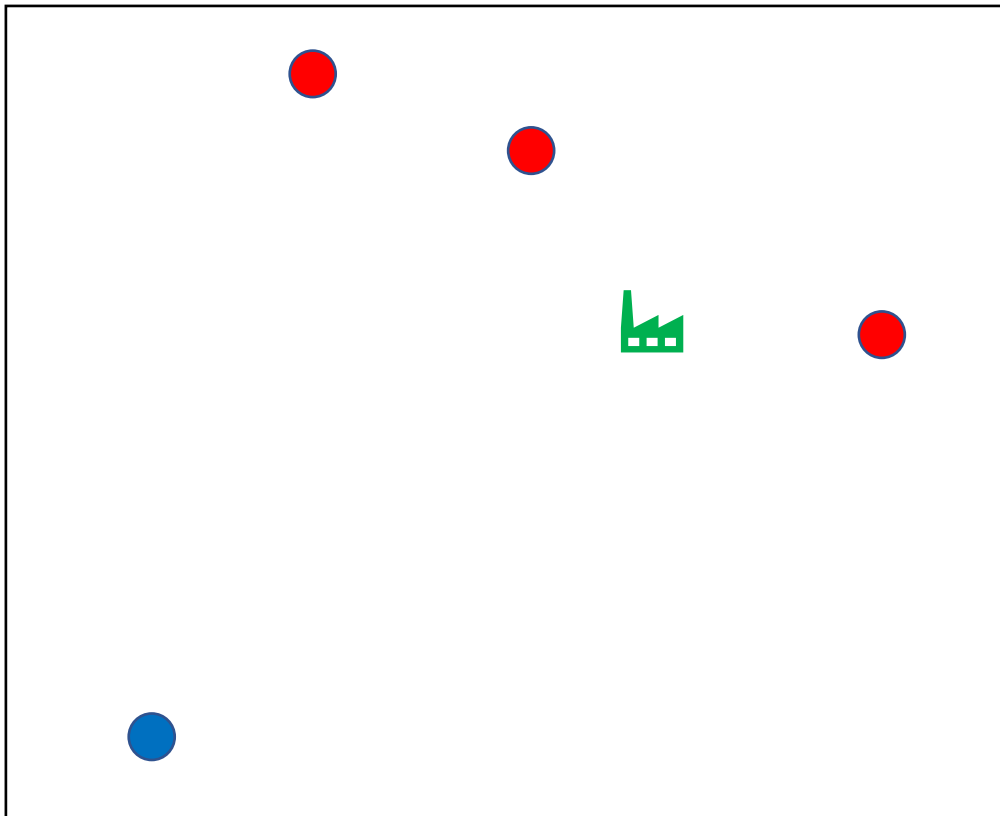


Figure 21 : Localisation des points de prélèvement autour du site B (en vert). Points rouges : situations exposées. Points bleus : situation non exposée.

Les figures 22 à 25 illustrent l'aspect des prélèvements MPS examinés en MET, en situation exposée et en situation non exposée.

On constate que la typologie des particules présentes est très comparable entre les deux situations. On note dans les deux cas la présence de particules de chlorure de sodium (aérosol marin très fréquemment retrouvé en situation météorologique dépressionnaire, ce qui était le cas au moment des prélèvements) et de particules ubiquitaires systématiquement retrouvées en air urbain (et souvent aussi en air non-urbain, en concentrations moindres) : suies (sous forme d'agrégats de particules nanométriques), imbrûlés de combustion (sous forme de particules plus ou moins sphériques, d'aspect liquide ou pâteux, disparaissant sous le faisceau d'électrons et contenant les éléments carbone et soufre). On note également un nombre important de particules contenant les éléments Na, Ca, C, O (carbonates ?), assez fréquemment rencontrées en air urbain ou industriel.

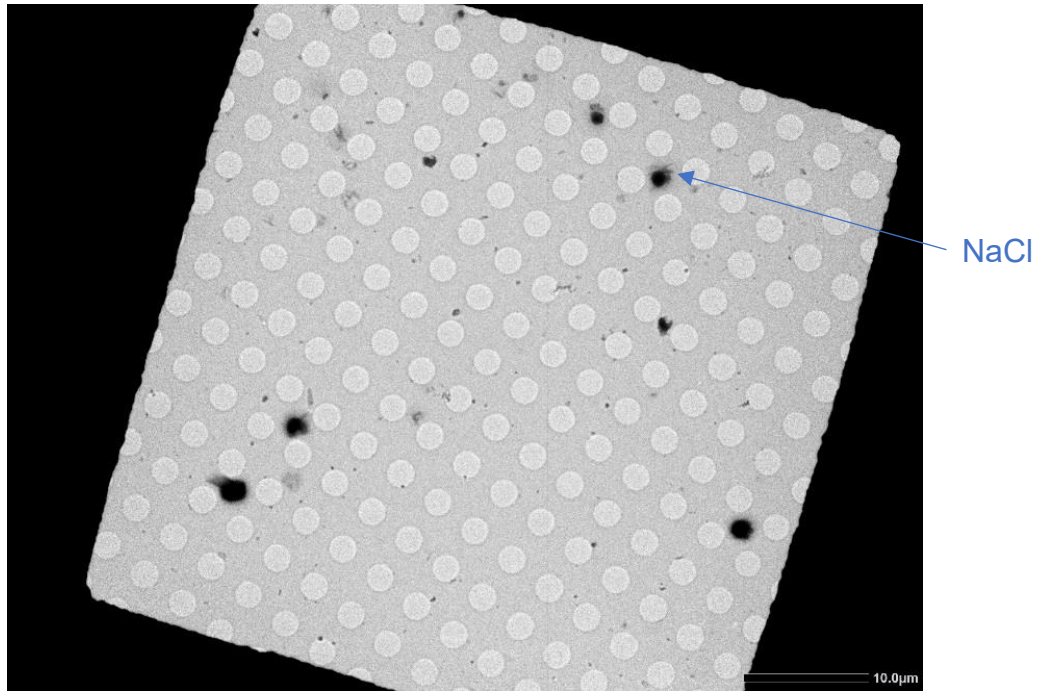


Figure 22 : Aérosol prélevé en situation non exposée. Barre d'échelle : 10 μm .

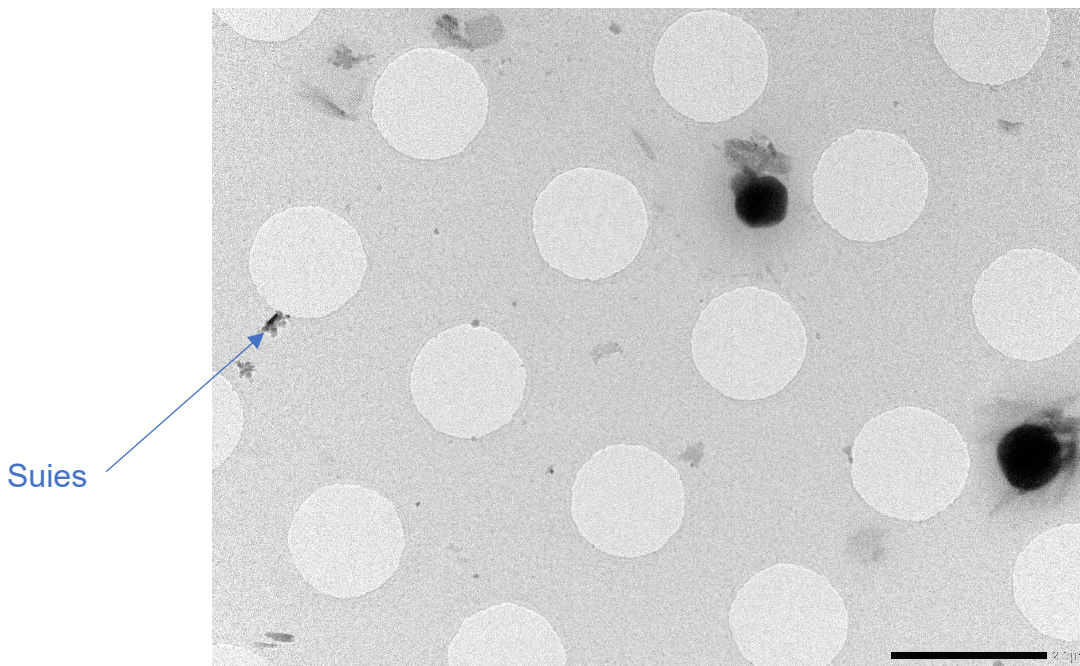


Figure 23 : Aérosol prélevé en situation non exposée (plus fort grandissement).
Barre d'échelle : 2 μm

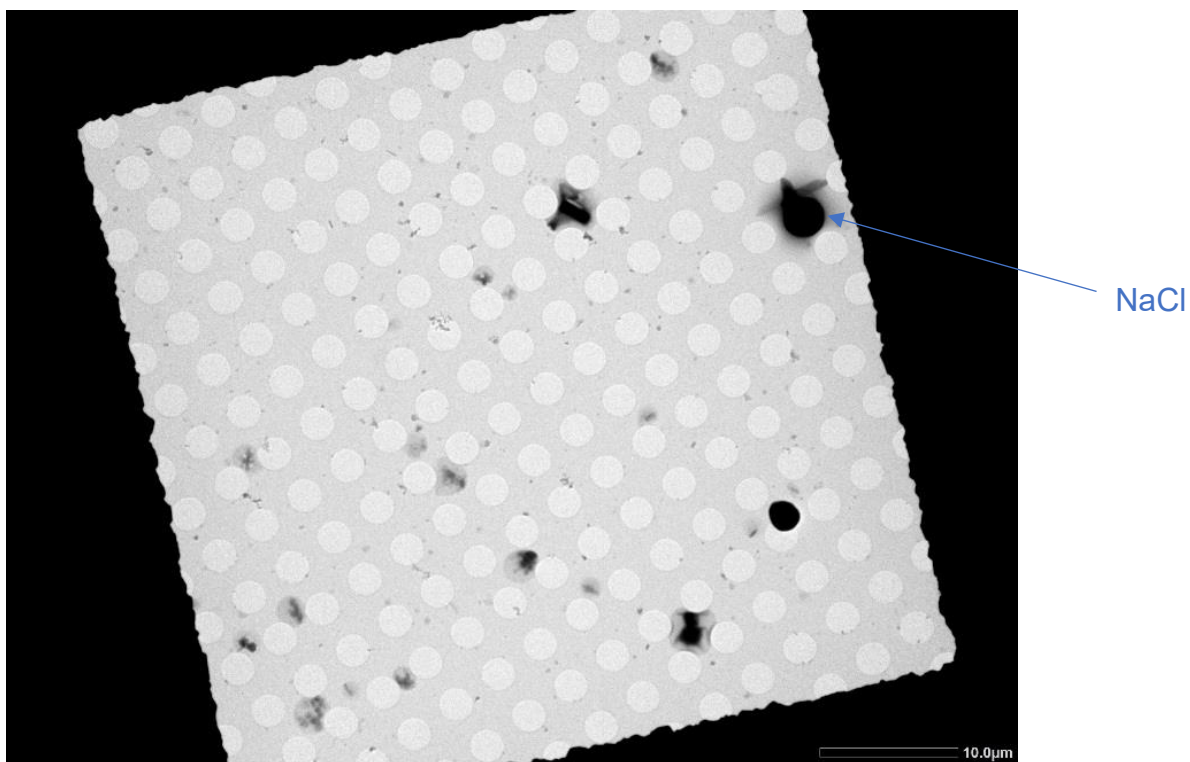


Figure 24 : Aérosol prélevé en situation exposée. Barre d'échelle : 10 μm .

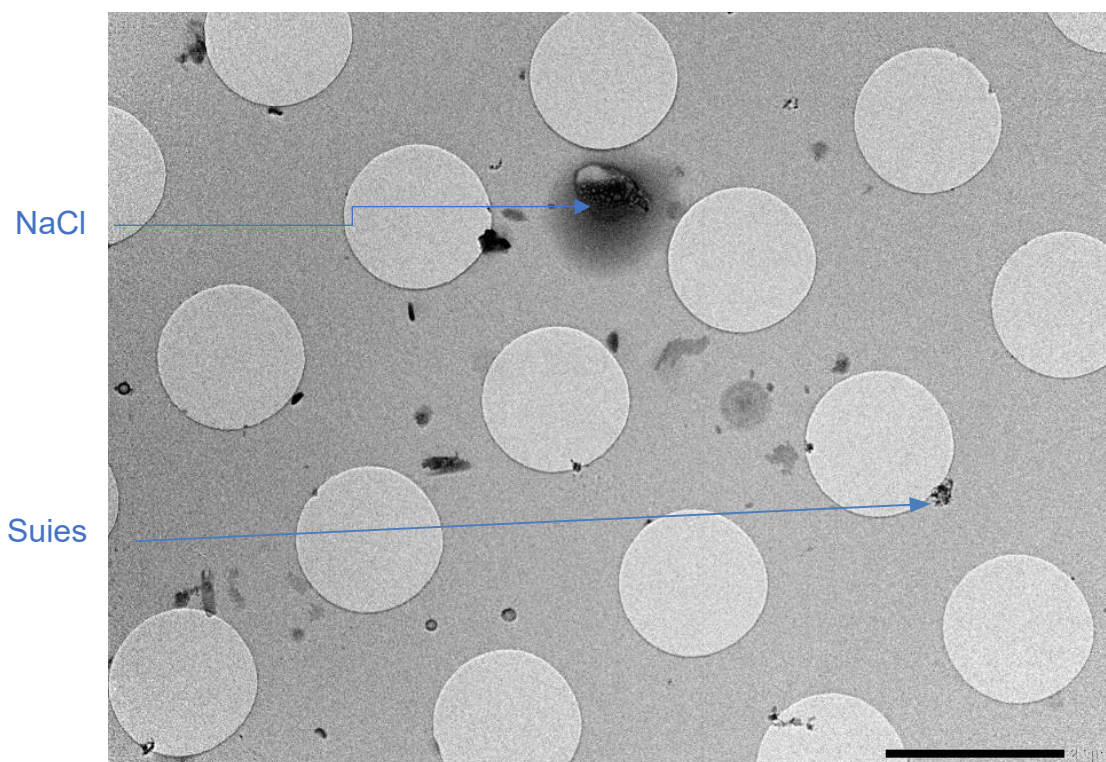


Figure 25 : Aérosol prélevé en situation exposée (plus fort grandissement).
Barre d'échelle : 2 μm

Les prélèvements Nanobadge effectués autour du site montrent la présence systématique de l'élément silicium à des teneurs de l'ordre de 6 à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le cuivre, le fer, le chlore et le zinc sont parfois détectés à des teneurs très faibles (0,1 à 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et sans corrélation avec le caractère exposé ou non des prélèvements). Ces prélèvements Nanobadge ne mettent donc pas en évidence un marquage environnemental par l'activité du site.

5.3.2 Conclusion concernant l'unité d'incinération C

Ni les prélèvements MPS ni les prélèvements Nanobadge ne mettent en évidence un marquage environnemental par l'activité du site. L'ensemble des particules observées en MET est attribuable à un fond particulaire ambiant. Les prélèvements Nanobadge ne montrent pas de différenciation significative, notamment en métaux, entre les situations exposées et les situations de fond.

6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Sur le site UIOM A, les émissions particulières sont relativement faibles. Une fraction de ces émissions est constituée de particules sphériques de taille submicronique contenant des métaux (majoritairement du fer) qui pourraient servir de traceurs de l'activité du site dans l'environnement.

Cependant, ni les prélèvements MPS ni les prélèvements Nanobadge ne mettent en évidence un marquage environnemental de l'activité du site. En particulier, les particules traceurs n'ont pas été retrouvées à l'environnement.

Sur les deux autres sites ayant uniquement fait l'objet de campagnes environnementales avec des moyens de prélèvement mobiles, ni les prélèvements MPS ni les prélèvements Nanobadge ne mettent en évidence un marquage environnemental de l'activité des sites. L'ensemble des particules observées en MET est attribuable à un fond particulaire ambiant. Les prélèvements Nanobadge ne montrent pas de différenciation significative, notamment en métaux, entre les situations exposées et les situations de fond.

En parallèle à cette étude, l'INERIS a réalisé deux travaux complémentaires qui peuvent apporter un éclairage supplémentaire aux présents résultats :

- une revue bibliographique sur les méthodes de prélèvement de particules à l'émission et en milieu environnemental et les résultats obtenus ;
- une revue bibliographique et des travaux de recherche sur l'incinération de nanomatériaux.

Ces travaux sont récapitulés en annexes 1 et 2.

Les enseignements principaux qu'on peut en retirer sont les suivants :

- les émissions particulières mesurées aux incinérateurs sont souvent très faibles, avec des concentrations du même ordre de grandeur que l'air ambiant ce qui rend leur contribution difficile à isoler ;
- dans l'environnement, on peut utiliser des méthodes portatives (celles utilisées dans la présente étude) ou plus lourdes (celles utilisées par l'INERIS autour de certains sites industriels producteurs de nanoparticules). Cependant, même les méthodes lourdes auront beaucoup de difficultés à isoler la contribution des sites du fait des facteurs de dilution très importants qui s'appliquent aux émissions.
- en ce qui concerne le devenir de la nanostructure dans ces installations, tous les cas sont possibles : conservation d'une nanostructure initialement présente, destruction, création d'une nouvelle nanostructure...

Ces conclusions sont cependant de portée limitée du fait du faible nombre d'installations étudiées.

Compte tenu de ces éléments, il pourrait être recommandé de caractériser quelques sites supplémentaires à l'émission uniquement, dans le but de confirmer les premières observations.

ANNEXE 1

Cette annexe fait le point sur la possibilité de mesurer les nanoparticules au niveau d'un incinérateur : émissions canalisées et à proximité du site.

Recherche bibliographique

L'INERIS a mis en œuvre une recherche bibliographique basée sur des combinaisons de mots clés appartenant à la liste suivante : emission, air, atmosphere, nanoparticle, «ultrafine particles », «ultrafine aerosols », nanoaerosol, instrument, device, equipment, technolog*, tool, technique, method, measur*, monitor*, detect*, characteriz*, identif*, concentration, distribution, industr*, manufactur*, waste, site, plant, facility, facilities, incinerat*. Environ 30 articles ont ainsi été détectés et analysés. Leur analyse puis la prise en compte de leurs références et de leurs citations, ont permis de détecter environ 70 articles supplémentaires.

Cette base de données a été complétée par des produits de sortie issus d'études menées (achevées ou en cours) par l'INERIS, notamment dans le cadre de l'appui au Ministère et des projets suivants : cALIBRATE, Nanofase, Nanofluegas, NanoIDENT, Nanowet, Serenade.

La recherche bibliographique par combinaison de mots clés fait ressortir 4 grandes familles d'études, centrées respectivement sur l'hygiène professionnelle (9 articles), la métrologie (9 articles), les mesures à la source (4 articles) et différentes études en laboratoire avec notamment un lien avec la toxicologie (5 articles).

Pour l'essentiel, nous en retirons deux états de l'art pertinents pour la thématique visée, l'un sur les particules ultrafines issus d'IUOM (Jones et Harrison, 2016), et un second sur les émissions industrielles potentielles de substances nanoparticulaires (John et al., 2017) ; ils sont discutés ci-dessous. Par ailleurs, la synthèse des différents articles et la prise en compte des produits de sortie INERIS ont permis de faire un bilan des méthodes de mesure disponibles.

Mesure de particules ultrafines à l'émission et à proximité d'un incinérateur

Jones et Harrison (2016) ont réalisé un état de l'art sur l'émission de particules ultrafines issues des incinérateurs de type IUOM (« Municipal Solid Waste »), basé sur environ 60 publications pertinentes. La conclusion principale est que 1/ les résultats des mesures à l'émission et autour du site mettent en évidence des niveaux de concentration comparables à ceux observés en atmosphère urbaine ; que 2/ cela a pour conséquence de rendre impossible la quantification de la contribution d'un incinérateur sur la concentration en particules ultrafines dans la zone géographique où il se trouve.

Plus récemment, Setyan et al. (2017) rapportent les résultats de mesures au niveau de deux incinérateurs suisses, à la fois à l'émission et en proximité de site. Les concentrations en nombre mesurées à l'émission sont très faibles (<100 p/cm³), ce qui est en cohérence avec la synthèse de Jones et Harrison.

Ces résultats montrent que du fait d'un terme source modeste, les mesures en temps réel, par exemple de la concentration en nombre ou de la distribution en taille, apportent des informations intéressantes mais qui ne peuvent permettre de conclure sur la présence ou non de nanomatériaux.

Emission à l'atmosphère de particules nano-manufacturées

Cet état de l'art récent (John et al., 2017) porte de manière spécifique sur les nanomatériaux, en considérant l'ensemble du cycle de vie.

Faute d'études disponibles, cet article ne fournit que très peu d'information sur le sujet de l'incinération des nanomatériaux, même s'il valide l'hypothèse selon laquelle des produits issus de l'incinération des nanomatériaux pourraient être émis à l'atmosphère. L'étude de Muelle et Nowack (2008) est mise en avant car elle propose une estimation quantitative du taux d'émission : cependant, d'une part très peu de données étaient disponibles à l'époque (2008), et d'autre part la production industrielle de produits nano-manufacturés a fortement évolué depuis 11 ans.

Méthodologies de mesurage

La revue bibliographique fait apparaître globalement 2 démarches : on trouve d'un côté une méthodologie légère, et de l'autre une méthodologie détaillée.

Dans le premier cas (ex. Bressot et al., 2018), l'objectif est de pouvoir réaliser une recherche qualitative d'éléments nano-structurés au sein de l'aérosol, avec un minimum de contraintes c'est-à-dire à l'aide d'une technique portable, facile à mettre en œuvre et facile à déplacer. Par conséquent, la méthode s'appuie sur un préleveur simple (ex. le MPS, R'mili et al., 2013), éventuellement complété par un compteur de particules portables. Le résultat final est de pouvoir indiquer, pour chaque point de prélèvement, si l'aérosol contient des nanoparticules, et si c'est le cas, de donner des informations sur leur morphologie et leur composition élémentaire. C'est une démarche économique, qui permet notamment d'évaluer l'intérêt d'un effort plus conséquent.

Dans le second cas, il s'agit de déployer un spectre large de matériels en vue de caractériser l'aérosol en fonction de plusieurs paramètres : concentration en masse, en nombre ; distribution en taille ; morphologie, composition élémentaire de particules individuelles ; composition de fractions (ex. PM10, PM2,5, etc.). Ces mesurages peuvent être complétés par la mesure de gaz (ex. NO, NO2, CO, SO2, etc.). Ce déploiement peut se faire pour des mesures sur plusieurs heures (ex. Fonseca 2016) ou plusieurs jours / plusieurs semaines (ex. Setyan 2017). La stratégie de mesure peut également inclure des points de mesure de différentes natures : Setyan et al. rapporte ainsi avoir réalisé des mesures en interne d'un incinérateur -(1) entre précipitateur électrostatique et scrubber, (2) entre scrubber et catalyse, (3) entre catalyse et filtre à manche-, (4) en sortie de cheminée, (5) en air ambiant à proximité des cheminées, et enfin (6) en fond urbain à environ 1 km de l'incinérateur.

Il est intéressant de signaler le fait que l'INERIS a eu recours à ces 2 méthodes. La première a été utilisée dans le cadre du DRC 59, afin de mener des interventions rapides à proximité de plusieurs incinérateurs. La seconde a été mise en œuvre dans le cadre du projet ADEME nanoIDENT, ainsi que pour les projets européens cALIBRATE et nanoFase. Il est nécessaire de souligner que l'INERIS a élargi la démarche « détaillée » en enrichissant le dispositif de mesure avec les techniques suivantes :

A l'émission : prélèvement réglementaire, PM10, PM2,5, PM1, prélèvements MPS ;

Environnement : prélèvements journaliers (DA80, nanobadge), jauges de retombées.

Réflexion sur les perspectives

L'état de l'art fait tout d'abord apparaître un manque de données dans la littérature : si on dispose d'un certain nombre de travaux sur les émissions de particules ultrafines par les incinérateurs, quasiment aucune étude spécifique aux nanomatériaux n'est disponible.

Différents travaux (ex. Le Bihan 2017, Ounoughene 2015, 2017, 2019) ont montré que la combustion de nanomatériaux au sein d'un four d'incinération mène à l'émission de nanoparticules. Tout dépend donc de la capacité des techniques de traitement des effluents à retenir ces nanoparticules.

Les résultats collectés à ce jour, *a priori* essentiellement sur des dispositifs en fonctionnement au sein de pays industrialisés « avancés », tendent à montrer des concentrations modestes au niveau des émissions canalisées (Jones et Harrison 2016, Setyan 2017) : les dispositifs de traitement des effluents seraient donc performants. Ces émissions sont suivies d'une dilution importante et rapide ; par conséquent, les paramètres généraux que sont la concentration totale en masse, la concentration en nombre ou la distribution en taille, ne semblent pas en mesure d'assurer le suivi de ces émissions dans l'environnement, même proche. Des efforts pourraient être menés en matière de caractérisation « spécifique », c'est-à-dire d'une part par microscopie électronique à transmission (morphologie, composition élémentaire), et d'autre part par analyse quantitative (mais non-« nano », cela n'existe pas à ce-jour). Toutefois, les émissions étant modestes, on peut s'attendre à ne pas retrouver de trace dans des prélèvements de proximité en air ambiant.

Il est à noter qu'il existe désormais des techniques de surveillance des particules ultrafines en air ambiant : les travaux du GT PUF du LCSQA ont montré leur pertinence à proximité de sources industrielles. Elles pourraient donc être mises en œuvre, toutefois sous-réserve de disposer d'un terme source suffisant.

On relève également l'émergence d'une surveillance par analyse RX de la composition élémentaire de l'aérosol en air ambiant. Il existe toutefois des limites importantes en matière de limite de détection, de liste des éléments mesurés, et enfin de retour d'expérience.

En conclusion, on relève d'une part que le terme source serait modeste, et d'autre part que cela a pour conséquence de rendre très délicat le suivi en air ambiant. La principale perspective pourrait donc être, dans un premier temps, de consolider les informations disponibles sur les faibles concentrations à l'émission.

Références

- Bressot, Christophe; Shandilya, Neeraj; Jayabalan, Thangavalu; et al., Exposure assessment of Nanomaterials at production sites by a Short Time Sampling (STS) approach Strategy and first results of measurement campaigns, PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, Volume 116, Pages 324-332, MAY 2018
- Fonseca, A. S., et al. (2016). "Process-generated nanoparticles from ceramic tile sintering: Emissions, exposure and environmental release." *Science of the Total Environment* 565: 922-932.
- John, Astrid C.; Kuepper, Miriam; Manders-Groot, Astrid M. M.; et al., Emissions and Possible Environmental Implication of Engineered Nanomaterials (ENMs) in the Atmosphere, ATMOSPHERE, Volume 8, Issue 5, UNSP 84, MAY 2017
- Jones, A. M. and R. M. Harrison (2016). "Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste: A review." *Atmospheric Environment* 140: 519-528.
- Le Bihan O., Ounoughene G., Meunier L., Debray B., Aguerre-Chariol O., Incineration of a commercial coating with nano CeO₂, *Journal of Physics Conference Series* 838(1):012023 · June 2017
- Mueller, Nicole C.; Nowack, Bernd, Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, Volume 42, Issue 12, Pages 4447-4453, JUN 15 2008
- Ounoughene G., Le Bihan O., Chivas-Joly C., Motzkus C., Longuet C., Debray B., Joubert A., Le Coq L., Lopez-Cuesta J., "Behavior and fate of Halloysite nanotubes (HNTs) when incinerating PA6/HNTs nanocomposite", *Environmental Science and Technology* 03/2015; 49(9):5450–5457.
- Ounoughene G., Le Bihan O., Debray B., Chivas-Joly C., Longuet C., Joubert A., Lopez-Cuesta J-M., Le Coq L., Thermal disposal of waste containing nanomaterials: first investigations on a methodology for risk management, *Journal of Physics Conference Series* 838(1):012024 · June 2017
- Ounoughene G., Longuet C., Chivas-Joly C., Le Bihan O., Debray B., Joubert A., Lopez Cuesta J., Le Coq L., Evaluation of Nanosilica Emission in Polydimethylsiloxane Composite During Incineration, *Journal of Hazardous Materials* 371 (2019) 415-422
- R'mili B., Le Bihan O., Dutouquet C., Aguerre-Chariol O., Frejafon E., Particle Sampling by TEM Grid Filtration, *Aerosol Science and Technology*, 04/2013; 47(7).
- Setyan, Ari; Patrick, Michael; Wang, Jing, Very low emissions of airborne particulate pollutants measured from two municipal solid waste incineration plants in Switzerland, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, Volume 166, Pages 99-109, OCT 2017

ANNEXE 2

Devenir des nanomatériaux en incinération

Cette annexe fait le point sur le devenir des nanomatériaux lors de leur combustion au sein d'un four d'incinération. Pour ce faire, nous exploitons les connaissances développées à l'INERIS à travers notre activité sur le sujet, notamment au sein de projets soutenus par le Ministère ou des projets de recherche (Nanowet, Serenade, thèse G. Ounoughene, Nanofluegas, cALIBRATE, etc.).

Nous évoquons également la question du traitement des effluents.

Bibliographie

Le nombre d'études disponibles sur le sujet reste limité ; à titre d'exemple, un article de synthèse sur les émissions de nanomatériaux à l'atmosphère (John et al., 2017) et publié voici 2 ans, ne cite que 3 références. Pour notre part, nous identifions actuellement une quinzaine de références pertinentes.

Dans la plupart des cas, les travaux sont réalisés sur pilote de laboratoire, à une température proche de celle fixée par la réglementation pour les UIOM (850°C). Pour l'essentiel seul Walser et al. (2012), et plus récemment Nanowet, ont réalisés des essais en échelle 1. Il est à noter que le projet français Nanowet (2017-2019) a permis de se pencher pour la première fois sur la filière des déchets spéciaux, en l'occurrence sur le cas d'une incinération à 1100 °C.

Comportement des nanomatériaux au sein d'un pilote d'incinération

À 850 °C, nous pouvons conclure désormais à l'existence d'un spectre très large de comportements / scénarios.

En préalable, il est à noter que la présence de particules nanométriques est à même, dans certains cas, de modifier le processus d'incinération d'un produit ; cela peut prendre la forme d'un effet « retardateur de flamme » (Ounoughene et al., 2015).

Les produits carbonés auraient tendance à être oxydés, menant à une complète élimination : ce point a été illustré une première fois dans le cadre de NanoFlueGas (Le Bihan et al., 2014), et nécessiterait d'être consolidé. Massari et al. (2014) mettent en évidence un cas de transformation (nano-TiO₂), entraînant la disparition de la nanostructure.

A l'inverse, certains produits ne seraient pas (ou seraient très peu) modifiés par l'incinération (Walser et al., 2012 ; Le Bihan et al., 2014 ; Ounoughene et al., 2019).

La surface spécifique de certains produits serait diminuée par un phénomène de frittage (Le Bihan et al., 2017).

Enfin, on relève de nombreux cas pour lesquels des éléments de la matrice (non-nano) sont oxydés, menant à la création de nanoparticules. C'est le cas de l'oxydation de silicium, observée pour des polymères (Le Bihan et al., 2014 ; Ounoughene et al., 2019).

À 1100 °C, le projet NanoWet a permis d'étudier récemment le comportement d'une sélection de trois produits, à une température plus élevée. On relève des scénarios similaires à ceux observés à 850°C : disparition de la nano-structure, maintien, diminution de la surface spécifique par frittage (favorisée par une température plus élevée), création de nouvelles nanoparticules à partir de l'oxydation de silicium ou de diverses impuretés (notamment soufrées).

Flux de matière à l'issue de la combustion

Les articles et études cités ci-dessus montrent que la matière issue de la combustion se répartit entre les rejets dans l'air (aérosols, gaz) et les résidus solides de combustion.

Par exemple, cela a été clairement démontré au sein des projets NanoFlueGas (Le Bihan et al., 2014) et Nanowet, et cela apparaît dans la synthèse bibliographique réalisée dans Ounoughene et al. (2017), citant notamment Ounoughene et al. (2015), Massari et al., (2014), et Vejerano et al., (2014).

En conséquence, cela signifie que les gestionnaires de site d'incinération doivent prendre en compte la totalité des flux d'exploitation, et tout particulièrement les différentes étapes du procédé de traitement des effluents.

Efficacité des dispositifs de filtration

Dans le cadre de NanoFlueGas puis d'une thèse, l'IMT Nantes a évalué sur pilote l'efficacité de filtration sur filtres à manche typiques de la filière française à 850 °C. Les résultats montrent sur cette seule étape une efficacité supérieure à 90 %.

Mesures in-situ

L'étude de Walser et al. (2012) menée sur du nano-CeO₂ a mis en évidence que le traitement des fumées considéré dans cette étude de cas permettait de filtrer efficacement ce produit. L'état de l'art récent de Jones et Harrison (2016) montre des résultats allant également dans ce sens.

Toutefois, ces résultats nécessiteraient d'être confirmés par des mesures *in situ* supplémentaires.

Références

John, Astrid C.; Kuepper, Miriam; Manders-Groot, Astrid M. M.; et al., Emissions and Possible Environmental Implication of Engineered Nanomaterials (ENMs) in the Atmosphere, ATMOSPHERE, Volume 8, Issue 5, UNSP 84, MAY 2017

Jones, A. M. and R. M. Harrison (2016). "Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste: A review." Atmospheric Environment 140: 519-528.

Le Bihan O., Joubert A., Venditti D., Tran T., Ounoughene G., Debray B., Durécu S., Le Coq L. - Characterization and reduction of particulate emissions from the incineration of wastes containing engineered NMs", Summary of the NanoFlueGas ADEME Project - **2014** - Convention n° 1181C0088 – 7p

Le Bihan O., Ounoughene G., Meunier L., Debray B., Aguerre-Chariol O., Incineration of a commercial coating with nano CeO₂, Journal of Physics Conference Series 838(1):012023 · June **2017**

Massari, A. et al., 2014. Behavior of TiO₂ nanoparticles during incineration of solid paint waste: A lab-scale test. Waste Management.

Ounoughene G., Le Bihan O., Chivas-Joly C., Motzkus C., Longuet C., Debray B., Joubert A., Le Coq L., Lopez-Cuesta J., "Behavior and fate of Halloysite nanotubes (HNTs) when incinerating PA6/HNTs nanocomposite", Environmental Science and Technology 03/**2015**; 49(9):5450–5457.

Ounoughene G., Le Bihan O., Debray B., Chivas-Joly C., Longuet C., Joubert A., Lopez-Cuesta J-M., Le Coq L., Thermal disposal of waste containing nanomaterials: first investigations on a methodology for risk management, Journal of Physics Conference Series 838(1):012024 · June **2017**

Ounoughene G., Longuet C., Chivas-Joly C., Le Bihan O., Debray B., Joubert A., Lopez Cuesta J., Le Coq L., Evaluation of Nanosilica Emission in Polydimethylsiloxane Composite During Incineration, Journal of Hazardous Materials 371 (**2019**) 415-422

Vejerano, E.P. et al., 2014. Characterization of particle emissions and fate of nanomaterials during incineration. , 1(2), pp.83–192.

Walser, T. et al., 2012. Persistence of engineered nanoparticles in a municipal solid-waste incineration plant. Nature Nanotechnology.