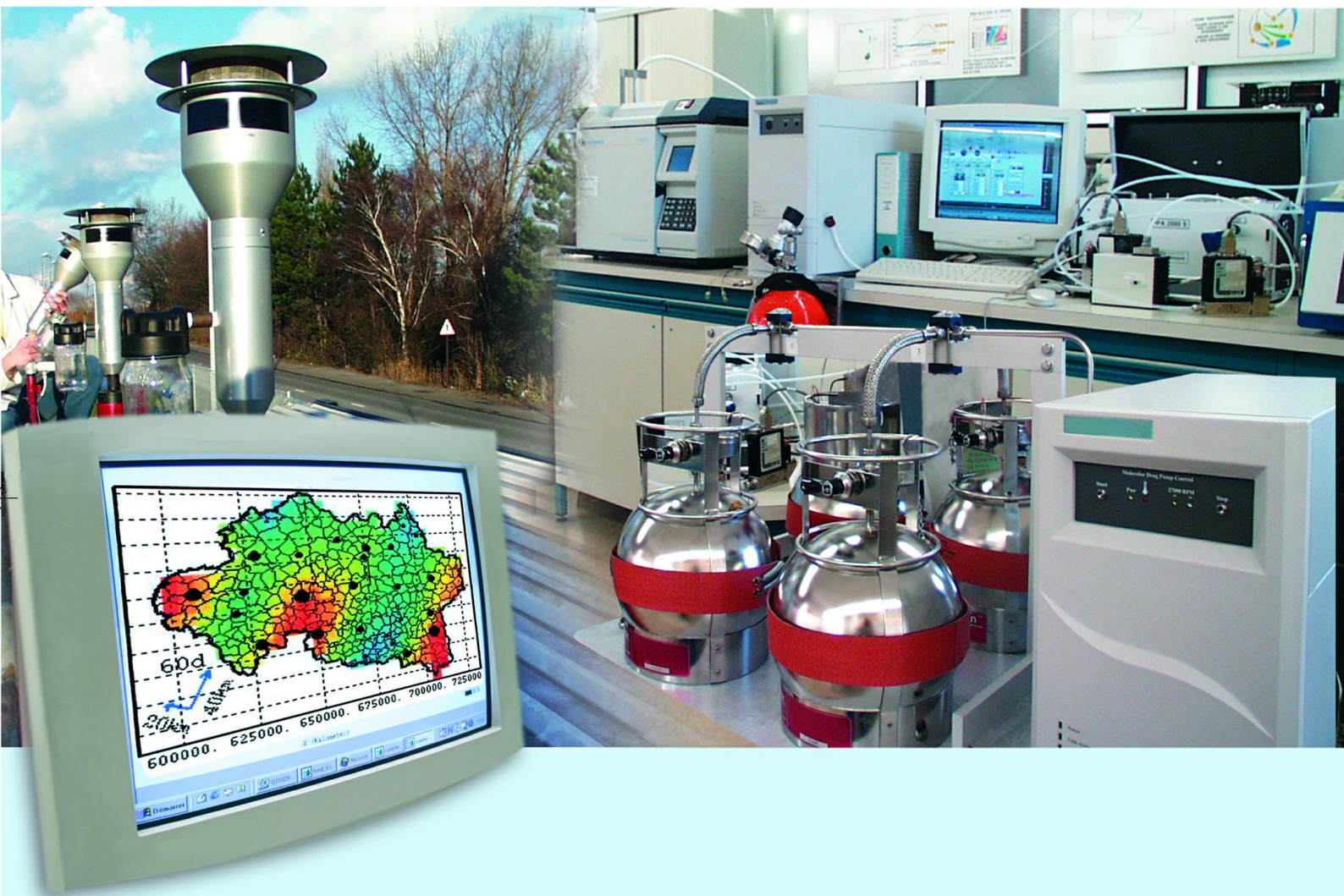




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Air intérieur

**Indicateurs optiques pour la mesure massique des particules
dans les environnements intérieurs**

Décembre 2008

Programme 2008

C. MARCHAND





PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'École des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, sous la coordination technique de l'ADEME et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux, en matière de pollution atmosphérique, supportés financièrement par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.



Indicateurs optiques pour la mesure des particules dans les environnements intérieurs

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

Thème : Air intérieur

Programme financé par le
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
(MEEDDM)

2008

J. SOUBISE, O. LE BIHAN, C. MARCHAND

Ce document comporte 28 pages (hors couverture et annexes)





	Rédaction	Vérification	Approbation	
NOM	C. MARCHAND	M. DURIF	D. GOMBERT	M. RAMEL
Qualité	Ingénieur à l'unité "Milieux"	Responsable de l'unité "Milieux"	Directeur adjoint, Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS, Direction des Risques Chroniques
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	7
REMERCIEMENTS	9
1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS	10
2. BILAN DES APPAREILS DISPONIBLES SUR LE MARCHE	10
3. TESTS EN CHAMBRE D'EXPOSITION	13
3.1 Liste des appareils étudiés.....	13
3.2 Mise au point de la chambre d'exposition	14
3.2.1 Caractérisation de la source de particules et optimisation.....	14
3.2.2 Variabilité spatiale.....	15
3.3 Tests des appareils	15
3.3.1 Protocole expérimental	16
3.3.2 Résultats.....	16
3.3.2.1 Profils de concentration obtenus	16
3.3.2.2 Comparaison des réponses des indicateurs optiques avec le TEOM-FDMS	17
4. TESTS IN SITU	20
4.1 Mesures dans un logement	20
4.1.1 Protocole expérimental	20
4.1.2 Caractérisation des sources de particules mises en œuvre	21
4.1.3 Comportement des indicateurs optiques	21
4.2 Mesures dans un bureau.....	24
5. "RETOUR UTILISATEUR"	25
6. CONCLUSION	27
7. BIBLIOGRAPHIE	28
8. LISTE DES ANNEXES	28

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air

HR : Humidité relative

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

LCSQA : Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air intérieur

PM₁ : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 1 µm

PM_{2.5} : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 2.5 µm

PM₄ : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 4 µm

PM₁₀ : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm

T : Température

TEOM : Microbalance à élément conique oscillant (*Tapered element oscillating microbalance*)

TEOM-FDMS (FDMS) : Microbalance à élément conique oscillant (*Tapered element oscillating microbalance*) couplée à un module FDMS (*Filter Dynamic Measurement System*)

TSP : Poussières totales (*Total Suspended Particles*)

RESUME

L'objectif global de cette étude est d'évaluer l'intérêt et le potentiel des techniques optiques indicatives dédiées aux particules, ainsi que les possibles applications dans le domaine de l'air intérieur, pour lequel ce type d'outil semble bien adapté. Cette étude a été réalisée dans le cadre des missions du Laboratoire central de surveillance la qualité de l'air (LCSQA) visant à apporter un appui scientifique et technique aux Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), avec pour objectif de capitaliser des informations sur l'adéquation d'un matériel avec ses objectifs d'utilisation.

L'objectif des travaux de 2008 était de réaliser un bilan du niveau de développement des indicateurs optiques, via des essais sur une sélection d'appareils, après la mise à jour des matériels disponibles sur le marché, suite au premier recensement réalisé en 2006. Pour cela, un dispositif d'exposition de conception simple, muni d'un système de génération de particules par combustion (encens), a été mis en place à l'INERIS afin d'exposer les appareils à des niveaux de concentration homogènes (spatialement), variables dans le temps. Des tests *in situ* ont également été réalisés dans un logement et un bureau. Les appareils suivants ont été testés : Dustmate, Grimm 1.108, Osiris, pDR (1000 et 1500), Sidepak.

De l'étude menée en 2008, il ressort que la mesure massique des particules via des indicateurs optiques reste entièrement indicative. En effet, pour l'ensemble de ce type d'instrument, la densité de l'aérosol étudié est une source d'approximation. Par ailleurs, d'autres sources d'approximation peuvent entrer en ligne de compte : il est important de rappeler qu'il existe deux familles d'appareils parmi ceux testés : celle dont le principe de mesure est celui de la dispersion d'une lumière incidente par une seule particule (Grimm, Osiris, Dustmate) et celle dont la dispersion est liée à un ensemble de particules (pDR, Sidepak). Dans le cas de cette dernière, la distribution granulométrique de l'aérosol étudié peut ajouter une source d'approximation si elle est significativement différente de celle de l'aérosol utilisé pour l'étalonnage de ces appareils (surestimation dans le cas d'une granulométrie plus fine).

Les tests réalisés en chambre d'exposition ont montré une dispersion notable des réponses des indicateurs optiques vis-à-vis de l'aérosol testé (combustion de bâtonnets d'encens, diamètre médian massique inférieur à 650 nm), réponses qui ont été évaluées par comparaison avec celle obtenue par un TEOM-FDMS, installé en parallèle.

Concernant la capacité des indicateurs optiques à suivre des profils dynamiques de concentration, Grimm, pDR et Sidepak ont montré des suivis temporels comparables à celui du FDMS, ce qui n'a pas été le cas pour l'Osiris et le Dustmate, leur domaine de mesure en terme de taille granulométrique pouvant expliquer cela (> 500 nm).

Concernant la concentration massique mesurée, les Grimm sont les indicateurs optiques ayant donné la meilleure adéquation avec le FDMS, suivi par les pDR (1000 et 1500), avec une surestimation d'au moins 50%. Il convient de noter que ces résultats ont été obtenus dans les conditions d'étalonnage des fournisseurs.

Les tests réalisés *in situ* ont permis de compléter les résultats obtenus en chambre d'exposition, en mettant en œuvre une seconde source de particules, de granulométrie moins fine que l'encens (aérosol de cuisson, diamètre médian massique supérieur à 2 µm). Les tests *in situ*, en réponse à la combustion d'encens, ont montré des réponses relatives (entre appareils) similaires à celles obtenues en chambre d'exposition hormis pour l'Osiris et le Dustmate. Les tests en réponse à l'aérosol de cuisson ont en revanche

montré des réponses relatives (entre appareils) différentes. Il convient de souligner que les réponses de l'Osiris et du Dustmate n'étaient pas toujours cohérentes, avec des réponses du même ordre de grandeur pour toutes les générations alors que certaines étaient plus intenses que d'autres, le domaine granulométrique ne pouvant être une explication dans le cas de cet aérosol.

Ces résultats sont à considérer avec précaution car ils ont été obtenus sur un nombre restreint d'essais. Il serait intéressant de les compléter avec un retour d'expérience sur des mesures de terrain conséquentes et pour différentes typologies de particules ; une campagne de mesures dans une gare aura lieu en 2009.

L'ensemble de ces tests a également permis d'acquérir un "retour utilisateur", utile dans le cadre de mesures sur le terrain notamment. Il convient de noter que Grimm, Osiris et Dustmate permettent une mesure simultanée de différentes fractions granulométriques ainsi qu'une mesure en masse et en nombre (mais pas simultanément). Si tous les appareils permettent une installation rapide, sont peu encombrants et permettent une vérification du zéro et un contrôle du débit facilement réalisables, certains points sont à améliorer : facilité/rapidité du déchargement des données (Osiris, Dustmate, Grimm), bruit de fonctionnement (Sidepak), stabilité de l'horloge (Osiris et Dustmate), interruption ou dérive de la mesure (pDR).

REMERCIEMENTS

Les rédacteurs souhaitent remercier les sociétés BPI Instruments, Ecomesure, Equipement Scientifique/Turnkey Instruments, Intertek et TSI Incorporated, pour les prêts des indicateurs optiques et leur accompagnement au cours de l'étude.

1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

La connaissance de la distribution spatiale de la pollution atmosphérique particulaire nécessite l'utilisation de techniques souples, portables et rapides. Un nombre important d'appareils est présent sur le marché. Toutefois, ils ne sont pas reconnus comme méthode de référence pour la mesure de concentrations massiques (PM_{10} , $PM_{2.5}$). Il s'agit le plus souvent de compteurs optiques, proposant une estimation de la concentration massique par recours à une masse volumique de l'aérosol estimée¹.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt et le potentiel de ces techniques optiques indicatives dédiées aux particules, ainsi que les possibles applications dans le domaine de l'air intérieur, pour lequel ce type d'outil semble bien adapté.

Une première phase de travail a été réalisée en 2006 (Rapport LCSQA INERIS-DRC/AIRE-74754-0654), présentant le principe de ces techniques et capitalisant un retour d'expérience des AASQA sur les indicateurs optiques ainsi qu'une synthèse de leurs besoins et des objectifs d'utilisation. Parmi ceux-ci le mesurage de qualité de l'air intérieur a été fréquemment cité. Un recensement des matériels existants avait également été réalisé.

L'objectif de cette seconde phase de travail réalisée en 2008 était, suite à une mise à jour des indicateurs optiques disponibles sur le marché, de réaliser une première évaluation du niveau de développement de ces matériels, via des essais sur une sélection d'appareils. Pour cela, un dispositif d'exposition de conception simple, muni d'un système de génération de particules par combustion, a été mis en place à l'INERIS afin d'exposer les appareils à des niveaux de concentration homogènes (spatialement), variables dans le temps. Des tests *in situ* ont également été réalisés dans un logement et un bureau.



2. BILAN DES APPAREILS DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ

Sur la base du recensement des appareils identifiés en 2006, un bilan actualisé des matériels pour la mesure indicative massique des particules disponibles sur le marché a été réalisé (Tableau 1), dans une perspective d'utilisation en air intérieur. Ainsi, seuls les appareils mobiles (poids < 5 kg) ont été inclus dans ce bilan. L'ensemble des données relatives à chaque appareil est issu des indications fournies par le constructeur ou le revendeur.

Par rapport au bilan de 2006 (Rapport LCSQA INERIS-DRC/AIRE-74754-0654), le pDR1200 et le Dustscan distribués par Ecomesure ont tous deux été remplacés par le pDR1500, de conception plus sophistiquée. En effet, il est équipé de sondes de température (T) et de pression atmosphérique (P) qui permettent la régulation du débit volumique pour les cyclones d'entrée (sélection granulométrique) ainsi que d'une sonde d'humidité relative (HR) permettant de corriger les effets de l'hygrométrie sur la réponse de l'appareil et par conséquent les concentrations mesurées. Par ailleurs, une cassette porte filtre permet de collecter les particules en sortie de cellule. Le Dust-Trak de TSI a également évolué et existe sous différents modèles : le 8530/8531 et le 8532 (Gamme Dust-Trak II) ainsi que le 8533 et le 8534 (Gamme Dust-Trak DRX). Les modèles 8530/8531 et 8533 sont dits "de bureau" et permettent également un prélèvement en









¹ Hypothèse que les particules mesurées sont sphériques et attribution d'une valeur de densité constante aux différentes fractions granulométriques de l'aérosol.

Tableau 1 : Bilan actualisé des indicateurs optiques pour la mesure des particules disponibles sur le marché et de leurs caractéristiques.

Appareil	Constructeur	Revendeur	Gamme de concentration (mg/m ³)	Type de mesure (nombre et/ou masse)	Gamme diamètre (µm)	Débit d'aspiration (L/min)	Résolution (mg/m ³)	Incertitude de mesure	Alimentation/ Autonomie (h)	Pas de temps	Poids (kg)	Mesure simultanée de différentes fractions
Dust-Trak II 8530/8531  8532 Dust-Trak DRX 8533 et 8534	TSI	- TSI France - ICS (Intertek)	de 10 ⁻³ à 150 0,5-400 (8531)	masse	0,1 - 10 (II) 0,1 - 15 (DRX)	1,4 à 3 (II) 3 (DRX)	0,001	Débit ± 5%	1 batterie (6h) et secteur	1 à 60 s	8530/8531, 8533 : 1,6 à 2,5 (1 ou 2 batteries) 8532, 8534 : 1,5	non (II) oui (DRX)
Sidepak	TSI	- TSI France - ICS (Intertek)	de 10 ⁻³ à 20	masse	0,1 - 10	0,7 à 1,8	0,001	NR	batterie (4-23h) et secteur	1 à 60 s	0,46 à 0,54	non
Grimm 1.108 Grimm 1.109	Grimm	ICS (Intertek)	de 10 ⁻³ à 100	masse et nombre	0,23 - 20 0,25 - 32	1,2	0,001	Débit ± 3%	batterie (7h) et secteur	min. 6 s	3	oui
DataRAM4	Thermo	Ecomesure	de 10 ⁻⁴ à 400	masse	0,08 - 10	1 à 3	0,0001	± 3%	batterie (20h) et secteur	1 à 60 s	5,3	non
pDR-1500 	Thermo	Ecomesure	de 10 ⁻³ à 400	masse	NR	1 à 3,5	0,001	NR	batterie (6h à 3,5 L/min ; 24h à 1,2 L/min) et secteur	1 à 60 s	1,2	non
pDR 1000	Thermo	Ecomesure	de 10 ⁻³ à 400	masse	0,1 - 10	0 Analyseur passif	0,001	± 5%	batterie (20h)	1 à 60 s	0,5	non
Osiris	Turnkey	Equipement Scientifique	de 10 ⁻⁴ à 6	masse et nombre	0,5 - 20	0,6	0,0001	NR	batterie et secteur	1 s à 4 h	3,5	oui
Dustmate	Turnkey	Equipement Scientifique	de 10 ⁻⁴ à 6	masse et nombre	0,5 - 20	0,6	0,0001	NR	batterie et secteur	1 s à 4 h	1,2	oui

 Nouveaux par rapport au bilan de 2006.

Tableau 1 (suite) : Bilan actualisé des indicateurs optiques pour la mesure des particules disponibles sur le marché et de leurs caractéristiques.

Appareil	Distinction des différentes fractions de PM (Têtes de coupure) Si oui, lesquelles ?	Prix HT (€)	Applications possibles	Stockage des données ?	Informations complémentaires	Visuel
Dust-Trak II 8530/8531 8532 ▲ Dust-Trak DRX 8533 et 8534	TSP, PM-4, PM-10, PM-2.5, PM-1	8533 : ~8400 8534 : ~6700	- évaluation de l'exposition des personnes - intervention suite à un accident/une plainte (8532, 8534) - surveillance de sites industriels (8530/8531, 8533)	60 000 mesurages	T opérationnelles : 0 à 50°C HR opérationnelles : 0 à 95% 8530/8531 et 8533 : Possibilité de prélèvement sur filtre (contrôle gravimétrique)	8530/8531 8532 8533 8534 
Sidepak	Impacteurs intégrés : - TSP (aucune coupure) - PM-10, PM-2.5, PM-1	3 520	- évaluation de l'exposition des personnes - intervention suite à un accident/une plainte - cartographie	31 000 mesurages	T opérationnelles : 0 à 50°C	
Grimm 1.108 Grimm 1.109	Fractions granulométriques : de 8 à 15 canaux (1.108) de 8 à 31 canaux (1.109)	14 000 (1.108) 18 000 (1.109)	- évaluation de l'exposition des personnes - surveillance de sites industriels	oui	T opérationnelles : -5 à 45°C 1 à 2000000 particules/L Possibilité de prélèvement sur filtre (contrôle gravimétrique)	
DataRAM4	- Tête TSP seule - TSP et impacteur : PM-10, PM-2.5 - TSP et impacteur : PM-10, PM-2.5 et adaptateur PM-1	11 500 12 220 12 450	- évaluation de l'exposition des personnes - surveillance de sites industriels	50 000 mesurages	T opérationnelles : -10 à 50°C HR opérationnelles : 10 à 95% Compense effets HR Indication du diamètre médian	
pDR-1500 ▲	- Tête TSP seule - TSP et 1 cyclone : PM-10, PM-4 ou PM-2.5, PM-1 - TSP et 2 cyclones : PM-10, PM-4 et PM-2.5, PM-1	3 950 4 420 4 850	- évaluation de l'exposition des personnes - intervention suite à un accident/une plainte - cartographie	50 000 mesurages	T opérationnelles : -10 à 50°C Sondes T et P : régulation débit volumique Sonde HR : correction des effets de l'HR Possibilité de prélèvement sur filtre (contrôle gravimétrique)	
pDR 1000	PM-10 uniquement	3 700	- intervention suite à un accident/une plainte - cartographie	13 300 mesurages	T opérationnelles : -10 à 50°C HR opérationnelles : 10 à 95%	
Osiris	TSP, PM-10, PM-2.5, PM-1	6 500	- évaluation de l'exposition des personnes - surveillance de sites industriels	oui	T opérationnelles : -5 à 40°C Possibilité de prélèvement sur filtre (contrôle gravimétrique) et Boîtier pour utilisation extérieure (ligne chauffée)	
Dustmate	TSP, PM-10, PM-2.5, PM-1	4 400	- évaluation de l'exposition des personnes - intervention suite à un accident/une plainte	oui	T opérationnelles : -5 à 40°C Possibilité de prélèvement sur filtre (contrôle gravimétrique)	

parallèle sur filtre, comme le pDR1500 alors que les modèles 8532 et 8534 sont portables. Les modèles de la gamme Dust-Trak DRX permettent de réaliser une mesure simultanée de différentes fractions (poussières totales, PM₁₀, PM₄, PM_{2.5} et PM₁), ce qui n'est pas le cas sur l'ancien modèle et les modèles Dust-Trak II. Les modèles DRX, dans leur principe de mesure, combinent les 2 principes identifiés en 2006 (principe de mesure basé sur la dispersion d'une lumière incidente par un ensemble de particules ou par une seule particule).

Certains indicateurs peuvent être intégrés dans un système fixe (Dust-Trak II 8530/8531, Dust-Trak DRX 8533, Grimm, DataRAM4, Osiris), pouvant ainsi permettre une surveillance sur site.

De ce bilan réactualisé, il ressort que :

- 13 indicateurs optiques disponibles sur le marché ont été identifiés pour l'air intérieur ;
- 6 d'entre eux sont nouveaux par rapport au bilan de 2006 (pDR1500, Dust-Trak II 8530/8531 et 8532, Dust-Trak DRX 8533 et 8534) ;
- en 2006, 2 familles d'appareils avaient été identifiées :
 - ✓ celle dont le principe de mesure est celui de la dispersion d'une lumière incidente par un ensemble de particules (pDR, DataRAM 4, Sidepak, Dust-Trak II), ce qui permet la mesure de concentrations massiques élevées ;
 - ✓ celle dont la dispersion est liée à une seule particule (Grimm (1.108 et 1.109), Osiris, Dustmate), ce qui permet d'avoir une information sur la taille des particules et une mesure simultanée de différentes fractions granulométriques ;
- les Dust-Trak DRX combinent ces 2 principes de mesure ;
- 4 indicateurs optiques permettent une mesure en masse et en nombre (Grimm (1.108 et 1.109), Osiris, Dustmate), mais pas simultanément.

3. TESTS EN CHAMBRE D'EXPOSITION

L'objectif de cette phase de travail réalisée en 2008 a été de faire une première évaluation du niveau de développement de ces matériels, via des essais sur une sélection d'appareils. Dans un premier temps, un dispositif d'exposition de conception simple, muni d'un système de génération de particules par combustion (encens), a été mis en place à l'INERIS afin d'exposer les appareils à des niveaux de concentration variables.

3.1 LISTE DES APPAREILS ETUDIÉS

Les indicateurs optiques suivants ont été utilisés pour les tests en chambre d'exposition : un pDR1000, un pDR1500, un Dustmate, un Osiris, un Grimm 1.108, un Sidepak. A titre indicatif, un Grimm 180, destiné à des mesures en air extérieur (du fait de sa configuration) et en prêt à l'INERIS au moment de cette étude, a été ajouté au panel des instruments étudiés.

Afin d'évaluer la réponse en masse de ces différents indicateurs optiques, des instruments de mesure déjà reconnus pour la mesure de concentrations massiques de particules, un TEOM 50°C et un TEOM-FDMS, ont également été installés en parallèle.

Les Dust-Traks identifiés dans le chapitre 2 n'ont pas été testés car ils n'étaient pas encore disponibles sur le marché au moment de l'étude. Pour des raisons de disponibilité, le DataRAM4 n'a pas pu être testé.

3.2 MISE AU POINT DE LA CHAMBRE D'EXPOSITION

La chambre d'exposition mise en place correspond à un espace clos (Annexe 2) dans lequel les différents indicateurs optiques ont été regroupés autour du TEOM 50°C et du TEOM-FDMS, l'ensemble des instruments fonctionnant simultanément durant les phases de tests. La génération des particules s'est faite par combustion de bâtonnets d'encens. Une phase de tests préliminaires a été réalisée afin de mettre au point la chambre d'exposition.

3.2.1 Caractérisation de la source de particules et optimisation

D'après nos tests, la combustion de l'encens utilisé durant toute l'étude génère très majoritairement des particules de diamètre médian massique inférieur à 650 nm (Figure 1).

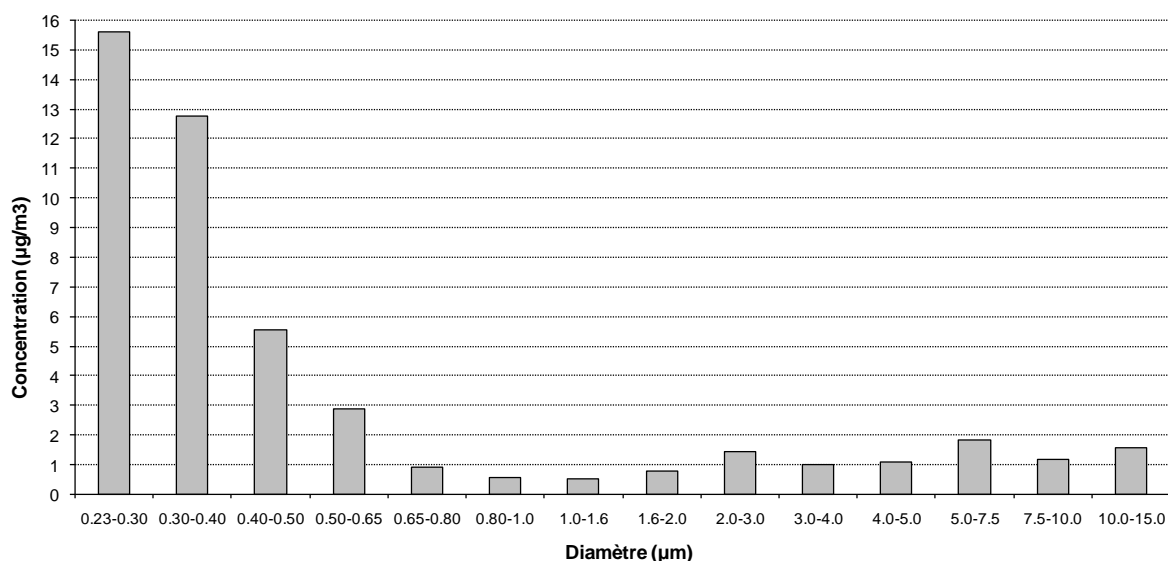


Figure 1 : Granulométrie massique de la combustion d'encens obtenue via le Grimm 1.108

Chaque combustion d'encens entraîne un "pic" de particules, permettant ainsi, en une génération de couvrir des gammes de concentration différentes. Dans un premier temps, des générations ont été effectuées afin de déterminer le nombre minimum d'encens à mettre en œuvre pour chaque test (il a également été vérifié qu'il n'y avait pas de saturation du signal pour les différents indicateurs optiques). Dans un second temps, le local faisant office de chambre d'exposition étant muni d'une hotte (Annexe 2), l'influence de cette dernière sur la génération a également été étudiée afin de l'optimiser.

L'ensemble de ces tests a montré que la combustion de 3 ou 4 bâtonnets d'encens permettait de générer des pics de particules d'intensité suffisante et par conséquent de couvrir une gamme de concentration en masse suffisante. Les tests réalisés avec/sans hotte ont montré que les générations avec hotte en marche permettaient de réduire le temps nécessaire pour regagner le niveau de concentration avant génération (diminution de la largeur du "pic" de particules) et par conséquent la durée de chaque test. Cependant, nous avons constaté que les générations avec la hotte éteinte permettaient d'obtenir moins de fluctuation sur le signal des indicateurs optiques (probablement due à une meilleure homogénéisation du nuage de particules générées sans fonctionnement de la hotte). Le choix a donc été fait de ne pas utiliser la hotte pour l'ensemble des tests.

3.2.2 Variabilité spatiale

L'influence de l'emplacement des indicateurs optiques sur la concentration mesurée a également été étudiée. En effet, il s'agissait de vérifier que le périmètre dans lequel l'ensemble des indicateurs optiques et des TEOM se situait était bien homogène en concentration de particules. Pour cela, des tests ont été réalisés sur deux journées différentes, avec un total de 5 générations. Le TEOM-FDMS a été pris comme référence (compte-tenu de la prise compte de la fraction volatile). Le Grimm 180, qui lors des premiers tests avait montré une bonne corrélation avec le TEOM-FDMS, a été utilisé pour évaluer l'influence de l'emplacement des indicateurs optiques sur la concentration mesurée. Pour 2 générations, le FDMS et le Grimm 180 étaient éloignés, couvrant la distance maximum en hauteur et en longueur pouvant séparer l'ensemble des indicateurs optiques testés et pour 3 générations, les deux instruments étaient regroupés, sans pour autant que chacun perturbe la mesure de l'autre. Les résultats de la Figure 2 montrent que la corrélation entre les réponses du FDMS et du Grimm 180 est similaire pour les 2 configurations (éloignés/regroupés), ce qui implique que les 2 instruments étaient soumis à des niveaux de concentration homogènes (spatialement) dans la zone de test définie.

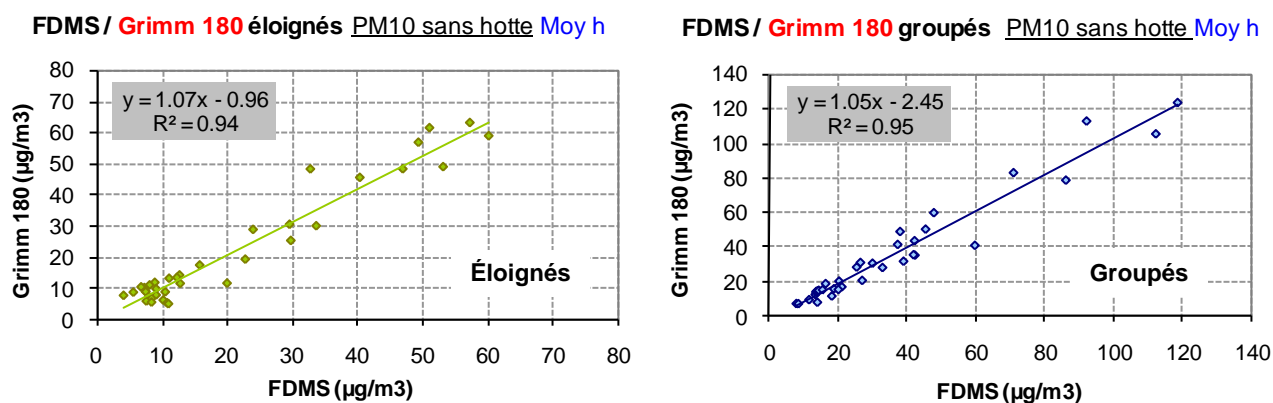


Figure 2 : Corrélation entre les réponses du Grimm 180 et du TEOM-FDMS selon leur emplacement dans la chambre d'exposition.

Les concentrations mesurées par le FDMS correspondent à des moyennes horaires dont la réactualisation a été demandée tous les $\frac{1}{4}$ d'heure dans le cadre de cette étude. Afin de pouvoir comparer les résultats du Grimm 180 (acquisition moyennée sur une minute) à ceux du FDMS, des moyennes glissantes sur une heure ont été calculées pour le Grimm 180, avec une moyenne extraite toutes les 15 minutes, synchronisée avec celle du FDMS.

BILAN DE LA MISE AU POINT DE LA CHAMBRE D'EXPOSITION (Chapitre 3.2) :

- la source de particules mises en œuvre (combustion d'encens) présente un diamètre médian massique inférieur à 650 nm et permet de couvrir différents niveaux de concentration ;
- l'objectif de soumettre l'ensemble des appareils de mesure à des niveaux de concentrations homogènes (spatialement), variables dans le temps, a été atteint.

3.3 TESTS DES APPAREILS

A la suite de cette phase préliminaire, une série de plusieurs générations a été réalisée sur 6 journées, avec 3 générations par jour. Elle s'est déroulée selon le planning donné en Annexe 3.

3.3.1 Protocole expérimental

L'ensemble des tests a été réalisé selon la procédure décrite ci-dessous, correspondant à une journée d'expérience donc 3 générations. Les appareils étaient disposés selon le schéma de l'Annexe 2. Les Grimm 1.108 et 180 étaient configurés en mode "fraction environnementale" (i.e. PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀).

J-1 :

Vérification des débits et des horloges de tous les appareils.

Faire le "zéro" si nécessaire.

Lancer la mesure de tous les appareils pour ceux pouvant fonctionner sur secteur.

Jour J :

- 1) Les appareils doivent être installés de telle sorte que leur extraction n'est pas dirigée vers la tête d'un autre appareil.
- 2) Vérification que les appareils mis en route la veille sont toujours en fonctionnement et ne donnent pas de mesure aberrante, au quel cas, faire un "zéro".
Mise en route du pDR1000 (qui ne fonctionne que sur batterie) et vérification de son niveau de charge.
Vérification que la hotte est bien éteinte.
- 3) 1^{ère} génération : mise en place des bâtons d'encens dans le porte-encens et début de la combustion (mise en route du chronomètre et report de l'heure, synchronisée avec les appareils de mesure).
Sortie de la chambre d'exposition.
Retour dans la chambre d'exposition et extinction des bâtons d'encens (en les plongeant dans un verre d'eau) 15 minutes après le début de la combustion.
Sortie de la chambre d'exposition et fermeture de la porte.
- 4) 2^{ème} génération : les procédures décrites en 2) et 3) sont réitérées, au minimum 3h² après le début de la première génération.
- 5) 3^{ème} génération : les procédures décrites en 2) et 3) sont réitérées, au minimum 3h après le début de la deuxième génération.

J+1 :

Déchargement des données et exploitation.

3.3.2 Résultats

3.3.2.1 PROFILS DE CONCENTRATION OBTENUS

Les Figures 3 et 4 illustrent le type de profil de concentration en particules obtenu suite à la combustion d'encens dans la chambre d'exposition. Les données de la Figure 3 correspondent à des concentrations moyennées sur une durée de 5 minutes. Les données de la Figure 4 correspondent à des moyennes horaires réactualisées tous les ¼ d'heure (cf. chapitre 3.2.2). De ce fait, les profils de la Figure 4 présentent des "pics" de concentration moins élevés et plus étalés dans le temps.

De manière générale, on constate que le suivi temporel des concentrations massiques par les TEOM et les indicateurs optiques sont comparables.

² Le 2^{ème} jour de tests (24 juillet), seulement 2h30 s'étaient écoulées entre la 1^{ère} et la 2^{ème} génération, ce qui est apparu comme étant une durée trop courte pour un retour au niveau initial en particules.

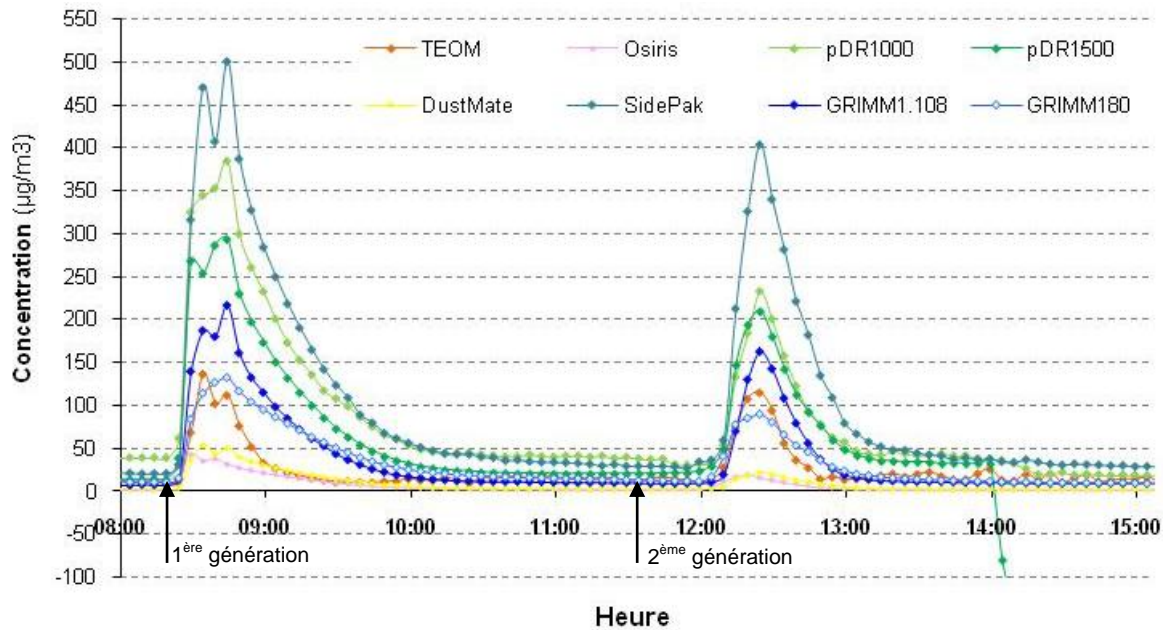


Figure 3 : Profil des concentrations en particules suite une combustion d'encens pour l'ensemble des indicateurs optiques et le TEOM 50°C (données moyennées sur 5 minutes, 28-07-2008)

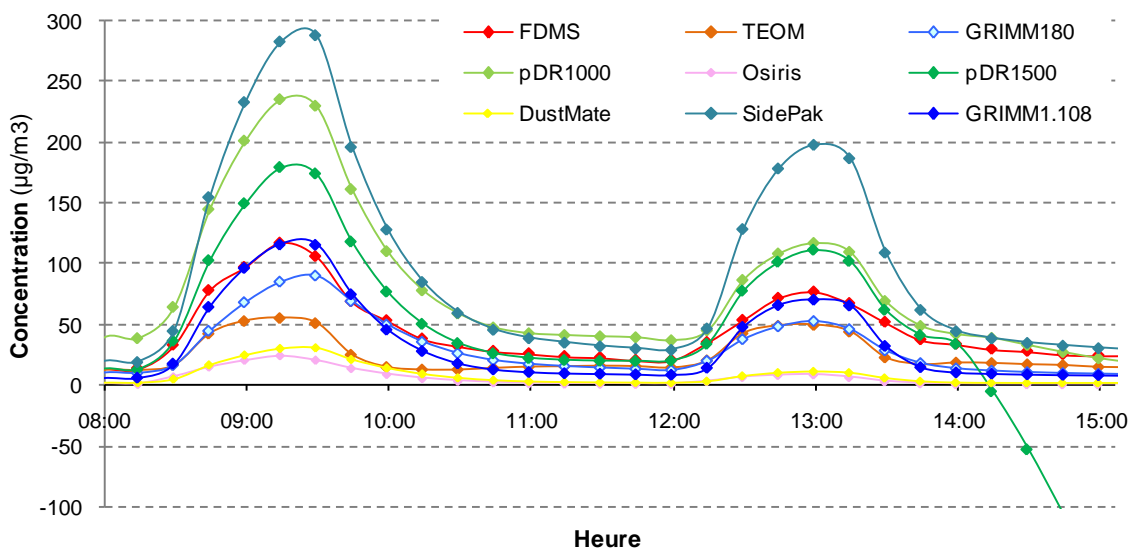


Figure 4 : Profils des concentrations en particules suite une combustion d'encens pour l'ensemble des indicateurs optiques, le TEOM 50°C et le FDMS (données moyennées sur 1 h, 28-07-2008)

Toutefois, on constate sur ces profils de concentration que certains indicateurs optiques surestiment très nettement la concentration massique en particules (Sidepak, pDR 1000, pDR 1500) alors que d'autres la sous-estiment très fortement (Osiris et Dustmate). Le Grimm 1.108 ainsi que le Grimm 180 semblent donner une réponse en bon accord avec celles du TEOM 50°C et du TEOM-FDMS.

L'ensemble de ces corrélations sont étudiées plus en détail dans le chapitre 3.3.2.2.

A noter également une chute brutale du signal du pDR1500 vers 14h, incident qui n'est arrivé qu'une fois lors des tests. Une remise à zéro de l'appareil a permis de continuer les mesures sans problème.

3.3.2.2 COMPARAISON DES REPONSES DES INDICATEURS OPTIQUES AVEC LE TEOM-FDMS

Afin de pouvoir réaliser cette comparaison, des moyennes glissantes sur une heure ont été calculées pour l'ensemble des indicateurs optiques ainsi que pour le TEOM 50°C, avec une moyenne extraite toutes les 15 minutes, synchronisée avec celle du FDMS, comme dans le chapitre 3.2.2. La Figure 5 illustre la corrélation obtenue entre les mesures du Grimm 1.108 et celles du FDMS sur l'ensemble des générations réalisées en chambre d'exposition. Celles des autres indicateurs optiques et du TEOM 50°C sont présentées en Annexe 4 et le Tableau 2 résume l'ensemble des équations obtenues.

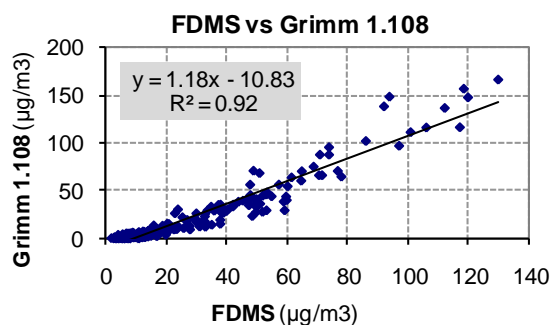


Figure 5 : Corrélation entre la réponse du Grimm 1.108 et celle du TEOM-FDMS sur l'ensemble des générations réalisées en chambre d'exposition

Malgré des températures supérieures à 25°C enregistrées lors de certains tests, le FDMS n'a pas montré de comportement aberrant. Cependant, certaines données ont été éliminées pour cette comparaison, des "anomalies" ponctuelles ayant été constatées (décrochage du signal du pDR 1500, échauffement de la ligne de prélèvement pour l'Osiris 2663, concentrations négatives données par le TEOM 50°C).

Tableau 2 : Synthèse des équations de corrélation obtenues entre les indicateurs optiques ainsi que le TEOM 50°C et le TEOM-FDMS

Appareils comparés	Équation obtenue	Appareils comparés	Équation obtenue
FDMS / Grimm 1.108	$y = 1.18x - 10.83$ $R^2 = 0.92$	FDMS / Grimm 180	$y = 0.84x - 1.14$ $R^2 = 0.85$
FDMS / pDR 1000	$y = 1.86x - 15.64$ $R^2 = 0.87$	FDMS / pDR 1500	$y = 1.59x - 9.83$ $R^2 = 0.90$
FDMS / Sidepak	$y = 2.71x - 18.87$ $R^2 = 0.93$	FDMS / TEOM	$y = 0.56x - 0.35$ $R^2 = 0.87$
FDMS / Osiris 2663	$y = 0.26x - 0.67$ $R^2 = 0.49$	FDMS / Dustmate	$y = 0.29x + 3.18$ $R^2 = 0.36$

La comparaison des mesures obtenues par le TEOM 50°C et le TEOM-FDMS permet de constater que l'aérosol généré présente une fraction volatile non négligeable. En effet, il existe quasiment un facteur 2 entre les concentrations mesurées par le FDMS (prise en compte de la fraction volatile) et le TEOM 50°C (coefficient directeur (a) de la droite de régression ~ 0,6).

Les coefficients de corrélation obtenus (R^2) montrent très clairement deux catégories d'indicateurs optiques. En effet, les Grimm, les pDR et le Sidepak montrent une bonne corrélation avec le FDMS dans la capacité à détecter des variations rapides de concentrations (profils dynamiques), avec un coefficient de corrélation proche de 0,9. En revanche, pour l'Osiris et le Dustmate, ce coefficient est proche de 0,4, indiquant que les variations de concentrations générées dans la chambre d'exposition n'ont pas été détectées de manière satisfaisante. Ceci pourrait être lié au domaine de mesure de ces appareils en terme de taille granulométrique puisqu'ils ne mesurent que les particules

supérieures à 500 nm.

Concernant la comparaison des concentrations massiques mesurées par les différents indicateurs optiques (comparaison des coefficients directeurs (a) des équations), on constate que tous ne présentent pas les mêmes performances. En effet, les Grimm (1.108 et 180) donnent des concentrations massiques qui sont en bon accord avec celles mesurées par le TEOM-FDMS ; le Grimm 1.108 surestime légèrement les concentrations ($a \sim 1,2$) alors que le Grimm 180 les sous-estime légèrement ($a \sim 0,8$). Les pDR1500 et 1000 présentent également des résultats intéressants, tous deux surestimant les concentrations massiques en particules tout en restant dans un ordre de grandeur proche de celles données par le FDMS (respectivement, $a \sim 1,6$ et $a \sim 1,9$). Le Sidepak, quant à lui, surestime très nettement les concentrations massiques en particules, d'un facteur proche de 3 ($a \sim 2,7$). En revanche, l'Osiris ainsi que le Dustmate sous-estiment très nettement les concentrations massiques générées, d'un facteur 3 à 4 par rapport au FDMS, ce qui, comme mentionné précédemment, peut être dû à la gamme de mesure granulométrique de ces derniers (> 500 nm).

La comparaison des concentrations massiques obtenues pour les différents indicateurs optiques est à considérer avec précaution.

En effet, tous les indicateurs optiques ne sont pas étalonnés avec le même aérosol ce qui peut impliquer une densité et une distribution granulométrique différentes. Ce facteur peut donc être une source de disparité entre les concentrations massiques mesurées par les différents indicateurs optiques. D'ailleurs, il semble qu'il y ait un comportement de réponse par type de constructeur puisque les deux Grimm donnent des résultats proches entre eux, comme les pDR, et l'Osiris et le Dustmate réagissent également de manière similaire.

De plus, il semble important de rappeler, à ce stade, que parmi les indicateurs optiques testés, deux principes de mesures existent (Rapport LCSQA INERIS-DRC/AIRE-74754-0654) :

- soit la mesure est basée sur une dispersion de la lumière par un ensemble de particules. Dans ce cas, la variabilité granulométrique est prise en compte par le biais d'un diamètre optique moyen attribué à l'aérosol et l'intensité lumineuse diffusée est directement proportionnelle à la concentration en nombre ;
- soit le principe de la mesure consiste à focaliser un faisceau incident sur une seule particule. Dans ce cas, l'intensité lumineuse diffusée dépend directement de la taille de la particule. L'appareil réalise alors un comptage du nombre de particules selon le diamètre optique³.

De ce fait, si la densité de l'aérosol étudié reste une source d'approximation pour l'ensemble des indicateurs optiques, dans le cas d'une mesure basée sur la dispersion de la lumière incidente par un ensemble de particules, la distribution granulométrique de l'aérosol étudié peut ajouter une source d'approximation si elle est significativement différente de celle de l'aérosol utilisé pour l'étalonnage de ces appareils. Ainsi, si l'aérosol étudié est centré sur une valeur plus faible que celle de l'aérosol étalon, il y aura surestimation de la concentration.

A noter que des prélèvements sur filtre ont été réalisés en simultané avec le pDR1500⁴ afin d'essayer de corriger le facteur d'étalonnage en fonction de la nature de l'aérosol, à

³ Des phénomènes de coïncidence sont alors possibles.

⁴ D'autres appareils permettent également de réaliser un prélèvement sur filtre en parallèle (cf. Tableau 1).

l'aide de la masse prélevée, mais les volumes prélevés étaient trop faibles pour pouvoir effectuer cet ajustement.

BILAN DES TESTS EN CHAMBRE D'EXPOSITION (Chapitre 3.3):

- 18 générations (combustion de bâtonnets d'encens) ont été réalisées ;
- la réponse des indicateurs optiques vis-à-vis de cet aérosol a été évaluée en comparaison avec celle obtenue par un TEOM-FDMS, installé en parallèle;
- concernant la capacité à fournir des profils dynamiques de concentrations massiques : Grimm, pDR et Sidepak présentent des suivis temporels comparables à celui du FDMS, ce qui n'est pas le cas pour l'Osiris et le Dustmate, leur domaine de mesure en terme de taille granulométrique pouvant expliquer cela (> 500 nm) ;
- concernant la comparaison des concentrations massiques, plusieurs facteurs sont à prendre compte : si la densité de l'aérosol étudié est source d'approximation pour l'ensemble des indicateurs optiques, la distribution granulométrique de l'aérosol étudié est un facteur supplémentaire d'approximation pour les appareils dont le principe repose sur la dispersion d'une lumière incidente par un ensemble de particules. De plus, tous les indicateurs optiques ne sont pas étalonnés avec le même aérosol étalon. Concernant la concentration massique mesurée, les Grimm sont les indicateurs optiques ayant donné la meilleure adéquation avec le FDMS, suivi par les pDR (1000 et 1500), dans les conditions d'étalonnage des fournisseurs.

4. TESTS IN SITU

Suite aux tests en chambre d'exposition, des essais *in situ* ont également été réalisés dans un logement et un bureau afin de tester le comportement des appareils en conditions réelles d'air intérieur. Ces tests complémentaires avaient pour but d'évaluer les réponses des indicateurs optiques vis-à-vis d'autres sources de particules et de confirmer leur bonne intégration dans des environnements intérieurs (bruit, encombrement notamment). Pour des raisons d'encombrement, le TEOM-FDMS et le TEOM 50°C n'ont pas été installés en parallèle des indicateurs optiques, de même que le Grimm 180 (voir chapitre 3.1).

4.1 MESURES DANS UN LOGEMENT

A titre indicatif, le logement étudié correspond à un appartement situé au 2^{ème} étage d'une maison, en zone urbaine. Dans le logement, les mesures ont été effectuées dans une chambre et dans la cuisine, sur 3 journées différentes. Plusieurs sources de particules ont été mises en œuvre successivement (cuisson de steaks, combustion d'encens, ouverture des fenêtres, balayage), selon le planning donné en Annexe 5. Les instruments de mesures étaient placés soit dans la pièce où se trouvait la source, soit dans l'autre pièce (Annexe 6).

4.1.1 Protocole expérimental

Chaque indicateur optique était mis en route au moins 1 h avant la première génération volontaire de particules. Avant celle-ci, le niveau de charge de la batterie du pDR 1000 était vérifié. De même, le "zéro" des appareils était réalisé quand cela était nécessaire.

Pour chaque type de source, leur mise en œuvre était identique à chaque fois :

- cuisson : 2 steaks, cuisson au gaz sans matière grasse, 3 minutes pour chaque face ;
- encens : 1 bâton, combustion durant 15 minutes ;

- ouverture des fenêtres (influence de l'air extérieur) : ouverture du velux avec une demi-amplitude, pendant au moins une heure, en fin d'après-midi, à des horaires où le trafic automobile était potentiellement plus dense qu'en journée.

La fraction granulométrique étudiée était celle des PM_{2.5} pour l'ensemble des indicateurs (hormis le pDR 1000 (PM₁₀ uniquement)).

4.1.2 Caractérisation des sources de particules mises en œuvre

La caractérisation granulométrique des sources de particules mises en œuvre volontairement dans le logement ont été réalisées au moyen du Grimm 1.108. Elles sont présentées dans les Figures 6 et 7.

Dans le cadre de ces essais, on constate que la cuisson est très nettement la plus forte source en terme de concentration massique (Figures 6 et 7). On constate également que hormis pour l'encens, où la plus grosse partie de la concentration massique mesurée correspond à des PM₁, les autres sources de particules mises en œuvre présentent une granulométrie moins fine, avec la majorité de la concentration massique provenant de particules >PM_{2.5}.

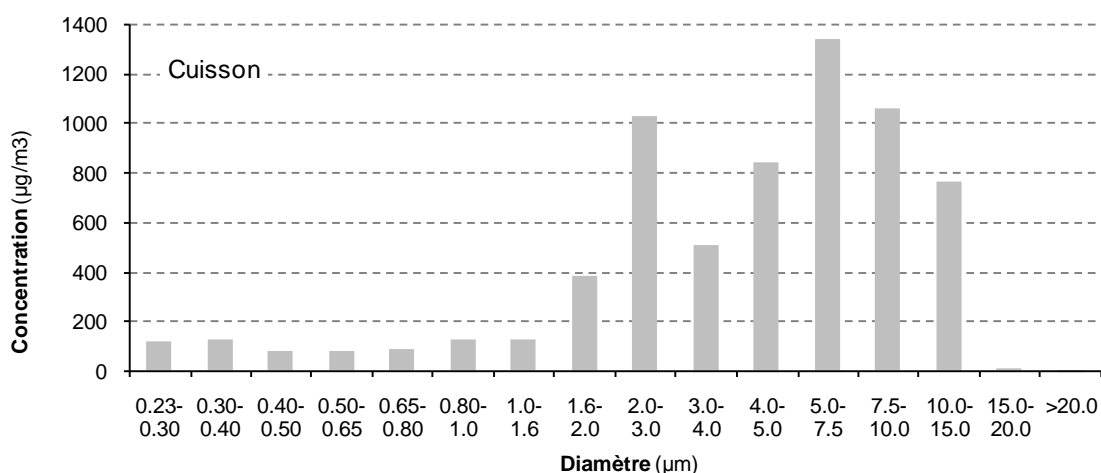


Figure 6 : Granulométrie massique de la cuisson au gaz de 2 steaks (Grimm 1.108)

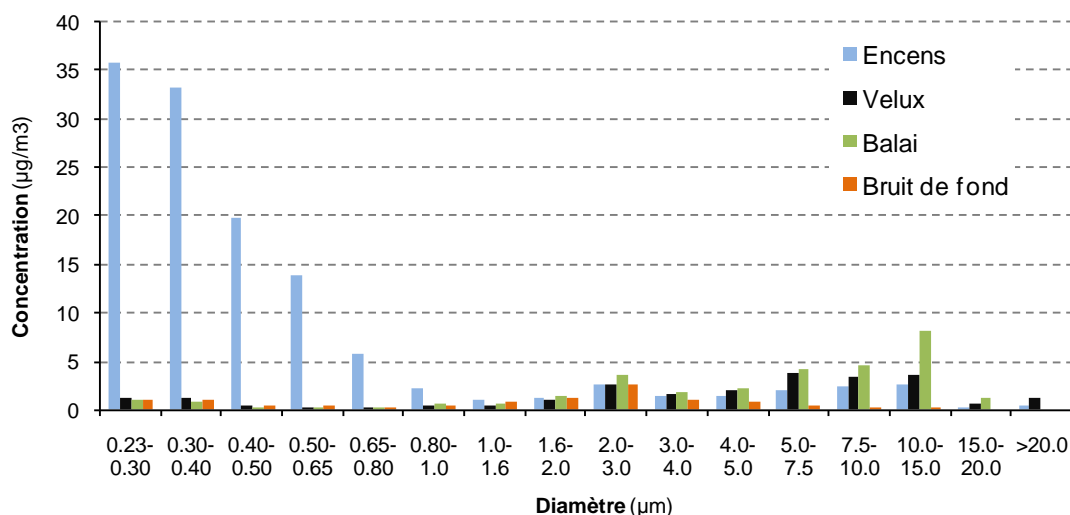


Figure 7 : Granulométrie massique des particules générées par la combustion d'encens, l'ouverture du velux, le passage du balai et en bruit de fond (Grimm 1.108)

Il est important de souligner que selon le mode de mesure du Grimm 1.108 (fractions environnementales (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀)) ou 15 canaux granulométriques), la comparaison

des fractions granulométriques peut être très différente (Annexe 7). Il semble que cela soit lié à la précision de la coupure granulométrique. Afin d'être cohérents avec les résultats de la chambre d'exposition, les résultats présentés ci-dessous ont été exploités en mode "fractions environnementales" pour le Grimm.

4.1.3 Comportement des indicateurs optiques

Les Figures 8 et 9 illustrent les profils de concentrations massiques obtenues avec les indicateurs optiques pour la cuisson et la combustion d'encens. Pour plus de lisibilité, les données présentées dans les graphiques sont moyennées sur une heure, avec un point tous les ¼ d'heure (chapitre 3.3.2.1). Les données du pDR 1000 sont données à titre indicatif étant donné qu'il ne mesure que les PM₁₀. A titre informatif, et sur la base des résultats obtenus en chambre d'exposition, le signal "théorique" qu'aurait donné le TEOM-FDMS a été calculé (FDMS calc.) à partir des données du Grimm 1.108.

Concernant l'ouverture du velux et le balayage, aucun signal se détachant nettement du bruit de fond en particules n'a été enregistré.

Sur la Figure 8 (encens), on constate que pour le Sidepak, les pDR et le Grimm 1.108, les réponses relatives obtenues (entre appareils) sont similaires à celles obtenues en chambre d'exposition. En revanche, les réponses du Dustmate et de l'Osiris sont voisines de celles du Grimm 1.108, ce qui n'était pas du tout le cas lors des mesures en chambre d'exposition.

Si l'on compare les données du 05-08 et du 06-08, on constate également que l'Osiris et le Dustmate donnent des concentrations équivalentes pour les deux jours alors que pour tous les autres indicateurs, on constate une diminution notable de la concentration. Aucune explication n'a pu être mise en avant pour expliquer ce phénomène, la position des appareils étant identiques et aucun défaut de fonctionnement n'ayant été constaté.

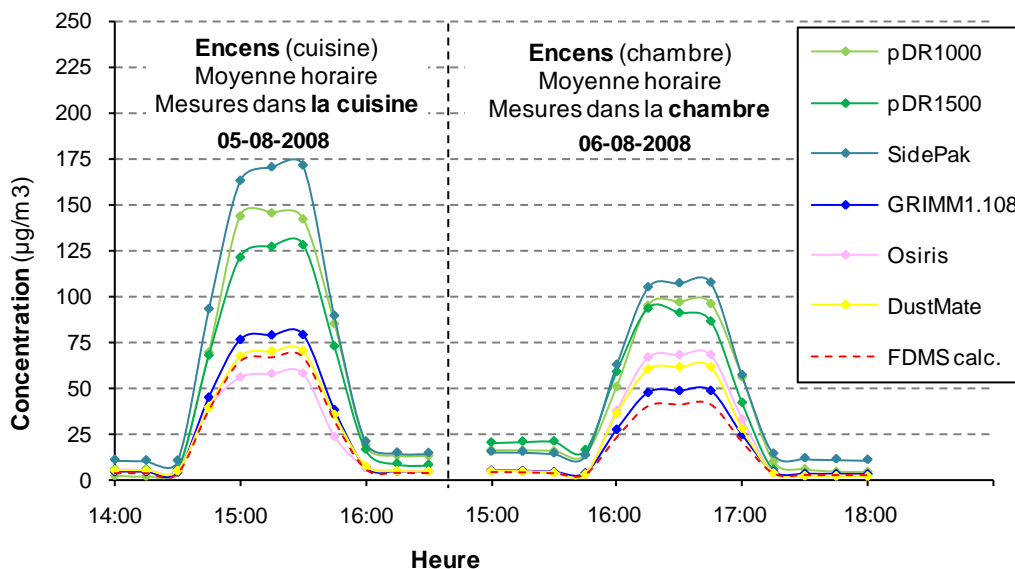


Figure 8 : Profils des concentrations massiques en particules suite à la combustion d'encens pour l'ensemble des indicateurs optiques (données moyennées sur 1 h)

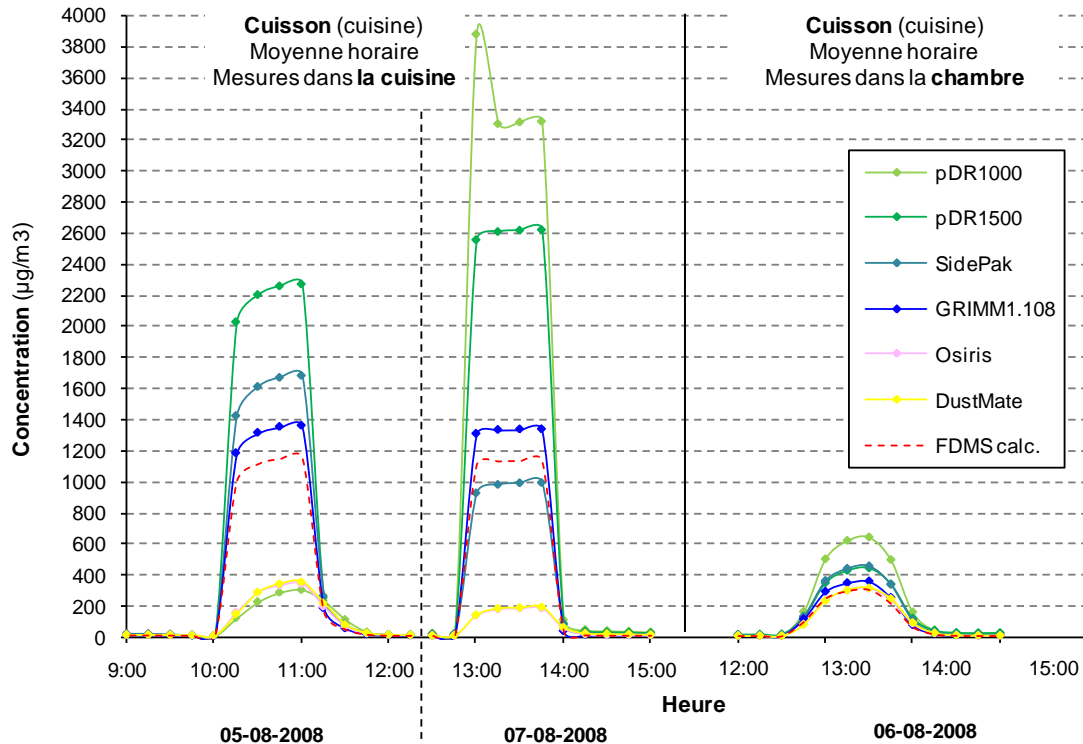


Figure 9 : Profils des concentrations massiques en particules suite à la cuisson de steaks pour l'ensemble des indicateurs optiques (données moyennées sur 1 h)

Sur la Figure 9 (cuisson), les résultats du pDR1000 sont à considérer à titre indicatif uniquement, la comparaison avec les réponses des autres indicateurs optiques étant faussée par la tête de coupure de cet instrument (PM_{10} uniquement). A ce propos, la réponse du pDR1000 enregistrée le 05-08 est très surprenante car étant donné la granulométrie des particules générées par la cuisson, la réponse du pDR1000 aurait dû être nettement supérieure à celle des autres indicateurs optiques (en configuration $PM_{2,5}$), comme pour le 06-08 et le 07-08.

Concernant les réponses de l'Osiris et du Dustmate, on constate que sur les 3 journées elles sont du même ordre de grandeur, alors que pour les autres indicateurs optiques, les concentrations mesurées le 06-08 ont très nettement diminué, ce qui rejoint l'observation de la Figure 8. Ceci ne semble pas lié à un phénomène de saturation de ces instruments, puisque la gamme de mesure de l'Osiris et du Dustmate s'étend jusqu'à 6 mg/m^3 et que les concentrations maximales mesurées par ces derniers sont bien inférieures à ce seuil. Comme observé lors des tests en chambre d'exposition, le Sidepak et le pDR1500 donnent des concentrations plus élevées que le Grimm 1.108, à la différence près que le Sidepak donne une réponse beaucoup plus proche du Grimm alors que lors des tests en chambre d'exposition, il correspondait à l'appareil qui surestimait le plus les concentrations. A noter également que lorsque les mesures sont effectuées dans la cuisine, les réponses du Sidepak et du pDR1500 sont très différentes alors qu'elles sont similaires lorsque les mesures sont réalisées dans la chambre. Au global, la réponse du Sidepak, en présence d'aérosol de cuisson est plus cohérente avec celle du Grimm que lors des tests en présence d'aérosol d'encens. On aurait pu s'attendre à un comportement similaire de la part du pDR1500.

4.2 MESURES DANS UN BUREAU

Des mesures ont également été réalisées dans un bureau individuel, situé en zone péri-urbaine, au 1^{er} étage d'un bâtiment. Les mêmes indicateurs optiques que ceux mis en œuvre dans le logement (Figure 10) ont été utilisés. Comme pour le logement, la fraction granulométrique étudiée était celle des PM_{2.5} pour l'ensemble des indicateurs (hormis le pDR1000 (PM₁₀ uniquement)).



Figure 10 : Disposition des indicateurs optiques pour les mesures dans le bureau

Les mesures ont été effectuées sur une journée (08-08-2008), avec différentes configurations : porte du bureau ouverte ou fermée, fenêtre ouverte ou fermée. Deux imprimantes et un photocopieur/imprimante se trouvaient au même étage que le bureau.

Aucune variation significative des concentrations massiques mesurées au cours de la journée n'a été constatée. Le bruit de fond moyen donné par l'ensemble des appareils était situé autour de 4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces mesures dans le bureau ont également été l'occasion de tester la durée de fonctionnement des indicateurs lorsque ceux-ci sont alimentés via la batterie. Les résultats sont consignés dans le chapitre 5 ("Retour utilisateur").

Il convient de noter que pour le pDR1500, le zéro de l'appareil doit être effectué dans les conditions d'alimentation lors des mesures. En effet, le "zéro" n'est pas identique, selon qu'il est réalisé sur batterie ou secteur (bruit de la masse du secteur différent du bruit de la référence de la batterie). Des tests sont en cours chez le constructeur pour pallier cela.

BILAN DES TESTS *IN SITU* (Chapitre 4.) :

- 2 sources majoritaires de particules mises en œuvre : la cuisson de steak (gaz) avec un diamètre médian massique supérieur à 2 μm et la combustion d'encens (diamètre médian massique < 650 nm) ;
- les réponses relatives (entre appareils) sont différentes selon la nature de l'aérosol étudié ;
- en réponse à la combustion d'encens, le Sidepak, les pDR et le Grimm 1.108 donnent des réponses relatives (entre appareils) similaires à celles obtenues en chambre d'exposition, ce qui n'est pas le cas pour l'Osiris et le Dustmate ;
- en réponse à l'aérosol de cuisson (même disposition des appareils que pour l'encens), l'Osiris et le Dustmate ont donné des réponses du même ordre de grandeur pour les 3 générations alors que pour les autres indicateurs optiques, les réponses lors de 2 générations étaient bien supérieures à la troisième ;
- ces résultats sont à considérer avec précaution car ils ont été obtenus sur un nombre restreint d'essais.

5. "RETOUR UTILISATEUR"

Au-delà des performances métrologiques des différents indicateurs optiques testés, le but était également de les évaluer sur un plan "pratique" en termes d'encombrement/gêne, de maniabilité, de panne/dérive, etc. Les aspects mentionnés comme importants pour ce type d'instruments lors de l'enquête réalisée auprès des AASQA en 2006 (Rapport LCSQA INERIS-DRC/AIRE-74754-0654) ont bien évidemment été pris en compte.

La synthèse de ce "retour utilisateur" est présentée dans le Tableau 3. Elle est basée sur le retour d'expérience de l'opérateur ayant réalisé l'ensemble des mesures effectuées dans le cadre de cette étude et dans une perspective d'utilisation en air intérieur.

Tableau 3 : Synthèse du "retour" utilisateur pour l'ensemble des indicateurs optiques testés en chambre d'exposition et *in situ*

	pDR 1000	pDR 1500	Sidepak	Osiris	Dustmate	Grimm 1.108
1. Encombrement/Gêne						
1.1 Peu bruyant	++	=	-	+	=	+
1.2 Portabilité (<1.5 kg)	++	+	++	-	+	=
1.3 Mobilité (<5 kg)	++	++	++	++	++	++
1.4 Volume appareil	++	++	++	+	+	++
2. Maniabilité						
2.1 Rapidité d'installation	+	+	+	++	++	++
2.2 Facilité de contrôle du débit	SO	++	++	++	++	++
2.3 Possibilité d'ajustement du débit	SO	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
2.4 Facilité test du zéro	+	++	++	++ ⁽¹⁾	++ ⁽¹⁾	++ ⁽¹⁾
2.5 Facilité/rapidité de déchargement des données	++	+	++	=	=	=
2.6 Convivialité des commandes :						
- appareil	=	++	++	+	+	=
- logiciel	++	++	++	+	+	+
2.7 Autonomie en énergie (batterie)	++	=	++	+	=	+
2.8 Longueur du câble d'alimentation	SO	=	++	++	++	++
3. Panne/dérive						
3.1 Stabilité débit	SO	-	+	++	++	++
3.2 Stabilité horloge	++	++	+	-	-	++
3.3 Mesure sans interruption ou dérive	=	-	+	++	+	++
4. Atouts techniques						
4.1 Possibilité de suivi simultané de # fractions	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
4.2 Réglage du temps de réponse (souplesse, gamme)	++	++	++	++	++	++
4.3 Possibilité de mesure en masse et nombre	Non	Non	Non	Oui ⁽²⁾	Oui ⁽²⁾	Oui ⁽²⁾

++ Très satisfaisant, + Satisfaisant, = Moyennement satisfaisant, - Peu à pas satisfaisant, SO : sans objet.

(1) : Zéro automatique (auto-zéro), (2) : Configuration soit en masse soit en nombre (pas simultanément).

Il convient de noter, en complément du Tableau 3, que si le pDR1500, le Sidepak, l'Osiris et le Dustmate permettent l'ajustement de leur débit de prélèvement, il n'existe pas de système d'alerte précisant que le débit n'est pas correctement réglé en fonction de la mesure qui veut être faite (impact sur la réponse des indicateurs optiques utilisant différentes têtes de coupures).

Concernant le pDR1500, des ajustements ont été réalisés concernant le "zéro" de l'appareil. En effet, le revendeur nous a signalé que lors de l'utilisation de cet appareil sur batterie, une dérive du "zéro" au fur à mesure de la décharge de la batterie avait été constatée. Tous les pDR1500 distribués après le 25-07-2008 ne sont pas impactés. Pour les autres, un retour auprès du revendeur peut-être fait pour modification.

Par ailleurs, il est important de rappeler que le "zéro" doit être effectué dans les conditions d'utilisation de l'appareil vis-à-vis du type d'alimentation. Ce dernier a du être fait régulièrement au cours de l'étude (valeurs enregistrées inférieures à zéro). Une dérive du débit a également été constatée au cours de l'étude pour cet appareil, nécessitant un contrôle régulier de ce dernier.

Le revendeur des pDR (1000 et 1500) nous a également notifié que les éléments optiques de ces derniers sont très simples à nettoyer.

Pour le pDR1000, la nécessité de refaire régulièrement le "zéro" a été constatée, à l'instar du pDR1500. A noter que peu de modifications de configuration sont possibles sans passer par le logiciel de l'ordinateur. Par ailleurs, lorsqu'on souhaite un enregistrement des données, il est nécessaire de le préciser à chaque lancement d'acquisition. Ceci a également été constaté pour le Sidepak.

Concernant l'Osiris et le Dustmate, la capacité de la carte mémoire a été jugée relativement faible, nécessitant un déchargement fréquent des données. Par ailleurs, les changements de configuration ne sont pas toujours aisés (modifications à faire à la fois sur le logiciel de l'ordinateur et de l'appareil, notamment pour le passage à la mesure en nombre).

D'un point de vue autonomie de fonctionnement (batterie) le pDR1000 et le Sidepak ont montré une autonomie de 10h, le Grimm et l'Osiris des autonomies respectives de 7h et 6h, le pDR1500 et le Dustmate une autonomie de 4h.

BILAN DU "RETOUR UTILISATEUR" :

- le tableau 3 synthétise les données constituant ce retour utilisateur ;
- d'un point de vue technique, une catégorie d'appareils permet la mesure simultanée de différentes fractions granulométriques ainsi qu'une mesure en masse et en nombre (Grimm, Osiris, Dustmate) ;
- tous les appareils permettent une installation rapide et présentent un encombrement satisfaisant. De même, la vérification du zéro et le contrôle du débit sont faciles à réaliser ;
- la facilité/rapidité du déchargement des données pourrait être améliorée pour l'Osiris, le Dusmate et le Grimm ;
- le Sidepak s'avère être relativement bruyant pour une utilisation en air intérieur ;
- pour l'Osiris et le Dustmate, la stabilité de l'horloge n'est pas satisfaisante ;
- concernant les pDR, des interruptions ou dérives de la mesure ont pu être constatées. Des améliorations ont été effectuées sur le pDR1500.

6. CONCLUSION

L'objectif global de cette étude est d'évaluer l'intérêt et le potentiel des techniques optiques dédiées aux particules, ainsi que les possibles applications dans le domaine de l'air intérieur, pour lequel ce type d'outil semble bien adapté.

De l'étude menée en 2008, il ressort que la mesure massique des particules via des indicateurs optiques reste entièrement indicative. En effet, pour l'ensemble de ce type d'instrument, la densité de l'aérosol étudié est une source d'approximation. Par ailleurs, d'autres sources d'approximation peuvent entrer en ligne de compte : il est important de rappeler qu'il existe deux familles d'appareils parmi ceux testés, celle dont le principe de mesure est celui de la dispersion d'une lumière incidente par une seule particule (Grimm, Osiris, Dustmate) et celle dont la dispersion est liée à un ensemble de particules (pDR, Sidepak). Dans le cas de cette dernière, la distribution granulométrique de l'aérosol étudié peut ajouter une source d'approximation si elle est significativement différente de celle de l'aérosol utilisé pour l'étalonnage de ces appareils.

Les tests réalisés en chambre d'exposition ont montré une dispersion notable des réponses des indicateurs optiques vis-à-vis de l'aérosol testé (combustion de bâtonnets d'encens, diamètre médian massique inférieur à 650 nm), réponses qui ont été évaluées par comparaison avec celle obtenue par un TEOM-FDMS, installé en parallèle.

Concernant la capacité des indicateurs optiques à suivre des profils dynamiques de concentration, Grimm, pDR et Sidepak ont montré des suivis temporels comparables à celui du FDMS, ce qui n'a pas été le cas pour l'Osiris et le Dustmate, leur domaine de mesure en terme de taille granulométrique pouvant expliquer cela (> 500 nm).

Concernant la concentration massique mesurée, les Grimm sont les indicateurs optiques ayant donné la meilleure adéquation avec le FDMS, suivi par les pDR (1000 et 1500), avec une surestimation d'au moins 50%. Il convient de noter que ces résultats ont été obtenus dans les conditions d'étalonnage des fournisseurs.

Les tests réalisés *in situ* ont permis de compléter les résultats obtenus en chambre d'exposition, en mettant en œuvre une seconde source de particules, de granulométrie moins fine que l'encens (aérosol de cuisson, diamètre médian massique supérieur à 2 µm). Les tests *in situ*, en réponse à la combustion d'encens, ont montré des réponses relatives (entre appareils) similaires à celles obtenues en chambre d'exposition hormis pour l'Osiris et le Dustmate. Les tests en réponse à l'aérosol de cuisson ont en revanche montré des réponses relatives (entre appareils) différentes. Il convient de souligner que les réponses de l'Osiris et du Dustmate n'étaient pas toujours cohérentes, avec des réponses du même ordre de grandeur pour toutes les générations alors que certaines étaient plus intenses que d'autres, le domaine granulométrique ne pouvant être une explication dans le cas de cet aérosol.

Ces résultats sont à considérer avec précaution car ils ont été obtenus sur un nombre restreint d'essais. Il serait intéressant de les compléter avec un retour d'expérience sur des mesures de terrain conséquentes et pour différentes typologies de particules ; une campagne de mesures dans une gare aura lieu en 2009.

L'ensemble de ces tests a également permis d'acquérir un "retour utilisateur", utile dans le cadre de mesures sur le terrain notamment. Il convient de noter que Grimm, Osiris et Dustmate permettent une mesure simultanée de différentes fractions granulométriques ainsi qu'une mesure en masse et en nombre (mais pas simultanément). Si tous les appareils permettent une installation rapide, sont peu encombrants et permettent une vérification du zéro et un contrôle du débit facilement, certains points sont à améliorer :

facilité/rapidité du déchargement des données (Osiris, Dusmate, Grimm), bruit de fonctionnement (Sidepak), stabilité de l'horloge (Osiris et Dustmate), interruption ou dérive de la mesure (pDR).

7. BIBLIOGRAPHIE

Rapport LCSQA INERIS-DRC/AIRE-74754-0654. Mesures indicatives des particules : Recensement des appareils disponibles sur le marché, besoins et retours d'expérience des AASQA. **2006** (http://www.lcsqa.org/system/files/Recensement_Appareils_Mesures_Particules_vf.pdf).

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Fiche LCSQA 2008	1
Annexe 2	Schéma de la chambre d'exposition	1
Annexe 3	Planning des tests en chambre d'exposition	1
Annexe 4	Comparaison des réponses des indicateurs optiques avec celle du TEOM-FDMS (tests en chambre d'exposition)	1
Annexe 5	Planning des tests <i>in situ</i> (logement)	1
Annexe 6	Photographies des tests <i>in situ</i> (logement)	1
Annexe 7	Granulométrie Grimm 1.108 : 15 canaux et fractions environnementales	1

Indicateurs optiques pour la mesure des particules

THEME 7 : AIR INTERIEUR ; Responsable de l'étude : INERIS

Contexte et objectif

La connaissance de la distribution spatiale de la pollution particulaire nécessite l'utilisation de techniques souples, portables et rapides. Un nombre important d'appareils est présent sur le marché. Toutefois, ils ne sont pas reconnus pour la mesure massique (PM₁₀, PM_{2,5}). Ceci s'explique notamment par le fait qu'il s'agit le plus souvent de compteurs optiques, instruments proposant une estimation et non une mesure réelle de la concentration massique (recours à une masse volumique de l'aérosol estimée).

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'intérêt et le potentiel des techniques optiques indicatives dédiées aux PM, ainsi que les possibles applications dans le domaine de l'air intérieur, pour lequel ce type d'outil semble extrêmement prometteur.

Un programme de travail en deux phases a été proposé, en 2006 :

Phase 1 (2006) :

Retour d'expérience de la part des AASQA sur ce type de techniques ;

Synthèse des besoins ;

Recensement et principe des matériels disponibles sur le marché.

Phase 2 (initialement prévue en 2007, reportée en 2008) :

Bilan sur le niveau de développement ;

Essais sur une sélection d'appareils.

Travaux antérieurs (2006)

Les travaux 2006 ont consisté à réaliser une analyse des besoins, en définissant les objectifs d'utilisation par les AASQA. Pour ce faire, un questionnaire leur a été adressé : plus de 30 réponses ont été reçues, confirmant un véritable intérêt pour ce sujet. Un recensement des matériels existants a également été réalisé. Ce travail a fait l'objet d'un rapport en 2006. En outre, les résultats ont été présentés au séminaire LCSQA du 1^{er} février 2007.

Travaux proposés pour 2008

La connaissance du niveau de développement d'un appareil est essentielle pour juger de son utilité et de sa fiabilité. Ce volet de la problématique, déjà abordé en 2006, sera complété en 2008 et des conclusions seront formulées.

Par ailleurs, pour répondre aux objectifs de la phase 2, il est prévu la mise au point d'une **chambre d'exposition** de conception simple, alimentée à l'aide d'un système de génération de particules (combustible simple et/ou générateur plus sophistiqué), afin d'exposer les appareils à des niveaux de concentration variables. Des **tests in situ** sont aussi envisagés pour quelques typologies d'environnements clos à définir.

En fonction des résultats obtenus et de l'intérêt que représente l'utilisation de ces outils pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur, la durée des travaux et les objectifs pourront évoluer.

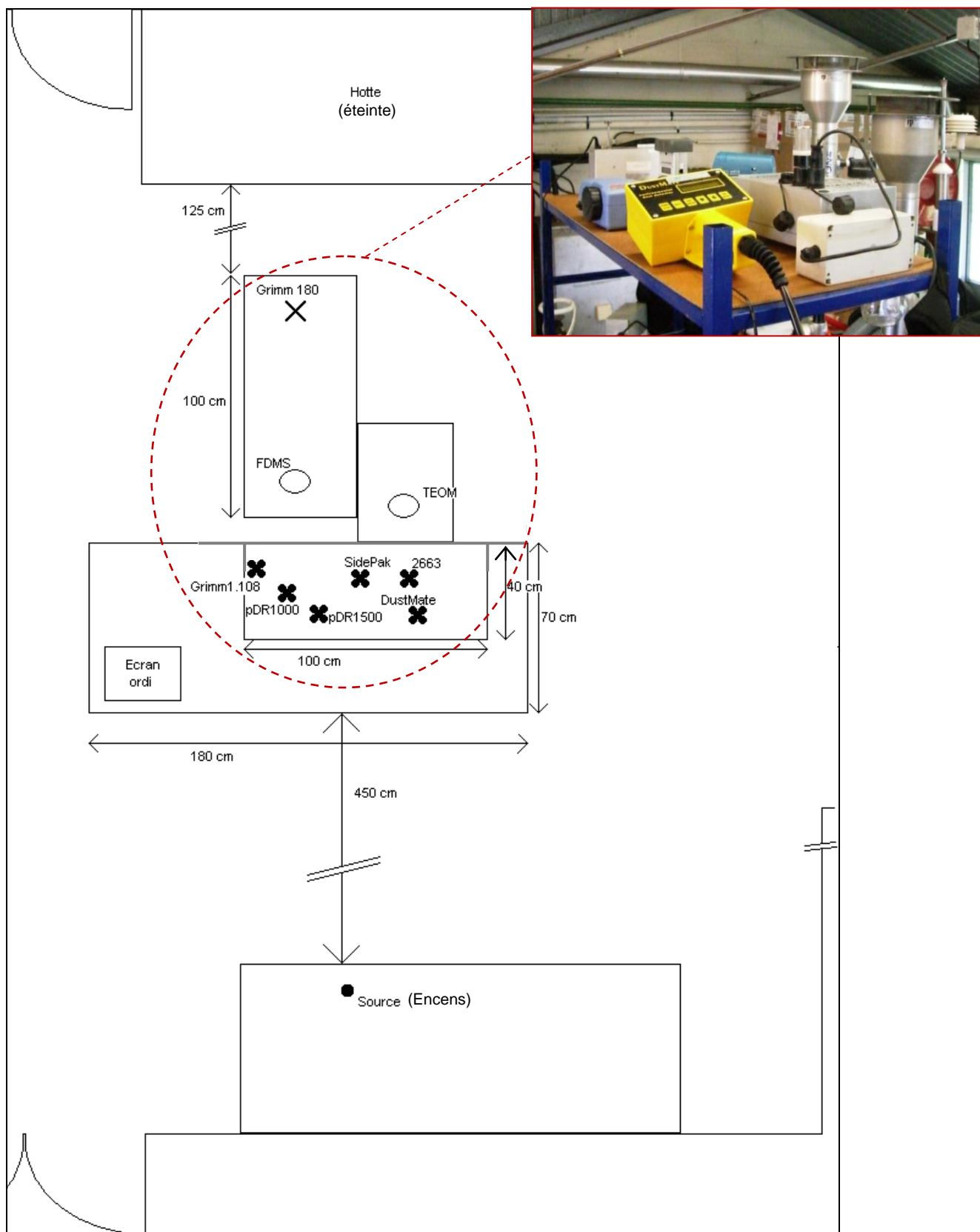
Collaboration

Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Renseignements synthétiques

Titre de l'étude	Indicateurs optiques		
Travaux	pluri-annuels		
Durée des travaux pluriannuels	2 ans		
Collaboration AASQA	-		
Heures d'ingénieur	EMD : -	INERIS : 200	LNE : -
Heures de technicien	EMD : -	INERIS : 550	LNE : -
Document de sortie attendu	Rapport d'essai des indicateurs optiques		
Lien avec le tableau de suivi CPT	Thème 2 : Métrologie / Particules		
Lien avec un groupe de travail	-		
Matériel acquis pour l'étude	Chambre d'exposition, petit matériel - Achat de deux compteurs		

ANNEXE 2 : Schéma de la chambre d'exposition

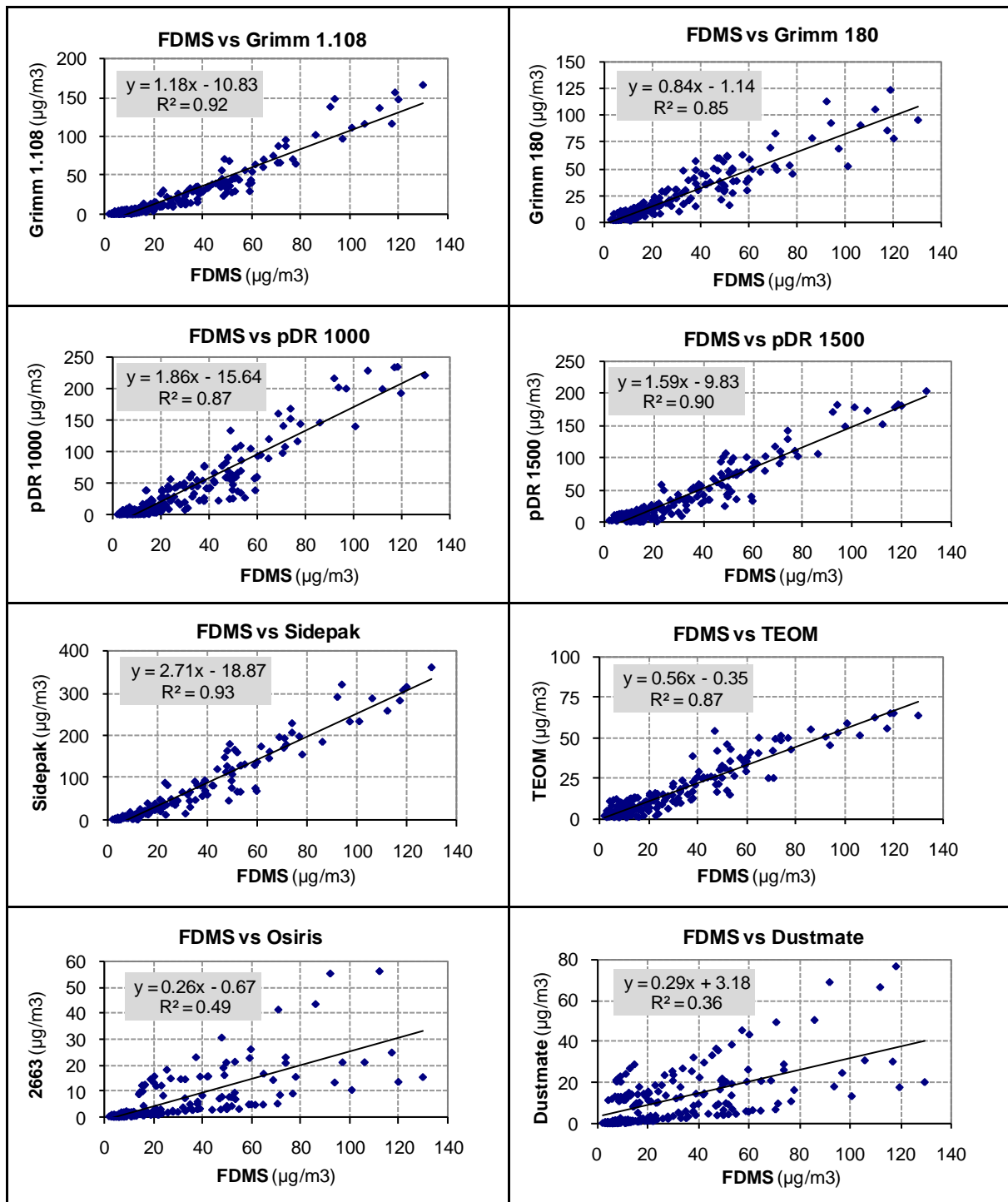


ANNEXE 3 : Planning des tests en chambre d'exposition

Date	N° manip	Heure début	Heure fin	Nombre encens	Hotte	Tête de coupure	Problèmes rencontrés	Grimm 1.108	TEOM 50°C	FDMS	Osiris	Grimm 180	Dust mate	pDR 1000	pDR 1500	Side pak
21/07/08	1.1	09:50	12:20	3	Non	PM10	Problème de ligne chauffée pour le 2663	x	x	x		x	x	x	x	x
21/07/08	1.2	13:30	16:00	3	Non	PM10	Problème de ligne chauffée pour le 2663	x	x	x		x	x	x	x	x
21/07/08	1.3	16:34	19:04	3	Non	PM10	Problème de ligne chauffée pour le 2663	x	x	x		x	x	x	x	x
24/07/08	2.1	09:00	11:30	3	Non	PM10	Temps de retour au niveau initial à prolonger	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24/07/08	2.2	11:39	14:09	3	Non	PM10		x	x	x	x	x	x	x	x	x
24/07/08	2.3	14:14	16:44	3	Non	PM10	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28/07/08	3.1	08:22	11:22	4	Non	PM1.0		x	x	x	x	x	x	x	x	x
28/07/08	3.2	11:39	15:30	4	Non	PM1.0	pDR1500 signal négatif (14h) T°>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28/07/08	3.3	16:07	19:30	4	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30/07/08	4.1	08:15	11:45	4	Non	PM1.0		x	x	x	x	x	x	x	x	x
30/07/08	4.2	11:56	15:00	4	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30/07/08	4.3	15:41	19:00	4	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
01/08/08	5.1	08:47	12:30	4	Non	PM1.0		x	x	x	x	x	x	x	x	x
01/08/08	5.2	12:55	16:30	4	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
01/08/08	5.3	16:52	20:00	4	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12/08/08	6.1	08:15	12:30	3	Non	PM1.0		x	x	x	x	x	x	x	x	x
12/08/08	6.2	12:47	16:00	3	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12/08/08	6.3	16:33	20:00	3	Non	PM1.0	T>25°C au cours du test	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Étant donné la granulométrie de l'encens, les mesures réalisées étaient similaires, quelle que soit la tête de coupure utilisée.

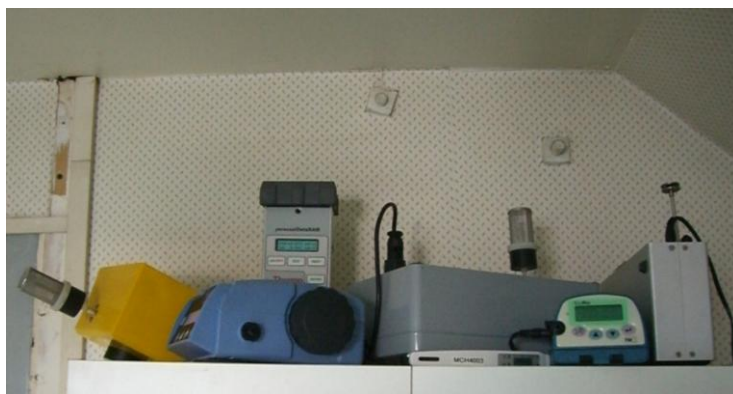
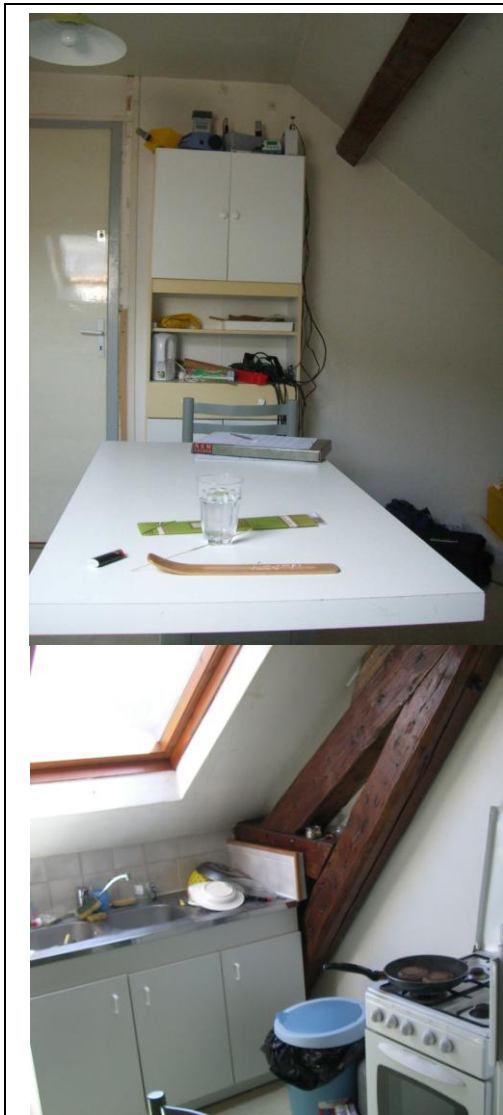
ANNEXE 4 : Comparaison des réponses des indicateurs optiques avec celle du TEOM-FDMS (tests en chambre d'exposition)



ANNEXE 5 : Planning des tests *in situ* (logement)

Date	N° manip	Source mise en œuvre	Localisation de la source	Heure début	Heure fin	Evénements en parallèle	Localisation des appareils					
							Grimm 1.108	Osiris	Dust mate	pDR 1000	pDR 1500	Sidepak
04/08/2008	7.1	Ouverture velux	Cuisine	18h00	20h30		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
05/08/2008	8.1	Cuisson	Cuisine	10h01	10h07		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
05/08/2008	8.2	Balai	Cuisine	13h30	13h35		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
05/08/2008	8.3	Encens	Cuisine	14h30	14h45		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
05/08/2008	8.4	Ouverture velux	Cuisine	17h00	19h00	18h : vaisselle	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
06/08/2008	9.1	Balai	Chambre	11h00	11h05		Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre
06/08/2008	9.2	Cuisson	Cuisine	12h30	12h36		Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre
06/08/2008	9.3	Encens	Chambre	15h45	16h00	T = 31.2°C	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre
06/08/2008	9.4	Ouverture velux	Chambre	17h45	19h00	18h : changement de place DustMate	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre	Chambre
07/08/2008	10.1	Balai	Cuisine	11h00	11h05		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine
07/08/2008	10.2	Cuisson	Cuisine	12h45	12h51		Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine	Cuisine

ANNEXE 6 : Photographies des tests *in situ* (logement)



Cuisine : Disposition des indicateurs optiques et différentes sources (cuisson, ouverture velux, combustion encens)



Chambre : Disposition des indicateurs optiques et de la source d'encens

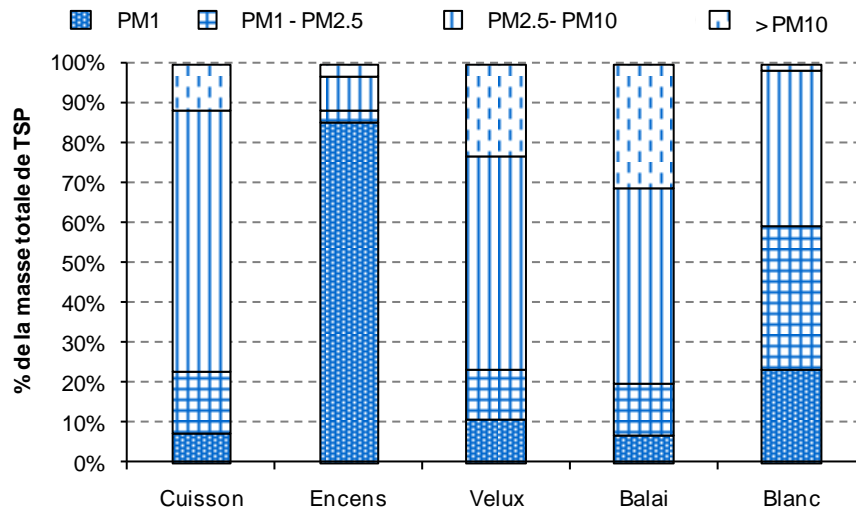


Figure A : Granulométrie des particules générées par la combustion d'encens, l'ouverture du velux, le passage du balai et en bruit de fond (blanc) : Grimm 1.108 en configuration 15 canaux granulométriques

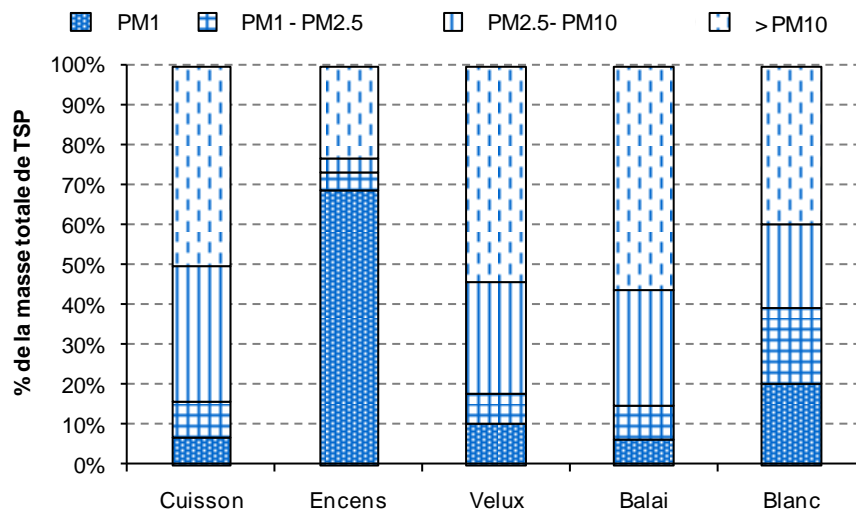


Figure B : Granulométrie des particules générées par la combustion d'encens, l'ouverture du velux, le passage du balai et en bruit de fond (blanc) : Grimm 1.108 en configuration fractions environnementales