

## Note technique

*Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement*

### COUPLAGE DRONES/CAPTEURS : ETUDE DE FAISABILITE POUR UNE APPLICATION A LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

Amandine Fievet (Ineris), Laurent Spinelle (Ineris)

#### SYNTHESE

Le développement de plus en plus rapide des technologies de vol autonome attire l'attention de nombreux secteurs économiques mais également de divers domaines scientifiques. La diversité des drones aériens associée au faible encombrement et faible poids des capteurs pour la mesure de qualité de l'air laisse envisager des applications comme par exemple la possibilité d'instrumenter des zones difficiles d'accès avec des instruments classiques et/ou de réaliser des profils verticaux de concentration des principaux polluants en zones urbaines et rurale dans les 200 premiers mètres d'altitudes où les régimes chimiques varient très fortement à cause des processus de dispersion (très influencés par la rugosité du terrain) et d'émissions. Cependant, l'utilisation de capteurs pour la mesure de qualité de l'air en mobilité, de plus soumis à des changements rapides de niveaux de concentrations et de conditions climatiques, mérite d'être évaluée sur le plan métrologique.

Ainsi, l'Ineris a réalisé une première étude de faisabilité de ce type de couplage pour la mesure des particules, portant sur l'évaluation de l'impact d'un drone multiroteur sur la mesure des capteurs PM, via l'influence de la distance entre le drone et les systèmes capteurs. Pour ce faire, le choix a été fait de prendre comme référence des mesures effectuées au moyen d'un compteur optique FIDAS. Ce dernier a été installé sur une Plateforme Elévatrice Mobile de Personnes (PEMP) de 18 mètres, en prenant soin d'installer les capteurs de PM à bas cout au même niveau que la tête de prélèvement du FIDAS. Le choix d'installer les capteurs et l'instrument de référence sur la même plateforme a été fait afin de faire varier, d'une part la distance entre une source de PM et les systèmes de mesure et d'autre part, la distance entre les systèmes de mesure et le drone.

Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré la possible influence du drone multirotor sur une mesure effectuée à l'aide de capteurs. Si la comparaison des concentrations mesurées par capteurs et par FIDAS sur des niveaux de concentrations faibles en PM (air ambiant,  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5} < 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $PM_{10} < 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) n'a pas mis en évidence d'impact du drone multirotor (ratio mesure capteur/FIDAS non affecté par la distance du drone), cette même comparaison à des concentrations plus élevées ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne) a mis en évidence, un impact de la distance du drone multirotor par rapport aux capteurs. Ainsi, une distance minimale à respecter de 2 m entre les capteurs et le drone multirotor a été estimée sur la base des essais menés.

A noter que ces essais n'ont pas permis d'évaluer l'impact du drone multirotor sur la matrice à mesurer. En effet, il est fort probable que les turbulences créées par ce type de drone modifient localement la concentration particulaire. Pour mener cette évaluation, il serait intéressant de reproduire ces essais avec une source fixe, stable, maîtrisée et répétable qui permette de faire un comparatif de mesures avec et sans drone. Ce type d'essais permettrait également de conforter les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, la source utilisée ici n'étant pas maîtrisée.

## 1. CONTEXTE

---

Le développement de plus en plus rapide des technologies de vol autonome attire l'attention de nombreux secteurs économiques mais également de divers domaines scientifiques. La disponibilité et la diversité de drones aériens laissent envisager la possibilité de réaliser des profils verticaux des principaux polluants en zones urbaines ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  ou particules) et rurale (ozone et particules) dans les 200 premiers mètres d'altitudes où les régimes chimiques varient très fortement à cause des processus de dispersion (très influencés par la rugosité du terrain) et d'émissions. De par leur faible encombrement et leur faible poids, les capteurs pour la mesure de qualité de l'air sont des candidats idéaux pour fonctionnaliser ces drones. Ils permettraient notamment d'instrumenter des zones difficiles d'accès et/ou d'obtenir des profils verticaux de concentrations en polluants avec plus de facilité.

Cependant, l'utilisation de capteurs pour la mesure de qualité de l'air en mobilité, de plus soumis à des changements rapides de niveaux de concentrations et de conditions climatiques, mérite d'être évaluée sur le plan métrologique.

Par ailleurs, la réglementation, bien qu'elle-même en cours de construction, impose le respect strict de l'espace aérien habituellement réservé à des pilotes ou des personnes formées.

Dans ce contexte, l'Ineris a étudié la faisabilité de ce type de couplage pour la mesure des particules, portant notamment sur les performances de capteurs embarqués sur des drones et les turbulences très locales à proximité des sources.

## 2. RAPPEL SUR LA REGLEMENTATION DE VOL EN DRONE

---

Depuis 2012, la réglementation française est en constante construction et évolution de manière à permettre aux propriétaires de drone dit "grand public" une pratique en toute sécurité. Cependant, ceci implique la mise en place de mesures spécifiques et régulièrement mises à jour, encadrant ces systèmes de vol autonome qui présentent généralement une portée de vol bien supérieure à la limite autorisée.

Afin de trouver une zone d'expérimentation autorisée et compatible avec les moyens de l'étude, l'utilisation visée du drone a dû être limitée à un usage de loisir. Le site Géoportail<sup>1</sup> permet d'identifier les zones autorisées pour cette utilisation.

Si la réglementation est moins contraignante pour ce type d'utilisation, il est indispensable de respecter les règles de sécurité essentielles décrites sur la plateforme *service-public.fr*<sup>2</sup>. Ces règles imposent notamment un vol limité à une hauteur maximale de 150 mètres, l'appareil devant rester visible à l'œil nu et dans le champ de vision du télépilote. Concernant le télépilote, aucune formation préalable n'est obligatoire, il est cependant conseillé de suivre celle mise en ligne sur le site *alphatango.aviation-civile.gouv.fr*<sup>3</sup> qui présente le cadre réglementaire, les distances de sécurité, les conditions de vols mais également les peines encourues en cas de non-respect de ces règles.

De plus amples informations sont disponibles sur la page web dédiée du Ministère de la Transition écologique et solidaire<sup>4</sup>.

## 3. BIBLIOGRAPHIE SUR LE COUPLAGE DRONES/CAPTEURS

---

Même si l'utilisation de capteurs à bas coût pour la mesure de la qualité de l'air couplée avec la portabilité des drones volants semble avoir un énorme potentiel, il faut cependant vérifier que les deux technologies sont compatibles.

En effet, les capteurs à bas coût sont sujet à d'importantes interférences notamment liées aux variations de température et d'humidité. Il est donc important de s'assurer que les capteurs sont capables de produire des mesures robustes dans les conditions environnementales particulières correspondant aux vols de drones. Par ailleurs, l'impact du drone volant sur la mesure elle-même est également à prendre en compte, notamment à cause des turbulences d'air créées par le drone, à même de perturber le bon fonctionnement du système de mesure et/ou de modifier les niveaux de concentrations dans la masse d'air à échantillonner.

---

<sup>1</sup> Géoportail. <https://www.geoportail.gouv.fr/>

<sup>2</sup> Drone : Règles de Pilotage à Respecter | Service-Public.Fr. <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34630>

<sup>3</sup> AlphaTango. <https://alphatango.aviation-civile.gouv.fr/#>

<sup>4</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire. Modèles réduits et drones de loisir. <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/modeles-reduits-et-drones-loisir>.

Concernant l'impact de la température et de l'humidité sur les mesures capteurs, une étude de Bezantakos et al.<sup>5</sup> présente les résultats d'une évaluation de deux capteurs de particules (compteur optique de particules OPC Alphasense modèle N2) en chambre d'exposition avec un compteur de particules optique Grimm modèle 1.109 utilisé comme instrument de référence. Les essais ont été réalisés avec un aérosol constitué de billes de polystyrène monodispersées de diamètre compris entre 0,8 et 10,2  $\mu\text{m}$  dans des conditions de températures variant entre -5 et 23°C et des conditions de pression variant entre 0,7 et 1,0 atmosphère. Cette étude montre qu'à température et pression ambiante, les capteurs présentent une différence de réponse aux mesures de référence inférieure à 40 % et une incertitude d'estimation de la taille des particules de  $\pm 5\%$ . Ces performances restent stables jusqu'à une température de 5°C et une pression de 0,7 atm. Pour les températures inférieures, les performances se sont fortement dégradées pour l'un des deux capteurs. Cette étude confirme ainsi l'intérêt de tels systèmes pour la mesure embarquée malgré des performances réduites selon les conditions de température. Il faut donc avoir la possibilité de conditionner l'échantillon ou au minimum de mesurer d'autres paramètres qui permettront une validation des mesures à posteriori, tels que la température ou le taux d'humidité relative.

Concernant l'effet du drone sur la mesure, Zhou et al.<sup>6</sup> ont utilisé des outils de simulations numérique de dynamique des fluides (computational fluid dynamics CFD) pour déterminer l'emplacement d'un système capteur présentant le moins de perturbation. Ils ont ainsi montré que les rotors créent des perturbations sous l'appareil sur un volume au minimum deux fois supérieur à son envergure. Cependant, bien que moins importante, la partie supérieure ne semble pas exempte de perturbations.

### 3.1 Méthodologie mise en œuvre

Comme indiqué précédemment, le choix a été fait, étant donné les moyens de l'étude, de vérifier l'impact d'un drone multiroteur dit de loisir, sur les mesures effectuées à l'aide de capteurs bas-coût et d'un compteur optique, utilisé comme référence.

### 3.2 Matériel de mesures

Pour mener cette étude, le choix a été fait d'utiliser un compteur de particule optique comme référence, ainsi que trois capteurs utilisant un principe de mesure similaire. Le choix de ces deux types de compteurs optique est justifié par la possibilité d'effectuer des mesures avec un pas de temps suffisamment fin pour contrecarrer l'autonomie réduite du drone. Ainsi, les instruments ont été réglés sur un pas de temps d'une seconde au risque d'impacter le bruit d'échantillonnage, les données pouvant de toute façon être moyennées ensuite sur un pas de temps plus long.

---

<sup>5</sup> Bezantakos, Spyros, Fabian Schmidt-Ott, and George Biskos. Performance Evaluation of the Cost-Effective and Lightweight Alphasense Optical Particle Counter for Use Onboard Unmanned Aerial Vehicles. *Aerosol Science and Technology* 52, 4, 385–92, <https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1412394>.

<sup>6</sup> Zhou, Shudao, Shuling Peng, Min Wang, Ao Shen, and Zhanhua Liu. The Characteristics and Contributing Factors of Air Pollution in Nanjing: A Case Study Based on an Unmanned Aerial Vehicle Experiment and Multiple Datasets. *Atmosphere* 9, 9, 343, <https://doi.org/10.3390/atmos9090343>.

### 3.2.1 Méthode de référence

Un FIDAS 200 de la société PALAS a été utilisé comme méthode de référence. Cet appareil est un granulomètre optique permettant une mesure en continu simultanée des fractions PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>1</sub>, avec un pas de temps similaire aux systèmes capteurs. Il est considéré comme une méthode dite équivalente à la méthode de référence pour des mesures en site de fond <sup>7</sup> et était simplement équipé de sa propre tête de prélèvement.

### 3.2.2 Systèmes capteurs

Les systèmes capteurs choisis pour ces essais sont des Sensirion SPS30, permettant la mesure des fractions particulières PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub><sup>8</sup>. Les Sensirion ont été utilisés dans leur format brut c'est à dire sans carter de protection supplémentaire comme le montre la Figure 1.



Figure 1 : Photo d'un capteur Sensirion SPS30

Malheureusement, sur les trois systèmes installés, seuls deux ont pu être conservés, le troisième ayant présenté des signes de saturation de mesure inexplicables. Il a donc été décidé de l'écarter de l'ensemble de l'étude.

## 3.3 Drone et nacelle élévatrice (PEMP)

Un drone multirrotor de loisir Mavic Pro de marque DJI a été utilisé. Au vue de sa taille et de son faible poids et de manière à maximiser le temps d'essais, le choix a été fait d'installer les systèmes capteurs avec l'appareil de référence sur une Plateforme Elévatrice Mobile de Personnes (PEMP) de 18 mètres.

Les deux configurations suivantes ont été testées au niveau de la nacelle, pour l'emplacement des systèmes de mesure, comme illustré sur les Figures 3a, 3b et 3c ci-après.

---

<sup>7</sup> A noter que le FIDAS 200 n'est pas reconnu comme mesure de référence en site trafic ou industriel. La vérification de conformité technique est disponible sur le site du LCSQA : [https://www.lcsqa.org/system/files/Liste%20appareils%20conforme%20mesure%20\\_qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J\\_v2%2007-02-19.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/Liste%20appareils%20conforme%20mesure%20_qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J_v2%2007-02-19.pdf)

<sup>8</sup> Il permet également la mesure des PM<sub>4</sub> qui n'a pas été étudiée ici.



Figure 3a : Vue de la 1<sup>ère</sup> disposition des appareils de mesures sur le panier de la nacelle, « FIDAS et capteurs côte à côte ».



Figure 2b : Schéma de la 1<sup>ère</sup> disposition des appareils de mesures sur le panier de la nacelle, « FIDAS et capteurs côte à côte ».



Figure 3c : Schéma de la 2<sup>ème</sup> disposition des appareils de mesures sur le panier de la nacelle, « FIDAS et capteurs opposés ».

### 3.4 Choix du site d'essai

Le choix du site de mesure a été fait en respect des restrictions de vol pour les drones de loisirs comme expliqué au chapitre 2 « Rappel sur la réglementation de vol en drone ». Le site choisi correspond ainsi à un site rural avec peu d'émissions d'où la nécessité d'une source de particules additionnelle.

### 3.1 Dopage en particules

Le dopage en particules a été réalisé à l'aide d'un système de combustion localisé placé sous la nacelle de la plateforme élévatrice pour favoriser son efficacité. Les mesures ont été réalisées dans l'air ambiant avec ou sans dopage. A noter que la source n'était pas maîtrisée donc variait dans le temps et dans l'espace en termes de niveaux de concentration.

### 3.2 Déroulement des essais

La Figure 4 ci-après résume les différentes configurations dans lesquelles ont été faits les essais :

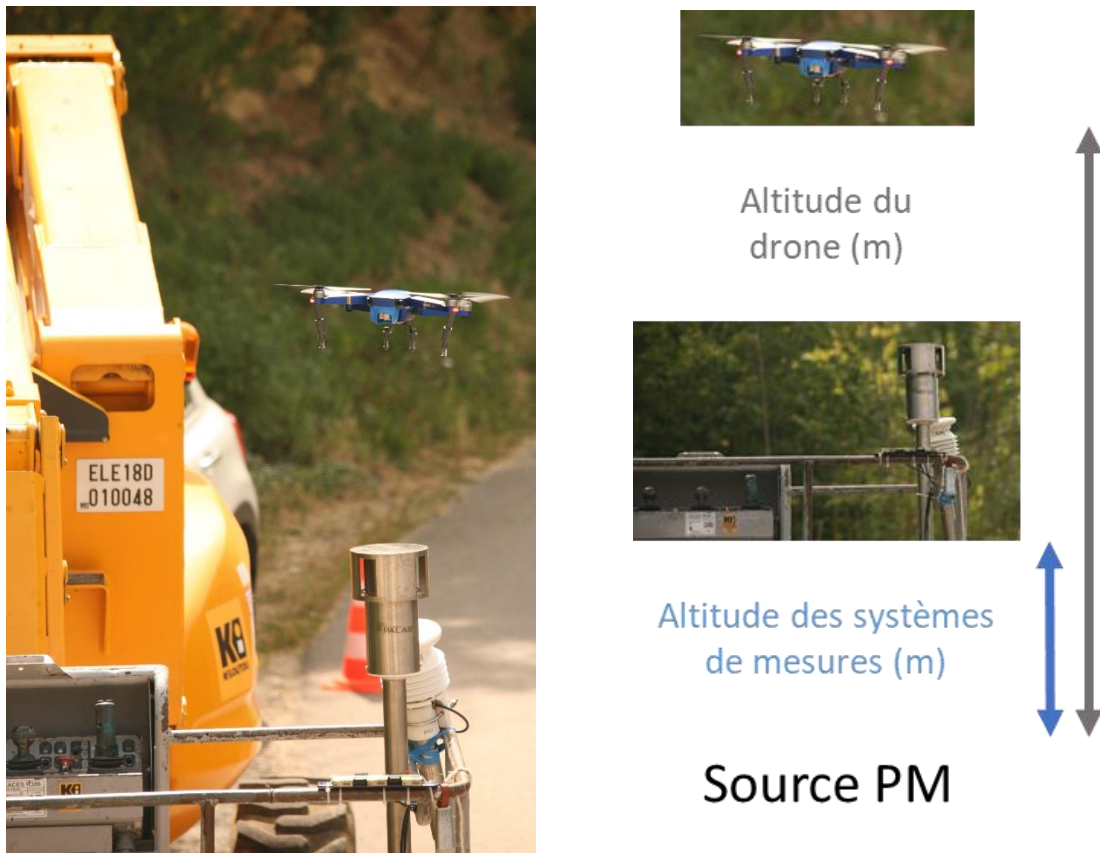


Figure 4: Vue (gauche) et schéma explicatif (droite) des essais avec présence du drone

En complément, le Tableau 1 ci-après synthétise le déroulement des essais. Les essais 1 et 2 ont été réalisés sans le drone pour évaluer les réponses des capteurs par rapport au FIDAS à différentes hauteurs du sol, avec et sans dopage. Les essais 3 et 4 ont été réalisés à une hauteur fixe du sol avec un positionnement du drone à différentes hauteurs par rapport aux systèmes de mesure, avec et sans dopage.



Tableau 1: Synthèse du déroulement des essais.

Numéro de l'essai	Conditions de l'essai	Positionnement des systèmes capteurs	Altitude des systèmes de mesures (m)	Altitude du drone (m)	Durée de la séquence (mn)
1	Air ambiant	FIDAS et capteurs côte à côte	15	N/A	5
			10	N/A	5
			7,5	N/A	5
			5	N/A	5
			4	N/A	5
			3	N/A	5
			2	N/A	5
2	Air ambiant+ dopage	FIDAS et capteurs côte à côte	15	N/A	5
			10	N/A	5
			7,5	N/A	5
			5	N/A	5
			4	N/A	5
			3	N/A	5
			2	N/A	5
3	Air ambiant+ dopage	FIDAS et capteurs côte à côte	2	15	5
			2	10	5
			2	7,5	4
			2	5	4
			2	4	5
			2	3	5
			2	2,5	5
4	Air ambiant	Fidas et capteurs opposés	7,5	8,5	5
			7,5	10	5
			7,5	12,5	4
			7,5	15	4

La batterie du drone ayant une durée de fonctionnement limitée à 20 minutes, il n'a pas été possible de faire des essais de longue durée. Cependant, l'utilisation de deux batteries a permis de réaliser jusqu'à 8 séquences successives par essai permettant d'atteindre 40 minutes de test par essai.



## 4. RESULTATS

### 4.1 Expression des résultats de mesures

Les concentrations massiques de particules sont exprimées en microgrammes par mètre cube ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les trois fractions particulaires  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$  ont été exploitées pour étudier l'influence du drone.

### 4.2 Résultats des essais sans dopage

Les concentrations mesurées lors des essais sans dopage, avec et sans présence du drone sont synthétisées dans le Tableau 2 ci-après.

Tableau 2: Synthèse des moyennes des concentrations observées dans l'air ambiant sans dopage avec et sans présence du drone

Numéro de l'essai	Conditions de l'essai	Positionnement des systèmes capteurs	Altitude des systèmes de mesures (m)	Altitude du drone (m)	Heure de début	Heure de fin	Mesure de référence			Systèmes capteurs					
							FIDAS_PM1 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FIDAS_PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FIDAS_PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM1_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM2.5_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM10_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM1_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM2.5_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM10_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1	Air ambiant	Fidas et systèmes capteurs côte à côte	15	N/A	09:25	09:30	10,9	13,0	21,1	14,8	16,0	16,1	14,1	15,5	16,1
			10	N/A	09:31	09:36	11,2	13,2	18,2	15,3	16,5	16,5	14,5	15,5	15,6
			7,5	N/A	09:38	09:43	11,1	13,4	20,6	14,5	15,7	15,9	14,1	15,2	15,4
			5	N/A	09:45	09:50	10,9	12,5	17,4	13,8	15,0	15,1	13,3	14,3	14,4
			4	N/A	09:52	09:57	11,2	13,1	18,7	13,4	14,4	14,4	13,3	14,4	14,7
			3	N/A	09:58	10:03	10,9	12,8	19,4	12,9	13,8	13,8	12,9	13,7	13,8
			2	N/A	10:04	10:09	10,6	12,5	18,4	12,2	13,1	13,1	12,0	12,8	12,9
			1	N/A	10:10	10:15	10,9	12,8	18,3	12,6	13,5	13,5	12,5	13,3	13,3
			4	Air ambiant	Fidas et systèmes capteurs opposés	7,5	8,5	14:02	14:07	7,6	9,1	15,0	5,7	6,1	6,1
7,5	10	14:07				14:12	7,3	9,3	18,3	6,1	6,6	6,6	6,5	6,9	6,9
7,5	12,5	14:12				14:17	7,6	9,2	16,4	6,6	7,1	7,1	7,0	7,4	7,4
7,5	15	14:17				14:19	7,6	9,3	15,3	6,5	7,0	7,0	6,8	7,2	7,2

On peut noter qu'entre l'essai 1 et 4, les concentrations en particules ont diminué mais restent du même ordre de grandeur. Les conditions de T et HR ont quant à elles également évoluées, l'essai 4 ayant été réalisé plus tardivement dans la journée. Sans dopage, aucun effet significatif lié à la présence du drone n'est observé. En effet, sur l'essai 4, l'écart entre la mesure de référence et celle des capteurs n'augmente pas à mesure que le drone se rapproche. Les ratios entre les réponses des capteurs et la mesure du FIDAS restent en effet du même ordre de grandeur avec ou sans la présence du drone à proximité :

- Pour le plus grand écart entre le drone et la nacelle (essai 4, séquence 7,5m\_D15m) la concentration mesurée par les capteurs correspond, en moyenne, à 88% de la concentration mesurée par le FIDAS pour la fraction  $\text{PM}_1$ , à 77% pour les  $\text{PM}_{2,5}$  et seulement 46% pour les  $\text{PM}_{10}$ .
- Là où les capteurs et le drone sont les plus proches (essai 4, séquence 7,5m\_D8,5m), la concentration mesurée par les capteurs représente quant à elle, en moyenne, 80% de la concentration mesurée le FIDAS pour la fraction  $\text{PM}_1$ , à 71% pour les  $\text{PM}_{2,5}$  et seulement 43% pour les  $\text{PM}_{10}$ .

Il est à noter que le faible ratio entre les réponses des capteurs et la mesure du FIDAS pour les  $\text{PM}_{10}$  est dû à la sensibilité des capteurs pour cette fraction particulaire et qu'il reste néanmoins constant quelque soit la distance entre les capteurs et le drone.

### 4.3 Résultats des essais avec dopage

Les concentrations mesurées lors des essais avec dopage, avec et sans présence du drone sont synthétisées dans le Tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Synthèse des moyennes des concentrations observées dans l'air ambiant avec dopage avec et sans présence du drone

Numéro de l'essai	Conditions de l'essai	Positionnement des systèmes capteurs	Altitude des systèmes de mesures (m)	Altitude du drone (m)	Heure de début	Heure de fin	Mesure de référence			Systèmes capteurs								
							FIDAS_PM1 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FIDAS_PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FIDAS_PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM1_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM2.5_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM10_SAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM1_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM2.5_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SENSIRION PM10_A33 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
2	Air ambiant +dopage	Fidas et systèmes capteurs côte à côte	15	N/A	10:35	10:40	13,3	15,9	28,2	12,3	13,2	13,2	12,0	12,7	12,7			
			10	N/A	10:41	10:46	13,4	15,5	22,0	13,0	14,0	14,0	13,1	13,9	13,9			
			7,5	N/A	10:48	10:53	19,9	22,2	29,1	20,8	22,3	22,3	21,7	23,0	23,0			
			5	N/A	10:54	10:59	31,0	33,7	43,5	31,0	33,4	33,4	32,2	34,1	34,1			
			4	N/A	11:00	11:05	40,1	43,9	53,1	26,1	28,1	28,1	28,6	30,4	30,4			
			3	N/A	11:06	11:11	45,1	48,9	59,9	44,2	47,5	47,5	49,3	52,3	52,3			
			2	N/A	11:12	11:17	59,6	63,3	75,3	110,5	118,8	118,8	127,7	135,4	135,4			
			1	N/A	11:18	11:23	15,4	17,8	22,8	12,4	13,3	13,3	12,8	13,6	13,6			
			3	Air ambiant +dopage	Fidas et systèmes capteurs côte à côte	2	15	11:29	11:34	40,6	44,0	53,0	33,6	36,1	36,1	30,3	32,2	32,2
						2	10	11:35	11:40	48,3	52,3	66,8	30,0	32,2	32,2	27,8	29,4	29,4
2	7,5	11:41				11:45	93,5	97,2	110,2	108,0	116,2	116,4	114,4	122,2	123,0			
2	5	11:45				11:49	25,9	28,9	41,5	22,9	24,6	24,6	23,6	25,0	25,0			
2	4	11:51				11:56	57,3	60,6	76,1	279,5	302,0	303,3	260,7	279,5	282,1			
2	3	11:56				12:01	68,4	73,4	98,6	248,1	321,0	366,1	323,6	542,2	709,3			
2	2,5	12:01				12:06	24,0	29,2	61,3	26,2	28,1	28,1	254,3	614,1	903,0			

#### 4.3.1 Comparatif des mesures capteurs et de référence sans drone

La Figure 5 ci-après permet d'isoler deux types de comportements :

- Les séquences de test correspondant à une hauteur de nacelle de 1m ainsi que celles commençant à 3m et allant jusqu'au maximum de 15m ;
- La séquence de test correspondant à une hauteur de nacelle de 2m.

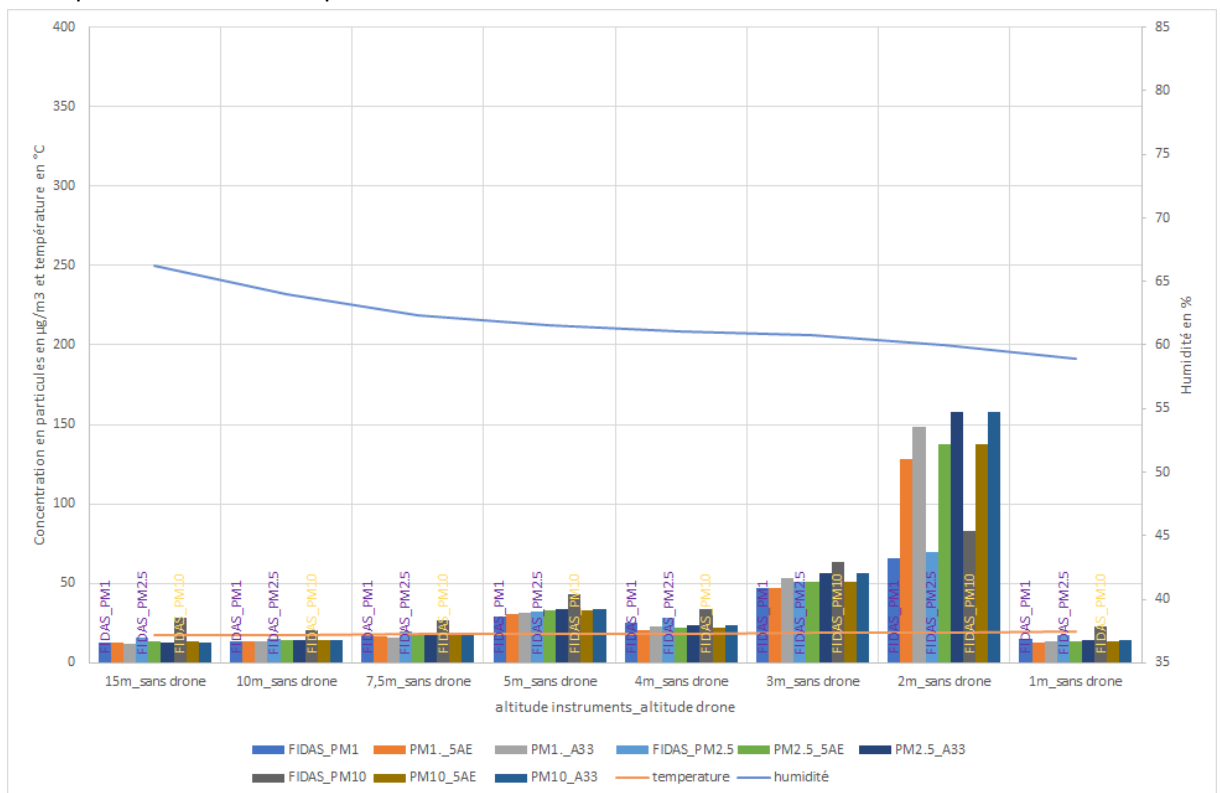
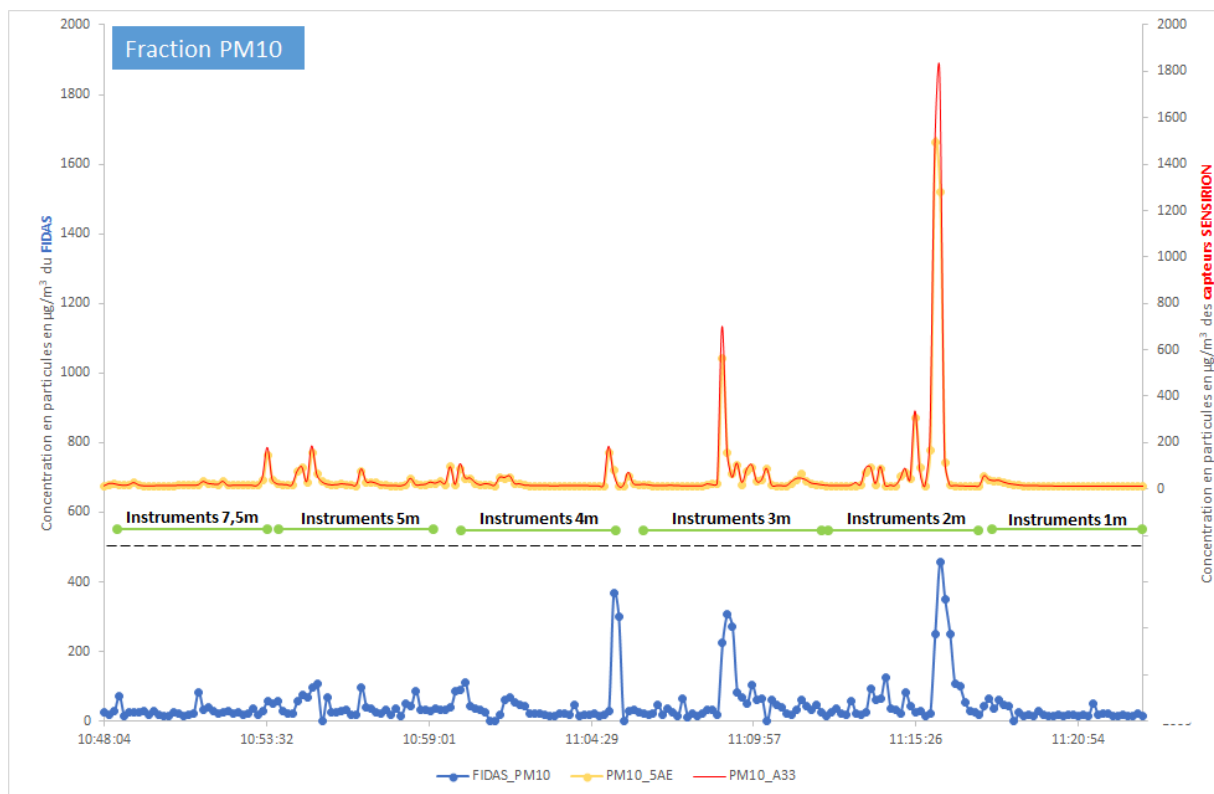


Figure 5 : Représentation graphique des concentrations mesurées dans l'air ambiant avec dopage sans drone (essai 2)

Dans le premier cas, on note un écart moyen de 93% en  $PM_{10}$ , 88% en  $PM_{2,5}$  et 66% en  $PM_{10}$  entre la mesure des capteurs et la mesure de référence. De plus, la Figure 6 qui représente le suivi temporel des données de références (en bleu) et des données capteurs (en jaune et rouge) montre que les profils dynamiques des capteurs sont bien corrélés avec celui de la méthode de référence, quelle que soit la fraction particulaire observée. Ainsi, même si la mesure est généralement surestimée, les deux capteurs présentent une faible variabilité entre eux (réponse quantitative similaire).

Le second cas montre une concentration nettement supérieure à celles des autres séquences, avec une différence plus importante entre les mesures de référence et les mesures capteurs (écart de 203%, 204% et 171% pour les  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  respectivement). Cette différence semble être liée au type source utilisée pour le dopage PM (nature des particules et stabilité de la génération dans le temps). Cette instabilité de la méthode de génération est clairement illustrée par la Figure 6 pour l'ensemble de l'essai. Malgré cette dernière observation, cette hauteur de 2 m a été conservée pour les séquences avec drone car elle correspond à la hauteur où le dopage était le plus efficace.



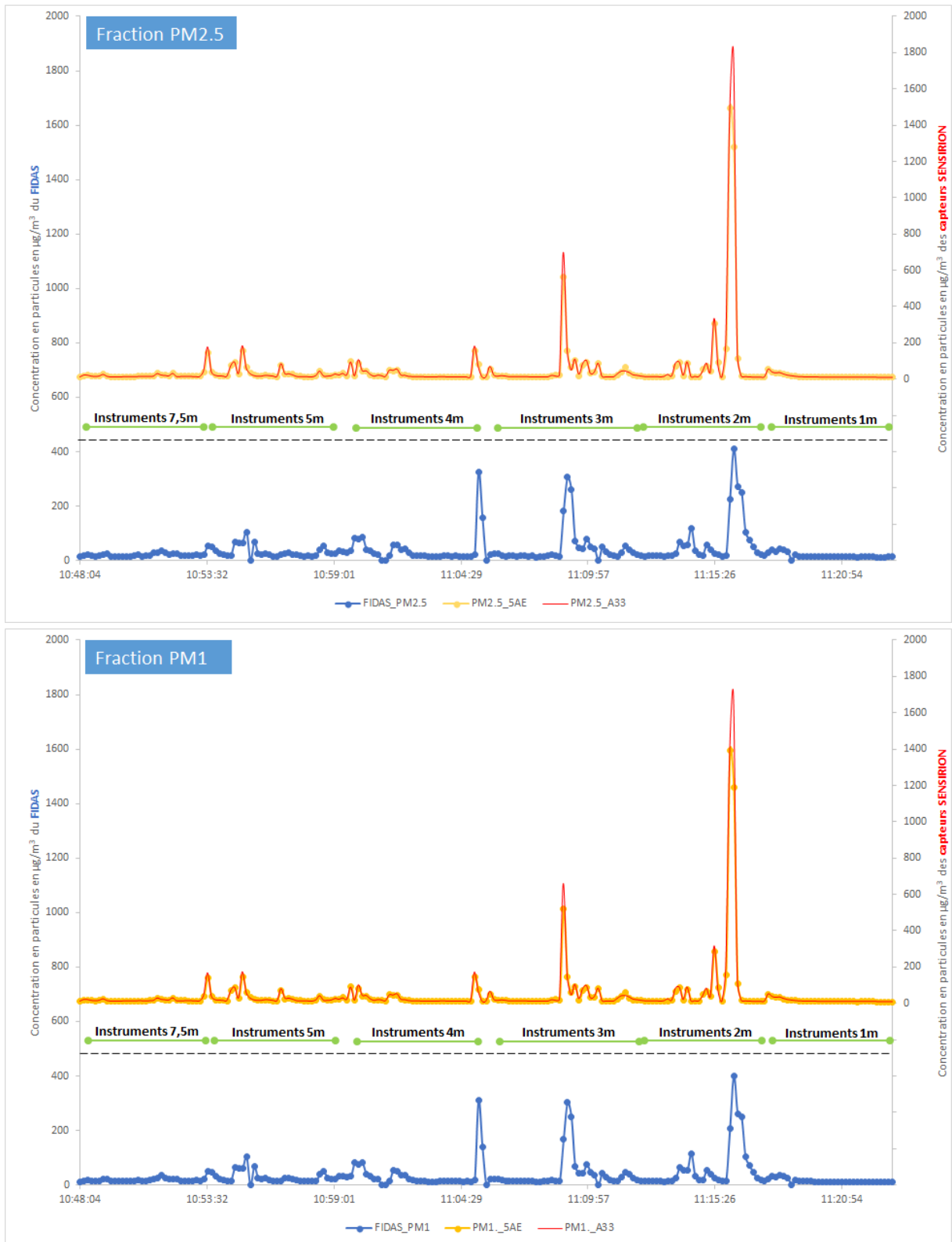


Figure 6 : Suivi temporel des concentrations moyennes en  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_1$  mesurées dans l'air ambiant avec dopage sans survol de drone

### 4.3.2 Comparatif des mesures capteurs et de référence avec drone

La Figure 7 ci-après montre distinctement un seuil de 2m en-dessous duquel l'approche du drone provoque une modification du comportement des capteurs. En effet, les réponses des capteurs et du FIDAS semblent perdre la cohérence visible précédemment dans les Figure 5 et Figure 6 lorsque le drone se trouve à une distance inférieure ou égale à 2m des systèmes de mesure. Cette observation est également appuyée par les différences de réponses visibles dans les suivis temporels présentés dans la Figure 8 ci-après.

En effet, on note clairement une différence de réponse entre les capteurs eux-mêmes lorsque le drone se situe à une altitude de 0,5m des systèmes et ce quelle que soit la fraction particulaire observée. De plus, si pour les essais avec le drone situé à 1 et 2m d'altitude par rapport aux systèmes de mesures, les deux réponses capteurs semblent être de nouveau cohérentes, on observe cette fois un écart important avec les mesures de concentration du FIDAS.

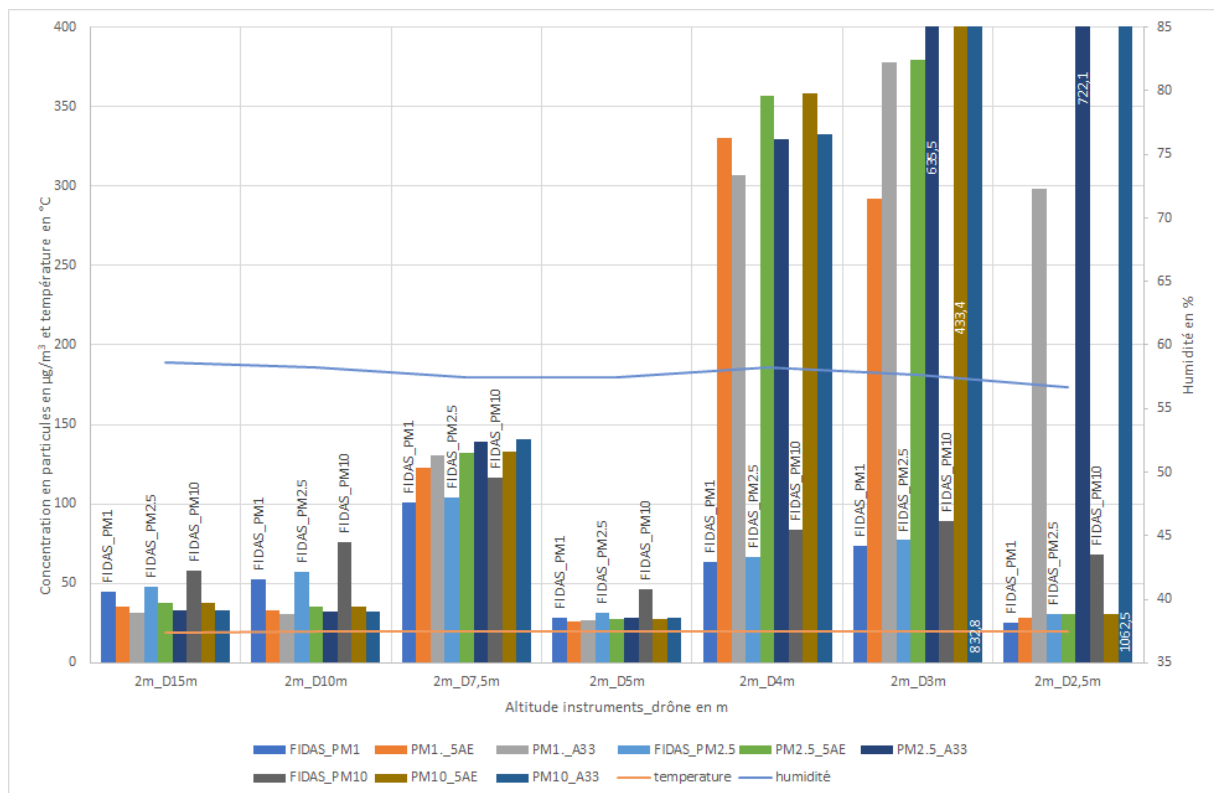
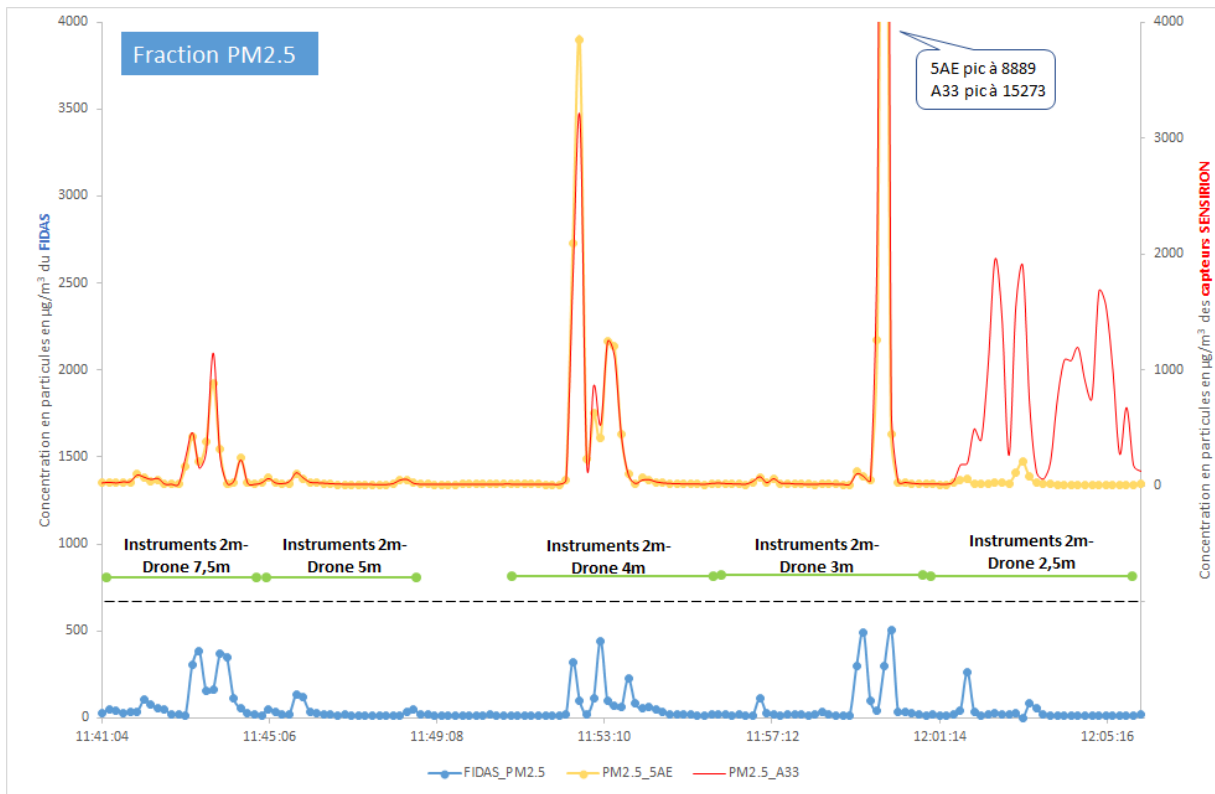
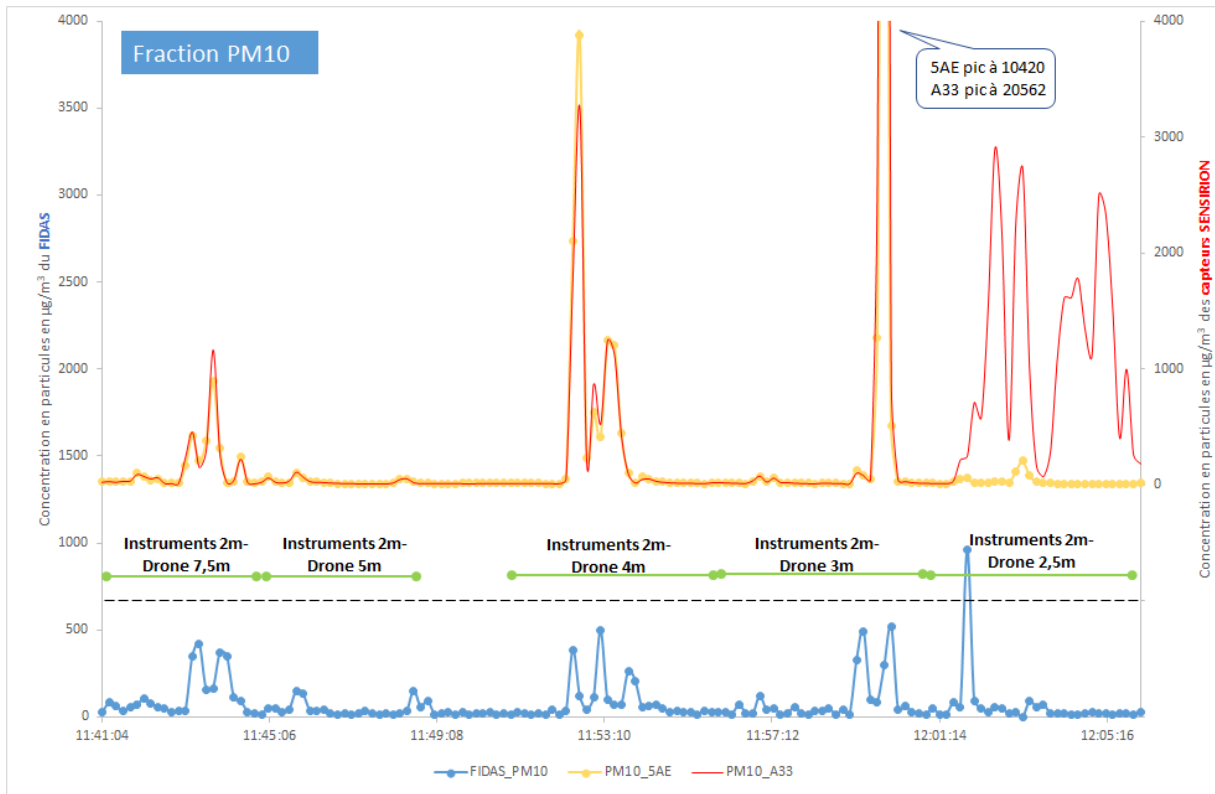


Figure 7 : Représentation graphique des concentrations moyennes mesurées dans l'air ambiant avec dopage et survol de drone (essai 3)



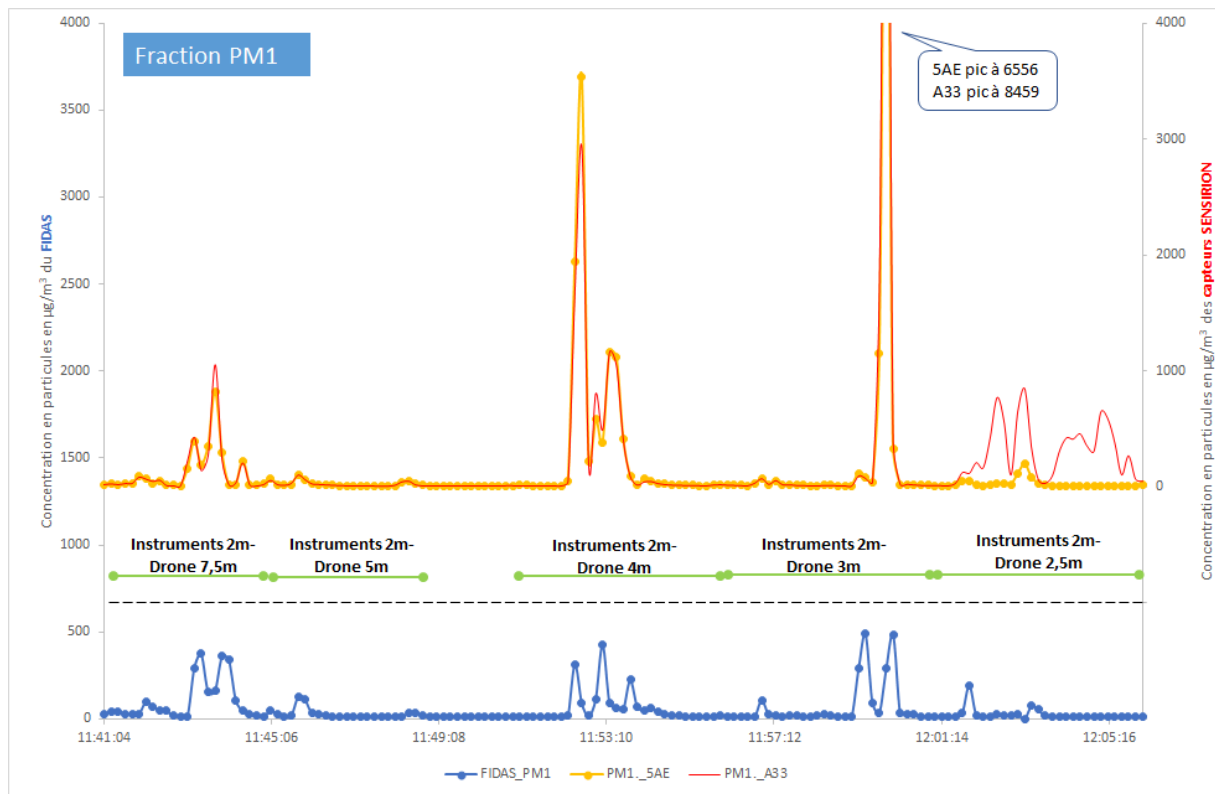


Figure 8 : Suivi temporel des concentrations moyennes en  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  et  $PM_1$  mesurées dans l'air ambiant avec dopage et survol de drone

Au vu des résultats obtenus lors de l'essai 2 (dopage sans drone, Figure 5), même si la source de particules n'est pas aussi stable que souhaitée, autant de par la concentration mais aussi direction du nuage, cette dernière ne peut expliquer à elle seule les différences de concentration observées entre les mesures FIDAS et capteurs en conditions de dopage, en particulier lorsque le drone se trouve à une altitude inférieure à 2m des systèmes de mesure. En ce qui concerne le FIDAS 200, la présence de la tête de prélèvement couplée au système de prélèvement actif de l'air semble diminuer voire annuler l'influence du drone sur le principe de fonctionnement de l'appareil.



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré la possible influence du drone multirotor sur une mesure effectuée à l'aide de capteurs. Si la comparaison des concentrations mesurées par capteurs et par FIDAS sur des niveaux de concentrations faibles en PM (air ambiant,  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5} < 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $PM_{10} < 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) n'a pas mis en évidence d'impact du drone multirotor (ratio mesure capteur/FIDAS non affecté par la distance du drone), cette même comparaison à des concentrations plus élevées ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne) a mis en évidence, un impact de la distance du drone multirotor par rapport aux capteurs. Ainsi, une distance minimale à respecter de 2 m entre les capteurs et le drone multirotor a été estimée sur la base des essais menés.

Une étude similaire a également été menée par Atmo-Grand-Est dans le cadre du projet européen INTERREG V Atmo-VISION<sup>9</sup>. Un drone muni d'un compteur de particules développé par le CNRS (capteur LOAC) a effectué des mesures verticales de particules fines  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  au-dessus du Rhin entre Strasbourg et Kehl, et dans la vallée de la Bruche. Les mesures réalisées pour la première fois avec ce type d'équipement ont eu lieu du 21 au 25 janvier 2019.

Enfin, il est important de rappeler que ces essais n'ont pas permis d'évaluer l'impact du drone multirotor sur la matrice à mesurer. En effet, il est fort probable que les turbulences créées par ce type de drone modifient localement la concentration particulaire. Pour mener cette évaluation, il serait intéressant de reproduire ces essais avec une source fixe, stable, maîtrisée et répétable qui permette de faire un comparatif de mesures avec et sans drone. Ce type d'essais permettrait également de conforter les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, la source utilisée ici n'étant pas maîtrisée.

De plus, il serait également important d'évaluer l'impact de l'utilisation de capteurs dédiés à cet usage, c'est à dire protégé et couplé à un système d'enregistrement des données et fixés directement sur un drone plus puissant. Cependant, la comparaison directe avec la méthode de référence sera difficile dans cette configuration. Une des possibilités d'optimisation serait de travailler sur une stratégie de prélèvement des particules en mobilité permettant un conditionnement isocinétique de l'échantillon (travaux au programme de travail 2020 du LCSQA).

---

<sup>9</sup> projet européen INTERREG V Atmo-VISION, <https://atmo-vision.eu/mesures-par-drone/>