



Rapport Tâche 2

Caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et intercomparaison des moyens de mesure de la QAI

Partie 1

Le 27/07/2023

Auteurs : Michel Ondarts (LOCIE), Jonathan Outin (LOCIE), Adeline Mélois (Cerema), Benjamin Golly (LOCIE) et Evelyne Gonze (LOCIE)

Ce document est extrait des travaux réalisés dans le cadre du projet Performance 2
Les organismes présentés ci-dessous contribuent à ce projet :

Partenaires financiers du projet



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

Contacts : Etienne Marx, suivi technique du projet

Frédérique BIENVENU chargée des suivis administratifs et financiers

Ministère de la Transition Ecologique

Contact : Léa GAROT, Cheffe de projet Acoustique et Qualité de l'Air Intérieur, DHUP/QC1

Partenaires techniques du projet



Cerema

Contact : Adeline Mélois, adeline.melois@cerema.fr



Société ANJOS Ventilation

Contact : Jérémy Depoorter, jdepoorter@anjos-ventilation.com



Société AERECO

Contact : Marc Legree, marc.legree@aereco.com



Université Savoie Mont Blanc - Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (USMB - LOCIE)

Contact : Evelyne Gonze, Evelyne.gonze@univ-smb.fr

Rapport établi par :

Date	Version	Commentaires
06/07/2022	v1	Première intercomparaison et protocole deuxième intercomparaison - Rédaction par LOCIE (Michel Ondarts et Jonathan Outin), relecture Cerema (Adeline Mélois)
19/07/2023	vf	Rapport complet 2 intercomparaison – Rédaction par LOCIE (Michel Ondarts, Jonathan Outin, Benjamin Golly et Evelyne Gonze), relecture et validation par Cerema (Adeline Mélois et Manon Santerne)
27/07/2027	Vf	Relecture par Alexandre Bacher, Cerema

Notice analytique :

Références	Informations
Commanditaire :	ADEME 500 Route des Lucioles 06560 Valbonne
Objet de l'étude :	Retour d'expérience sur des systèmes de ventilation intelligents hygro-réglables installés dans des bâtiments occupés depuis dix ans
Résumé de la commande :	Prestations réalisées dans le cadre de l'appel à projet "Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020" - Edition 2020. Réponse technique et financière présentée à l'ADEME
Référence du dossier :	Convention de financement ADEME / Partenaires du projet n°2004C0014 notifiée le 08/07/2020
Communicabilité :	<input type="checkbox"/> Libre (avec acceptation du commanditaire dans le contrat) <input checked="" type="checkbox"/> Contrôlée (communiquée avec l'autorisation du commanditaire) <input type="checkbox"/> Confidentielle
Pilote du projet :	Cerema : Adeline Mélois Adeline.melois@cerema.fr
Constitution de l'équipe :	Cerema, Anjos, Aereco, USMB-LOCIE
Mots clés :	Ventilation, Performance, Evaluation, Logement

Liste des destinataires :

Contact	Adresse	Nbre et Type
Etienne Marx Frédérique Bienvenu	ADEME, 500 Route des Lucioles, 06560 Valbonne	1 (PDF)

Résumé :

Cette deuxième tâche du projet a pour objectif de réaliser des essais en laboratoire pour :

- Caractériser les performances hygro-réglables actuelles des terminaux de ventilation ;
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des capteurs embarqués : les capteurs installés pendant Performance 1 (CO₂, Humidité relative et température), ainsi que les nouveaux capteurs intégrés dans les cartes d'acquisition (Composés Organiques Volatils et Particules fines)
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des balises NEMOs utilisées pour les campagnes d'évaluation de la Qualité de l'Air Intérieur de Performance 2 dans les pièces de vie (CO₂, température, humidité relative, Composés Organiques Volatils Légers, Particules fines et Formaldéhyde)

Ces essais sont réalisés par Aereco pour les terminaux et capteurs des appartements de l'immeuble de Paris, par Anjos pour les terminaux et capteurs des appartements de l'immeuble de Villeurbanne (protocoles et résultats présentés dans deux rapports annexe), et les intercomparaisons sur les appareils de mesure de la QAI sont réalisés par le LOCIE. Les protocoles et les premiers résultats sont présentés dans ce présent rapport.

L'Isle d'Abeau, le 27 juillet 2023

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
1 INTRODUCTION	7
2 CONTEXTE	9
3 PROTOCOLE D'INTER-COMPARAISON DES CAPTEURS QAI	10
3.1 Inter-comparaison en enceinte contrôlée	10
3.2 Mesures comparatives en conditions standard d'occupation	14
4 RESULTATS DES CAMPAGNES D'INTER-COMPARAISON	17
4.1 Particules en suspension (PM)	17
4.2 Composés organiques volatils	24
4.3 Formaldéhyde : NEMo en enceinte contrôlée	30
5 CONCLUSION	33
ANNEXES	37
Annexe 1 : Certificats d'étalonnage des compteurs de particules Grimm	38
Annexe 2 : Certificat d'analyse – cartouches de prélèvement XPoSure Aldehyde Sampler	44
Annexe 3 : Certificat d'analyse – Colonne chromatographique HPLC	45
Annexe 4 : Certificat d'étalonnage RAE3000	46
Annexe 5 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – Aereco	48
Annexe 6 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – Aereco – table de corrélation	49
Annexe 7 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – Aereco	50
Annexe 8 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – Aereco – table de corrélation	51
Annexe 9 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – NEMo	53
Annexe 10 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – NEMo	54
Annexe 11 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco	57
Annexe 12 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco – table de corrélation	59
Annexe 13 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco	62

Annexe 14 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco – table de corrélation	63
Annexe 15 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Nemo	65
Annexe 16 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Nemo	67
Annexe 17 : Campagne d'inter-comparaison 1 – formaldéhyde – Nemo	68
Annexe 18 : Campagne d'inter-comparaison 2 – formaldéhyde – Nemo	69

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 3.1 : Schéma de principe de l'enceinte à paramètres contrôlés	11
Figure 3.2 : Exemple de variations de grandeurs d'entrée pour l'étude de la dynamique de système	11
Figure 3.3 : Principe de fonctionnement du générateur de micropollution (LFM : débitmètre massique liquide ; MFC : débitmètre massique gaz ; CEM : contrôle de l'évaporation et du mélange)	12
Figure 3.4 : Photo du positionnement des capteurs dans la salle « CONFORT » de l'IUT	15
Figure 4.1 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les capteurs Aereco : profils de concentration durant la transformation et coefficients de corrélation de Pearson (campagne 1, 03/11/2021)	17
Figure 4.2 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les capteurs Aereco : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 09/05/2022 (haut) et du 10/05/2022(bas)).....	18
Figure 4.3 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les capteurs Aereco durant une transformation de type impulsion (campagne 1, essais du 27/10/2021).....	19
Figure 4.4 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les NEMOs : profils de concentration durant des échelons de concentration (campagne 1, essais du 03/11/2021 (gauche) et du 04/11/2021 (droite)).....	20
Figure 4.5 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les NEMO : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 09/05/2022 (haut) et du 10/05/2022 (bas))	21
Figure 4.6 : Etude de la mesure des PM _{2.5} par les NEMO durant une transformation de type impulsion (campagne 1, essais du 27/10/2021).....	22
Figure 4.7 : Evolutions des concentrations en PM _{2.5} issues des Aereco et des NEMO durant la campagne d'inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l'IUT	22
Figure 4.8 : Evolutions des concentrations en PM _{2.5} issues des Node durant la campagne d'inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l'IUT.....	23
Figure 4.9 : Coefficients de corrélation de Pearson : inter-comparaison des Aereco, des NEMOs et des Nodes, salle « CONFORT » de l'IUT – Campagne 1.....	24
Figure 4.10 : Etude de la mesure des COV totaux par les capteurs Aereco : profils de concentration durant la transformation et coefficients de corrélation de Pearson (campagne 1, 25/10/2021)	25
Figure 4.11 : Etude de la mesure des COV totaux par les capteurs Aereco : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 23/05/2022 et du 24/05/2022)	26
Figure 4.12 : Etude de la mesure des COV totaux par les Aerecos : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 1, essais du 24/10/2021).....	27

Figure 4.13 : Etude de la mesure des COV léger par les NEMOs : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 23/05/2022 et du 24/05/2022).....	28
Figure 4.14 : Evolutions des concentrations en COV totaux et COV légers issues respectivement des capteurs Aereco et des NEMOs durant la première campagne d’inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l’IUT	29
Figure 4.15 : Coefficients de corrélation de Pearson : inter-comparaison des capteurs Aereco, des NEMOs et des Nodes, salle « CONFORT » de l’IUT – Campagne 1.....	30
Figure 4.16 : Evolutions des concentrations en Formaldéhyde mesurées par les NEMOs durant la première campagne d’inter-comparaison dans l’enceinte	31
Figure 4.17 : Coefficients de corrélation de Pearson pour le formaldéhyde mesuré par les NEMOs dans l’enceinte – Campagne 1.....	31
Figure 4.18 : Exemple d’échelon de concentration de formaldéhyde mesuré par les NEMOs en enceinte - Campagne 2	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : Concentrations cibles et flux massique de polluants associés	13
Tableau 2 : Synthèse des essais prévisionnels campagne 1.....	14
Tableau 3 : Synthèse des essais prévisionnels campagne.....	14
Tableau 4 : Récapitulatif du déroulement de la campagne de mesure en condition standard d’occupation marqueurs Jaune : occupation de la salle ; Vert : fonctionnement normal ; Rouge : dysfonctionnement.....	16
Tableau 5 : Synthèse des concentrations en formaldéhyde mesurées dans l’enceinte suivant le protocole NIOSH2016.....	32

1 INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats des travaux réalisés dans le cadre de la tâche 2 du projet Performance 2, tâche dédiée à la caractérisation en laboratoire de la pérennité technologique des performances des composants de ventilation et intercomparaison des moyens de mesure de la Qualité de l'Air Intérieur (QAI).

Depuis le projet Performance 1, les terminaux de ventilation (bouches d'extraction et entrées d'air) des logements des bâtiments de l'étude (un immeuble à Paris et un immeuble à Villeurbanne) ainsi que les différents capteurs mis en place pendant Performance 1 sont restés dans les logements. Une étude en laboratoire de ces terminaux et ces capteurs est nécessaire pour répondre aux objectifs suivants :

- Caractériser les performances hygroscopiques actuelles des terminaux de ventilation : il s'agit ici, à travers d'essais en environnement contrôlé, de caractériser le fonctionnement du dispositif permettant de moduler les débits en fonction de l'humidité de l'air, et de comparer les performances évaluées après plus de 10 ans d'utilisation en milieu occupé aux performances mesurées à réception dans le cadre du projet Performance 1 ;
- Vérifier le fonctionnement des capteurs embarqués : les capteurs de CO₂, Humidité relative (HR) et température installés pendant Performance 1 seront réutilisés pour Performance 2. Il faut donc vérifier qu'ils fonctionnent encore et si c'est le cas, les réétalonner, et si ce n'est pas le cas, les remplacer, afin de s'assurer de la fiabilité des mesures réalisées pour Performance 2.

Pour réaliser ces essais, il est nécessaire de récupérer les terminaux de ventilation et les capteurs dans les logements. Aereco et Anjos sont donc intervenus sur site pour récupérer ces éléments, en remplaçant les terminaux de ventilation par des terminaux provisoires afin de maintenir le fonctionnement du système de ventilation de l'immeuble pendant la durée des essais en laboratoire.

Dans Performance 2, des mesures complémentaires sont réalisés, notamment des mesures de polluants non mesurés pendant Performance 1 dont le formaldéhyde, les Composés Organiques Volatils (COV) et les particules fines (PM_{2.5}). Ces mesures sont réalisés grâce à deux types de matériel de mesure :

- des capteurs installés sur une partie des cartes reliées au système d'acquisition en continu dans les logements ;
- des balises NEMos : ces balises sont installées pendant les campagnes hivernales in-situ (tâche 1 du projet Performance 2) dans le salon et une chambre de chaque logement volontaire pour l'étude. Elles intègrent des capteurs de CO₂, température, HR, Composés Organiques Volatils Légers (COVL), Formaldéhyde et PM_{2.5}.

Le travail réalisé par Aereco sur la caractérisation en laboratoire des performances des terminaux de ventilation et des capteurs est présenté dans le document intitulé « Rapport Tâche 2 – Partie 2 - Phase Laboratoire Aereco – Caractérisation & métrologie ».

Le travail réalisé par Anjos sur la caractérisation en laboratoire des performances des terminaux de ventilation et des capteurs est présenté dans le document intitulé « Rapport Tâche 2 – Partie 3 - Rapport des mesures d'étalonnages des capteurs et systèmes de ventilation - Anjos »

Le travail réalisé par le LOCIE sur l'intercomparaison des appareils de mesure est présenté dans les prochains paragraphes de ce présent document.

2 CONTEXTE

Cette partie de la tâche 2 concerne l'étude de la qualité de mesure des capteurs présents dans les balises de mesures de qualité d'air intérieur déployées dans les logements (balises NEMo) et aux terminaux de ventilation (carte Aereco) du projet Performance 2. En effet, ce type de capteur, parfois appelé capteur bas coût, est connu pour présenter des précisions et des répétabilités variables et peut être affecté par des dérives de ses signaux dans le temps.

Afin de tenir compte des performances des capteurs (notamment précision, dérive) lors de l'analyse des données mesurées pendant le projet Performance 2, la tâche 2 inclut une campagne d'inter-comparaison des capteurs en laboratoire (enceinte contrôlée). Cette campagne d'inter-comparaison a pour objectif de vérifier la fiabilité des capteurs, d'estimer leur précision et d'exclure tout capteur présentant des défauts de mesure majeurs. En outre, en concertation avec l'ensemble des partenaires, il a été décidé d'inclure dans cette tâche une inter-comparaison *in situ* (dans un environnement réel) avant déploiement des capteurs et une seconde campagne d'inter-comparaison en laboratoire après le premier déploiement (non prévues initialement). Cette dernière étude a principalement pour objectif de détecter d'éventuelle dérive de mesures.

Cette étude concerne les particules en suspension (PM), les composés organiques volatils (COV totaux pour les capteurs Aereco, COV légers pour les NEMo) et le formaldéhyde pour une partie des NEMo. La méthodologie choisie dans cette étude est basée, dans un premier temps, sur la comparaison de la valeur mesurée par chaque capteur et leur dynamique de réponse par rapport aux valeurs mesurées par un appareil de référence. Ces essais comprennent deux types de sollicitation : l'une du type échelon, l'autre de type impulsion. Dans un second temps, des mesures *in situ* en conditions réelles permettront d'évaluer la cohérence des capteurs d'une part au sein d'un groupe de capteurs identiques (intra) et, d'autre part, entre les types de capteurs (inter).

Pour ce faire, les capteurs de COV, de particules et de formaldéhyde seront placés dans une enceinte dont les paramètres physiques et la composition chimique de l'atmosphère intérieure sont contrôlés (humidité, concentration en COV, particules). Les valeurs obtenues par les capteurs seront alors comparées à des mesures de références réalisées grâce à des analyseurs de laboratoire préalablement étalonnés et ajustés pour les particules (compteur optique GRIMM), des prélèvements sur cartouches pour le formaldéhyde (méthode NIOSH 2016) et des analyses en ligne pour les COV (mesure PID). En complément de cette étude, l'ensemble des capteurs sera installé dans une salle de travaux dirigés de l'université afin de comparer leurs réponses respectives dans un environnement réel avec occupation.

La première partie du présent rapport décrit l'ensemble des protocoles mis en œuvre pour effectuer cette étude. La seconde partie est consacrée à la présentation et l'analyse des résultats des deux campagnes d'inter-comparaison effectuées durant le projet Performance 2.

3 PROTOCOLE D'INTER-COMPARAISON DES CAPTEURS QAI

Les deux campagnes d'inter-comparaisons des capteurs NEMo et Aereco se décomposent en deux phases. La première consiste à inter-comparer les capteurs dans des conditions environnementales contrôlées avec ou sans mesure de référence. Cette phase s'effectue en enceinte, les sollicitations (durées et amplitudes des variations des paramètres d'intérêts) peuvent être plus « sévères » et plus rapides que celles rencontrées dans des conditions standard d'utilisation. La seconde a pour but d'effectuer des mesures comparatives dans des conditions standard d'occupation, elle est réalisée dans une salle de travaux dirigés de l'université en présence d'activités d'enseignement ou de recherche. L'ensemble des protocoles mis en œuvre est décrit dans la partie suivante.

3.1 Inter-comparaison en enceinte contrôlée

3.1.1 Description de l'enceinte et du contrôle des paramètres environnementaux

L'enceinte mise en œuvre a un volume égal à 1 m^3 et est réalisée en polyméthacrylate de méthyle acrylique (PMMA). Ses parois sont recouvertes de feuilles de téflon afin d'assurer l'inertie chimique de l'enceinte. On notera que cette solution ne permet pas d'éviter les phénomènes d'adsorption - désorption de composés gazeux. L'enceinte est équipée de piquages en parties haute et basse ce qui permet le branchement des appareils de mesure en ligne et les prélèvements d'échantillons (Figure 3.1).

L'enceinte est équipée d'un renouvellement d'air contrôlé en débit et en humidité absolue. L'air est renouvelé par insufflation en partie basse, il est injecté au travers d'un distributeur couvrant l'ensemble de la face inférieure de l'enceinte. Afin d'optimiser la distribution, un media fibreux est installé sur le système de distribution. La sortie de l'air se situe sur la face supérieure de l'enceinte. Le débit de renouvellement d'air est fixé à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La régulation s'effectue à l'aide d'un débitmètre massique Brooks Instrument (modèle 5851 S).

Le renouvellement d'air est effectué avec de l'air comprimé. Avant son injection dans l'enceinte, l'air comprimé est filtré (déshuileur et filtre à particules) puis humidifié. L'humidification se fait par barbotage dans l'eau. L'air est saturé en eau à la température permettant d'atteindre l'humidité absolue de consigne. Cette dernière est calculée à partir de l'humidité relative de consigne à la température de l'essai. La température de l'enceinte n'est pas contrôlée, elle est égale à la température ambiante soit une température pouvant être comprise entre 18 et 24 °C. La température et l'humidité relative sont mesurées par une hygropuce (datalogger hygropuce, waranet-solutions) étalonnée au laboratoire pour la première campagne et un datalogger Kimo KPA-320 (état : neuf) étalonné en usine pour la seconde campagne.

L'injection des polluants gazeux ou particulaires est effectuée dans l'air comprimé humidifié en amont du distributeur pour les essais de type échelon de concentration. Pour les essais de type impulsion (pollution particulaire seulement), les polluants sont

soit injectés en amont du distributeur soit directement dispersés dans l'enceinte (ouverture de l'enceinte, dispersion du polluant puis fermeture de l'enceinte).

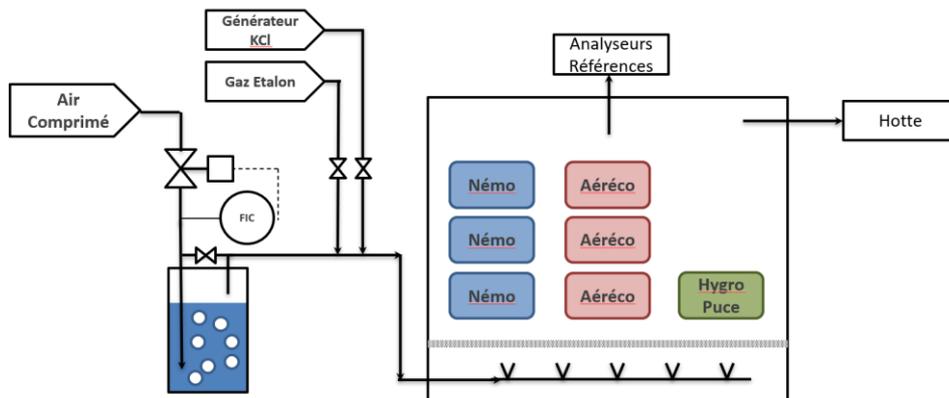


Figure 3.1 : Schéma de principe de l'enceinte à paramètres contrôlés

3.1.2 Inter-comparaison des mesures de concentrations particulières

Trois types de particules et méthodes de génération associées sont utilisées pour ces essais (3 mis en œuvre durant la campagne 1 de l'inter-comparaison, seulement une pour la seconde).

Pour réaliser un échelon de concentration (campagne 1 et 2), la génération de la pollution particulaire est effectuée via un générateur d'aérosol ATM 220 (Topas, Germany). Cette injection est continue. L'aérosol retenu est un aérosol de KCl. Il est issu de l'atomisation d'une solution de KCl ayant pour concentration soit 0,2 et 1% massique. Le choix de la concentration de la solution dépend de la concentration cible en particules.

Durant la première campagne, plusieurs essais mettant en œuvre des injections de type impulsion (Figure 3.2) ont été réalisés. Pour effectuer ces essais, la porte de l'enceinte est ouverte, le brassage de l'enceinte est assuré par un ventilateur positionné devant la porte. Les particules sont alors mises en suspension devant le ventilateur qui les disperse dans l'enceinte. La porte est ensuite refermée. Pour ces essais, deux types de particules ont été retenus :

- un aérosol de glycol issu d'un générateur de fumée principalement constitué de particules submicroniques ;
- un aérosol de poudre minérale (zéolithe) préalablement tamisée afin de ne retenir que la fraction granulométrique comprise entre 3 et 10 μm .

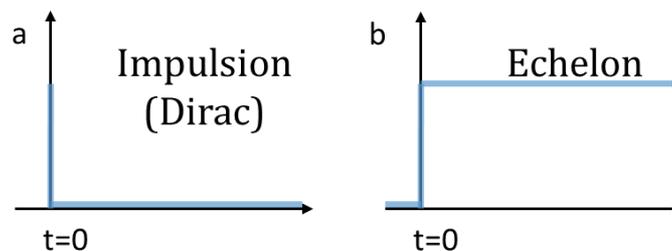


Figure 3.2 : Exemple de variations de grandeurs d'entrée pour l'étude de la dynamique de système

(a) variation de type impulsion ; (b) variation de type échelon

La mesure de référence de la concentration en particules dans l'enceinte est effectuée par un compteur optique à faisceau laser Grimm (modèle 1.108, Intertek, France, cf. Annexe 1). Il permet la mesure de la distribution en nombre des particules selon 15 classes réparties entre 0,3 et 20 μm . Le diamètre mesuré est un diamètre optique. La concentration maximale mesurable est de $2 \cdot 10^3 \text{ part.cm}^{-3}$. Le logiciel de traitement de données associé effectue la conversion de la distribution granulométrique et des concentrations en nombre à une distribution granulométrique et des concentrations massiques.

Le piquage de prélèvement est installé dans la partie centrale de l'enceinte, au même niveau que celui des capteurs.

3.1.3 Inter-comparaison des mesures de concentrations en formaldéhyde et COV

Les injections de formaldéhyde et de COV sont faites en continu (échelon de concentration) à l'aide d'un générateur de gaz étalon (générateur de micropolluant Bronkhorst). Ce générateur est basé sur l'évaporation de liquide dans un flux d'air à l'aide d'une vanne trois voies thermostatée. Il est composé d'un réservoir contenant le polluant sous forme liquide. Le débit de liquide est contrôlé par un débitmètre massique thermique Liquide Flow Bronkhorst (LFM). Sa valeur est fixée en fonction de la concentration en polluant souhaitée. Un débitmètre massique thermique gaz (MFC, GFC El-Flow Bronkhorst) permet le contrôle du débit de gaz de dilution (Figure 3.3). L'air et le polluant sont ensuite mélangés dans une vanne trois voies à température régulée. L'air chargé en polluant est dilué dans l'air insufflé dans l'enceinte en amont du distributeur.

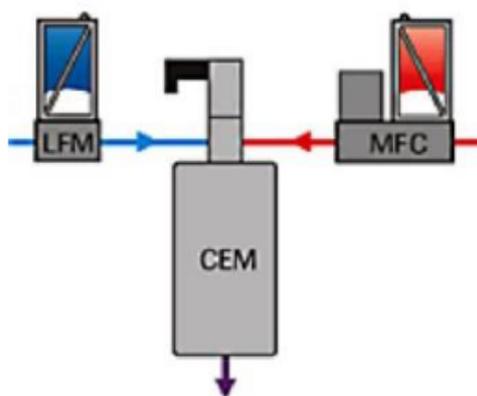


Figure 3.3 : Principe de fonctionnement du générateur de micropollution (LFM : débitmètre massique liquide ; MFC : débitmètre massique gaz ; CEM : contrôle de l'évaporation et du mélange)

Pour les essais sur les COV, les composés modèles retenus sont le toluène pour la première campagne et l'isopropanol pour la seconde. Les concentrations cibles dans l'enceinte (après dilution) sont comprises entre 20 et une centaine de $\mu\text{g.m}^{-3}$. Le Tableau 1 synthétise les concentrations cibles et les flux massiques de polluants liquides injectés.

Tableau 1 : Concentrations cibles et flux massique de polluants associés

Polluants	Concentration en enceinte ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Débit liquide (mg.h^{-1})
Formaldéhyde	25	12
	50	24,1
	75	36,1
	100	48,2
Toluène	200	1,2
	800	4,9
Isopropanol	25	0,4
	50	0,8
	75	1,2
	100	1,6

La mesure de référence du formaldéhyde est faite par prélèvement sur cartouche de DNPH suivant le protocole NIOSH 2016. Cette méthode d'analyse peut se décomposer en 3 étapes distinctes :

- captage du formaldéhyde sur une cartouche adsorbante imprégnée de 2,4 dinitrophénylhydrazine (DNPH, cf. annexe 2) ;
- élution de l'analyte à l'aide d'un volume précis d'acétonitrile ;
- analyse de l'éluât par chromatographie HPLC (High Performance Liquid Chromatography, cf. annexe 3) couplée à une détection UV.

Le prélèvement du formaldéhyde se fait sur des cartouches adsorbantes de DNPH (cartouche Water Sep-Pack Xposure™ Aldehyde Sampler, société Waters). Les quantités minimales et maximales de formaldéhyde adsorbées sur la cartouche permettant son analyse sont respectivement de 0,23 μg et de 32 μg . En fonction des gammes de concentration à analyser, le volume d'air à échantillonner doit donc être ajusté. Cet échantillonnage se fait à des débits compris entre 100 et 1500 mL.min^{-1} .

La désorption du complexe formé, le 2,4-dinitrophénylhydrazone de formaldéhyde, s'effectue suivant le protocole de la méthode NIOSH2016 via une solution d'acétonitrile (qualité HPLC). Le volume d'acétonitrile nécessaire pour la désorption est de 10 mL avec un débit d'élution maximal de 3 mL.min^{-1} afin d'assurer un temps de contact suffisant pour permettre le transfert complet du complexe dans la phase organique.

La mesure de référence des COV est un capteur à photoionisation (PID) modèle ppbRAE 3000 (détecteur portable de COV de chez RAE system, cf. annexe 4) pour les mesures de toluène et d'isopropanol. Cet appareil a été étalonné le 4 avril 2022 par cleanAir Europe. Sa plage de mesure s'étend de 1 ppbv à 10000 ppmv. Sa précision est égale à $\pm 3\%$ (isobutylène) avec un temps de réponse (T90) est égal à 2 s.

3.1.4 Synthèse des paramètres des essais de la campagne 1 et 2

Le Tableau 2 et le Tableau 3 synthétisent l'ensemble des tests effectués en enceinte. Il est important de noter que du fait de la durée maximale des campagnes d'inter-

comparaison, chaque essai de la campagne 2 était limité à une demi-journée de test. Le taux de renouvellement d'air étant de 1 volume heure, la stabilisation complète des échelons (estimée pour ce renouvellement d'air à 5 heures) n'est pas atteinte.

Tableau 2 : Synthèse des essais prévisionnels campagne 1

Paramètres étudiés	Descriptif essai	Analyseur intercomparé	Analyse de référence
COV	Comparaison sur régime pseudo permanent – bruit de fond (C<200ppbv)	NEMo - Aereco	CNA - RAE
COV	Comparaison sur régime pseudo permanent – bruit de fond + dégazage toluène (C<800ppbv)	NEMo - Aereco	CNA - RAE
COV	Echelon de concentration HR = 0% à 25°C	NEMo - Aereco	CNA - RAE
COV	Echelon de concentration HR = 40% à 25°C	NEMo - Aereco	CNA - RAE
Formaldéhyde	Echelon de concentration HR = 40% à 25°C Concentration cible 50 ppbv	NEMo (Aereco)	-
Formaldéhyde	Echelon de concentration HR = 40% à 25°C Concentration cible 50 ppbv	NEMo (Aereco)	DNPH - HPLC
PM2.5	Dirac PM2.5 Aérosol glycol	NEMo - Aereco	Grimm
PM10	Dirac PM10 Zéolithe broyée (fraction > à alvéolaire)	NEMo	Grimm
PM2.5	Echelon KCl	NEMo - Aereco	Grimm

Tableau 3 : Synthèse des essais prévisionnels campagne

Paramètres étudiés	Descriptif essai	Nombre d'essais	Concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Analyseur intercomparé	Analyse de référence
PM2.5	Echelon, HR = 45% à 25°C	5	30 à 150 Dont 2 dans les mêmes conditions pour différentes positions de capteurs	NEMo - Aereco	Grimm
Formaldéhyde	Echelon, HR = 45% à 25°C	4	25 – 50 – 75 -100	NEMo - Aereco	NioSH 2016
COV - isopropanol	Echelon, HR = 45% à 25°C	4	25 – 50 – 75 -100	NEMo - Aereco	RAE

3.2 Mesures comparatives en conditions standard d'occupation

3.2.1 Méthodologie de mesure dans la salle « confort » de l'IUT de Chambéry

La salle sélectionnée pour ces mesures comparatives dans des conditions standard d'occupation est la salle « confort » de l'IUT de Chambéry au sein du département Génie Civil et Construction Durable de l'université Savoie Mont Blanc (USMB). La salle, d'une superficie de 61 m², peut accueillir une quinzaine de personnes. Elle se trouve au rez-de-chaussée d'un bâtiment avec les fenêtres orientées à l'est. La ventilation est assurée par une VMC double flux (modèle DFE Compact 450 FWL, ALDES) dont le fonctionnement est indépendant du fonctionnement général de la ventilation du bâtiment, ce qui permet de pouvoir imposer les conditions de ventilation spécifiques à la salle.



Figure 3.4 : Photo du positionnement des capteurs dans la salle « CONFORT » de l'IUT

Des capteurs de CO₂, humidité, et température sont fixés sur un trépied au centre de la pièce pour la mesure du confort thermique et de la qualité de l'air de manière permanente. L'ensemble des données est stocké en continu sur le serveur de l'IUT avec un affichage pédagogique de certaines mesures en direct, pour les occupants, à savoir le taux de CO₂, la température et l'humidité, principalement.

Pour réaliser l'inter comparaison, les capteurs du projet Performance 2 ont été disposés au centre de la pièce à une hauteur d'environ 1 m afin de limiter le risque d'être dans une zone morte sans recirculation (Figure 3.4).

3.2.1 Période d'échantillonnage et qualité des mesures

La campagne de mesure s'est déroulée en deux phases en raison de l'arrivée tardive des capteurs Aereco. La première phase a débuté à partir du mardi 5 octobre 2021 avec l'installation des capteurs NEMO d'Ethera et des capteurs Node d'AirVisual fourni par le laboratoire LOCIE. La seconde phase d'installation s'est déroulée le jeudi 14 octobre 2021 avec la mise en place de l'ensemble des capteurs Aereco.

Cette période a été choisie en raison de l'occupation régulière de la salle avec plusieurs séries de travaux dirigés sur des demi-journées ou des journées complètes tout au long de la semaine. Comme le montre le Tableau 4, la salle a été occupée plus de 70% du temps (en excluant les nuits et les weekends) sur la période de mesures. Les enseignants ainsi que les étudiants ont été informés de la présence de ces capteurs et des règles de sécurité ont été clairement expliquées à chaque groupe. Aucun déplacement, ni dégradation des capteurs n'a été constaté ; les mesures se sont déroulées dans un environnement normal et représentatif des conditions standard d'occupation.

Tableau 4 : Récapitulatif du déroulement de la campagne de mesure en condition standard d'occupation marqueurs Jaune : occupation de la salle ; Vert : fonctionnement normal ; Rouge : dysfonctionnement

Occupation Salle			mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche	lundi	mardi	mercredi		
Appareils	ID	Meas Time	06/10/2021	07/10/2021	08/10/2021	09/10/2021	10/10/2021	11/10/2021	12/10/2021	13/10/2021	14/10/2021	15/10/2021	16/10/2021	17/10/2021	18/10/2021	19/10/2021	20/10/2021		
ETHERA NeMO XT	NeMO413	10min																	
	NeMO567																		
	NeMO604																		
	NeMO659																		
	NeMO680																		
	NeMO697																		
	NeMO703																		
ETHERA NeMO OAQ	NeMO913																		
ETHERA NeMO LOCIE	NeMO347_LOCIE																		
AirVisual	NODE1	10s																	
	NODE2																		
AERECO	44	1 min																	
	72																		
	104																		
	111																		
	150																		
	151																		
	152																		
	158																		
154																			
155																			
Capteurs Salle IUT	IUT	1 min																	

Tous les capteurs ont fonctionné sans interruption du vendredi 15 au mercredi 20 octobre 2021 (zone hachurée) avec plus de 95% des données collectées et validées. A noter que les mesures de formaldéhyde des appareils NEMO n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette inter-comparaison. De plus, sur la première phase de l'inter-comparaison, les dysfonctionnements observés correspondent à la décharge des batteries des appareils NEMO XT malgré la recharge réalisée à 100% le jour précédent leur installation. Par la suite, tous les appareils ont été branchés sur une alimentation secteur afin d'éviter ce dysfonctionnement.

La diversité des appareils et des temps de mesure allant de 10 s pour les Node à 10 min pour les NEMOs, il a été nécessaire d'harmoniser la base de données sur un pas de temps uniforme permettant d'avoir une information représentative des concentrations en polluants dans la pièce. Ainsi pour pouvoir mener cette inter comparaison d'appareils, nous avons réalisé deux matrices de données, l'une sur un pas de temps différents propre à chaque type d'appareils et la seconde sur un pas de temps horaire. Ces deux bases de données permettent de comparer l'étalement des mesures, d'une part, au sein d'un groupe d'appareils identiques (intra) et, d'autre part, entre les types d'appareils (inter).

4 RESULTATS DES CAMPAGNES D'INTER-COMPARAISON

Cette partie synthétise et fait l'analyse de l'ensemble des résultats de l'étude d'inter-comparaison, à savoir les deux campagnes en enceinte contrôlée et la campagne en environnement réel. L'ensemble des résultats expérimentaux ne sera pas présenté, seuls les exemples représentatifs des comportements observés le seront afin de simplifier la lecture de cette partie. Le lecteur pourra cependant se référer aux annexes pour accéder à l'ensemble des résultats des essais. Bien qu'effectuée avant les tests en enceinte, la campagne en environnement réel sera présentée dans un second temps. Cela permettra d'analyser la transposabilité des conclusions issues des essais en enceinte à un fonctionnement en conditions réelles.

4.1 Particules en suspension (PM)

4.1.1 Aereco en enceinte contrôlée

L'étude des capteurs installés sur les cartes Aereco pour la mesure des $PM_{2.5}$ a consisté à l'étude de leur réponse pour des échelons d'amplitudes différentes et un essai pour une transformation de type impulsion.

Quel que soit l'essai de type échelon (Figure 4.1 et Figure 4.2), les profils de concentration décrits par les capteurs Aereco sont cohérents vis-à-vis de celui mesuré par le compteur de référence (GRIMM). Cette cohérence peut être quantifiée grâce aux coefficients de corrélation calculés qui sont proches ou égaux à 1 et cela avec la référence ou intra Aereco. Durant les deux campagnes, quelques coefficients sont moins bons, compris entre 0,7 à 0,9. Ces derniers semblent associés à des profils présentant des pics de concentration très ponctuels. Les appareils concernés par ce phénomène sont les cartes Aereco 150, 152 et 153. La référence et une majorité d'appareil ne mesurant pas ces pics, sachant que les capteurs ont été changé de position entre les campagnes 1 et 2, on peut supposer que ces pics résultent d'erreurs de mesure ponctuelles ou de problème dans la chaîne d'acquisition.

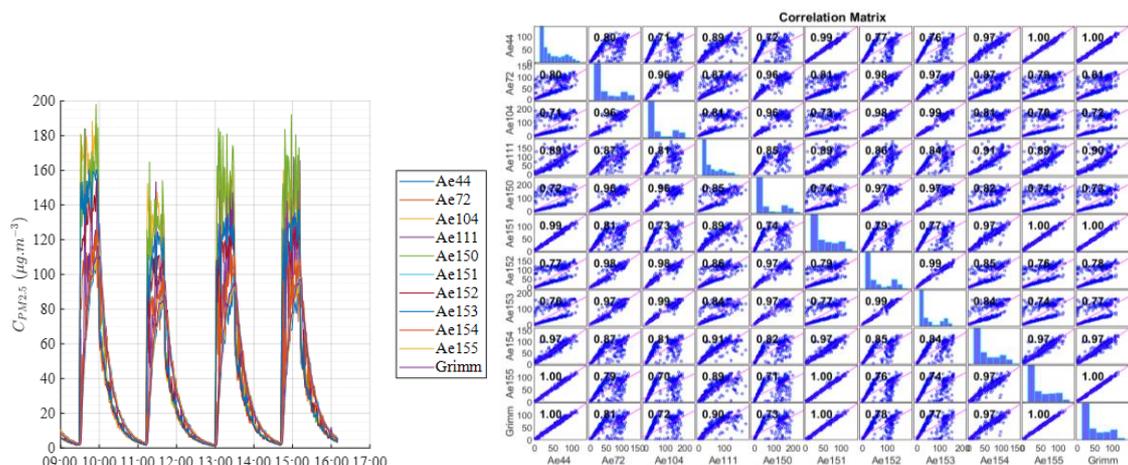


Figure 4.1 : Etude de la mesure des $PM_{2.5}$ par les capteurs Aereco : profils de concentration durant la transformation et coefficients de corrélation de Pearson (campagne 1, 03/11/2021)

Pour la majorité des essais, les valeurs de concentrations intra Aereco sont proches, l'écart entre les moyennes et médianes sont de l'ordre de $\pm 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les essais à concentration modérée (concentration cible moyenne des essais, Figure 4.2). Cet écart augmente à mesure que les concentrations augmentent. Durant un essai (campagne 2, 06/05/2022), la différence de concentration intra Aereco était significative et pouvait atteindre 33%. On peut supposer un biais de manipulation.

Les gammes de concentration mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mesurées par la référence. On notera cependant que les capteurs Aereco surestiment de manière quasi systématique la concentration par rapport à cette référence. La distribution des concentrations dans l'enceinte ne semble pas être la cause de ces surestimations puisque les appareils concernés ne sont pas systématiquement les mêmes. Cette surestimation est de l'ordre d'une dizaine de $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ à quelques dizaines de $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les concentrations plus élevées. Durant la campagne 2, en excluant les pics ponctuels de concentration, les écarts relatifs mesurés avec la référence après stabilisation de la concentration sont compris entre +12% et +25 %.

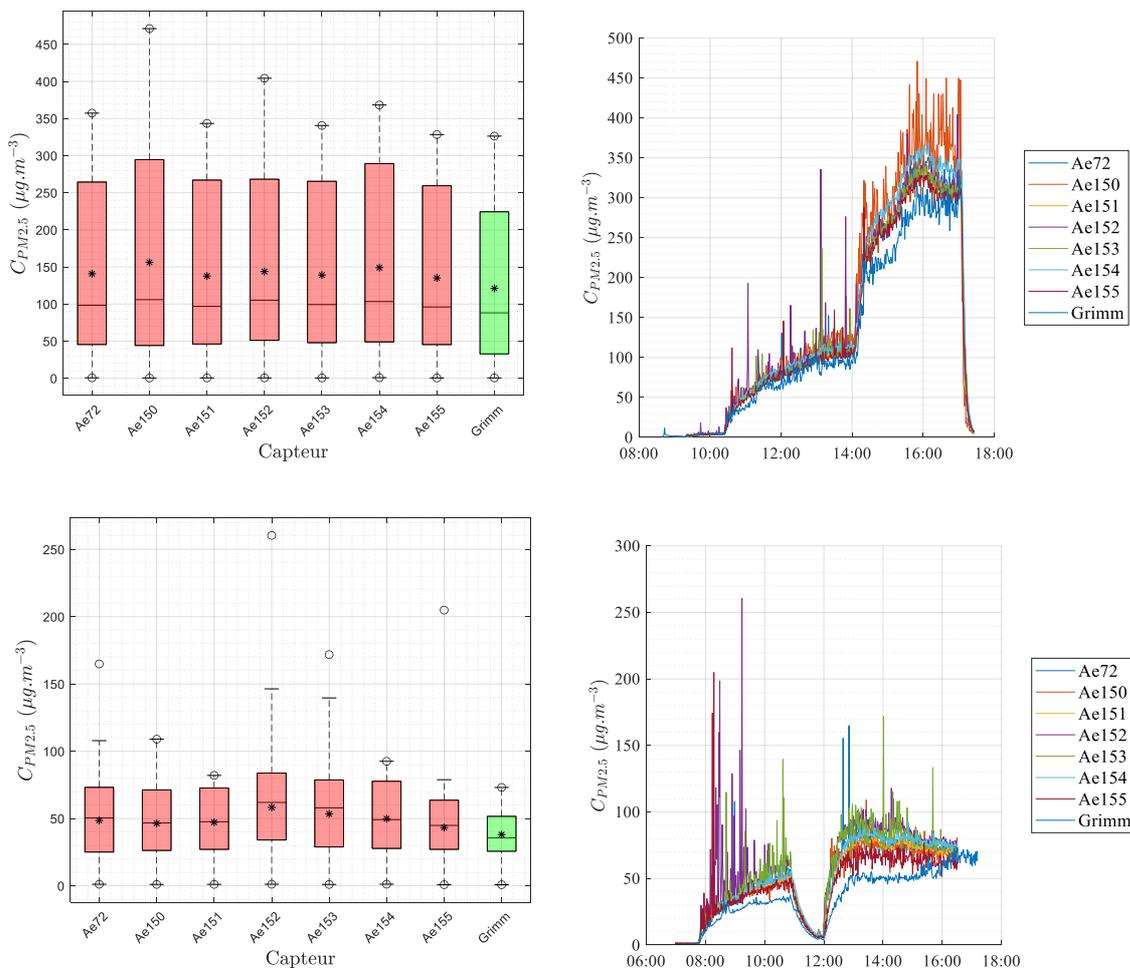


Figure 4.2 : Etude de la mesure des PM_{2.5} par les capteurs Aereco : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 09/05/2022 (haut) et du 10/05/2022 (bas))

On pourra souligner que les capteurs Aereco sont capables de rendre compte avec précision, tant du point de vue de la dynamique que de celui de l'amplitude de la transformation, d'évènement de type impulsion (Figure 4.3).

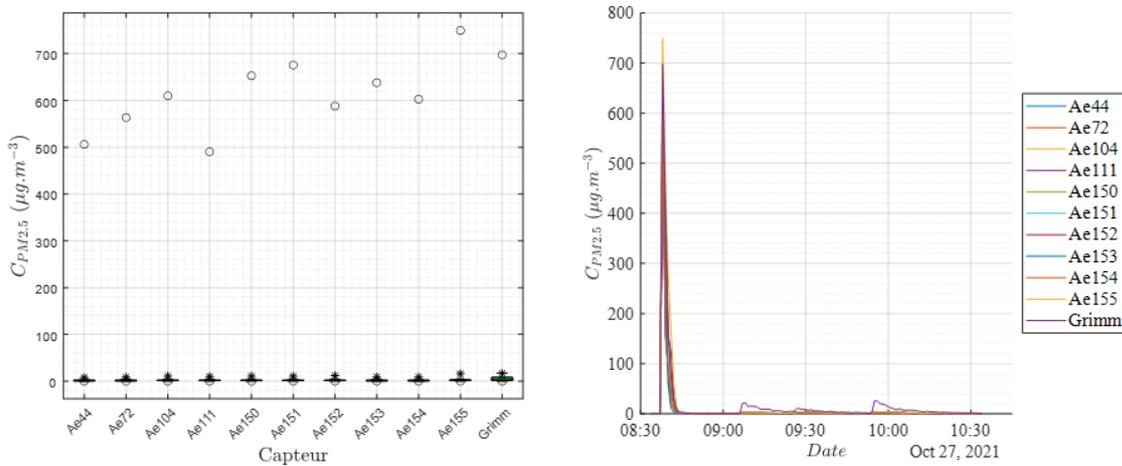


Figure 4.3 : Etude de la mesure des $PM_{2.5}$ par les capteurs Aereco durant une transformation de type impulsion (campagne 1, essais du 27/10/2021)

Pour finir, on notera que les premiers essais de la campagne 2 (essais du 06/05/2022, annexe 7) présentent une grande dispersion en terme de valeurs de concentration, cela pour les capteurs Aereco et les NEMOs. Ces résultats sont singuliers et ne semblent pas être représentatifs de l'ensemble des autres résultats ce qui pourrait indiquer un dysfonctionnement du banc d'essai. Ces résultats ont donc été exclus de l'analyse de la campagne 2.

4.1.2 NEMOs en enceinte contrôlée

Du fait du pas de temps des NEMOs (10 min) différent de celui de la référence (1 min) et du fait de la non synchronisation des NEMOs entre eux, aucun calcul de coefficient de corrélation ne peut être fait. L'analyse de la cohérence des profils de concentration se basera donc uniquement sur une analyse qualitative de ces derniers. La Figure 4.4 et la Figure 4.5 présentent des profils obtenus durant les deux campagnes. Les évolutions temporelles sont cohérentes pour l'ensemble des capteurs à l'exception des NEMOs 913 (campagne 1), 567 et 604 (campagne 2). Aucun retard significatif de la réponse ne peut être observé, que ce soit pour les phases de croissance ou pour les phases de décroissance de concentration.

Pour les NEMOs 913, 567 et 604, des augmentations brusques de concentration immédiatement suivies de diminutions peuvent être observées associées (913) ou non (567 et 604) à un offset de l'ensemble de la mesure (Figure 4.4 et Figure 4.5). Les niveaux de concentration sont significativement supérieurs à ceux mesurés par la référence et ceux mesurés par les autres NEMOs. Ces appareils semblent donc présenter des dysfonctionnements ponctuels.

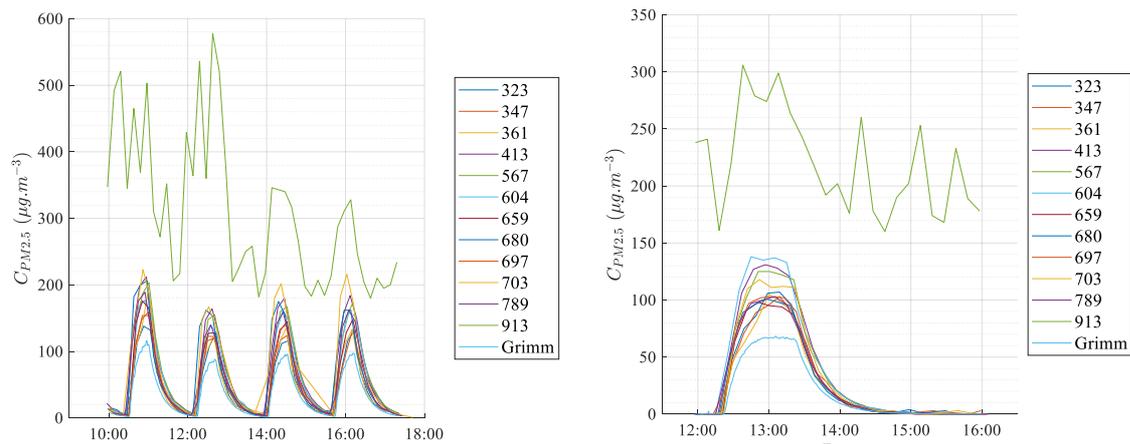


Figure 4.4 : Etude de la mesure des $PM_{2.5}$ par les NEMOs : profils de concentration durant des échelons de concentration (campagne 1, essais du 03/11/2021 (gauche) et du 04/11/2021 (droite))

Concernant la précision des mesures, une dispersion importante peut être observée. Par exemple, pour la campagne 2 (Figure 4.5), lorsque la concentration se stabilise à une valeur de $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (mesure de référence), les concentrations mesurées par les NEMOs sont comprises entre 12 et $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en excluant les NEMOs 567 et 604). Pour une concentration stabilisée à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (mesure de référence), les concentrations mesurées par les NEMOs sont comprises entre 50 et $270 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($192 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en excluant les NEMOs 567 et 604). Les écarts relatifs lorsque la concentration est stabilisée sont compris :

- entre -66% et $+185\%$ (ou $+42\%$ en excluant les NEMOs 567 et 604) pour l'essai réalisé à $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (mesure de référence) ;
- entre -50% et $+170\%$ (ou $+92\%$ en excluant les NEMOs 567 et 604) pour l'essai réalisé à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (mesure de référence).

On notera que les Boxplots associés à ces essais ont des profils relativement proches ce qui traduit que les sous-estimations et les surestimations sont associées aux mêmes capteurs. Ceci peut résulter d'une erreur systématique de mesure ou d'une mauvaise homogénéité de la concentration en $PM_{2.5}$ dans l'enceinte. La dernière hypothèse semble la moins probable puisque les capteurs ont été changé de place entre les deux campagnes.

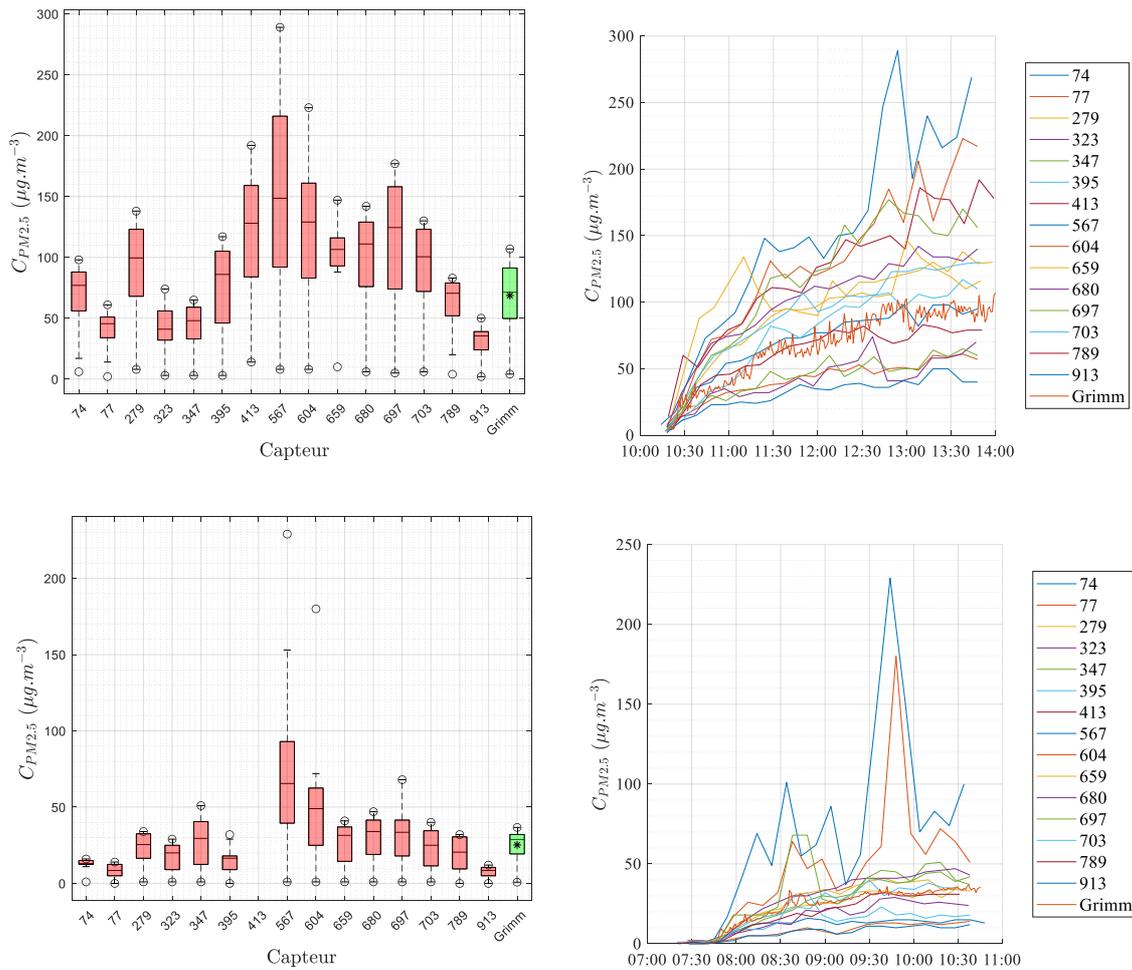


Figure 4.5 : Etude de la mesure des $PM_{2.5}$ par les NEMo : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 09/05/2022 (haut) et du 10/05/2022 (bas))

La Figure 4.6 présente les profils de concentrations mesurées durant l'essai de type impulsion. Du fait du pas de temps des NEMOs et de leur non-synchronisation, les réponses sont très variables, les NEMOs mesurant la concentration soit en début, soit en fin de transformation. En effet, comme la variation de concentration créée par l'impulsion s'étale sur environ 5 min, certains NEMOs (323, 347 et 604) ne mesurent pas de variation car l'intervalle de temps de mesure est trop long. Les NEMOs ne sont donc pas adaptés à la mesure de variations de concentration courte dans le temps.

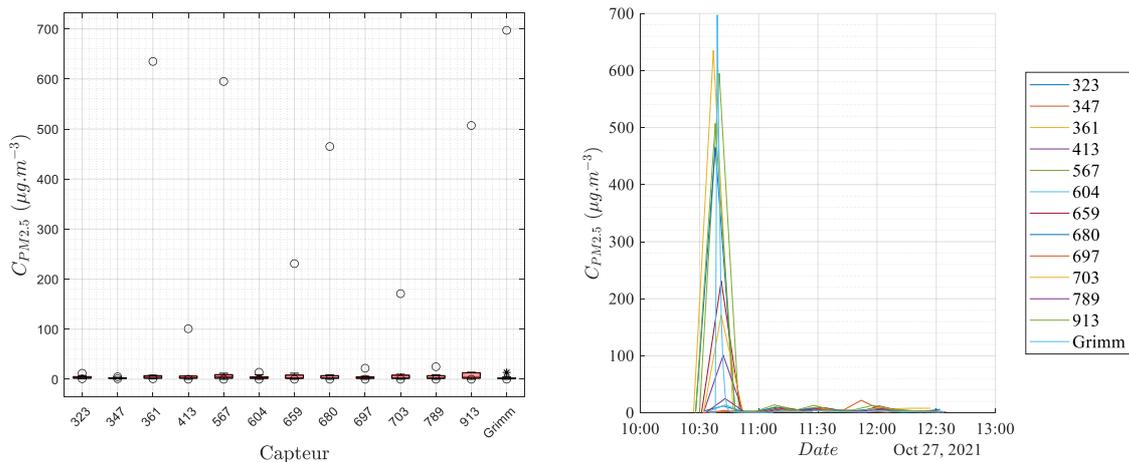


Figure 4.6 : Etude de la mesure des $PM_{2.5}$ par les NEMo durant une transformation de type impulsion (campagne 1, essais du 27/10/2021)

4.1.3 Inter-comparaison en conditions standards d'occupation

Durant la campagne d'inter-comparaison en conditions standard d'occupation, les concentrations en $PM_{2.5}$ étaient faibles, majoritairement inférieures à $10 \mu g.m^{-3}$. Des variations de concentrations peuvent néanmoins être observées : elles augmentent par exemple d'environ $5 \mu g.m^{-3}$ à $11 \mu g.m^{-3}$ le 16 octobre 2021 (Figure 4.7).

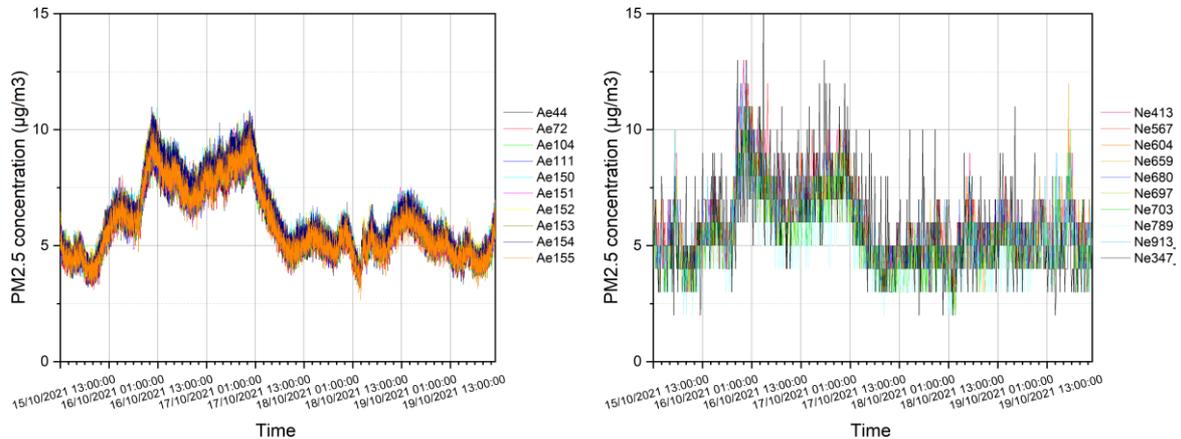


Figure 4.7 : Evolutions des concentrations en $PM_{2.5}$ issues des Aereco et des NEMo durant la campagne d'inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l'IUT

Afin de valider les gammes de concentrations mesurées, deux appareils de mesure de la qualité de l'air (Node, Air Visual), préalablement étalonnés¹, ont également été déployés durant cette campagne. La Figure 4.8 présente les évolutions temporelles des concentrations mesurées du 15/10/2021 au 19/10/2021. Du point de vue des gammes

¹ Najwa Kanama, Michel Ondarts, Gaëlle Guyot, Jonathan Outin, Evelyne Gonze, IAQ campaign in an occupied low-energy house with a high level of spatial and temporal discretization. Applied Sciences 2021, 11, 11789. <https://doi.org/10.3390/app112411789>

de concentrations, on constate une bonne adéquation entre les mesures des trois types d'appareil. Les concentrations sont comprises entre 3 et 11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Seul 3 NEMOs affichent ponctuellement des valeurs supérieures à 11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et pouvant atteindre 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ces résultats sont cohérents avec les résultats obtenus en enceinte.

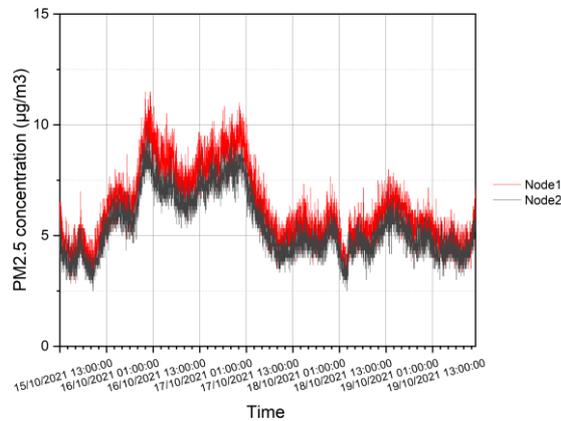


Figure 4.8 : Evolutions des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ issues des Node durant la campagne d'inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l'IUT

Les mesures des différents capteurs Aereco sont comprises dans une enveloppe moyenne d'amplitude égale à 2,5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette observation consolide les observations faites en enceinte : les mesures des capteurs Aereco sont d'autant plus comparables que les concentrations sont faibles. Comme cela a pu être mis en évidence durant la campagne en enceinte contrôlée, les évolutions temporelles de ces appareils sont corrélées les unes aux autres, les dynamiques sont identiques. Ce résultat est mis en évidence par les coefficients de corrélation de Person compris entre 0,95 et 1 (Figure 4.9). Les corrélations avec les Nodes sont également fortes, les coefficients sont identiques aux coefficients intra Aereco. Durant cette campagne, aucun pic ponctuel de concentration n'a été observé.

Comme vu précédemment, les mesures issues des appareils NEMO présentent une dispersion sensiblement plus importante que celle observée avec les capteurs Aereco. En effet, durant le temps de la campagne de mesure, elle peut atteindre 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, soit +100% de la valeur des Nodes. Malgré un profil relativement proche des profils de concentration obtenus avec les Aereco et les Nodes, des corrélations moindres entre appareils (intra) ont été calculées pour les NEMOs. Les coefficients de corrélation sont compris entre 0,6 et 1. Les NEMOs 347 et 913 sont les moins corrélés, on peut supposer que le modèle (extérieur, XT, etc.) a donc une incidence non négligeable sur les résultats.

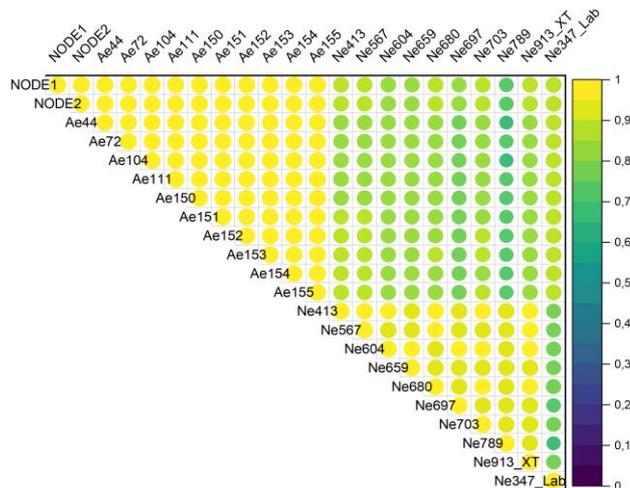


Figure 4.9 : Coefficients de corrélation de Pearson : inter-comparaison des Aereco, des NEMOs et des Nodes, salle « CONFORT » de l'UT – Campagne 1

Pour finir, les coefficients de corrélations inter capteurs sont faibles à moyennes, à savoir compris entre 0,6 et 0,9. Finalement, ce deuxième type de campagne permet de confirmer les résultats observés durant la campagne en enceinte à savoir :

- une très bonne corrélation des évolutions temporelles et une dispersion des concentrations modérée pour les capteurs Aereco (comparaison intra) ;
- une corrélation modérée à bonne des évolutions temporelles et une dispersion des concentrations modérée à forte pour les NEMOs (comparaison intra).

4.2 Composés organiques volatils

4.2.1 Aereco en enceinte contrôlée : COV totaux

Pour cette partie de l'inter-comparaison, les deux campagnes n'ont pas été effectuées dans les mêmes conditions puisque le COV cible n'était pas le même. Le toluène a été utilisé pour la première alors que l'isopropanol a été retenu pour la seconde. On retiendra donc pour cette analyse la campagne 2 pour l'étude de la cohérence des évolutions temporelles des réponses et les 2 campagnes pour l'analyse de l'inter-comparaison des valeurs de concentration. Dans cette partie, la référence aura pour seul but de valider les évolutions de concentration dans l'enceinte, les concentrations en COV totaux entre appareils différents (technologies, étalonnage) ne peuvent être comparées. En effet, ce type d'appareil est étalonné en fonction d'une réponse à un COV de référence, la réponse diffère donc en fonction du COV de référence et de la technologie de mesure.

Les profils de concentration sont cohérents entre Aereco, et cela pour des transformations lentes et des transformation plus ponctuelles (Figure 4.10 et Figure 4.11). Les coefficients de corrélation sont compris entre 0,96 et 0,98. Bien que les valeurs de concentration soient très sensiblement différentes, les évolutions de concentration sont également cohérentes avec la référence.

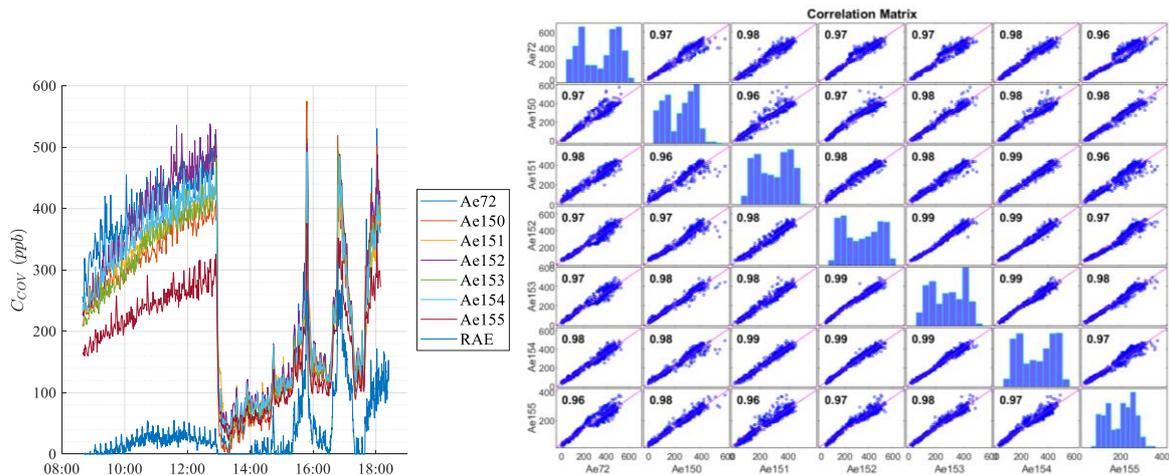


Figure 4.10 : Etude de la mesure des COV totaux par les capteurs Aereco : profils de concentration durant la transformation et coefficients de corrélation de Pearson (campagne 1, 25/10/2021)

On peut observer une dispersion importante des valeurs de concentration : la différence de concentration mesurée est d'environ 100 ppb à faible concentration allant jusqu'à 300 ppb pour les fortes concentrations. L'Aereco 155 est associé à des concentrations sensiblement plus faibles que celles mesurées par les autres appareils durant l'ensemble de la campagne 2. Cependant, la campagne 1 n'avait pas permis de mettre en évidence ce résultat. On peut donc supposer soit un problème de distribution au sein de l'enceinte, soit une dérive de cet appareil.

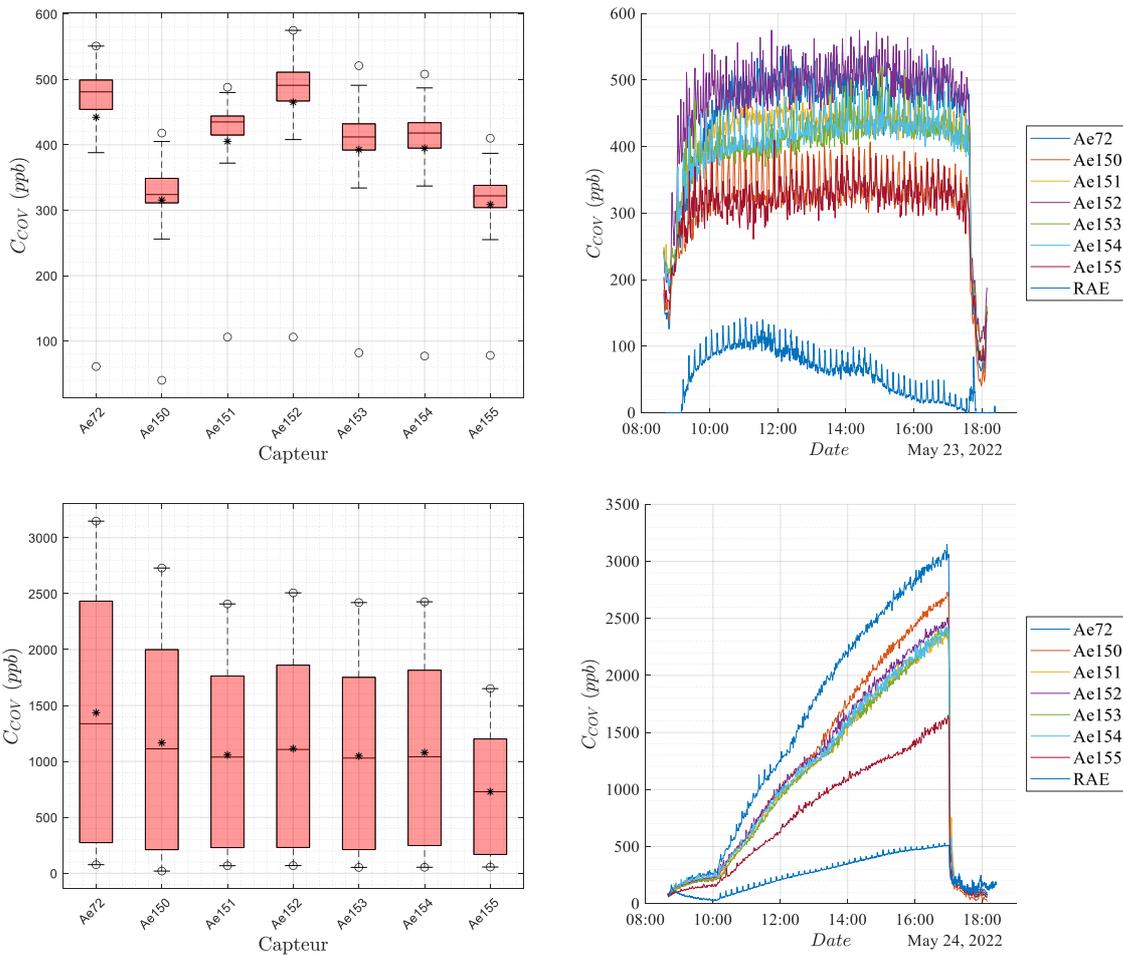
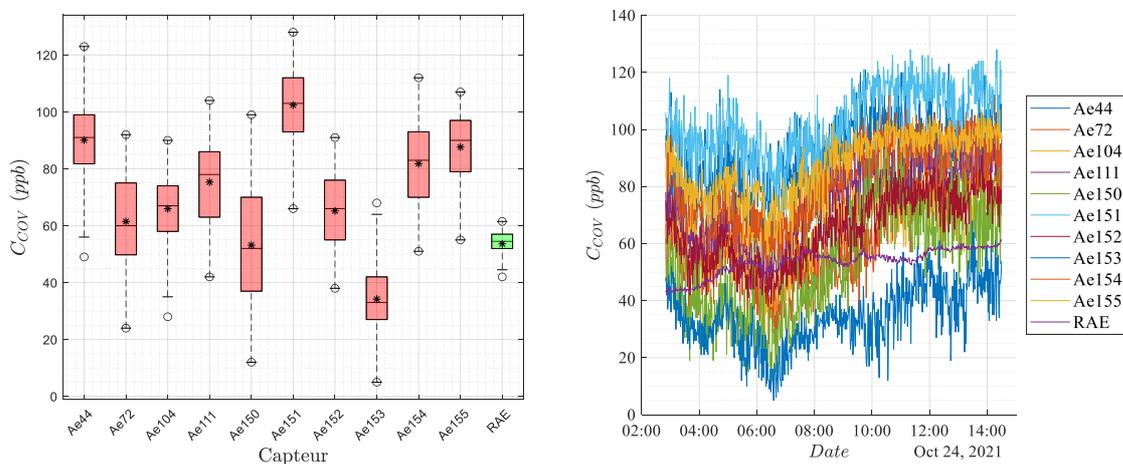


Figure 4.11 : Etude de la mesure des COV totaux par les capteurs Aereco : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 23/05/2022 et du 24/05/2022)

Pour le toluène (campagne 1, Figure 4.12), la dispersion des valeurs mesurées est également importante, de l'ordre de plusieurs dizaines de ppb pour une concentration mesurée du même ordre de grandeur. Ce résultat pourrait être associé à une moins grande sensibilité du capteur à ce composé (réponse faible malgré des concentrations en toluène élevées).



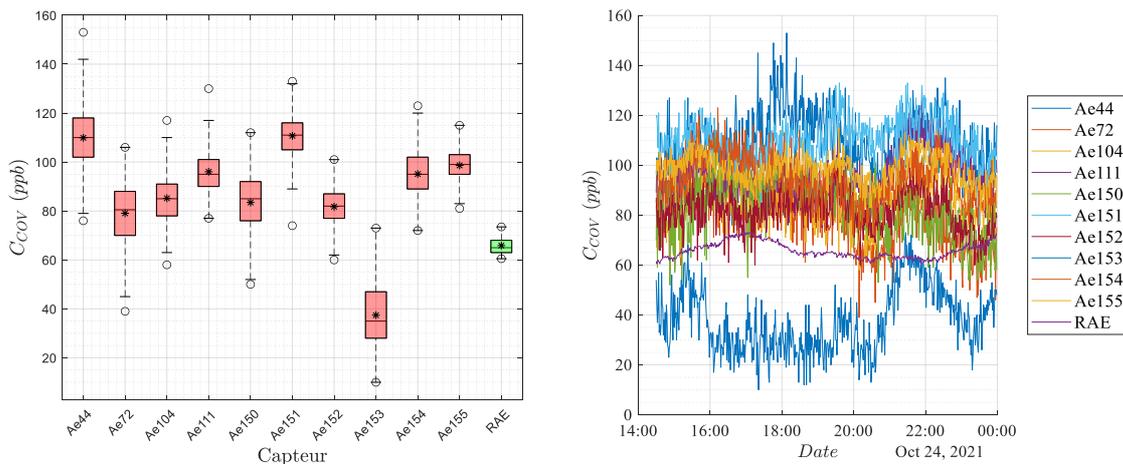


Figure 4.12 : Etude de la mesure des COV totaux par les Aerecos : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 1, essais du 24/10/2021)

4.2.2 Nemo en enceinte contrôlée : COV léger

Dans cette partie, seule la campagne 2, réalisée avec de l'isopropanol, composé organique léger (3 carbones) adapté aux mesures des NEMOs, sera présentée. En effet, la mesure des NEMOs est une mesure de COV légers, c'est-à-dire COV ayant un nombre de carbones inférieur ou égal à 4 : les NEMOs ne mesurent le toluène que pour des concentrations très élevées, l'analyse de ces résultats ne paraît pas pertinente.

Deux comportements distincts peuvent être observés en termes de dynamique de réponse. Lors d'un premier échelon, à concentration modérée, les NEMOs se stabilisent à des concentrations constantes sans décrire l'augmentation puis la diminution de concentration mesurée par le capteur de référence (Figure 4.13). Lors d'une seconde transformation, qui consiste en une lente augmentation de la concentration dans l'enceinte, tous les NEMOs mesurent cette augmentation. Cette différence de comportement est difficilement explicable malgré des niveaux de concentration sensiblement différents entre les deux essais.

Pour ces deux essais, la dispersion des concentrations mesurées est grande, de l'ordre de plusieurs dizaines de ppb. Pour les deux essais, les mesures de concentrations élevées et faibles sont associées aux mêmes capteurs, observation pouvant être associée soit à une mauvaise distribution dans l'enceinte, soit à une sensibilité différente d'un capteur à un autre. Les NEMOs 604, 659 et 703 sont associés aux réponses de plus faibles amplitudes.

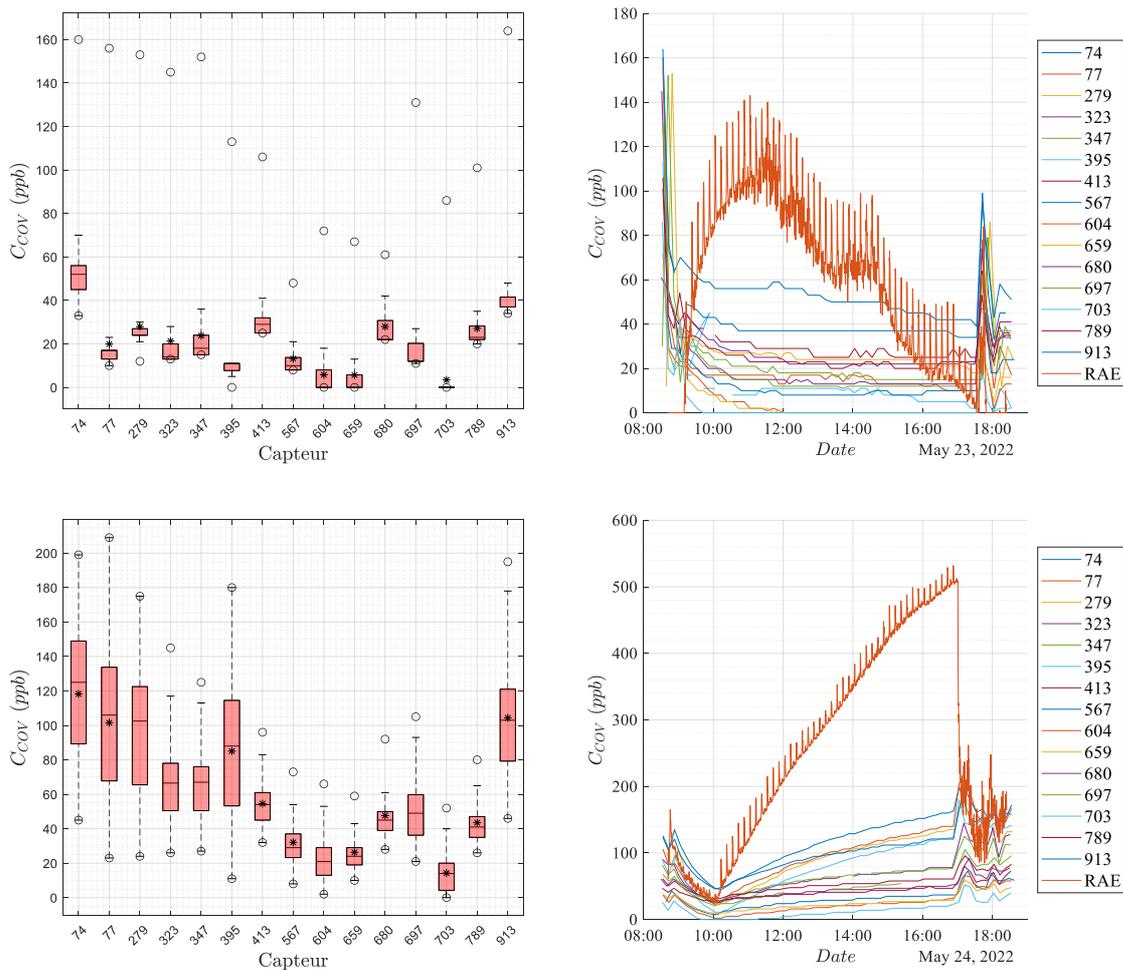


Figure 4.13 : Etude de la mesure des COV léger par les NEMOs : analyses statistiques (boxplot) et profils de concentration durant la transformation (campagne 2, essais du 23/05/2022 et du 24/05/2022)

4.2.3 Inter-comparaison en conditions standards d'occupation

Contrairement aux $PM_{2.5}$, aucune mesure de référence de COV n'a été faite durant la campagne d'inter-comparaison en conditions standard d'occupation. Cette partie portera donc essentiellement sur l'intra- et inter-comparaison des différents appareils de mesure dans ces conditions pour la mesure des COV (totaux et légers).

Comme le présente la Figure 4.14, les concentrations en COV totaux et légers augmentent quotidiennement ; ces augmentations ont été mesurées par l'ensemble des appareils.

Pour les capteurs Aereco, les concentrations varient entre 0 et environ 400 ppb alors qu'elles varient de 0 à 70 ppb pour les NEMOs. Les valeurs de concentration entre les deux types de capteurs sont très différentes ; la majeure partie du temps séparées d'un ordre de grandeur. Ce résultat est peu surprenant puisque les deux appareils ne mesurent pas les mêmes catégories de COV. Les campagnes en enceinte ont également mis en évidence la très faible sensibilité des NEMOs à des composés de poids moléculaires modérés sortant de la gamme de mesure (C1 à C4) comme le toluène.

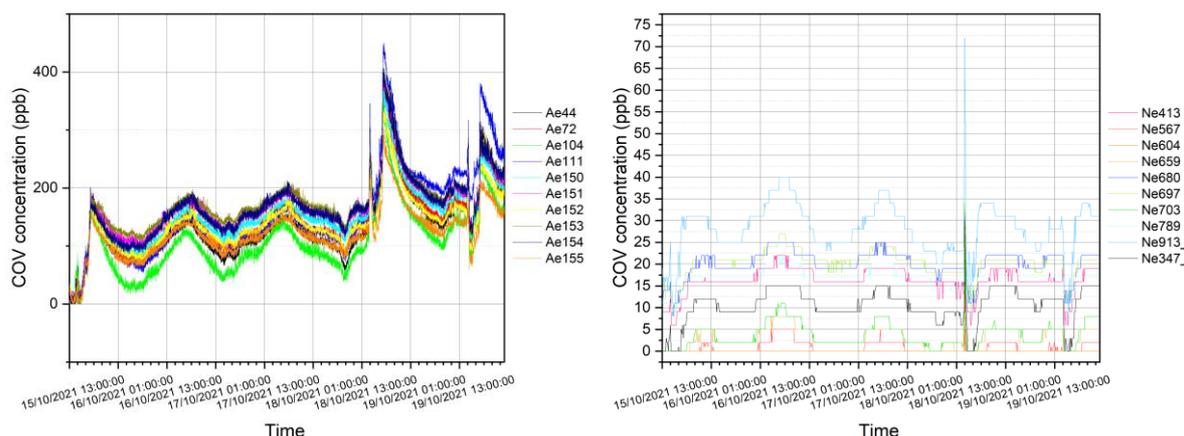


Figure 4.14 : Evolutions des concentrations en COV totaux et COV légers issues respectivement des capteurs Aereco et des NEMOs durant la première campagne d'inter-comparaison dans la salle « CONFORT » de l'IUT

Pour l'ensemble des capteurs Aereco, les évolutions temporelles sont comparables, les coefficients de corrélation sont satisfaisants et compris entre 0,9 et 1 (Figure 4.15). On notera cependant, comme lors de la campagne en enceinte, les valeurs de concentration d'un appareil à l'autre sont dispersées. Pour les pics de concentration en COV, des écarts pouvant atteindre 100 ppb peuvent être observés. En faisant l'hypothèse raisonnable que la concentration en COV est homogène dans la zone où les appareils ont été déployés, cela permet de consolider les résultats de l'étude en enceinte : les écarts de concentration observés ne sont pas uniquement dus à une mauvaise distribution des polluants dans l'enceinte mais peuvent être attribués à des sensibilités différentes entre capteurs.

On peut également observer une augmentation de valeurs minimales faisant suite aux pics quotidiens de COV. Ce résultat peut soit être attribué à une ventilation insuffisante qui ne permet pas le retour à une concentration de fond, soit à une dérive de la mesure, consécutive à des expositions répétées.

Pour les NEMOs, bien que la majorité des appareils décrivent les augmentations successives de concentration, les coefficients de corrélation intra NEMOs sont nettement moins bons que ceux associés aux capteurs Aereco. Ils sont compris entre 0,6 et 1 (hors NEMo 604). Le NEMo 604 ne corrèle avec aucun autre appareil (intra, inter). Les valeurs de concentration varient très sensiblement d'un NEMo à un autre. Les bruits de fonds (période entre chaque augmentation) varient entre 0 et 25 ppb.

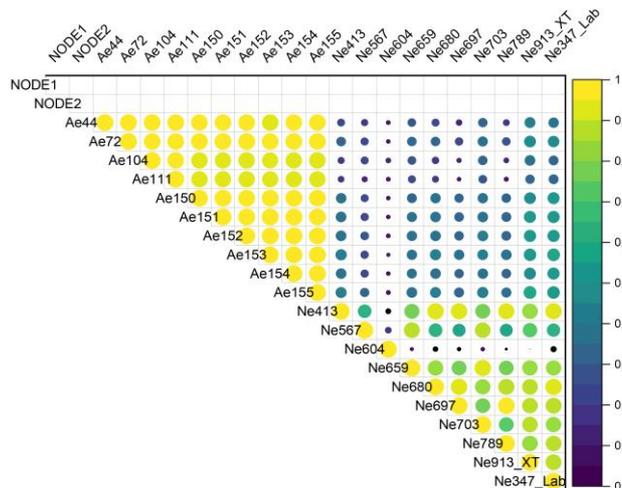


Figure 4.15 : Coefficients de corrélation de Pearson : inter-comparaison des capteurs Aereco, des NEMOs et des Nodes, salle « CONFORT » de l'IUT – Campagne 1

Comme le montre la Figure 4.15, il n’y a pas de corrélation entre les NEMOs et les Aereco. Comme les niveaux de concentration sont également très différents, aucune inter-comparaison ne semble pouvoir être faite entre ces deux catégories d’appareil pour l’étude des COV. Outre les réponses des capteurs, cette observation pose question sur la pertinence de la mesure de COV légers pour qualifier la qualité de l’air intérieur, puisqu’elle ne semble pas corrélée à la mesure de COV totaux.

4.3 Formaldéhyde : NEMo en enceinte contrôlée

Les NEMOs mesurent le formaldéhyde par le biais d’une méthode mettant en œuvre une accumulation du composé sur cartouche puis une mesure optique. Les résultats obtenus sont donc des concentrations moyennes, le pas de temps est de 2 heures. La gamme de concentration cible est la dizaine de $\mu\text{g.m}^{-3}$. La mesure peut être sensible à des variations fortes d’humidité de l’air. Vis-à-vis de l’ensemble de ces caractéristiques, il est important de rappeler que le temps de stabilisation de la concentration en enceinte est estimé à 5 heures (5 fois le temps caractéristique) et un minimum de 3 heures est nécessaire pour atteindre 95 % de la réponse finale (temps de réponse). Le temps disponible par essai étant limité à une demi-journée : l’analyse de la précision de la mesure sera faite sur un nombre de points extrêmement faible.

De plus, la concentration dans l’enceinte est contrôlée par un générateur de gaz étalon ; cette concentration n’a pu être mesurée que lors de la deuxième campagne qui sera donc la référence pour les aspects précisions de la mesure.

La Figure 4.16 présente les résultats de la première campagne d’inter-comparaison. Deux échelons de concentration ont été effectués, le premier à $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ et le second à $20 \mu\text{g.m}^{-3}$. Du fait d’un problème d’acquisition (décalage du démarrage de l’acquisition des NEMOs), seule la décroissance de concentration a pu être enregistrée pour le plateau

à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. En termes de concentration, les ordres de grandeur sont corrects vis-à-vis des valeurs de consignes (générateur). Cependant, une dispersion non négligeable des amplitudes des réponses peut être observée. Par exemple, pour le plateau effectué à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, les concentrations varient de 50 à $88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette dispersion ne semble pas liée aux NEMOs puisque les concentrations maximales mesurées durant les deux plateaux ne sont pas associées aux mêmes appareils.

Les réponses temporelles sont homogènes et cohérentes. Cette observation est validée par les coefficients de corrélation (Figure 4.17) compris entre 0,85 et 0,98.

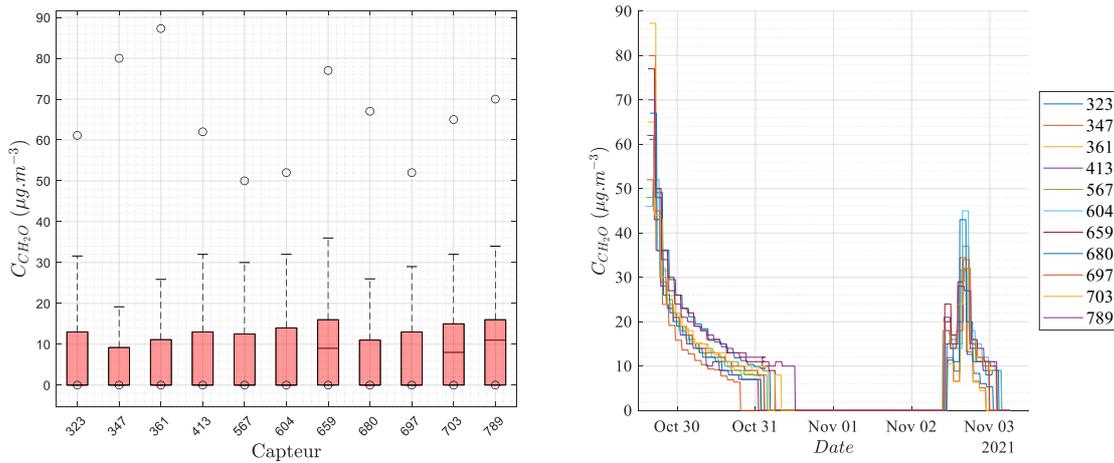


Figure 4.16 : Evolutions des concentrations en Formaldéhyde mesurées par les NEMOs durant la première campagne d'inter-comparaison dans l'enceinte

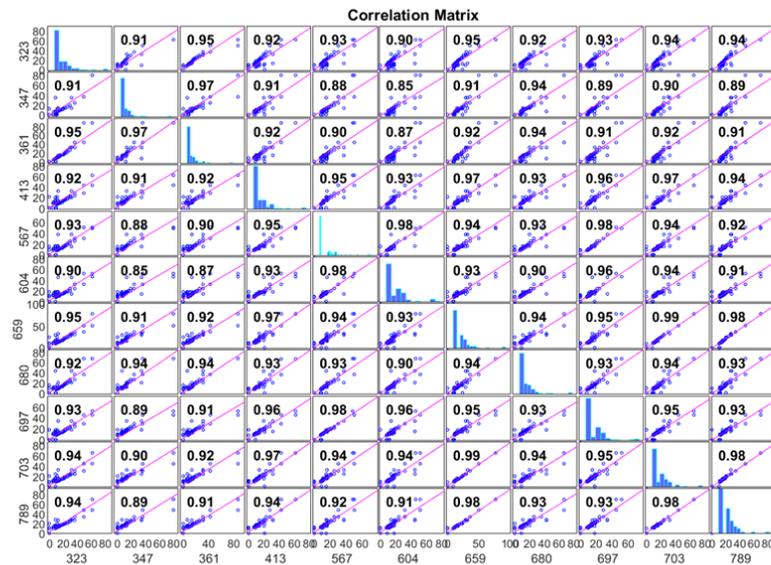


Figure 4.17 : Coefficients de corrélation de Pearson pour le formaldéhyde mesuré par les NEMOs dans l'enceinte – Campagne 1

La Figure 4.18 présente deux échelons effectués durant la seconde campagne, l'un à forte concentration (concentration cible $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), l'autre à concentration plus faible

(concentration cible $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Les concentrations mesurées par la méthode de référence sont synthétisées dans le Tableau 5. Comme durant la campagne 1, les réponses temporelles sont cohérentes. De même, des écarts de concentration non négligeables peuvent être observés, et cela à faible et forte concentrations. Ici encore, aucun capteur ne semble sous-évaluer ou surévaluer de manière systématique les concentrations en formaldéhyde.

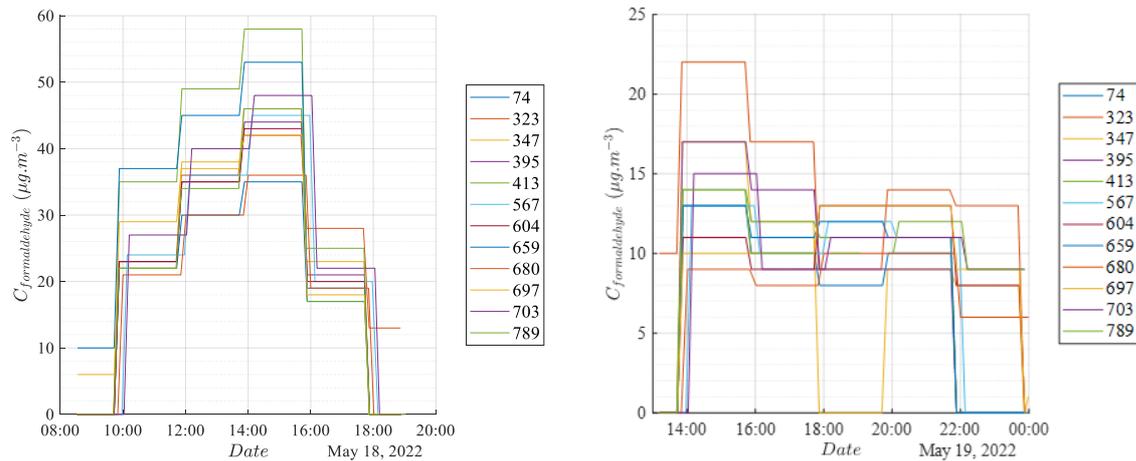


Figure 4.18 : Exemple d'échelon de concentration de formaldéhyde mesuré par les NEMOs en enceinte - Campagne 2

Tableau 5 : Synthèse des concentrations en formaldéhyde mesurées dans l'enceinte suivant le protocole NIOSH2016

Date	Concentration cible ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Concentration mesurée dans l'enceinte (méthode NIOSH 2016) ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
18/05/2022 10h	25	19,8
18/05/2022 13h	40	45,7
19/05/2022 9h	15	7,1
19/05/2022 13h	50	Erreur de mesure
20/05/2022 9h	60	Erreur de mesure

5 CONCLUSION

Cette étude a consisté à inter-comparer deux types de capteurs : les capteurs Aereco et les NEMOs. Les paramètres étudiés étaient les concentrations en PM_{2.5}, en COV (totaux pour les capteurs Aerecos, légers pour les NEMOs) et en formaldéhyde (NEMO uniquement). Pour cela, la campagne en enceinte initialement prévue a été mise en œuvre. En complément, durant la campagne 1 (avant déploiement des capteurs), une campagne d'inter-comparaison en environnement réel a également été effectuée. Cette campagne a permis d'étudier la transposabilité des résultats en enceinte à des résultats *in situ*. Une seconde campagne, implémentée après le premier déploiement des capteurs, a également été proposée et effectuée. Son objectif était de vérifier les possibles dérives des différents capteurs. Pour cette dernière, les protocoles d'étude ont pu être adaptés afin d'accroître la pertinence des essais (choix des composés cibles, temps de stabilisation des échelons, etc.).

Les réponses des différents capteurs ont été comparées à des analyseurs de référence. Les analyses de la qualité de la mesure et de l'inter-comparabilité des capteurs portent autant sur les valeurs des concentrations mesurées que sur la dynamique de la réponse.

Concernant l'intra-comparaison des capteurs (comparaison au sein d'une même famille de capteurs), les conclusions générales suivantes peuvent être faites :

- Aereco :
 - PM : Les réponses temporelles des capteurs Aerecos sont fortement corrélées et cela quel que soit le type de variation de concentration et quelle que soit la gamme de concentration mise en œuvre dans cette étude. Elles sont également fortement corrélées aux mesures de l'analyseur de référence. Ces réponses sont donc cohérentes. Les concentrations mesurées présentent une dispersion raisonnable, inférieures à 25% par rapport à la référence pour des concentrations inférieures à 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. On notera cependant la présence de pics ponctuels qui peuvent être associés à des erreurs de mesure. Il semble donc nécessaire de traiter les résultats afin de filtrer ces valeurs qui dégradent sensiblement les paramètres calculés (valeurs maximales, coefficients de corrélation).
 - COV totaux : Les réponses temporelles des capteurs Aerecos sont fortement corrélées et cohérentes avec les mesures de référence. La dispersion des concentrations est d'environ 100 ppb pour des concentrations inférieures à 1000 ppb et de plusieurs centaines de ppb pour des concentrations supérieures à 2000 ppb (campagne 2 prise comme référence, capteur 155 exclu). Du fait de la nature de la mesure (concentration en COV totaux exprimée en équivalent du composé utilisé pour la calibration), la précision des valeurs de concentration ne peut pas être étudiée. Deux capteurs ont mesuré des concentrations sensiblement

plus faibles que les autres capteurs : le 153 durant la campagne 1 et le 155 durant la campagne 2.

- NEMo :
 - PM : Les réponses temporelles des NEMOs sont cohérentes avec celles de la référence pour les transformations lentes de type échelon. Au contraire, le pas de temps de mesure important ne permet pas aux NEMOs de décrire de manière précise les transformations ponctuelles de type impulsion. L'intra-comparaison des NEMOs n'est donc pas possible dans ce cas de figure. L'analyse de ces évolutions temporelles reste qualitative puisqu'aucun coefficient de corrélation n'a pu être calculé. Concernant la précision de la mesure, la dispersion est importante. En effet lors des mesures en enceinte, des écarts avec la référence compris entre -66% et +185% ont pu être mesurés. Un capteur a eu des profils présentant des décalages de leur échelle de mesure (offset) à savoir le NEMo n°913 (NEMO extérieur). De plus, des variations brusques de concentration ne pouvant pas être attribuées à des concentrations réelles en enceinte ont été observées pour les NEMOs 913, 567 et 604.
 - COV légers : Les résultats de la campagne de mesure de COV légers sont plus hétérogènes que ceux associés aux autres paramètres. Les évolutions temporelles peuvent être décrites de manière satisfaisante durant certains essais (enceinte et campagne *in situ*). Sur certains autres essais, l'évolution des concentrations n'a pu être mesurée. A ce jour, aucune hypothèse permettant d'expliquer ces différences de comportement n'a pu être proposée. En termes de valeur de concentration, une dispersion significative, notamment durant la campagne *in situ*, a été observée.
 - Formaldéhyde : Les réponses temporelles des NEMOs sont cohérentes avec les transformations mises en œuvre. Les ordres de grandeur des concentrations sont corrects, la dispersion est cependant non négligeable. Elle est comprise entre 10 et 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour des concentrations cibles comprise entre environ 10 et 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Comme le confirme la campagne *in situ*, pour les PM, les capteurs peuvent être comparés au sein d'une même famille, i.e. NEMo et Aereco. Cette même campagne a cependant mis en évidence des coefficients de corrélation NEMo-Aereco moins satisfaisants, et cela malgré des niveaux de concentration proches. La comparaison des résultats de ces deux types de capteur est d'autant plus complexe que leurs pas de temps de mesure sont différents. Concernant les COV, l'inter-comparaison des deux types de capteurs n'est pas possible : les réponses temporelles et les valeurs mesurées ne sont pas cohérentes. Ceci s'explique sans doute en grande partie du fait des gammes de composés cibles qui sont différentes d'une famille à l'autre.

Pour finir, on pourra souligner des problèmes récurrents de communication et de batterie, donc d'acquisition, pour les NEMOs qui ont entraîné la perte de nombreuses données.

ANNEXES

Annexe 1 : Certificats d'étalonnage des compteurs de particules Grimm	38
Annexe 2 : Certificat d'analyse – cartouches de prélèvement XPOsure Aldehyde Sampler	44
Annexe 3 : Certificat d'analyse – Colonne chromatographique HPLC	45
Annexe 4 : Certificat d'étalonnage RAE3000	46
Annexe 5 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – Aereco	48
Annexe 6 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – Aereco – table de corrélation	49
Annexe 7 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – Aereco	50
Annexe 8 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – Aereco – table de corrélation	51
Annexe 9 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM _{2.5} – NEMO	53
Annexe 10 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM _{2.5} – NEMO	54
Annexe 11 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco	57
Annexe 12 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco – table de corrélation	59
Annexe 13 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco	62
Annexe 14 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco – table de corrélation	63
Annexe 15 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Nemo	65
Annexe 16 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Nemo	67
Annexe 17 : Campagne d'inter-comparaison 1 – formaldéhyde – Nemo	68
Annexe 18 : Campagne d'inter-comparaison 2 – formaldéhyde – Nemo	69

Annexe 1 : Certificats d'étalonnage des compteurs de particules Grimm

GRIMM  AEROSOL TECHNIK		SPECTROMETER DEPARTMENT	
Dorfstraße 9 D-83404 Ainring +49 (0)8654-578-0 info@grimm.durag.com		Vordere Aue 4 D-06774 Muldestausee +49 (0)3493-51407-73 service@grimm.durag.com	
Calibration Certificate			
Model	1.108	Serial Number	8F010051
		Firmware	8.60
		Revision	B
Channels	16 Size Channels		

Calibration Method

The reference unit is calibrated with NIST certified PSL particles and the calibration is verified every year. This is a worldwide accepted standard method referring to PTB Braunschweig and we therefore guarantee the traceability of our calibration. The absolute size calibration of the reference unit is transferred to the candidate unit with a calibration procedure using polydisperse dolomite particles.

Instruments used for Calibration

Calibration Tower	7851		
Reference Class 3	1.108	Serial Number	8F150005
Flow-Meter	Defender 520-M /01	Serial Number	119942
Oscilloscope	Rohde & Schwart RTB2004	Serial Number	GR.3540.01

Calibration Material

Reference Unit	NIST certified monidisperse PSL particles with different diameters
Candidate Unit	Micro Dolomit DR90 polydisperse powder (0,10µm - 180µm)

Tolerance Ranges

- Sample Flowe Rate	± 3% at 1.2 l/min
- Count Correlation	± 3% at 1µm
- Count Calibration	± 3% ≥ 500P/l
- Relative Mass Deviation	± 3% or ± 2 µg/m³

Mass values of spectrometers at calibration tower

Mean Value	Reference 8F150005	Test Unit	Deviation
Total Mass	1151,9 µg/m³	1146,6 µg/m³	-5,3 µg/m³ = -0,5%
Sample Volume: 0,0180 m³ / Sample Time: 15 min.			

Mass values of spectrometers at ambient air

Mean Value	Reference 8F150005	Test Unit	Deviation
Total Mass	2,3 µg/m³	2,4 µg/m³	0,1 µg/m³ = 4,3%
Sample Volume: 1,0944 m³ / Sample Time: 912 min.			

We hereby confirm that this instrument has been successfully calibrated and passed the mass test. All work has been done by qualified and trained staff of GRIMM Aerosol Technik.

This calibration is valid until 31 December 2021

Date: 17.11.2020

Grimm Aerosol Technik Pouch GmbH
 OT Friedland
 Vordere Aue 4
 06774 Muldestausee
 Signature: _____
 Tel.: 03493 51407-0 Fax: 03493-51407-bu

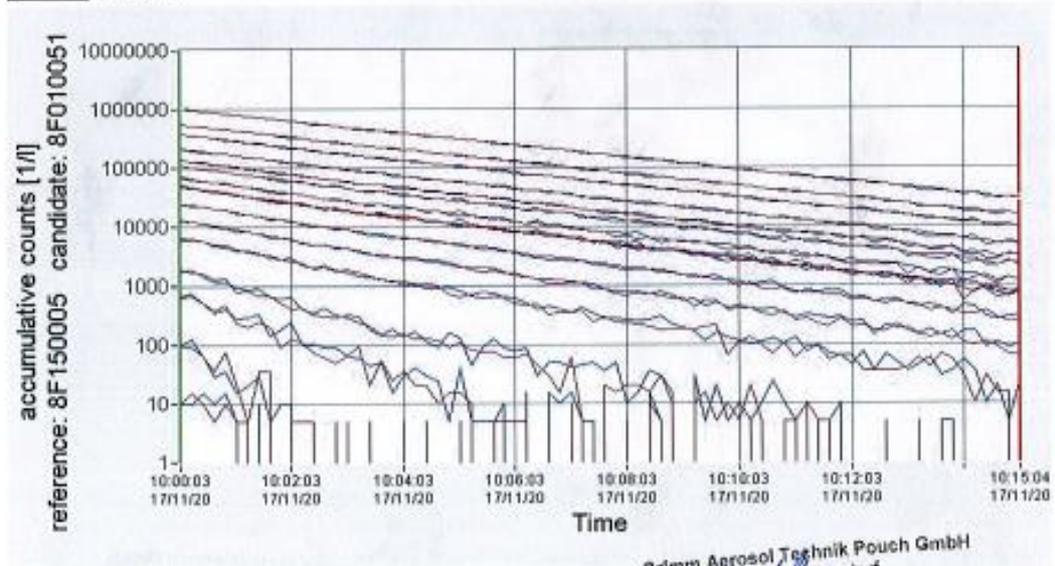
Calibration Certificate

Count values of spectrometers at calibration tower

Channels		0	1	2	3	4	5	6	7
Diameter [µm]		> 0,30	> 0,40	> 0,50	> 0,65	> 0,80	> 1,00	> 1,60	> 2,00
Concentration [p/l]	Reference	277250	147567	97765	53552	33865	26031	15791	10915
	Test unit	274741	146941	96657	53116	33491	25820	15659	10938
Deviation [%]		-0,9	-0,4	-1,1	-0,8	-1,1	-0,8	-0,8	0,2
Channels		8	9	A	B	C	D	E	F
Diameter [µm]		> 2,00	> 3,00	> 4,00	> 5,00	> 7,50	> 10,00	> 15,00	> 20,00
Concentration [p/l]	Reference	10722	5061	2436	1046	207	61	6	1
	Test unit	10584	5105	2424	1030	217	67	6	1
Deviation [%]		-1,3	0,9	-0,5	-1,5	4,8	9,8	0,0	0,0
Channels		G	H	I	J	K	L	M	N
Diameter [µm]		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Concentration [p/l]	Reference	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Test unit	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Deviation [%]		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Channels		O	P	Q	R	S	T	U	V
Diameter [µm]		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Concentration [p/l]	Reference	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Test unit	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Deviation [%]		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Sample Volume: 0,0180 m ³		Sample Time: 15 min.							

Count validation graph of spectrometers at calibration tower

— Reference
— Test Unit



Date: 17.11.2020

Grimm Aerosol Technik Pouch GmbH
OT Friedersdorf
Vordere Aue 4
06774 Muldestausee
Tel.: 03493 51407-0 Fax: 03493 51407-50

Serviceprotocol Grimm Aerosol Technik - Servicecenter Pouch - Germany

Customer	Intertek	Last Service	MH-ITS 01.01.20
RMA	2466001844	Responsible Technician	D. Winkler
	receive	inspection	Responsible Technician
Date of	02.11.20	05.11.20	J. Brückner
Model	Grimm 1.108 B	Serial Number	8F010051
			Final Inspection service@grimm.durag.com

Reason for service _____

Case _____

Filter normal dirty

Customer values			
Alarm N	0µg/m³	Alarm C	0p/L
Thr. Humidity	0%	C-factor	1,00
Intervall	0	Location	1
Values before Service		pre-comparison	
Date of Inspection	05.11.20	Yes	No
Run-Time	4801,6h	Ramp	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Software Version	8.60E/07.07.10/F/07.07.10	Mass	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC/v	3,8mV	Calibration	
DC_d	209,0mV	Calibration	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC_h	439,7mV	Ramp	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC_diff	230,7mV	Mass Tower	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
CO_h	0	Counts amb.	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
CO_d	0	Mass amb. air	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
La_l	-	(only Enviro)	
La_h	-	Check data	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Laserpower (mW)	20,4/0,66	archiving	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Flow	1,162L/min	device function check-up	
Imot	34,0%	No (included in calibration)	
Date/Time	-3min		
		Values after Service	
		Date of EK	17.11.2020
		Run-Time	4829,6 h
		Software Version	8.60 E /7.7.2010 /F/07.07.10
		DC/v	136,0mV
		DC_d	206,6mV
		DC_h	427,6mV
		DC_diff	221,0mV
		CO_h	0
		CO_d	0
		La_l	-
		La_h	-
		Laserpower (mW)	18,2/0,62
		Flow	1,194L/min
		Imot	29,4%
		Date/Time	ok

Service activities		Note Thresholds
Inspection & Final Check	Mirrorscrew inspection	<input checked="" type="checkbox"/>
Analog Inputs	correct <input checked="" type="checkbox"/> wrong <input type="checkbox"/>	Verschlauchung Spülluft wechseln <input checked="" type="checkbox"/>
Batterypower	Mirrorscrew Fin.Check	Isofolie wechseln <input checked="" type="checkbox"/>
Keyboard	correct <input checked="" type="checkbox"/>	
Memorycard	Check all screws	
Rinsing Air Contr.	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
Pneumatic tightn.		
0-Filter Check	Customer Paper(s)	
electr. Flow. 100	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
Cleaning	Customer Email(s)	
DC-balancing	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
	8021029 Arbeitsstunde	

8021030	Kleinteile	1	<input checked="" type="checkbox"/>
1201843	PTFE-Filter	1	<input checked="" type="checkbox"/>
1204089	Isofolie	1	<input checked="" type="checkbox"/>
8021033	Kal IAQ		<input checked="" type="checkbox"/>
			<input type="checkbox"/>
			<input type="checkbox"/>
Th(0...F): 99 175 96 218 179 230 43 56 195 162 63 103 120 207 55 98			

threshold new



Calibration Certificate

Model	1.108	Serial Number	8F020014	Firmware	8.60
				Revision	C
Channels	16 Size Channels				

Calibration Method

The reference unit is calibrated with NIST certified PSL particles and the calibration is verified every year. This is a worldwide accepted standard method referring to PTB Braunschweig and we therefore guarantee the traceability of our calibration. The absolute size calibration of the reference unit is transferred to the candidate unit with a calibration procedure using polydisperse dolomite particles.

Instruments used for Calibration

Calibration Tower	7851		
Reference Class 3	1.108	Serial Number	8F150005
Flow-Meter	DryCal DCL-MH /01	Serial Number	109903
Oscilloscope	Rohde & Schwarz RTB2004	Serial Number	GR.3540.01

Calibration Material

Reference Unit	NIST certified monodisperse PSL particles with different diameters
Candidate Unit	Micro Dolomit DR90 polydisperse powder (0,10µm - 180µm)

Tolerance Ranges

- Sample Flow Rate $\pm 3\%$ at 1.2 l/min
- Count Correlation $\pm 3\%$ at 1µm
- Count Calibration $\pm 3\% \geq 500\text{Pfl}$
- Relative Mass Deviation $\pm 3\%$ or $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Mass values of spectrometers at calibration tower

Mean Value	Reference 8F150005	Test Unit	Deviation
Total Mass	926,8 µg/m ³	915,8 µg/m ³	-11,0 µg/m ³ = -1,2%
Sample Volume: 0,0180 m ³ / Sample Time: 15 min.			

Mass values of spectrometers at ambient air

Mean Value	Reference 8F150005	Test Unit	Deviation
Total Mass	7,0 µg/m ³	6,4 µg/m ³	-0,6 µg/m ³ = -8,6%
Sample Volume: 0,0730 m ³ / Sample Time: 61 min.			

We hereby confirm that this instrument has been successfully calibrated and passed the mass test. All work has been done by qualified and trained staff of GRIMM Aerosol Technik.

This calibration is valid until 31 December 2021

Date: 16.11.2020

GRIMM Aerosol Technik Pouch GmbH
D-06774 Muldenhausen
Vordere Aue 4
Tel.: 03493 51407-0 Fax: 03493 51407-50

Calibration Certificate

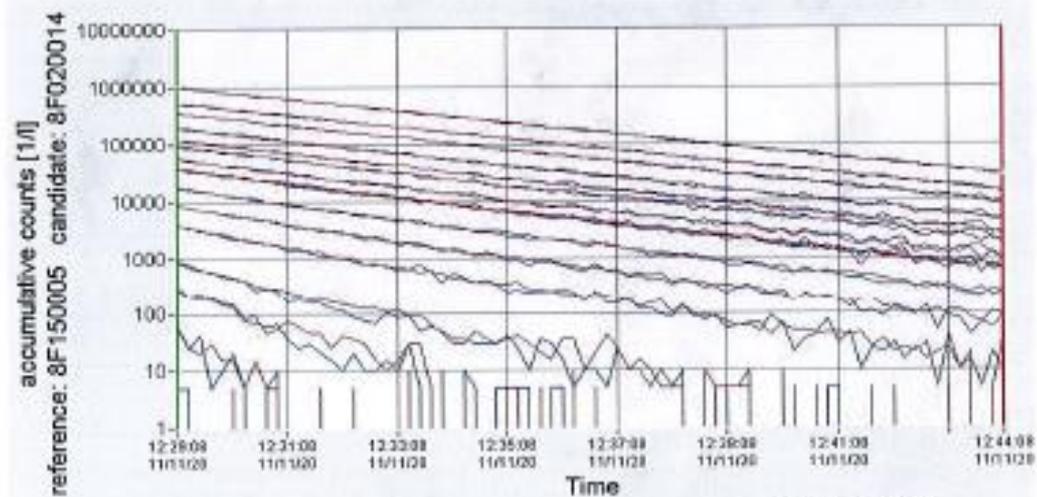
Count values of spectrometers at calibration tower

Channels		0	1	2	3	4	5	6	7
Diameter (µm)		> 0,30	> 0,40	> 0,50	> 0,65	> 0,80	> 1,00	> 1,60	> 2,50
Concentration (µl)	Reference	274612	146317	95379	50943	31235	23486	13471	8904
	Test unit	276288	145262	95610	50641	30854	21302	13501	8771
Deviation (%)		1,3	-0,7	0,2	-0,6	-0,9	-0,6	0,2	-2,0
Channels		8	9	A	B	C	D	E	F
Diameter (µm)		> 2,50	> 3,00	> 4,50	> 5,50	> 7,50	> 10,50	> 15,00	> 20,00
Concentration (µl)	Reference	8823	3783	1634	627	303	26	3	0
	Test unit	8735	3694	1612	609	95	24	2	0
Deviation (%)		-1,0	-2,4	-1,3	-2,9	-7,8	-7,7	-33,3	#DIV/0!
Channels		G	H	I	J	K	L	M	N
Diameter (µm)		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Concentration (µl)	Reference	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Test unit	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Deviation (%)		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Channels		O	P	Q	R	S	T	U	V
Diameter (µm)		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Concentration (µl)	Reference	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Test unit	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Deviation (%)		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Sample Volume: 0.0180 m³ / Sample Time: 15 min

Count validation graph of spectrometers at calibration tower

Reference
Test Unit



Date: 16.11.2020

Grimm Aerosol Technik Pouch GmbH
OT Friedrichsdorf
Vordere Aue 4
66774 Muldestauser
Tel: 03493 51487-0 Fax: 03493 51487-50

Serviceprotocol Grimm Aerosol Technik - Servicecenter Pouch - Germany

Customer	Intertek	Last Service	MH-ITS 28.01.19
RMA	2466001843	Responsible Technician	T. Hoff
	receive	inspection	Inspection
Date of	02.11.20	05.11.20	Technician
Model	Grimm 1.108 -	Serial Number	8F020014
			Final Inspection service@grimm.durag.com

Reason for service _____

Case _____

Filter very dirty

Customer values			
Alarm N	0µg/m³	Alarm C	0p/L
Thr. Humidity	55%	C-factor	1,00
Intervall	0	Location	1
Values before Service		pre-Comparison	
Date of Inspection	05.11.20	Yes	No
Run-Time	2645,8h	Ramp	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Software Version	8.60 E 18.7.2005 15.07.05	Mass	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC/v	119,1mV	Calibration	
DC_d	197,2mV	Calibration	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC_h	399,8mV	Ramp	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DC_diff	202,6mV	Mass Tower	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
CO_h	0	Counts amb.	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
CO_d	0	Mass amb. air (only Enviro)	
La_l	-	Mass amb. air	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
La_h	-	Check data	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Laserpower (mW)	17,7/0,528	archiving	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Flow	-	device function check-up	
Imot	130,0%	No (included in calibration)	
Date/Time	ok		

Service activities		Note Thresholds	<input checked="" type="checkbox"/>
Inspection & Final Check			
Analog Inputs	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>	Mirrorscrew inspection correct <input checked="" type="checkbox"/> wrong <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Batterypower	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>	Mirrorscrew Fin.Check correct <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Keyboard	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>	Check all screws Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Memorycard	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>	Customer Paper(s) Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rinsing Air Contr.	<input checked="" type="checkbox"/>	Customer Email(s) Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pneumatic tightn.	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>	8021029 Arbeitsstunde	0,50h <input type="checkbox"/>
O-Filter Check	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>		
electr. Flow: 100	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>		
Cleaning	<input checked="" type="checkbox"/> / <input checked="" type="checkbox"/>		
DC-balancing	<input type="checkbox"/>		

8021030	Kleinteile	1	<input checked="" type="checkbox"/>
1201843	PTFE-Filter	1	<input checked="" type="checkbox"/>
1206266	Verpackung 1100	1	<input checked="" type="checkbox"/>
8021033	Kal IQ	1	<input checked="" type="checkbox"/>
1206203	rinsing air controler complete	1	<input checked="" type="checkbox"/>
Th(0...F): 92 168 90 205 172 224 43 58 202 175 68 112 132/220 65-116			

threshold new



Annexe 3 : Certificat d'analyse – Colonne chromatographique HPLC

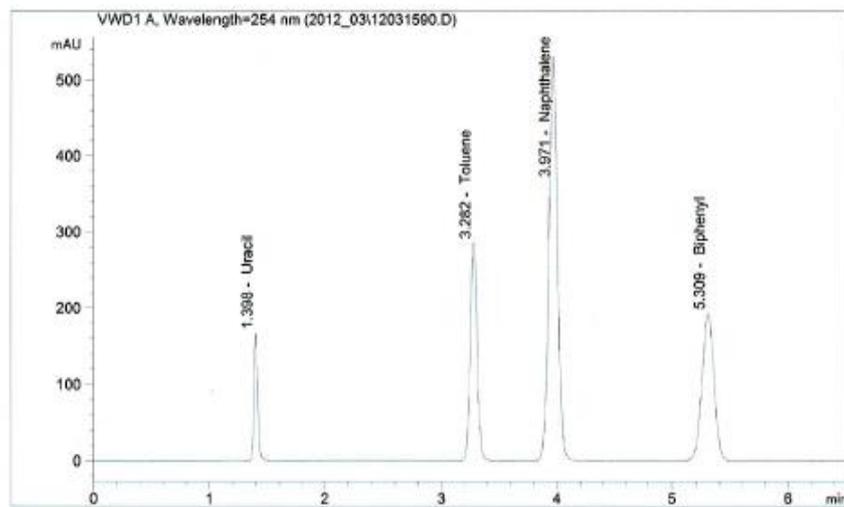
LC Certificate
of Analysis

RESTEK

Column Performance Report

Packing Material: Pinnacle II C18
Catalog Number : 9214564
Serial Number : 12031590T
Batch Number : 120217P

Column Length : 150 mm
Inside Diameter: 4.0 mm
Particle Size : 5.0 μ m



Mobile Phase : Water 20% Methanol 80%
Flow Rate : 0.80 ml/min
Sample : Cat# 558389
Pressure : 82 Bar

Wavelength : 254 nm
Sample Amount : 5.0 μ l
Temperature : Ambient

Storage Solvent : Mobile Phase

Performance results for peak #4:

Retention time : 5.31 min
 k' : 2.80
Width at 1/2 height: 0.11 min
Symmetry at 10% : 0.95
Plates/column : 13221
Plates/meter : 88140

Analyst: LAH Tested: 3/29/2012 1260-1



Restek certifies that this product complies with all quality specifications. It was produced in accordance with the most current edition of the Restek Corporation Quality System Manual. Restek Corporation's quality system is registered to ISO 9001:2008 (BSI certificate # FM 80397).

110 Benner Circle • Bellefonte, PA 16823 • 814-353-1300 • 800-356-1688 • fax: 814-353-1309 • www.restek.com

Annexe 4 : Certificat d'étalonnage RAE3000



CERTIFICAT DE CALIBRATION RAE3000

Analyseur	RAE3000
CAE No:	206237
N° de série	206237

Méthode	Travail sur gaz etalon certifié	X
---------	---------------------------------	---

CALIBRATION DE L' ANALYSEUR

Gaz de calibration	Concen. ppm	Lecture ppm
I-C4H8	100	101,2
AIR	0	0,000

VERIFICATIONS ET PARAMETRES

Lampe	10,3
Charge batterie	OK
Débit (L/mn)	0,53

Cet appareil a été calibré par nos soins le :

04/04/2022

Calibration réalisée par :

TB



RAE 3000 #206237
ITEM : 518

**FICHE DE SUIVI DU MATERIEL
DEPART ET RETOUR CLIENTELE**

ACCESSOIRES COMPLEMENTAIRES

	Quantité	DEPART	RETOUR
Sonde flexible	1	1	
support+chargeur	1	1	
Filtre de rechange	1	1	
cable RS 232+adaptateur USB	1	1	
clé USB	1	1	

Manuel	1	1	
--------	---	---	--

BA

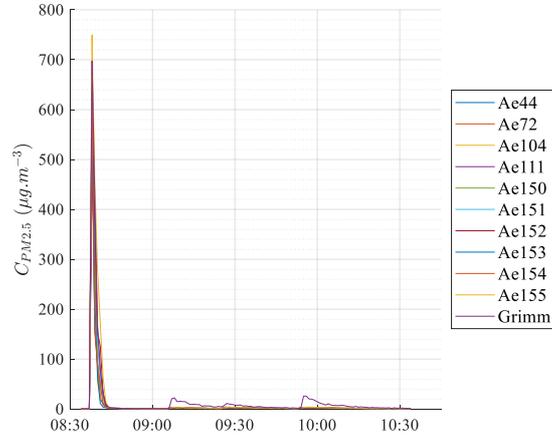
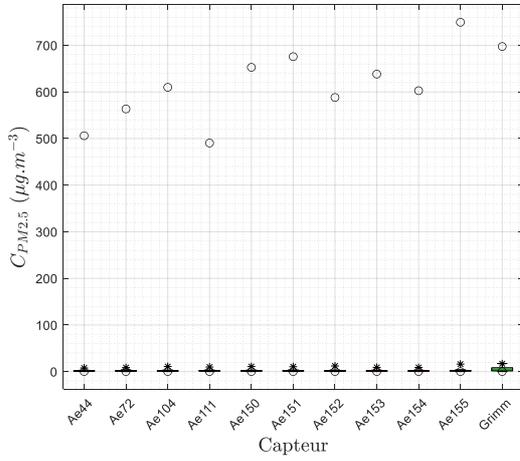
Nombre de carton		1	
------------------	--	---	--

11/05/22

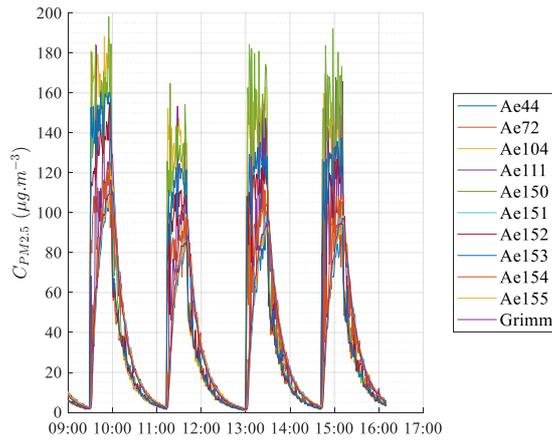
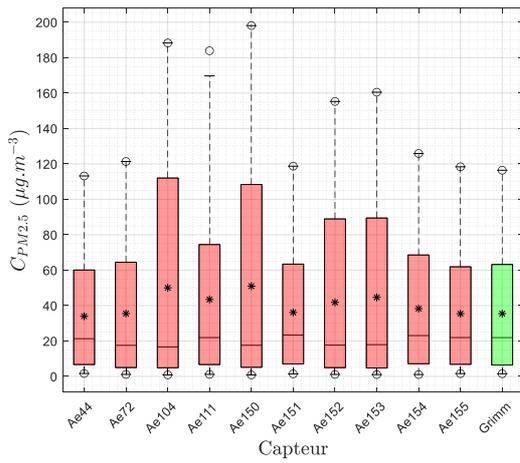
**Dès réception du matériel
 merci de procéder à une vérification.
 En cas de réclamation,
 veuillez nous avvertir dans les 24 heures
 en appelant le 0800 95 82 10.**

Annexe 5 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM_{2.5} – Aereco

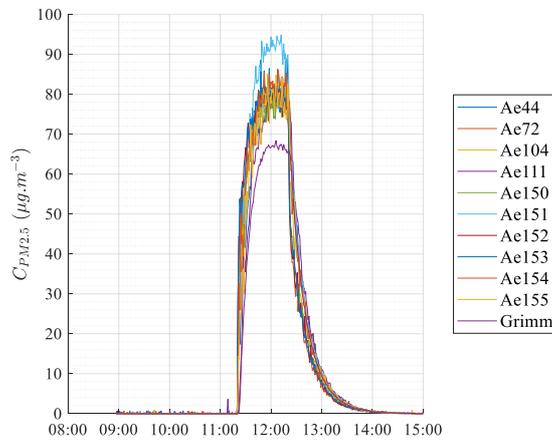
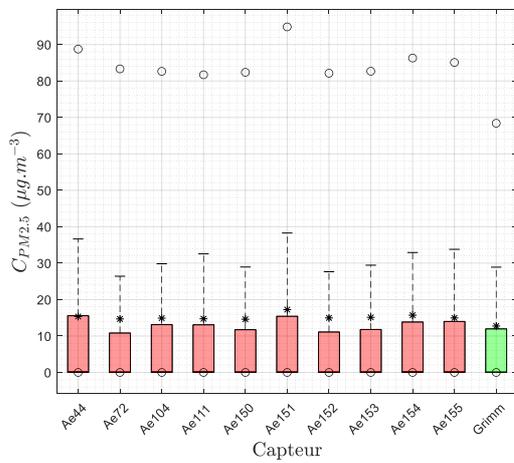
27/10/2021



03/11/2021

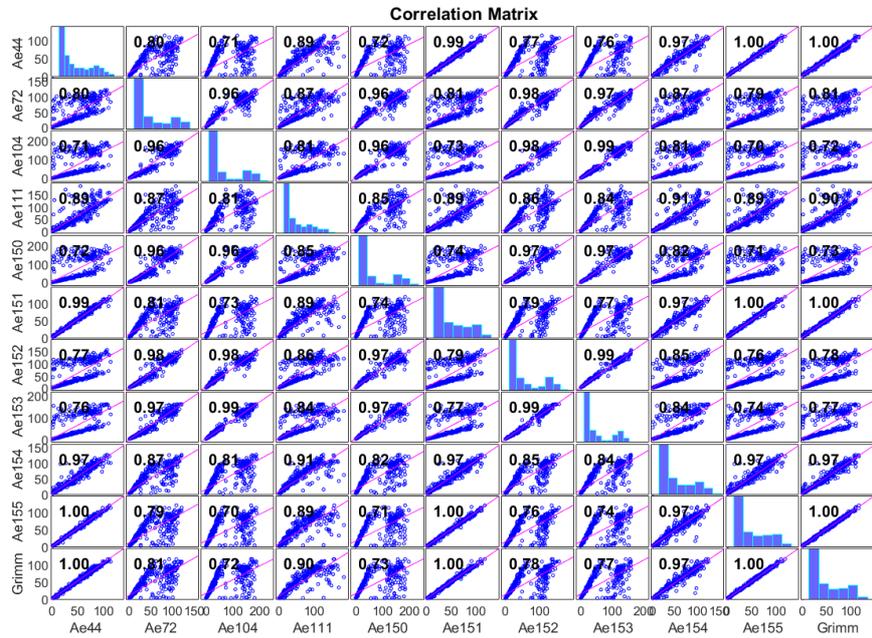


04/11/2021

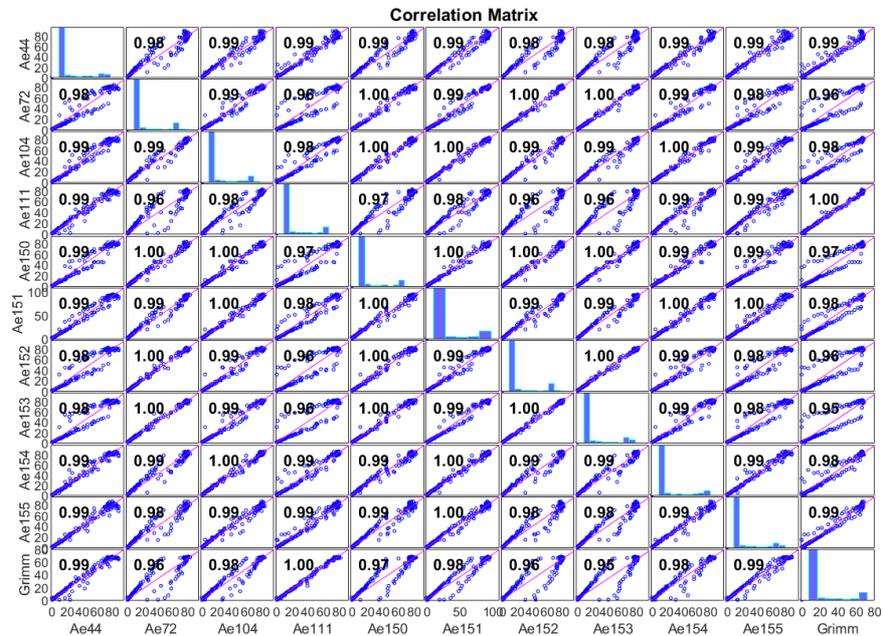


Annexe 6 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM_{2.5} – Aereco – table de corrélation

03/11/2021

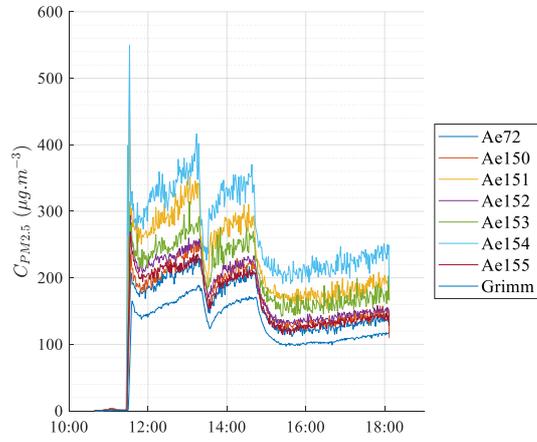
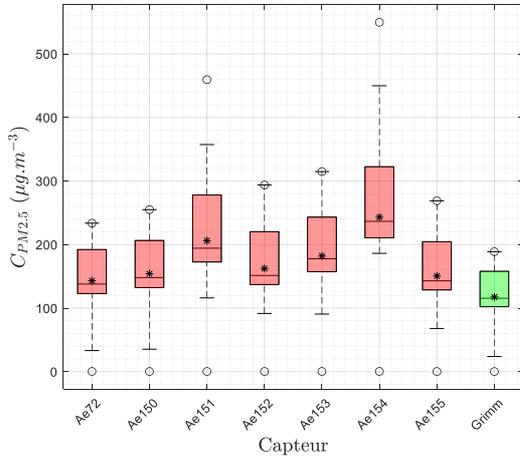


04/11/2021

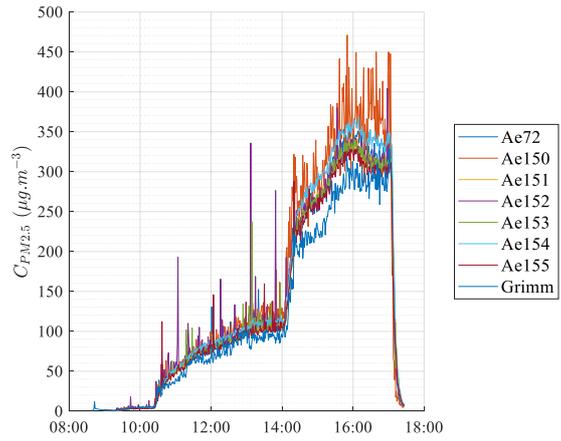
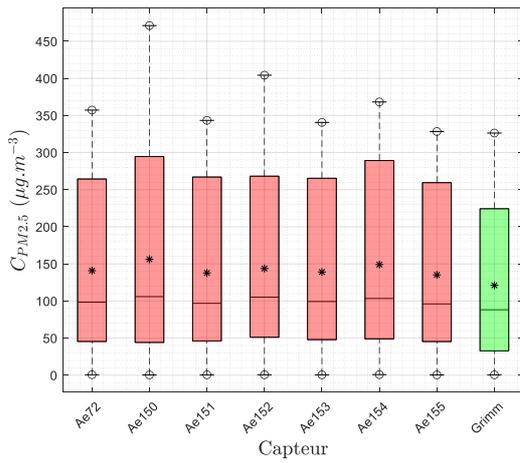


Annexe 7 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM_{2.5} – Aereco

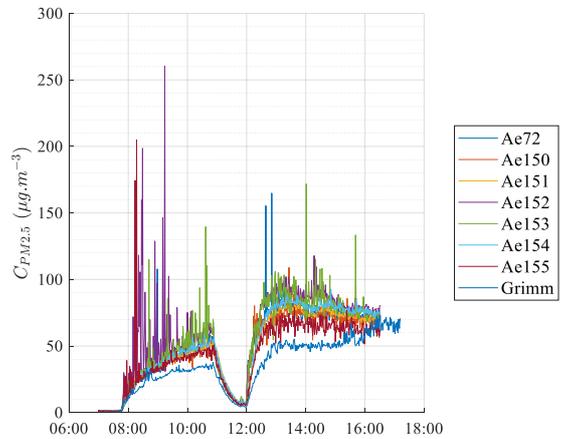
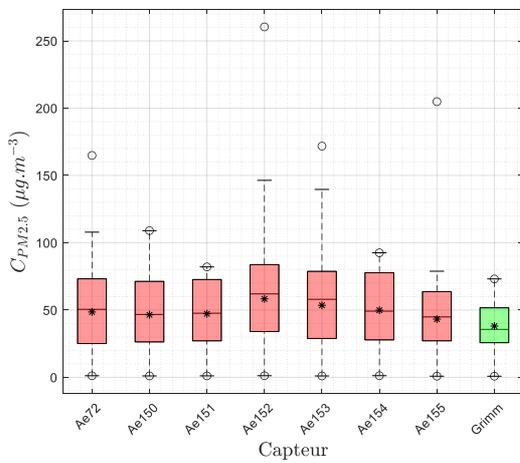
06/05/2022



09/05/2022

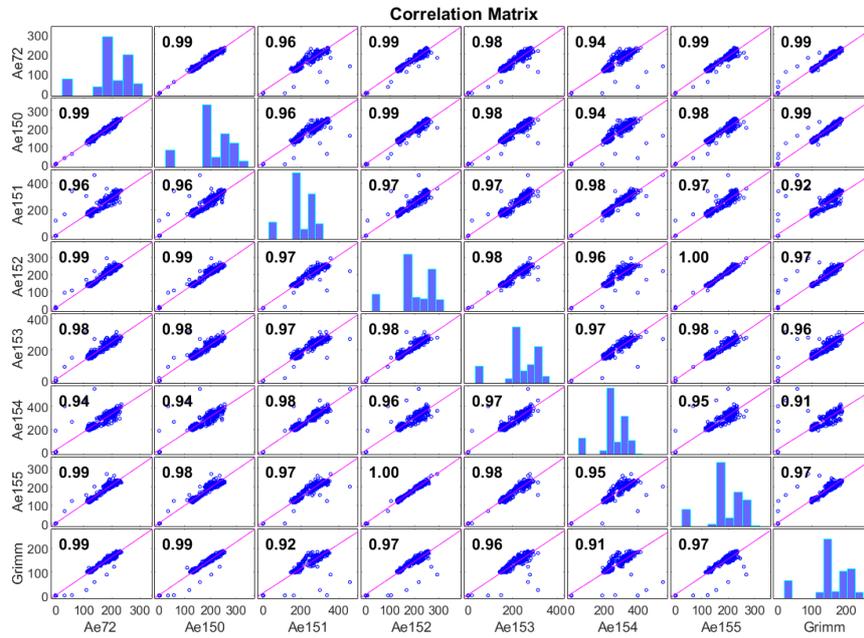


10/05/2022

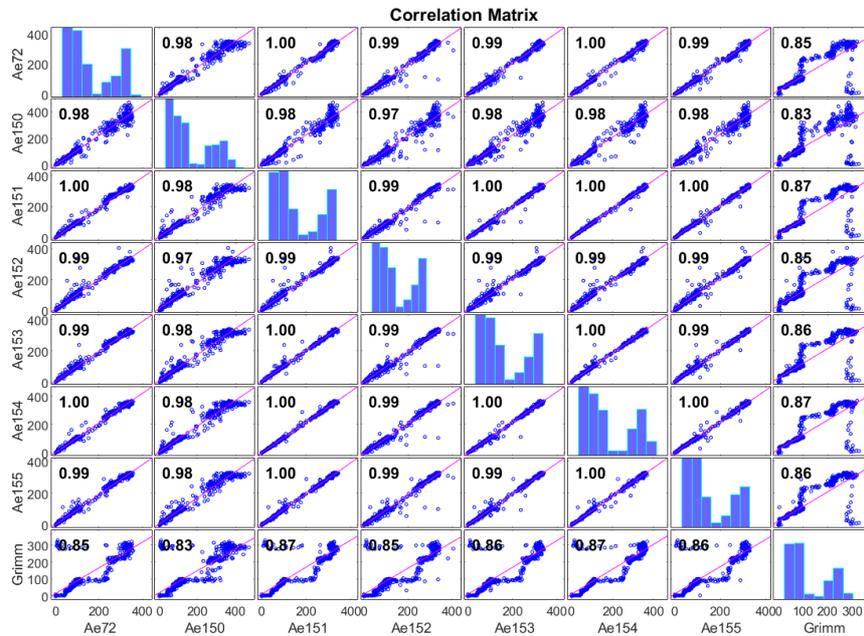


Annexe 8 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM_{2.5} – Aereco – table de corrélation

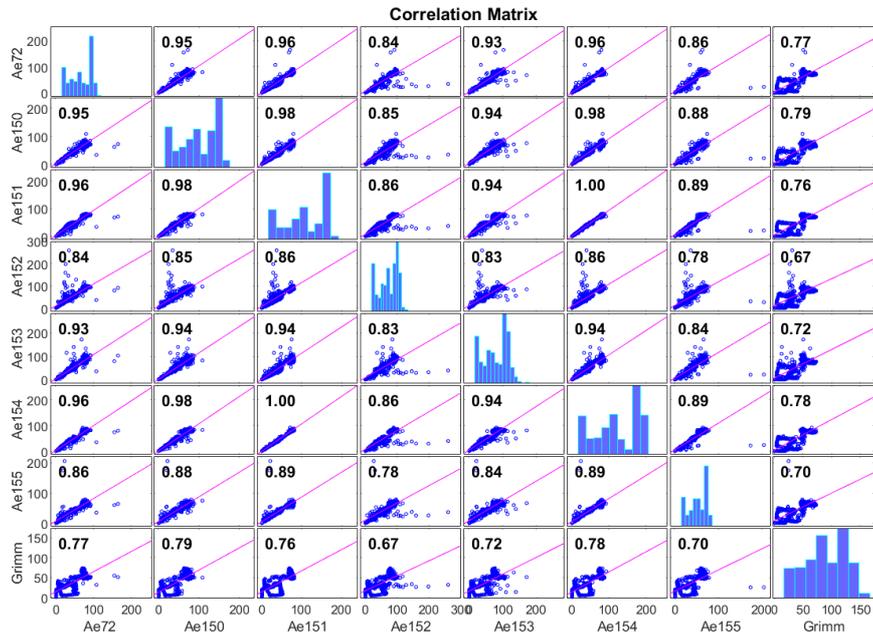
06/05/2022



09/05/2022

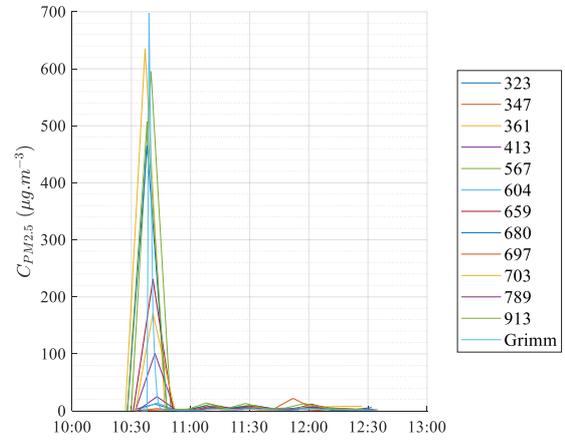
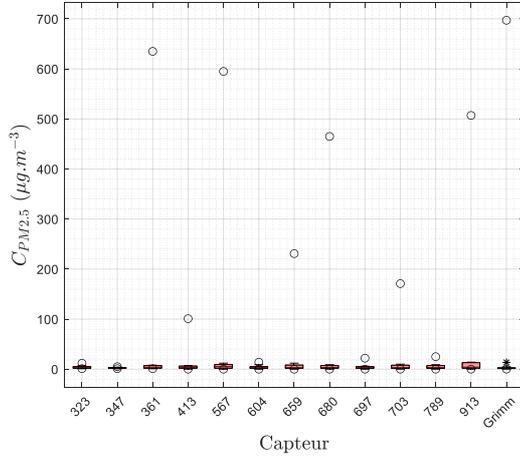


10/05/2022

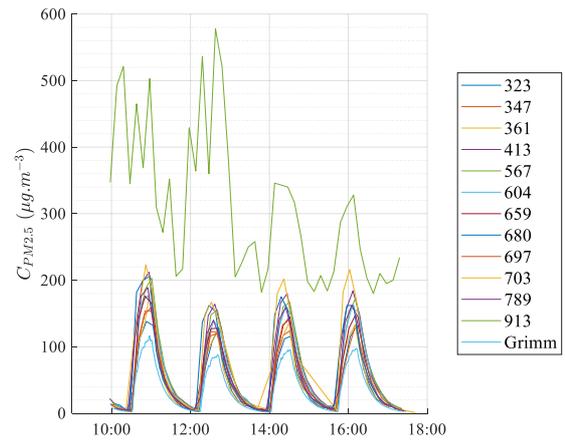
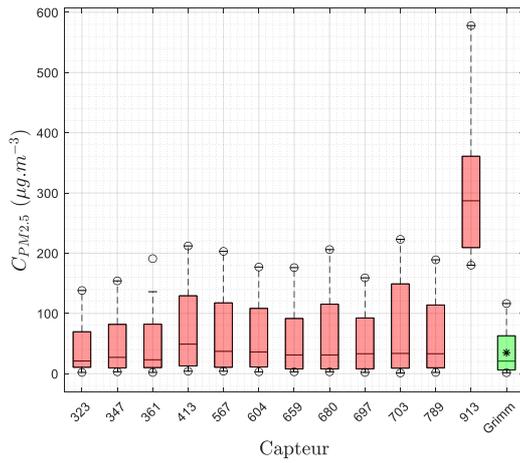


Annexe 9 : Campagne d'inter-comparaison 1 – PM_{2.5} – NEMO

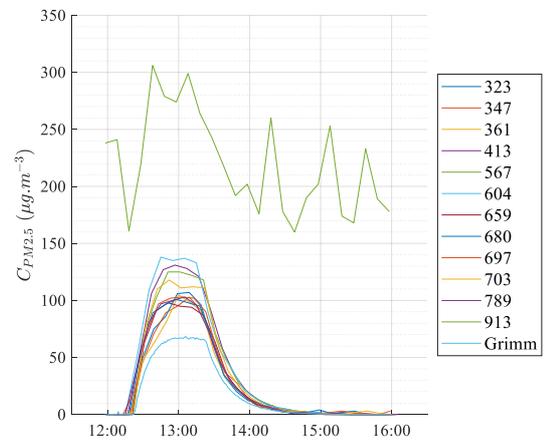
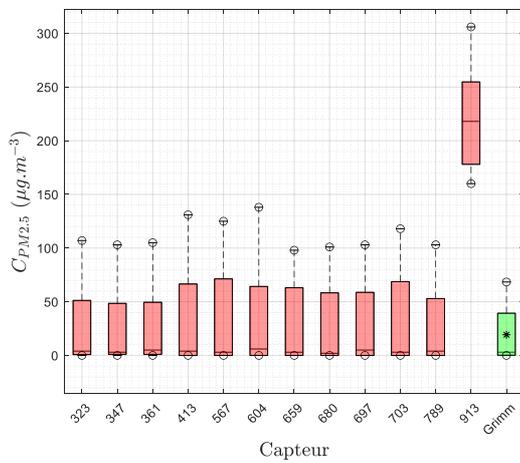
Essai du 27/10



03/11/2021

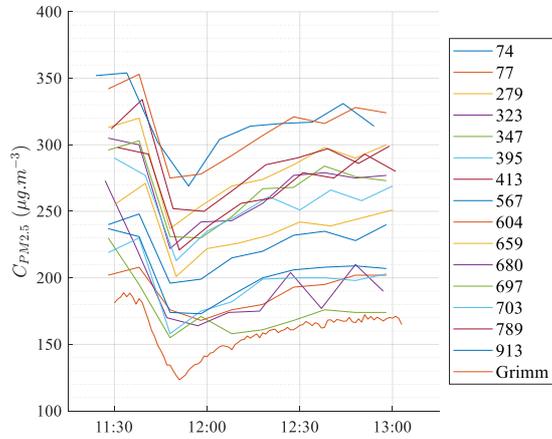
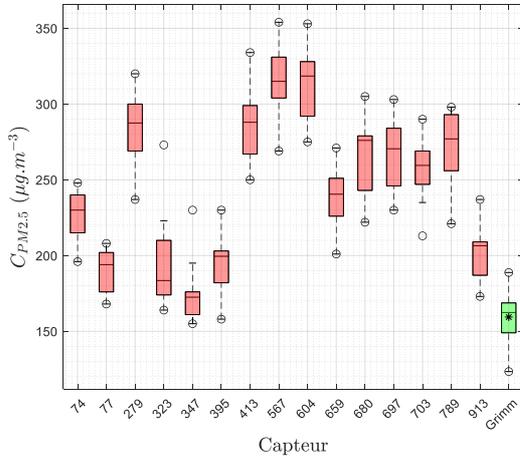


04/11/2021

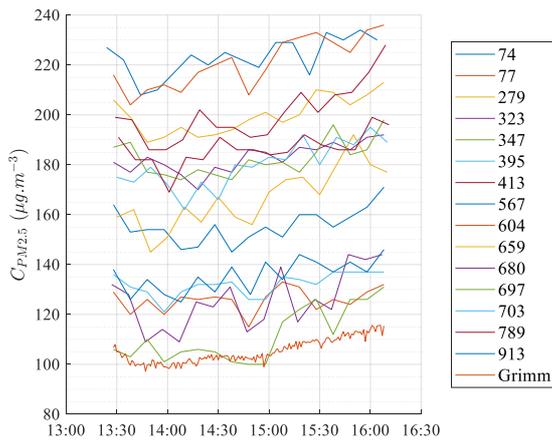
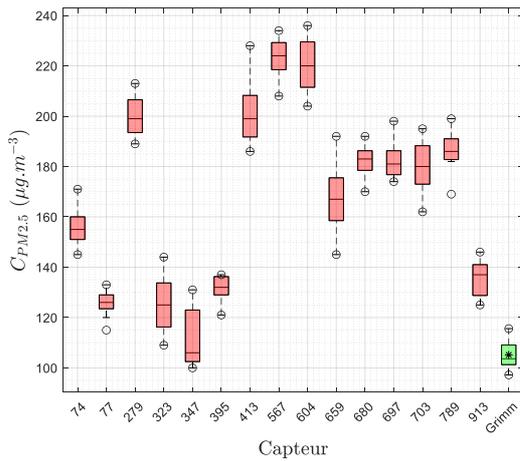


Annexe 10 : Campagne d'inter-comparaison 2 – PM_{2.5} – NEMO

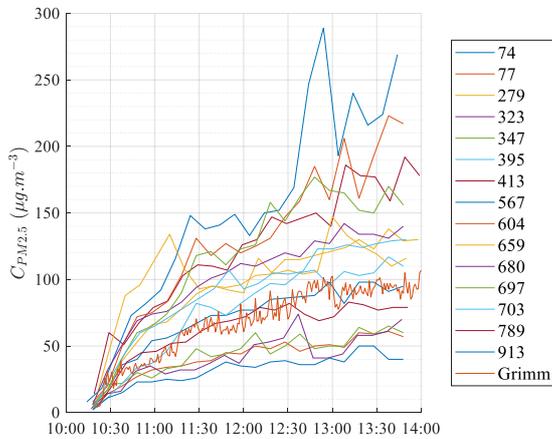
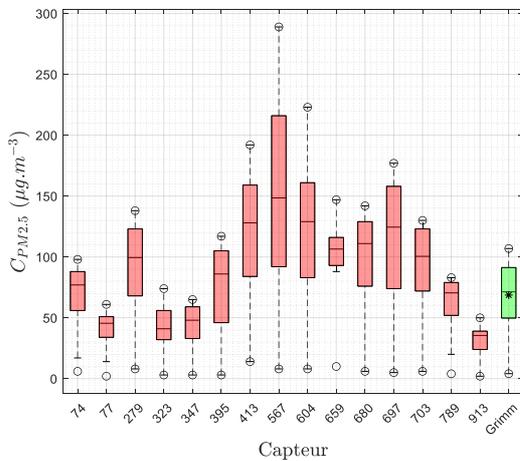
06/05/2022 - 1



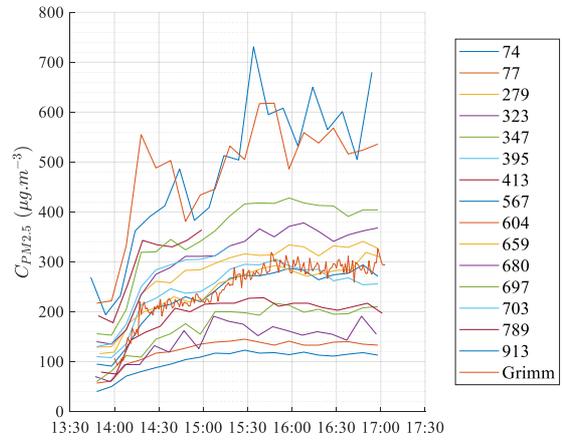
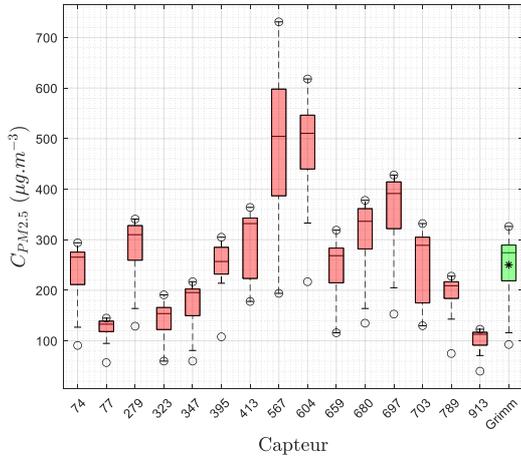
06/05/2022 - 2



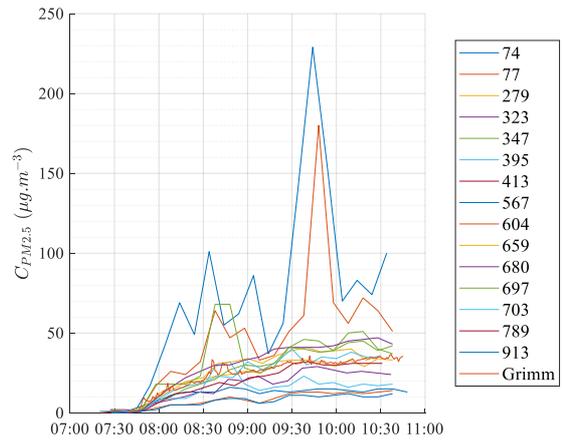
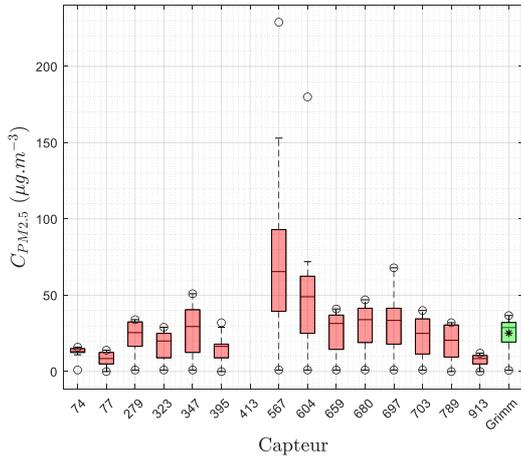
09/05/2022 - 1



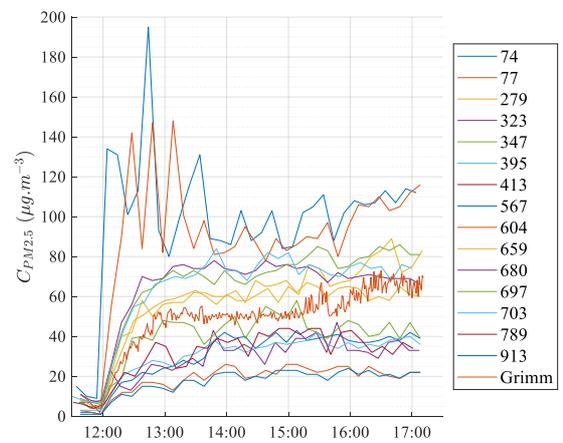
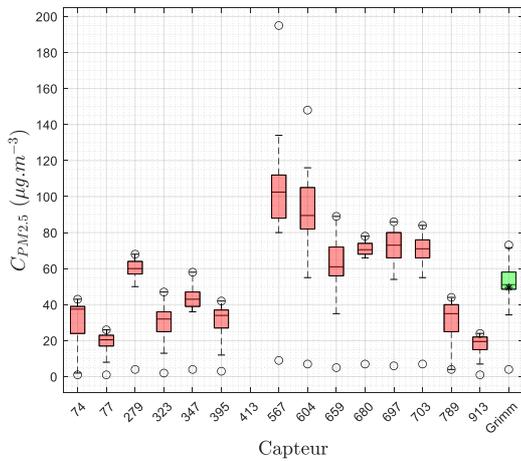
09/05/2022 - 2



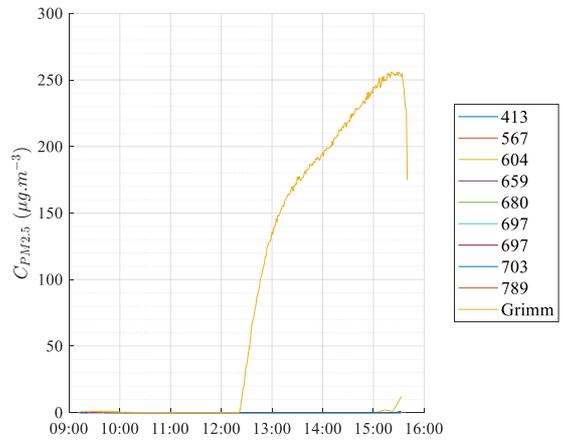
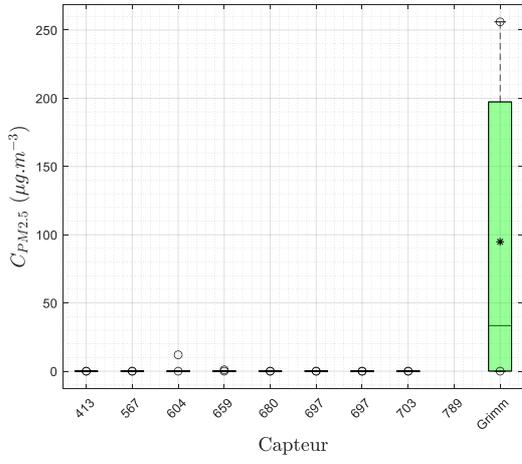
10/05/2022 - 1



10/05/2022 - 2

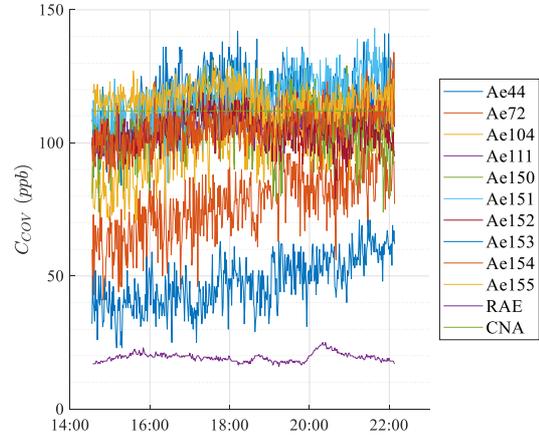
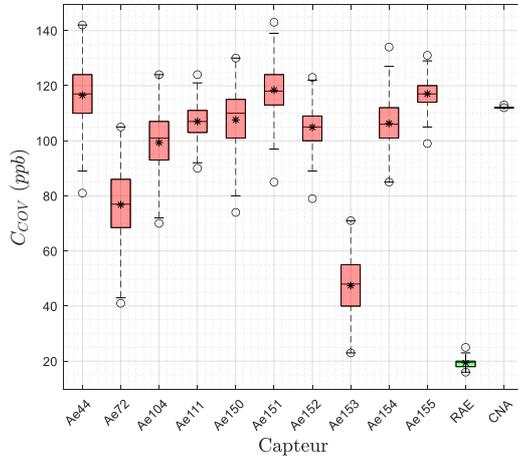


02/06/2022

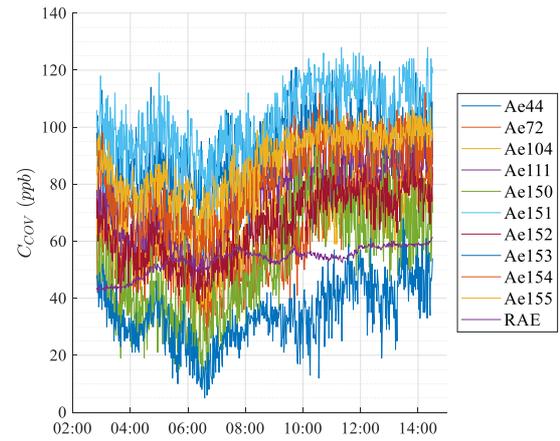
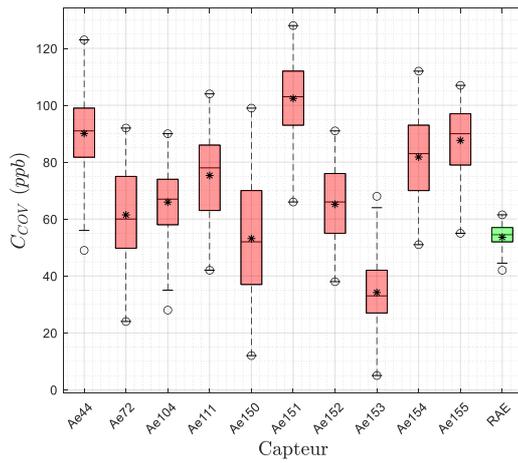


Annexe 11 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco

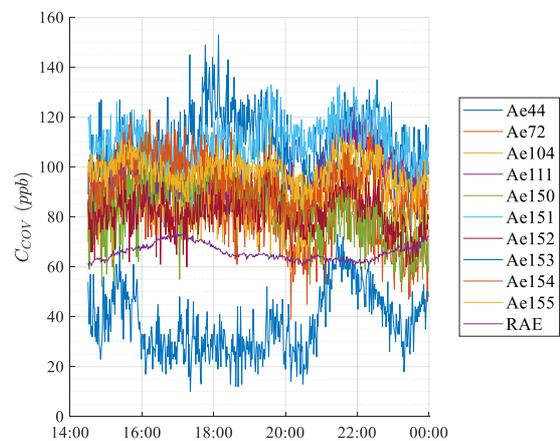
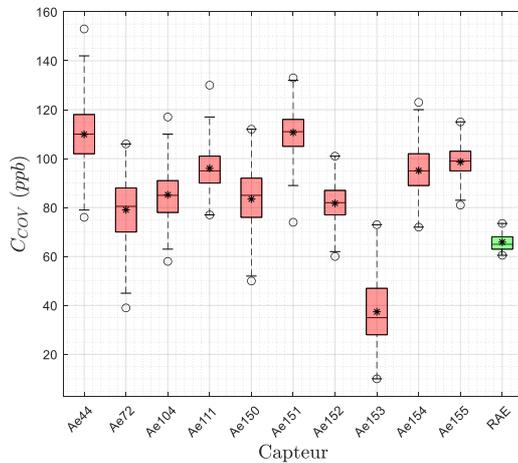
22/10/2021



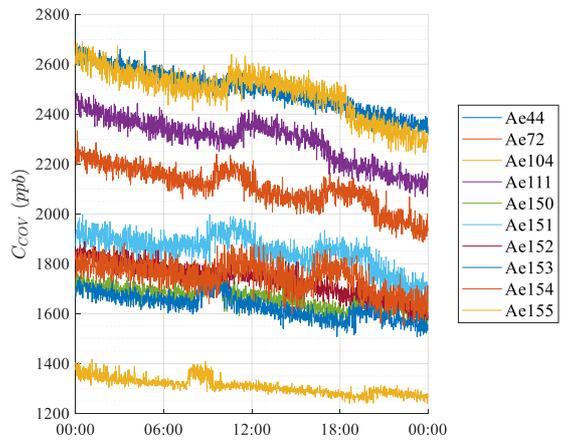
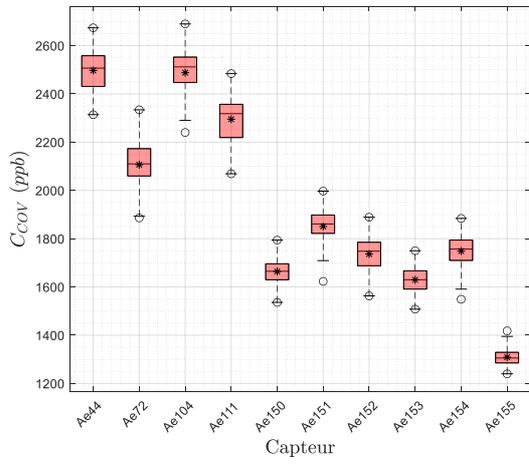
24/10/2021



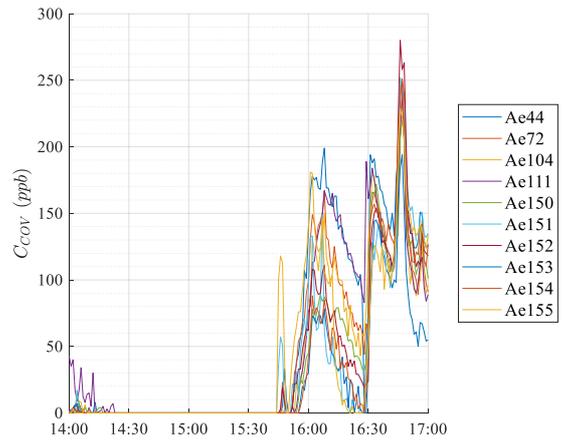
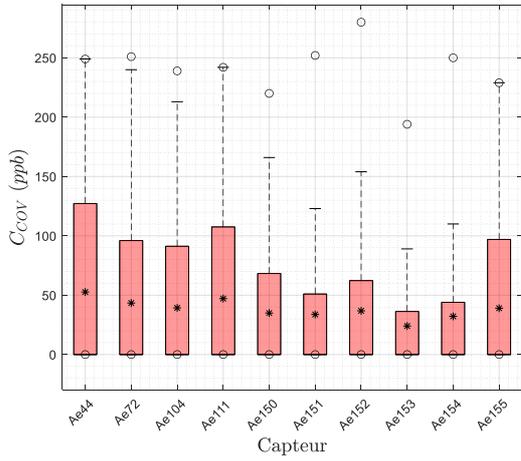
24/10/2021



25/10/2021

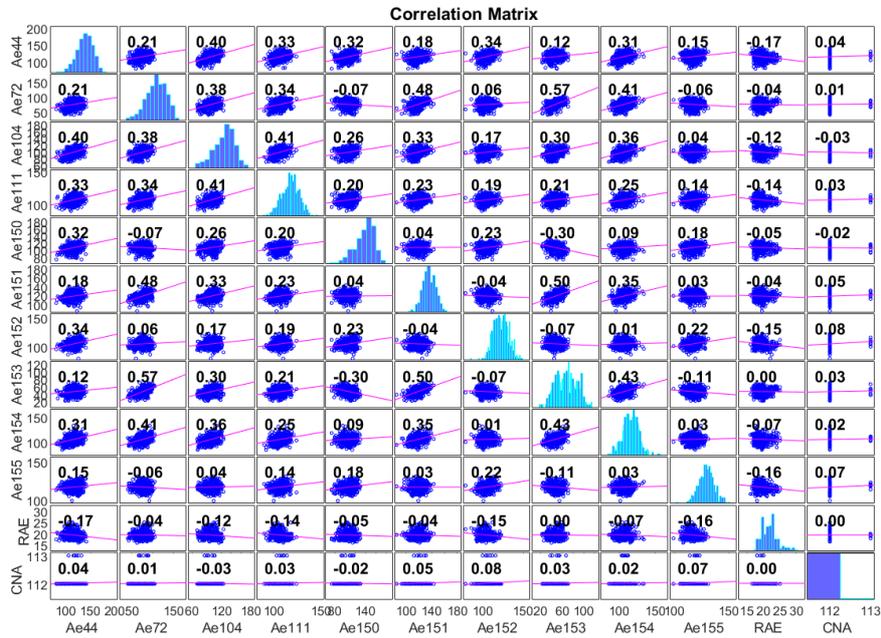


22/10/2021

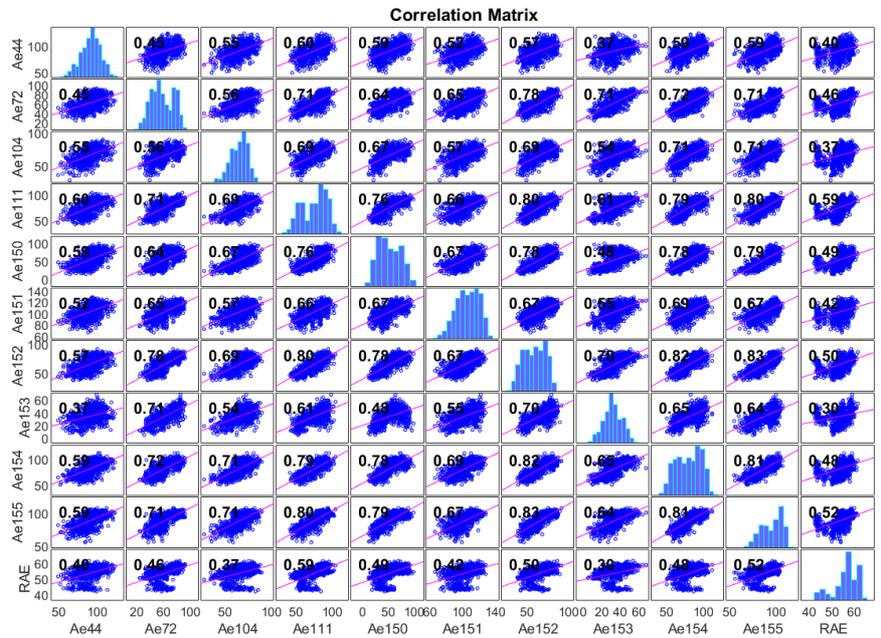


Annexe 12 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Aereco – table de corrélation

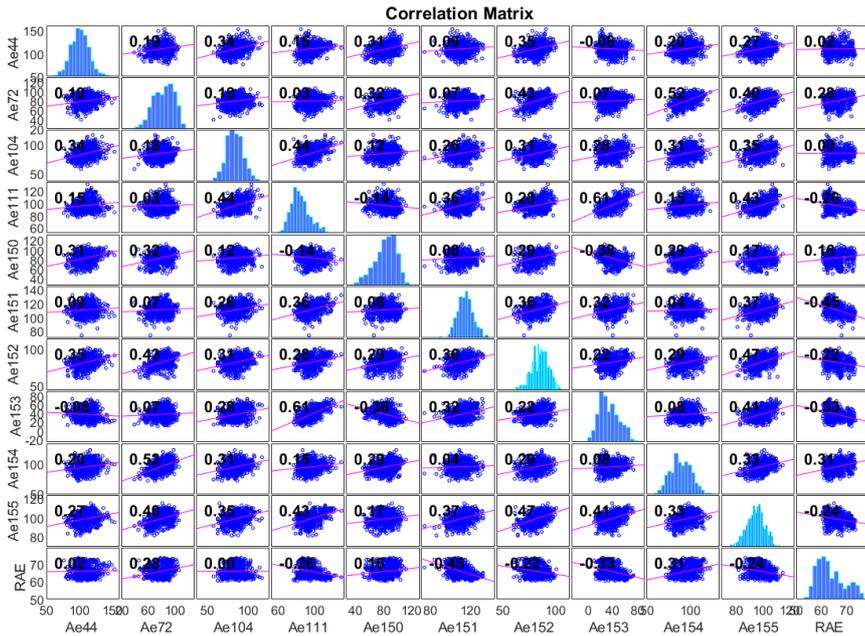
23/10/2021



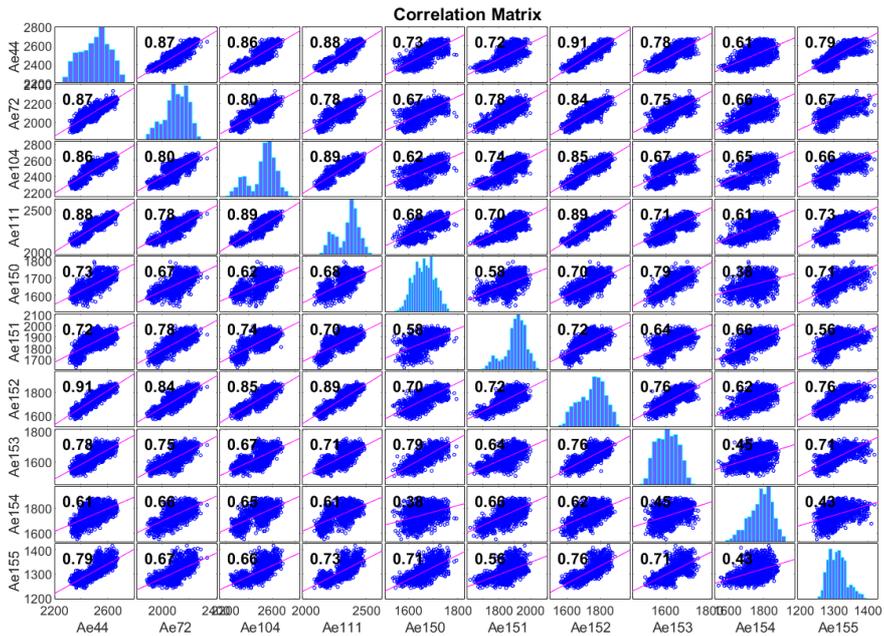
24/10/2021



24/10/2021



25/10/2021

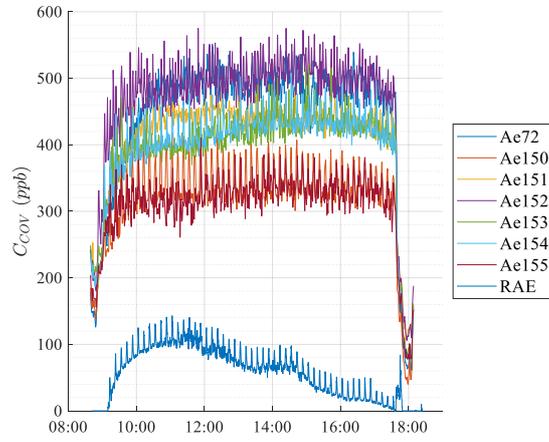
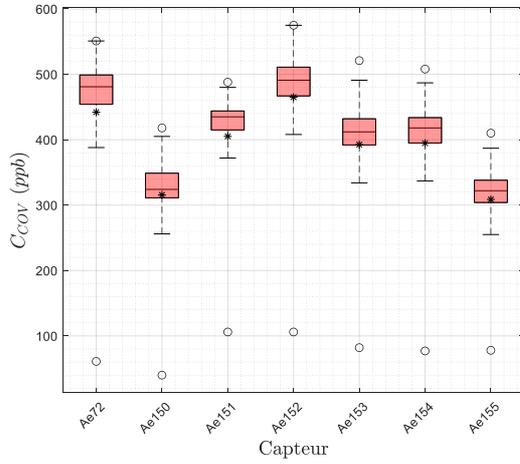


22/10/2021

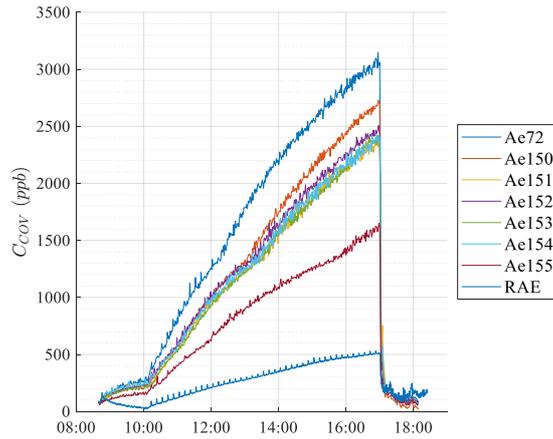
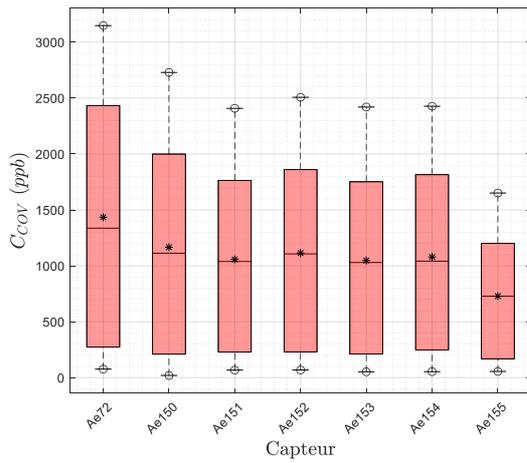


Annexe 13 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco

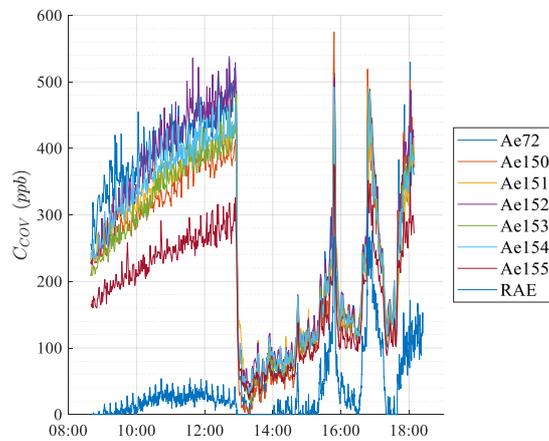
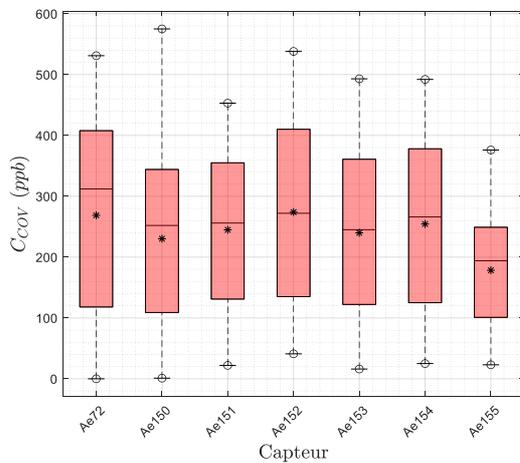
23/05/2022



24/05/2022

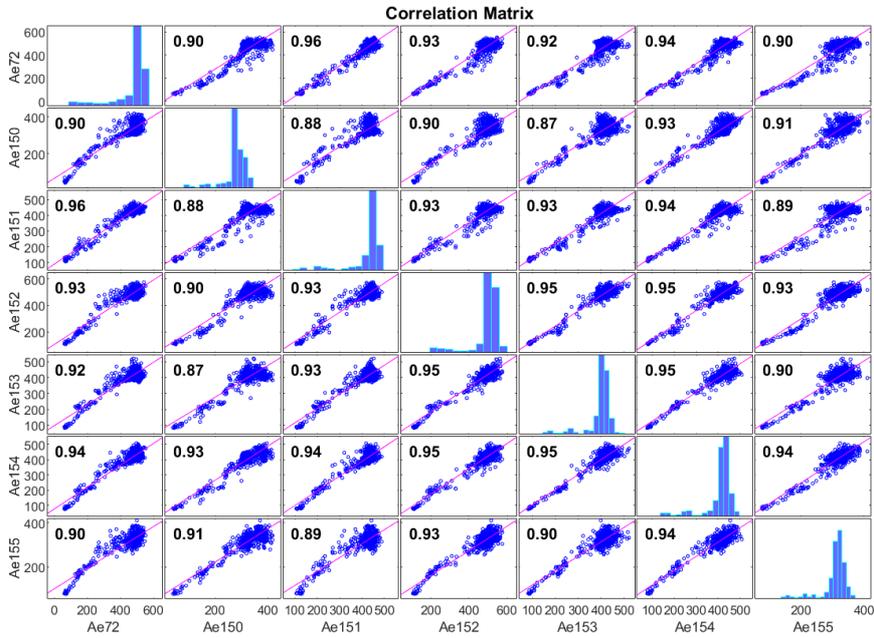


25/05/2022

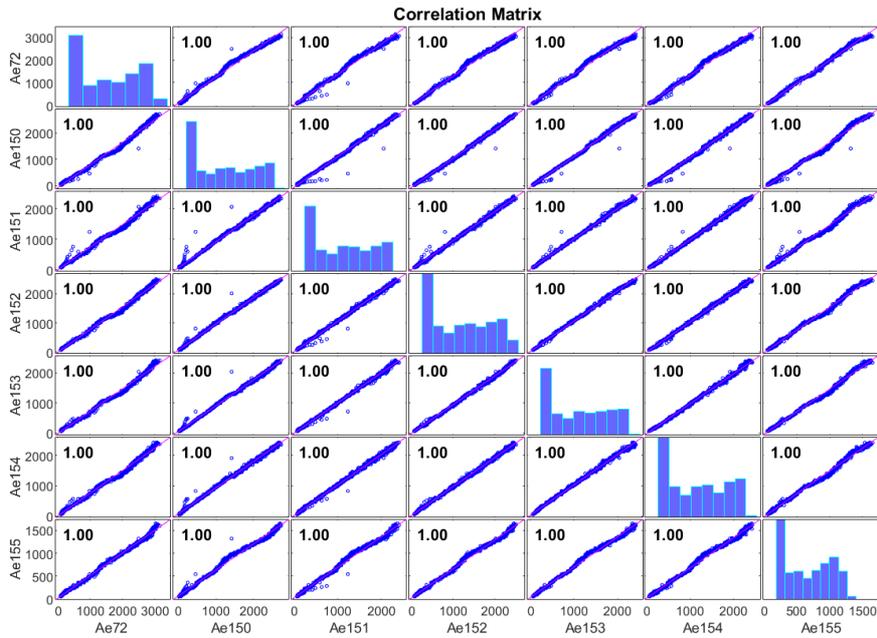


Annexe 14 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Aereco – table de corrélation

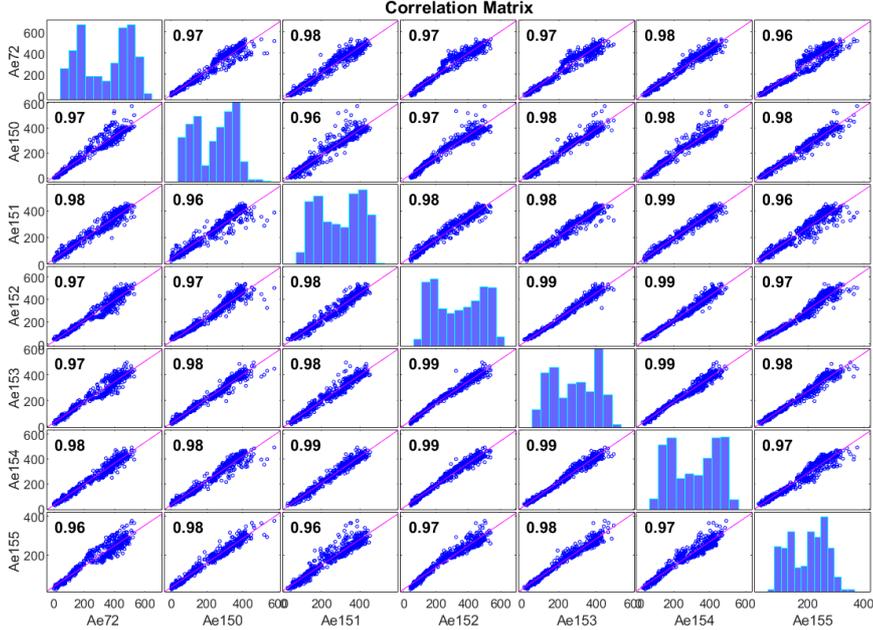
23/05/2022



24/05/2022

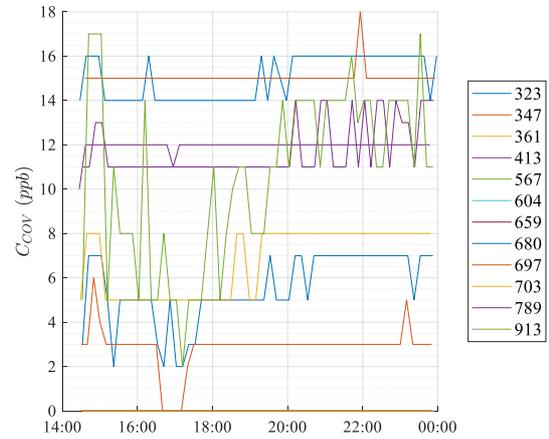
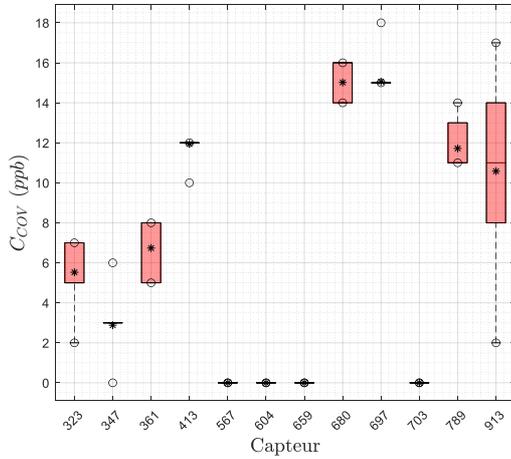


25/05/2022

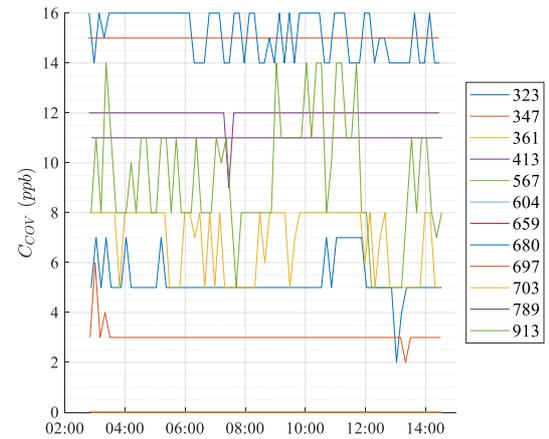
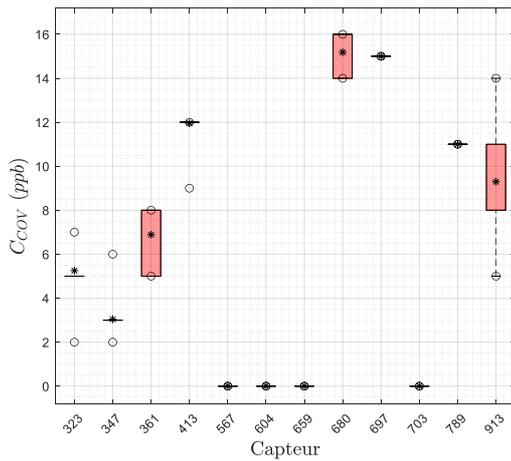


Annexe 15 : Campagne d'inter-comparaison 1 – COV – Nemo

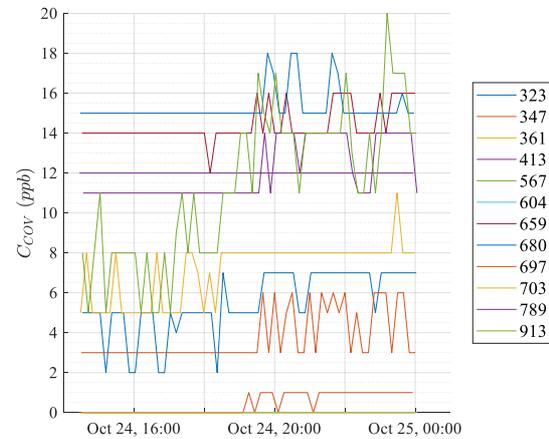
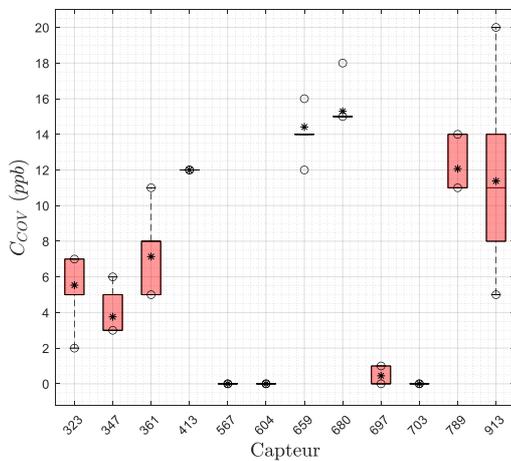
Régime pseudo-permanent - C<200ppbv (après échelon du 22/10) - 23 octobre



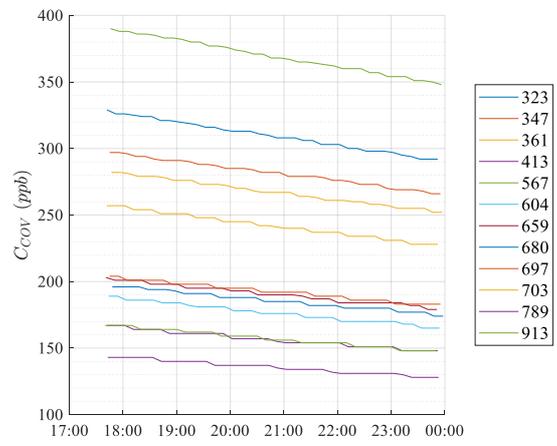
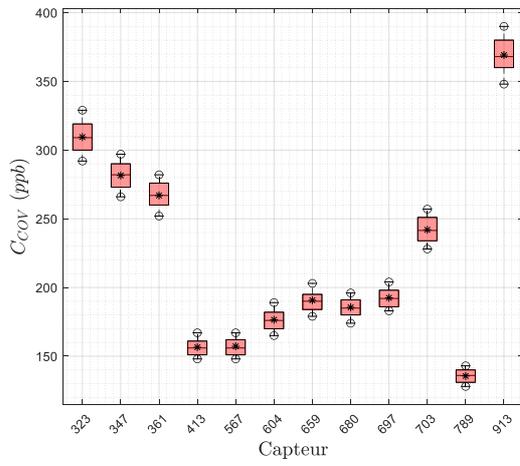
Régime pseudo-permanent - C<200ppbv (après échelon du 22/10) - 24 octobre



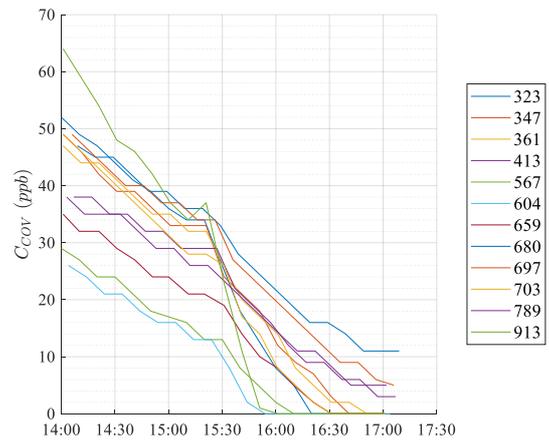
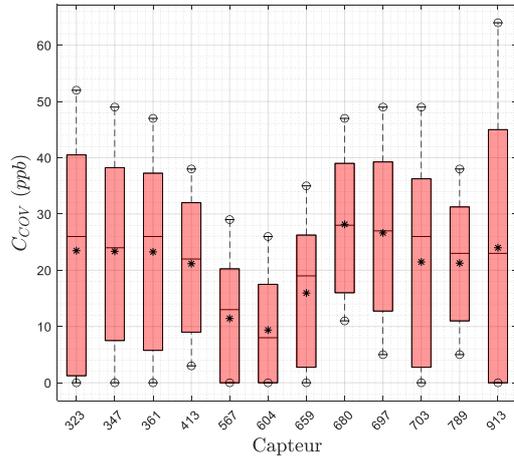
Régime pseudo-permanent - C<200ppbv (après échelon du 22/10) - 24 octobre



Régime pseudo-permanent (après échelon du 25/10) – 25 Octobre

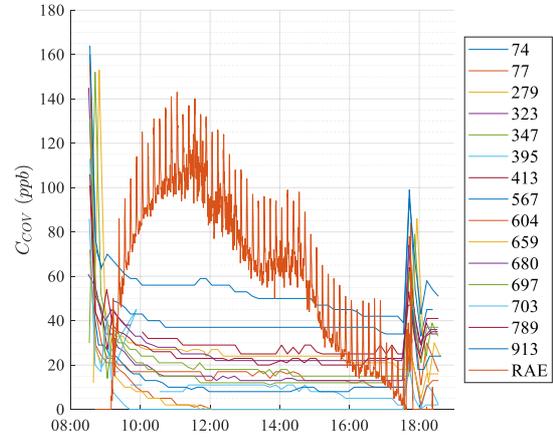
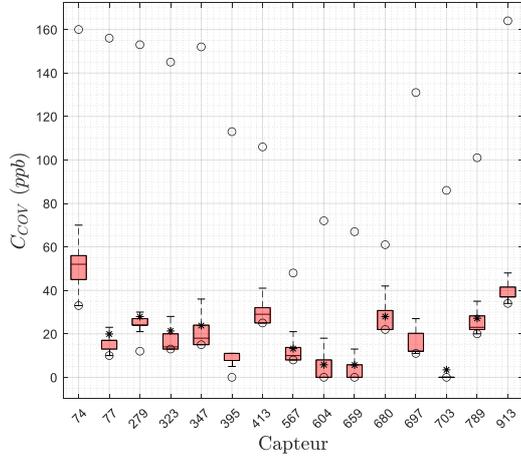


Echelon – 22/10

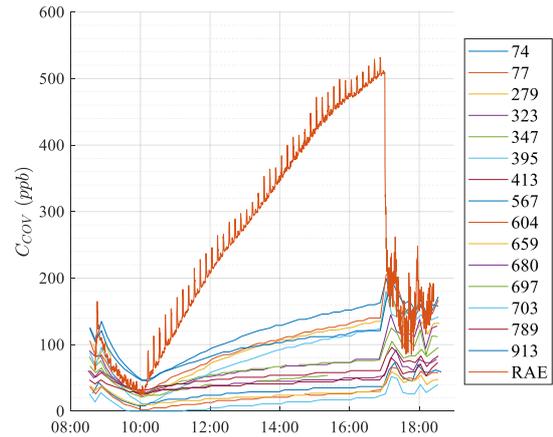
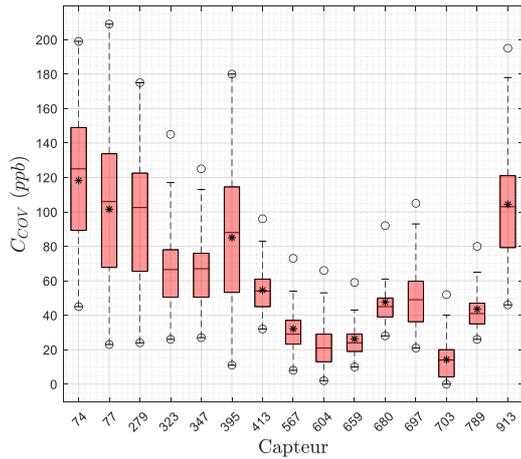


Annexe 16 : Campagne d'inter-comparaison 2 – COV – Nemo

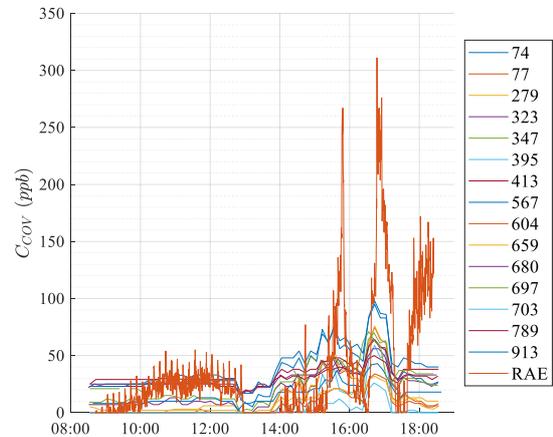
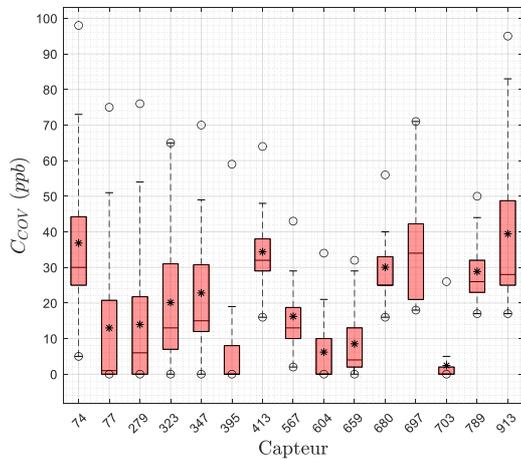
23/05/2022



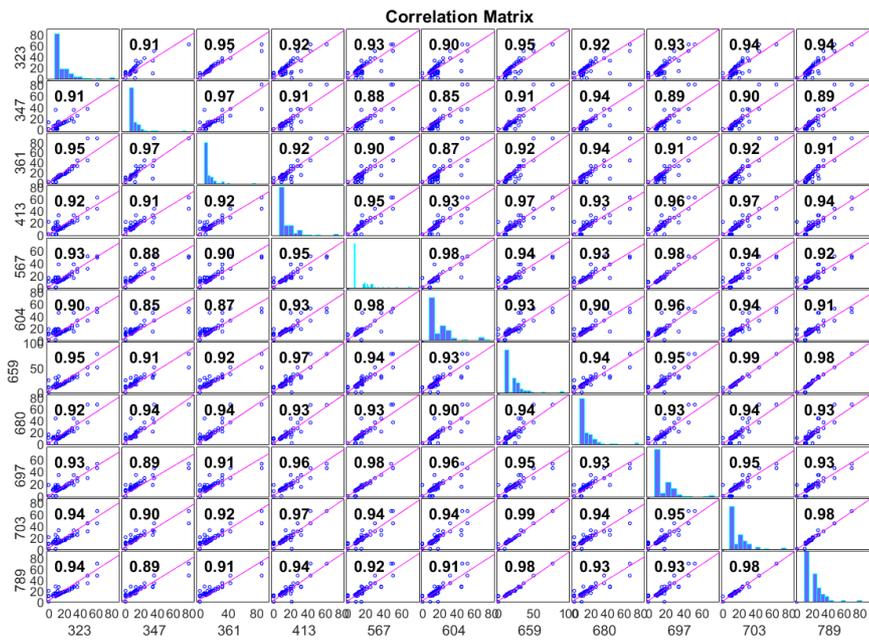
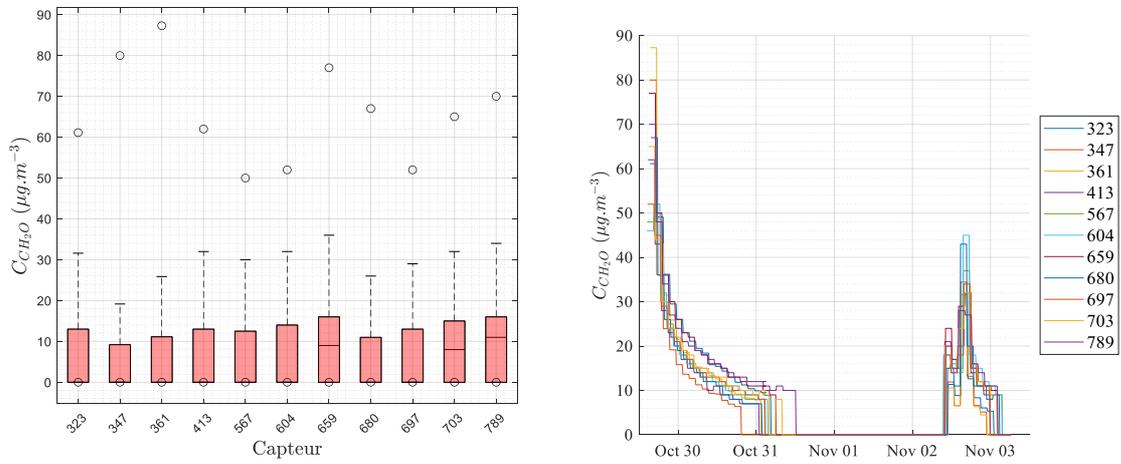
24/05/2022



25/05/2022

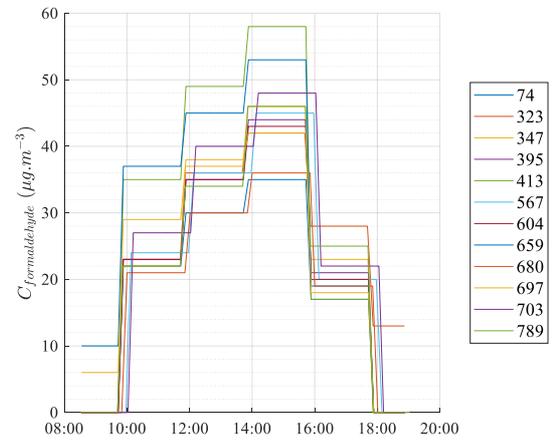
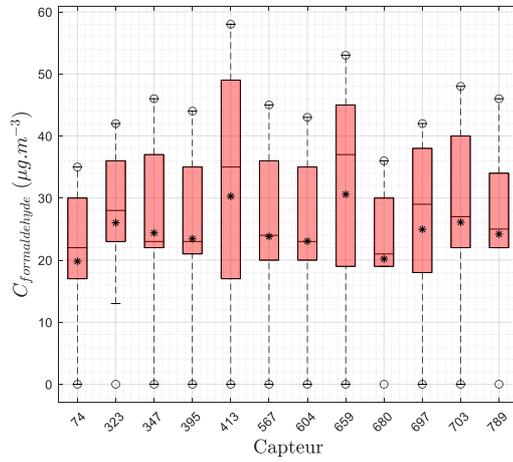


Annexe 17 : Campagne d'inter-comparaison 1 – formaldéhyde – Nemo

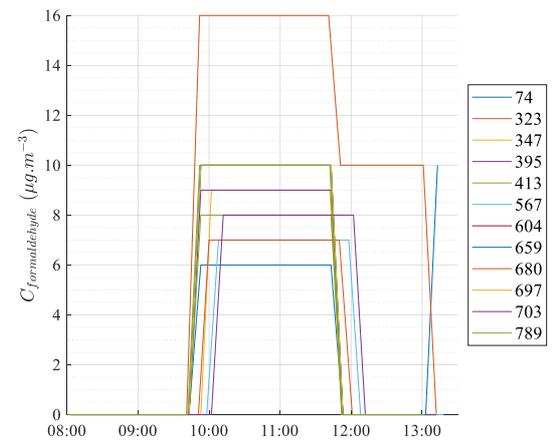
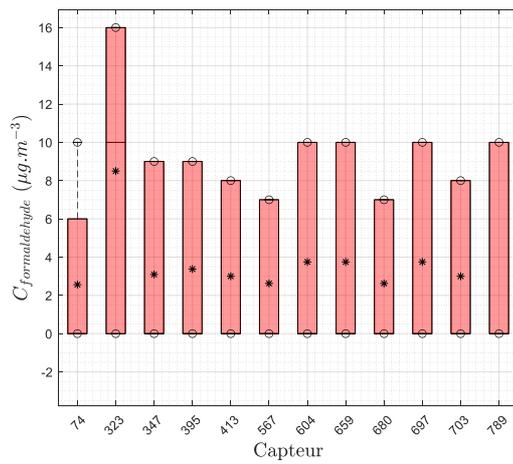


Annexe 18 : Campagne d'inter-comparaison 2 – formaldéhyde – Nemo

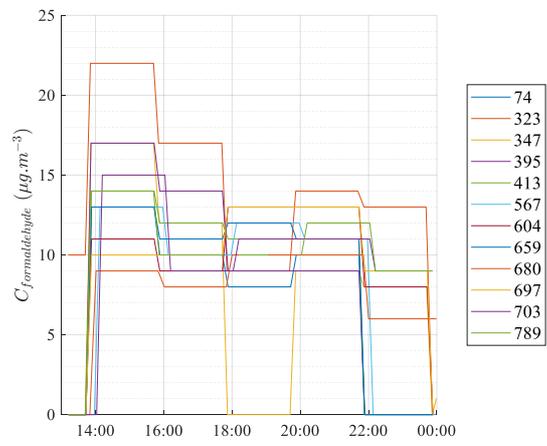
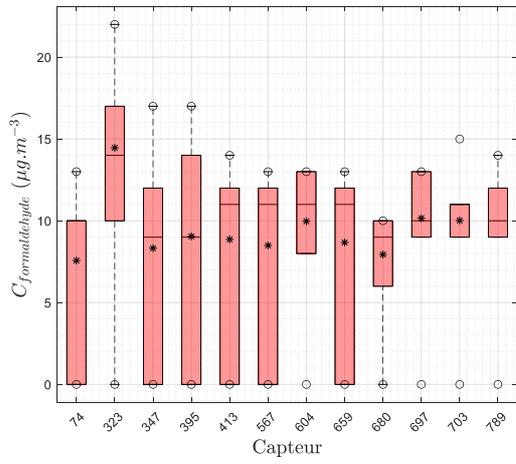
18/10/2022



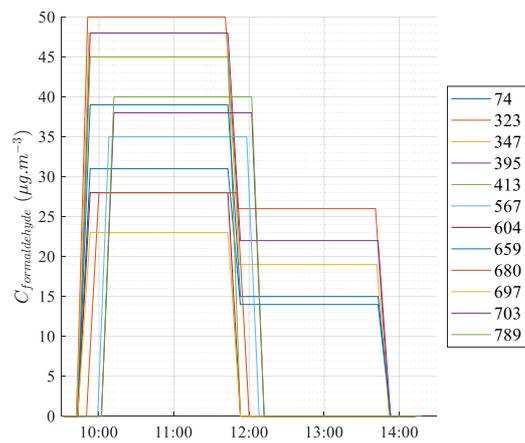
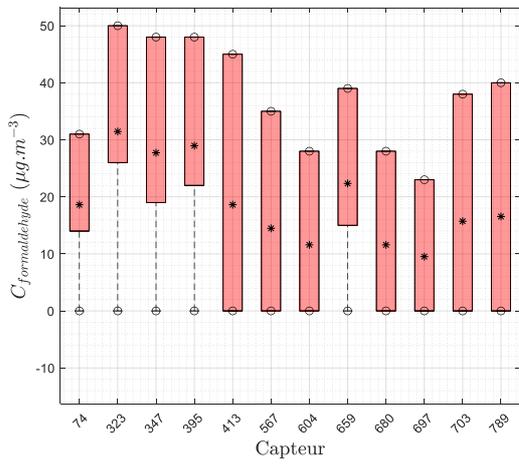
19/10/2022 - 1



19/10/2022 - 2



20/10/2022



Résumé

Cette deuxième tâche du projet a pour objectif de réaliser des essais en laboratoire pour :

- Caractériser les performances hygro-réglables actuelles des terminaux de ventilation ;
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des capteurs embarqués : les capteurs installés pendant Performance 1 (CO₂, Humidité relative et température), ainsi que les nouveaux capteurs intégrés dans les cartes d'acquisition (Composés Organiques Volatils et Particules fines)
- Vérifier le fonctionnement et la fiabilité des balises NEMOs utilisées pour les campagnes d'évaluation de la Qualité de l'Air Intérieur de Performance 2 dans les pièces de vie (CO₂, température, humidité relative, Composés Organiques Volatils Légers, Particules fines et Formaldéhyde)

Ces essais sont réalisés par Aereco pour les terminaux et capteurs des appartements de l'immeuble de Paris, par Anjos pour les terminaux et capteurs des appartements de l'immeuble de Villeurbanne (protocoles et résultats présentés dans deux rapports annexe), et les intercomparaisons sur les appareils de mesure de la QAI sont réalisés par le LOCIE. Les protocoles et les premiers résultats sont présentés dans ce présent rapport.