Élèves
Pierre BOULANGER
Louis GODRON
Benoît PAQUES

Projet encadré par :
Anne-Claire CHENUS

CONCOURS C.GENIAL 2017
Lycée Saint-Charles, Orléans

DusTrack'R

Projet réalisé en collaboration avec :

Corinne ROBIN et Abderrazak YAHYAOUI, responsables des études de Lig'Air
Alan URBAN, Chercheur en Neurosciences et Imagerie cérébrale, NERF

DUSTRACK'R

Problématique : Comment élaborer un dispositif mobile qui permette de rendre compte efficacement de la pollution aux microparticules ?

Résumé

Les concentrations en microparticules (PM10), enjeu de santé public majeur sont déterminées en région Centre par 11 stations fixes. Notre objectif est de renforcer ce réseau en élaborant un dispositif autonome permettant de cartographier à l'aide d'une base GPS la pollution en trois dimensions dans les lieux difficilement accessibles. Notre dispositif se compose d'un drone équipé de différents capteurs permettant la mesure des PM10 ainsi que la température, la pression et l'hygrométrie ce qui permet de corriger en temps réel les mesures grâce à des modèles mathématiques. Nous avons démontré la fiabilité de notre approche car nos mesures sont comparables à celles du réseau Lig'Air, partenaire de notre projet. Avant d'optimiser les conditions de mesure des PM10 en vol, nous avons validé notre dispositif en suivant le niveau de PM10 à différentes hauteurs lors de l'émission contrôlée de poussières de cheminées. Enfin, nous avons assemblé un drone qui autorise un vol de 15 min et qui permettra de cartographier efficacement la pollution atmosphérique. Notre projet offre une approche innovante qui pourrait permettre un suivi précis géographiquement et en temps réel de la pollution atmosphérique.

LYCÉE ST CHARLES
31, avenue St Fiacre
45100 ORLÉANS
Tél. : 02.38.51.98.00

REMERCIEMENTS

Ce projet a été effectué au sein du lycée Saint-Charles sous la direction de Madame PERROT et en collaboration avec Corinne ROBIN et Abderrazak YAHYAOUI, responsables des études de Lig'Air ainsi qu'Alan URBAN, chercheur en neurosciences.

Nous remercions Madame Corinne ROBIN et Monsieur Abderrazak YAHYAOUI pour leur disponibilité et pour nous avoir reçus dans leurs locaux afin de nous faire découvrir leur réseau de mesures. Nous remercions également Monsieur Florent HOSMALIN, Responsable technique de Lig'Air pour les informations techniques qu'il nous a fournies au sujet des mesures des stations de leur réseau.

Nous tenons à remercier Monsieur Alan URBAN pour son implication dans le projet et pour l'aide qu'il nous a apportée sur la partie programmation du prototype.

Nous remercions également Madame Claire RUELLO, technicienne du laboratoire du lycée pour son soutien ainsi que pour la gestion des commandes de matériel.

Enfin, nous remercions Madame Pascale PERROT, directrice adjointe du lycée Saint-Charles, ainsi que Monsieur Frédéric LE NALIO, directeur du cours Saint Charles, qui nous ont soutenus dans la réalisation du projet.

INTRODUCTION

De nombreuses villes françaises et notamment Paris sont régulièrement touchées par des pics de pollution atmosphérique. Chaque année, plus de 2 millions de décès prématurés à travers le monde, sont attribués aux effets de la pollution de l'air. Parmi les nombreux polluants atmosphériques, on trouve notamment les microparticules.

Comment sont classifiées les microparticules ?

Notre projet s'intéresse aux particules en suspension désignées par l'abréviation PM (Particulate Matter).
Elles sont classées en fonction de leur diamètre aérodynamique (diamètre moyen d'une sphère qui possèderaient les propriétés aérodynamiques équivalentes) :

On distingue les **PM10**, particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm et les **PM2,5** aussi appelées particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm.

Quelle est l'origine et la composition des microparticules ?

Les particules peuvent être rejetées directement dans l'atmosphère (particules primaires) ou elles peuvent provenir de réactions photochimiques entre précurseurs gazeux (particules secondaires). À cause du trafic routier ou du vent, des particules déposées peuvent également être remises en suspension.
Les sources d'émission principales sont le chauffage résidentiel, les chantiers et BTP, le transport, les combustions industrielles … Leur origine est également naturelle : éruptions volcaniques, feux de forêt, érosion éolienne des sols …

La figure 1a montre un filtre neuf et un filtre après exposition du trafic tandis que la figure 1b. montre l'image d'un filtre obtenue grâce à un microscope électronique :

<u>Figure 1 :</u> a) Photo d'un filtre neuf et d'un filtre après une semaine d'exposition au trafic routier. **b)** image d'un filtre à particules placé le long d'une route par un microscope électronique. Les suies de diesel (en gris sur l'image) sont présentes de manière prédominante sur le filtre. Les particules indiquées en bleu sur l'image sont des poussières de combustion, les particules colorées en rose sont d'origine minérale et les cristaux, en vert, sont des sels. (Source : C.Trimbacher Umwelbundesamt Wien)

Quel est l'effet des microparticules sur la santé ?

Les microparticules ne sont pas arrêtées par la barrière du nez et pénètrent ainsi dans l'appareil respiratoire. De plus, les PM2,5 peuvent atteindre les ramifications les plus profondes de l'appareil respiratoire. Leurs effets sont comparables à ceux du **tabagisme passif**.

PM2,5	PM10
Affectation des voies respiratoires Augmentation du risque de maladies respiratoires chroniques et de la mortalité cardiopulmonaire Augmentation du cancer du poumon chez l'adulte.	Effets aigus sur les symptômes respiratoires et les maladies cardiovasculaires.
En Europe : **Perte d'espérance de vie moyenne à 9 mois** 386 000 décès prématurés 110000 hospitalsations graves annuelles	

Face à ce risque sanitaire, des normes à ne pas dépasser sont définies par l'OMS (tableau 1). Les critères nationaux de qualité de l'air sont également définis dans le Code de l'environnement français (similaires à l'OMS).

Polluant		Lignes directrices de l'OMS
PM2,5	Moyenne annuelle	10 µg/m^3
	Moyenne journalière	25 µg/m^3 (pas plus de 3 dépassement par an autorisés)
PM10	Moyenne annuelle	20 µg/m^3
	Moyenne journalière	50 µg/m^3(pas plus de 3 dépassement par an autorisés)

Tableau 1 : critères de qualité de l'air en fonction du type de particules

Comment sont actuellement mesurées les concentrations en microparticules ?

Des réseaux de surveillance de l'air sont mis en place dans toute la France. Dans la région Centre, il s'agit de Lig'Air que nous avons contacté afin de mieux comprendre les enjeux des mesures de la pollution atmosphérique. Ils disposent de stations de mesure fixes implantés selon la carte suivante :

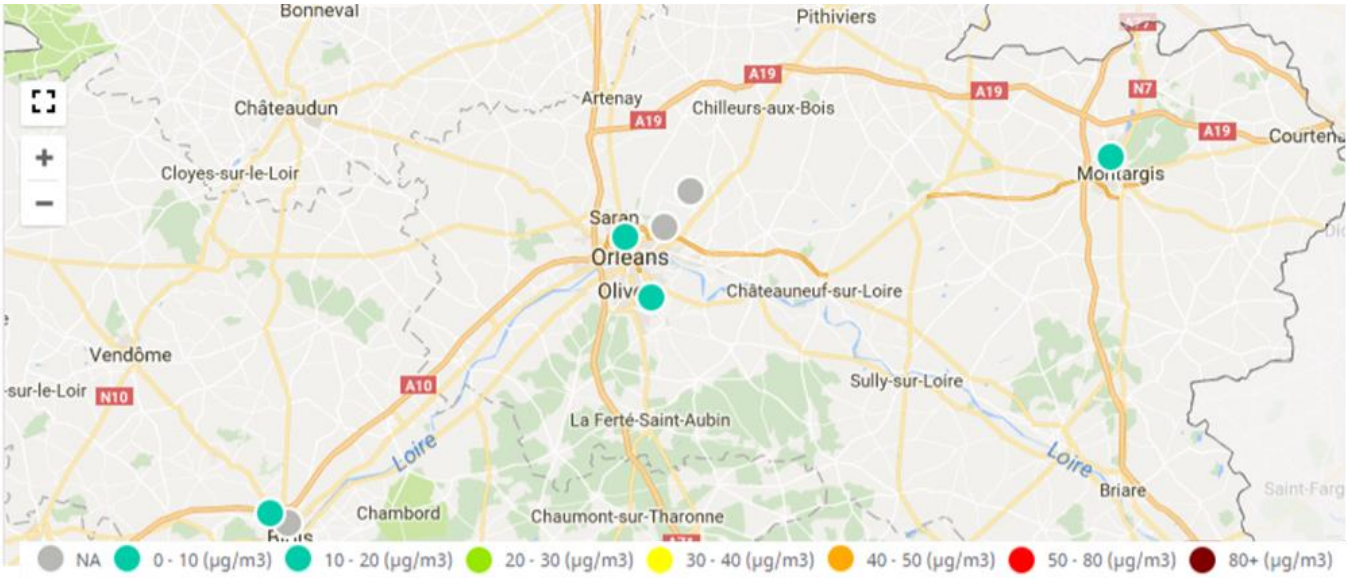


Figure 2 : Carte montrant les stations de mesures des concentrations en PM 10 (24/02/2017) aux environs d'Orléans

Les stations (fig. 3) sont fixes, situées à un mètre de hauteur par rapport au sol. Le principe de mesure est le suivant :

- L'air est aspiré et passe à travers un filtre sur lequel les particules se déposent.
- La concentration massique est alors mesurée par pesée gravimétrique (le filtre est pesé en continu) ou par jauge beta. Le filtre en verre est soumis à un rayonnement β. Un compteur Geiger mesure l'intensité du rayonnement transmis, l'absorption étant proportionnelle à la masse de matière rencontrée.
- La mesure transmise correspond à une moyenne calculée toutes les 15 minutes.

Figure 3 : photo d'une station de mesures de la concentration en PM10

Ce réseau présente deux limites :

- Il n'étudie pas l'évolution de la concentration en microparticules en fonction de la hauteur (intéressant dans l'élaboration des modèles de prévision de la pollution atmosphérique)
- Il ne s'adapte pas aux fluctuations en temps réel si un pic de pollution très localisé venait à se produire (incident tel qu'une explosion …). Il faudrait alors un dispositif mobile qui surveille particulièrement la zone concernée.

Notre problématique est donc :

Comment élaborer un dispositif mobile qui permette de rendre compte efficacement de la pollution aux microparticules ?

Pour répondre à la problématique, nous avons défini les **objectifs suivants** :

- Élaborer un module qui effectue les fonctions suivantes : mesure de la concentration en microparticules (PM10) ainsi que des facteurs qui influent la mesure : pression, température, hygrométrie. Pour connaître la position du module, nous avons ajouté un GPS.
- Effectuer des tests des capteurs de microparticules en environnement pollué.
- Monter le module sur un dispositif mobile : une perche télescopique dans un premier temps
- Élaborer le drone et l'équiper avec le module. Effectuer les acquisitions et les comparer avec les mesures de Lig'Air.

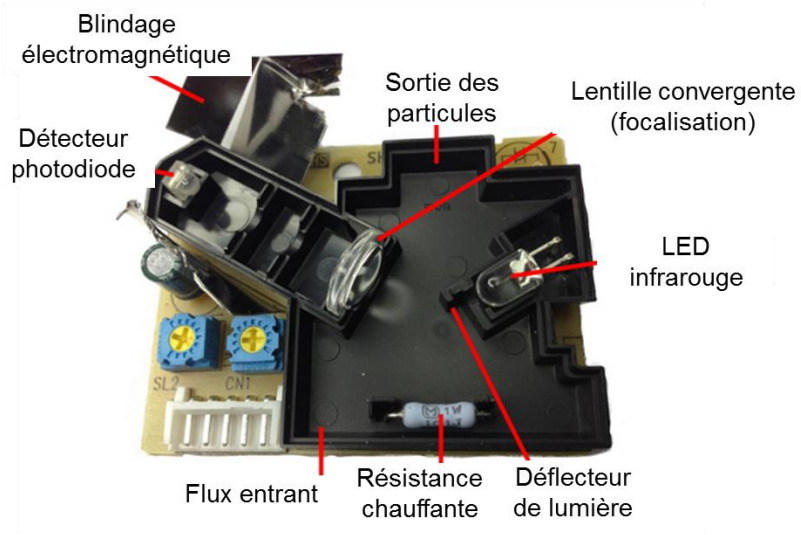
PARTIE 1 : Comment mesurer la concentration en microparticules ?

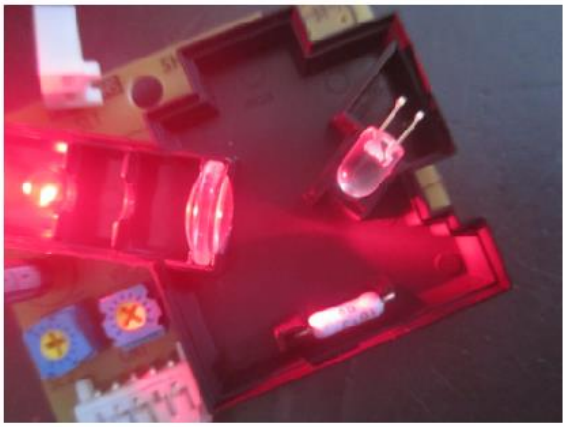
1.1. Choix du capteur de poussières : PPD42NS.

Nous avons choisi de travailler avec le Capteur de poussières (PPD42NS, Evola). Il permet de détecter les microparticules ayant un diamètre de 1 µm minimum et d'évaluer la concentration des PM10.

Température de fonctionnement : 0-45 °C
Taux d'humidité maximal : 95 %
Coût : 20 euros

La circulation de l'air dans le capteur se fait grâce à la **résistance chauffante** (figure 4) qui permet des mouvements de convection. Le capteur doit ainsi être positionné verticalement, la résistance chauffante en bas.





<u>Figure 4</u> : *à gauche* : composants du capteur de microparticules. *À droite* : la photo permet de visualiser le point focal de la lentille convergente. Une LED rouge est positionnée à la place du photodétecteur et de la fumée artificielle est pulvérisée afin d'observer le cône de lumière. En utilisant le principe du retour inverse de la lumière, le faisceau est bien focalisé au niveau du photodétecteur.

En présence de microparticules, le flux lumineux reçu par la photodiode diminue. Le temps pendant lequel l'intensité lumineuse est inférieure à une valeur seuil appelé Low Pulse Occupancy Time (LPOT) est mesuré, puis le rapport LPOT/temps d'échantillonnage (=30 s) est calculé et ensuite converti en nombre de particules par unité de volume (pcs : 1 particule/238 mL=0,01 cf avec cf= 1 cubic feet) en utilisant une courbe de calibration fournie par le constructeur (Fig. 5).

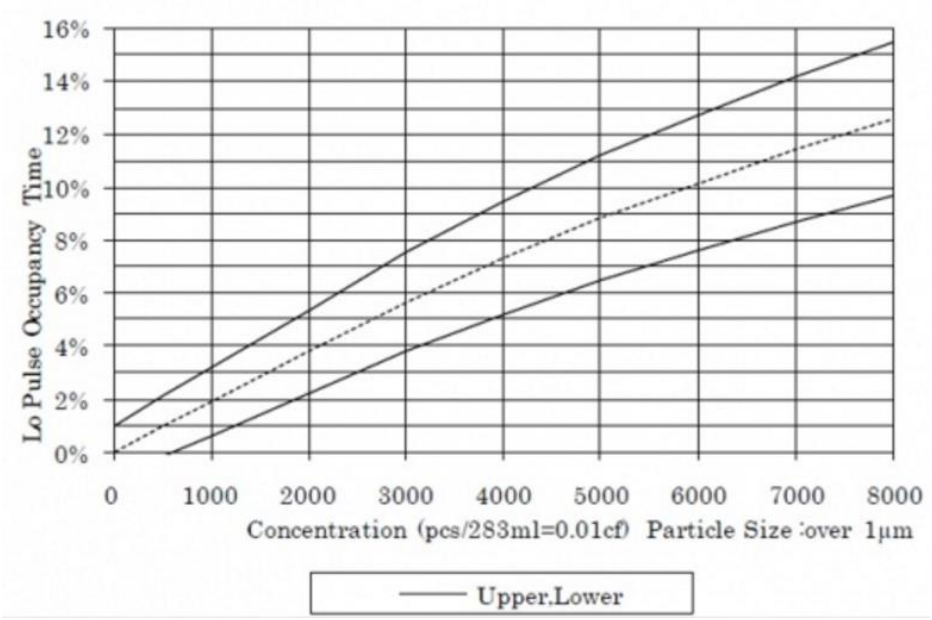


Figure 5 : graphe expérimental montrant le lien entre le ratio LPOT/temps d'échantillonnage et la concentration particulaire.

L'équation permettant d'obtenir la concentration particulaire connaissant le ratio LPOT/temps d'échantillonnage (Fig. 6) et que nous allons utiliser dans le code (extrait du code paragraphe 1.2.) est :

$$Concentration = 1{,}1 \times ratio^3 - 3{,}8 \times ratio^2 + 520 \times ratio + 0{,}62$$

On notera que quand l'affichage est 0,62, cela correspond à une mesure nulle.

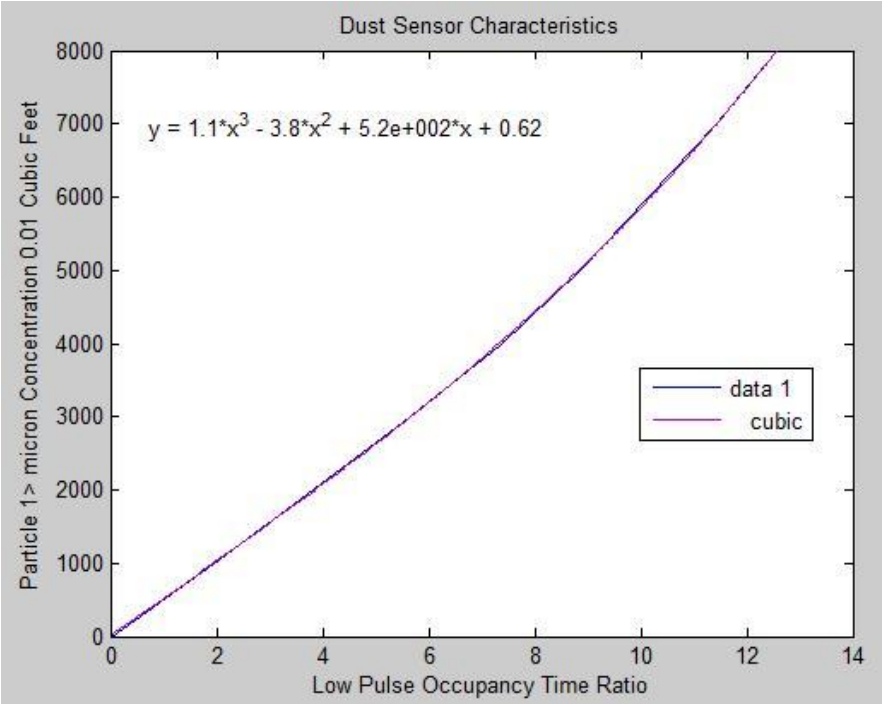


Figure 6 : modélisation de la concentration particulaire en fonction du *ratio*

La difficulté est de convertir cette mesure en concentration massique afin d'effectuer des comparaisons avec les réseaux de surveillance.

Un article publié dans Plos One en 2015 et qui cherche à évaluer les performances du capteur PPD42NS (*Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor*,

Austin E *et al*. PLOS ONE 10, 2015) a permis de montrer que les particules de diamètre compris entre 0,75µm et 6µm étaient détectées dans la limite de 1µg/m^3. Dans les expériences, l'air testé est composé successivement de billes calibrées en polystyrène de différents diamètres, ou d'un air pollué ASHRAE de particules de tailles polydisperses. Le graphe de la figure 7 montre le signal du capteur (LPOT) en fonction de la concentration massique des particules mesurée par un spectromètre de masse TSI Aerodynamic Particle Sizer (APS). Pour des concentrations inférieures à 50µg/m^3, on peut adopter un **modèle linéaire** (zone bleutée fig 7). On visualise le zoom de cette zone dans l'encart. À partir de 800 µg/m^3, on observe une saturation du capteur.

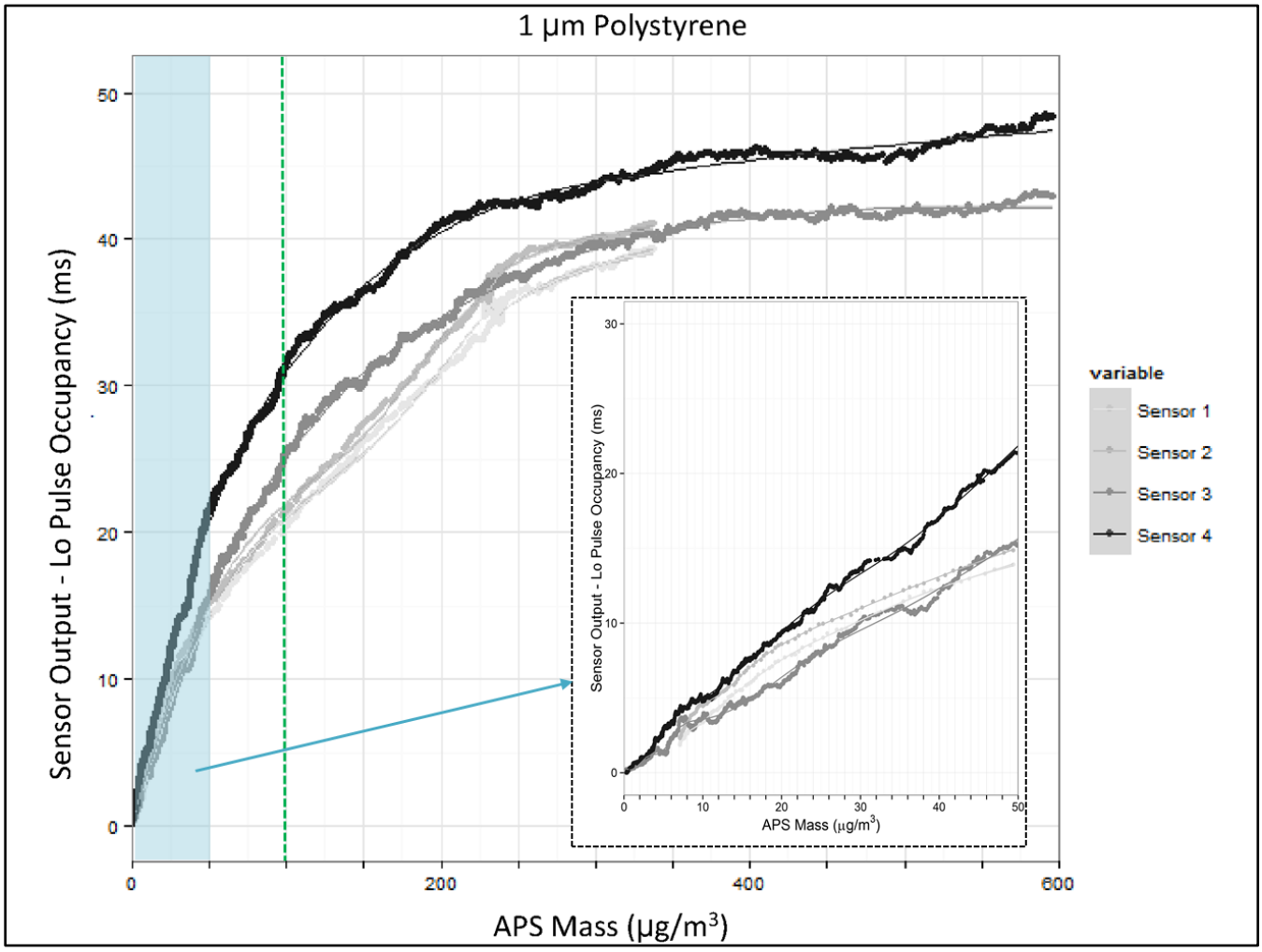


Figure 7 : Réponse du capteur pour des billes de polystyrène calibrées de 1µm de diamètre.

Le problème est que la régression linéaire dépend du diamètre de la particule comme le montre le tableau 2.

	Sensor 1	
	Slope	**adj. R2**
0.75 µm	1.02 ± 0.06	0.66
1.00 µm	3.05 ± 0.05	0.99
2.00 µm	5.13 ± 0.05	0.99
3.00 µm	12.00 ± 0.17	0.99
6.00 µm	12.43 ± 0.13	0.86
ASHRAE	5.40 ± 0.03	0.97

doi:10.1371/journal.pone.0137789.t001

Tableau 2 : pente de la régression linéaire entre 0 et 50 µg/m^3 en fonction du diamètre des particules.

Nous allons pour simplifier notre étude choisir comme pente de correction la pente d'un air pollué (ASHRAE) soit **5,40** ce qui permet d'alerter en cas de dépassement du seuil défini par l'OMS (50 µg/m^3) et du seuil d'alerte (80 µg/m^3) en étendant le modèle linéaire jusqu'à une concentration massique de 100 µg/m^3 (ligne en tirets verte de la figure 7). La figure 8 montre l'ordre de grandeur des concentrations massiques en microparticules le jour d'un pic de pollution.

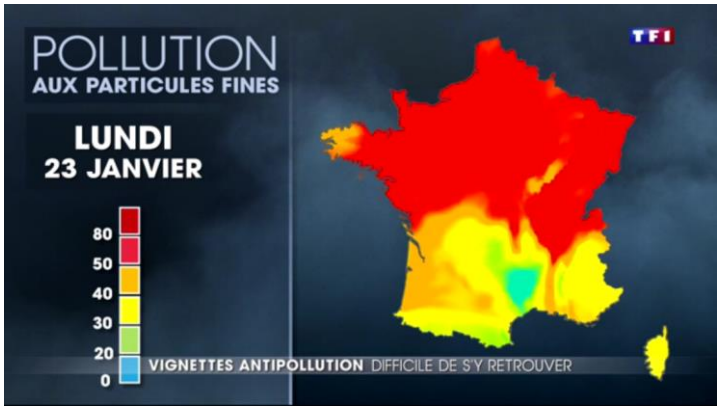


Figure 8 : carte de la France lors d'un pic de pollution

1.2. Arduino UNO

Nous commandons le capteur grâce à un microcontrôleur Arduino UNO. L'extrait de code ci-dessous montre comment nous avons calculé les valeurs de concentrations particulaires et de concentration massique.

```
duration = pulseIn(pin, LOW); //Initialisation du compteur de temps en microsecondes
lowpulseoccupancy = lowpulseoccupancy+duration; //Compteur

if ((millis()-starttime) > sampletime_ms)
{
ratio = (lowpulseoccupancy)/(sampletime_ms*10.0);
concentration = 1.1*pow(ratio,3)-3.8*pow(ratio,2)+520*ratio+0.62;
CM = ratio*30/100*5.40;
```

Toutes les 30 secondes = *sampletime_ms*
Calcul du rapport *(ratio)* pour en déduire par la 1ère technique la *concentration* (particulaire) grâce à une loi polynomiale.
Calcul de *CM*, la concentration massique calculée selon la régression linéaire utilisée pour les poussières ASHRAE.

1.3. Premières mesures : tests des performances du capteur dans un environnement pollué

Dans un premier temps, nous avons souhaité vérifier la pertinence de mesures en différentes altitudes.
Pour cela, nous avons recréé un environnement pollué en dispersant des cendres de cheminée dont nous avons déterminé la répartition en microparticules au préalable.

a) Détermination de la composition des cendres de cheminée

Après disposition des cendres sur une lame, nous les observons au microscope optique (grossissement x1000) puis nous analysons l'image obtenue avec le logiciel ImageJ (fig. 9) qui permet de décompter le nombre de particules en fonction de leur taille. L'échelle est donnée grâce au disque dont le diamètre est connu et vaut 70 µm.

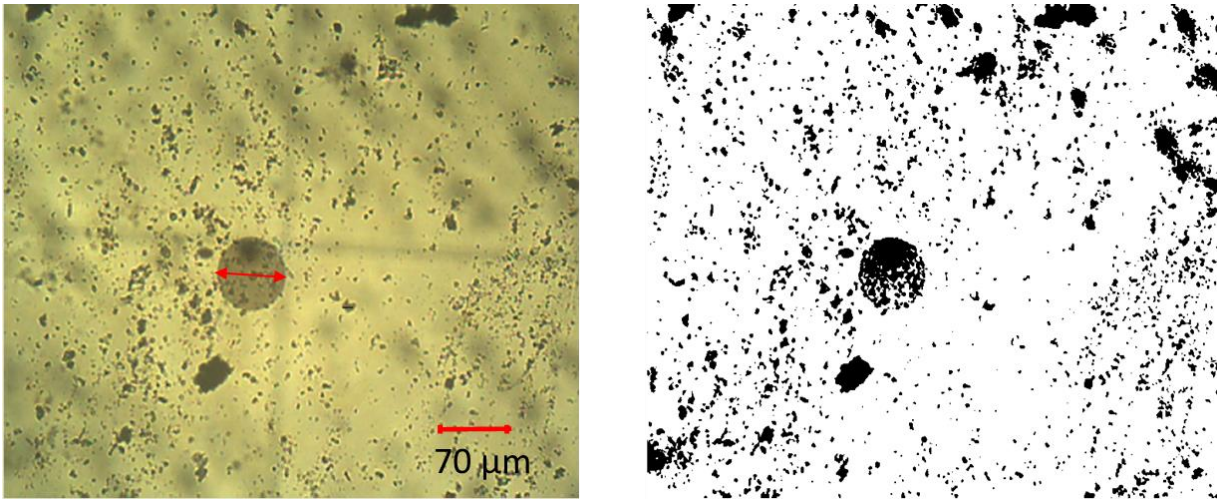


Figure 9 : image de la cendre (x1000) – à gauche - puis analysée par ImageJ -à droite –

Nous exportons les résultats sur Excel ce qui nous permet d'obtenir le décompte du tableau puis de tracer l'histogramme de la figure 10.

Diamètre d (µm)	Nombre
d<0,75	1363
0,75<d<1	38
1<d<2	58
2<d<3	19
3<d<4	4
4<d<5	4
5<d<6	2
6<d<7	2
7<d<8	2
10<d<25	7
TOTAL	1499

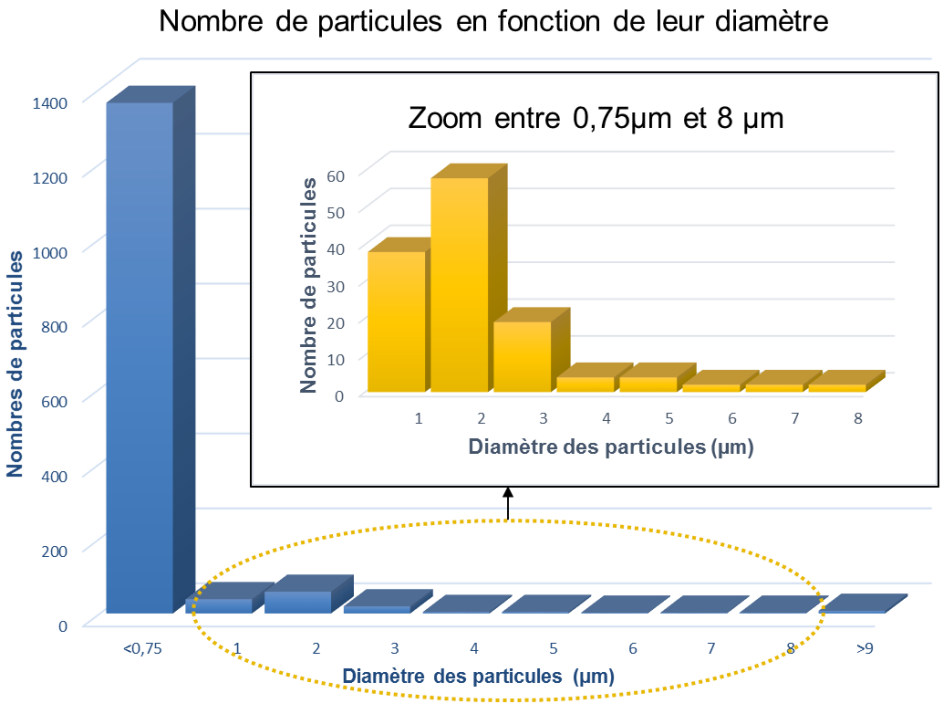


Figure 10 : histogramme des particules contenues dans l'échantillon de cendre

Sur les 1499 particules contenues dans l'échantillon, la plupart (1363) ne seront pas détectées par le capteur car leur taille est trop petite (inférieure à 0,75 µm). Parmi les particules détectables par le capteur, la majorité appartiennent à la catégorie des PM2,5, les plus nocives.

b) Création d'un environnement pollué

Nous avons élaboré une cuve dotée d'un ventilateur alimenté par des piles (fig. 11).
Nous insérons à l'intérieur les cendres de cheminée puis nous mettons en marche le moteur.

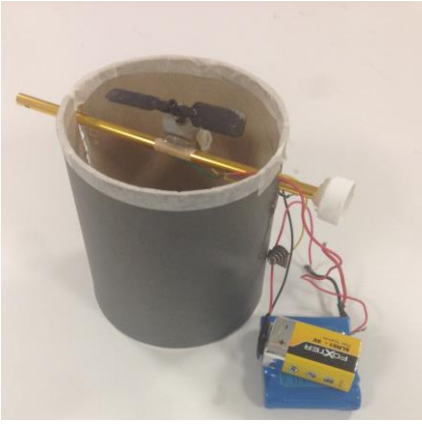


Figure 11 : photo de l'émetteur de microparticules

Les mesures sont effectuées à l'aide du capteur PPD42 NS tous les 50 cm (tableau 3). Les mesures incohérentes sont éliminées et les résultats sont affichés pour des moyennes de 5 mesures. Le temps d'intégration du capteur est de 30 s.
Les mesures sont ici données en nombre de particules par unité de volume (1 pcs = 1 particule/238 mL) car les concentrations au voisinage de l'émetteur sont trop élevées et il faudrait utiliser un modèle non linéaire pour calculer la concentration massique.

hauteurs (cm)	Concentration pcs Sans émetteur	Concentration µg/m3 Sans émetteur	Concentration pcs Avec émetteur	Concentration µg/m3 Avec émetteur
0	1123	3,52	430 763	
50	859	2,69	56 640	
100	479	1,5	43 446	1143 - Modèle linéaire erroné
150	951	2,98	4 205	111
200	759	2,38	2 863	75
250	1293	4,05	1 118	29
300	1155	3,62	390	10

Tableau 3 : mesures effectuées à différentes altitudes d'un émetteur de microparticules

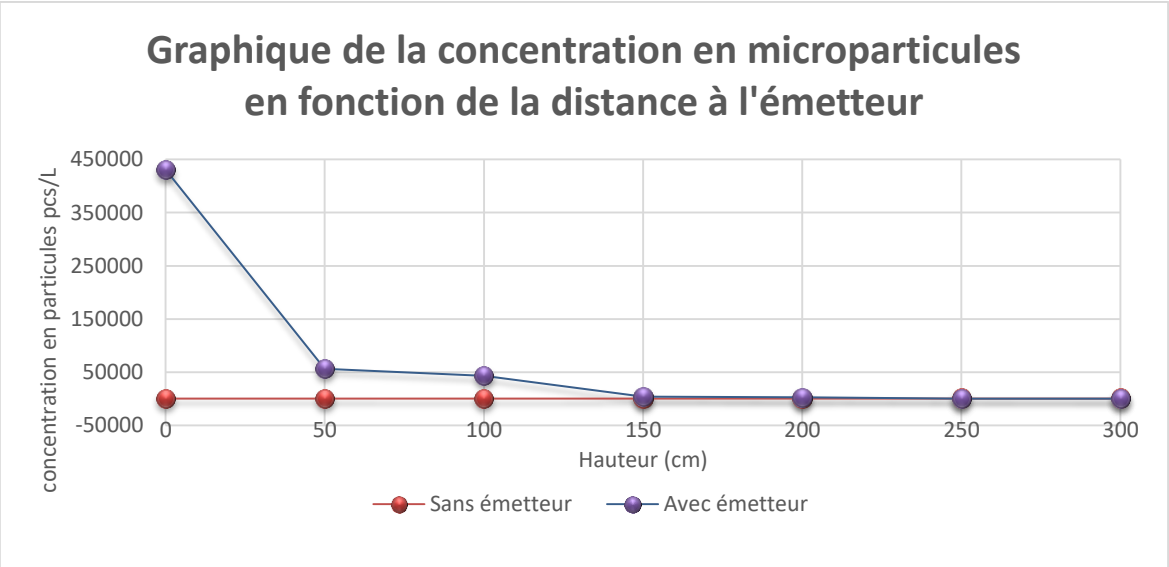


Figure 12 : graphique montrant l'évolution de la concentration particulaire en fonction de la distance à l'émetteur

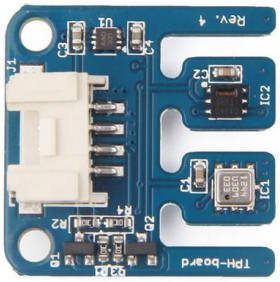
On observe une décroissance attendue quand on s'éloigne de l'émetteur (fig. 12). Une approche plus fine aurait été d'observer la décroissance en fonction de la taille des particules ce qui aurait nécessité des détecteurs plus précis et onéreux.

PARTIE 2 : Construction du module

Une fois les tests préliminaires réalisés, nous avons monté un module équipé des capteurs décrits ci-dessous.

- ***Capteur température, pression, hygrométrie : TPH board rev. 4.***

Alimentation : 3,3 – 5 V
Intervalles de mesure :
Pression : 300 à 1100 hPa +/-0.12hPa
Humidité : 0 à 100% +/-0.04%
Température : -40°C à +85°C
Coût : 30 euros



- ***GPS GROVE V1.2***

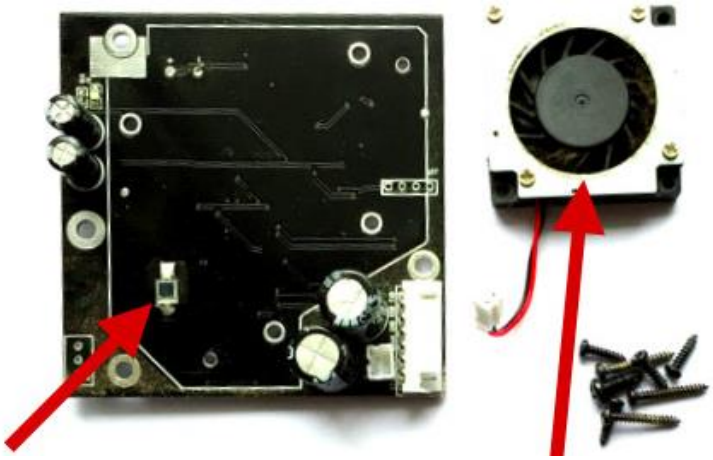
Il renvoie les coordonnées GPS (on peut ensuite localiser l'endroit via le site coordonnées-gps par exemple) ainsi que l'heure de la mesure.
(IMPRESSION ECRAN)
Alimentation : 3,3 – 5 V
Coût : 30 euros

- ***Capteur de microparticules PPD42NS***

- ***Capteur de microparticules NOVAPM SDS 011.***

Nous avons choisi d'ajouter un deuxième capteur de microparticules. Ceci afin de vérifier la cohérence de nos mesures. La deuxième raison est que ce capteur est équipé d'une pompe avec ventilateur. L'intérêt de ce dispositif est l'utilisation d'un ventilateur à la place de la résistance chauffante, ce qui crée un flux d'air plus efficacement. Il permet également de mesurer directement les concentrations massiques en PM2,5 et en PM10.

- Intervalle de mesure : 0.0-999.9µg/m3
- Tension d'alimentation : 5V
- Temps de réponse : 1 seconde
- Erreur relative :10%
- Intervalle de température :--20 à 50°C
- Coût : 45 euros



Diode Ventilateur

Nous avons utilisé une **platine GROVE Base Shield** afin de faciliter les branchements à l'Arduino. La première version 1.0 du module a permis d'effectuer des tests pour vérifier la validité des mesures (en annexe 1). Nous avons ensuite compacté le module (fig. 13) et nous l'avons enfermé dans une boîte afin qu'il résiste aux intempéries V2.0. Des trous au niveau du capteur de température ont été effectué afin que la température mesurée soit bien celle de l'air extérieur. En annexe 2 se trouvent des photos complémentaires du module.

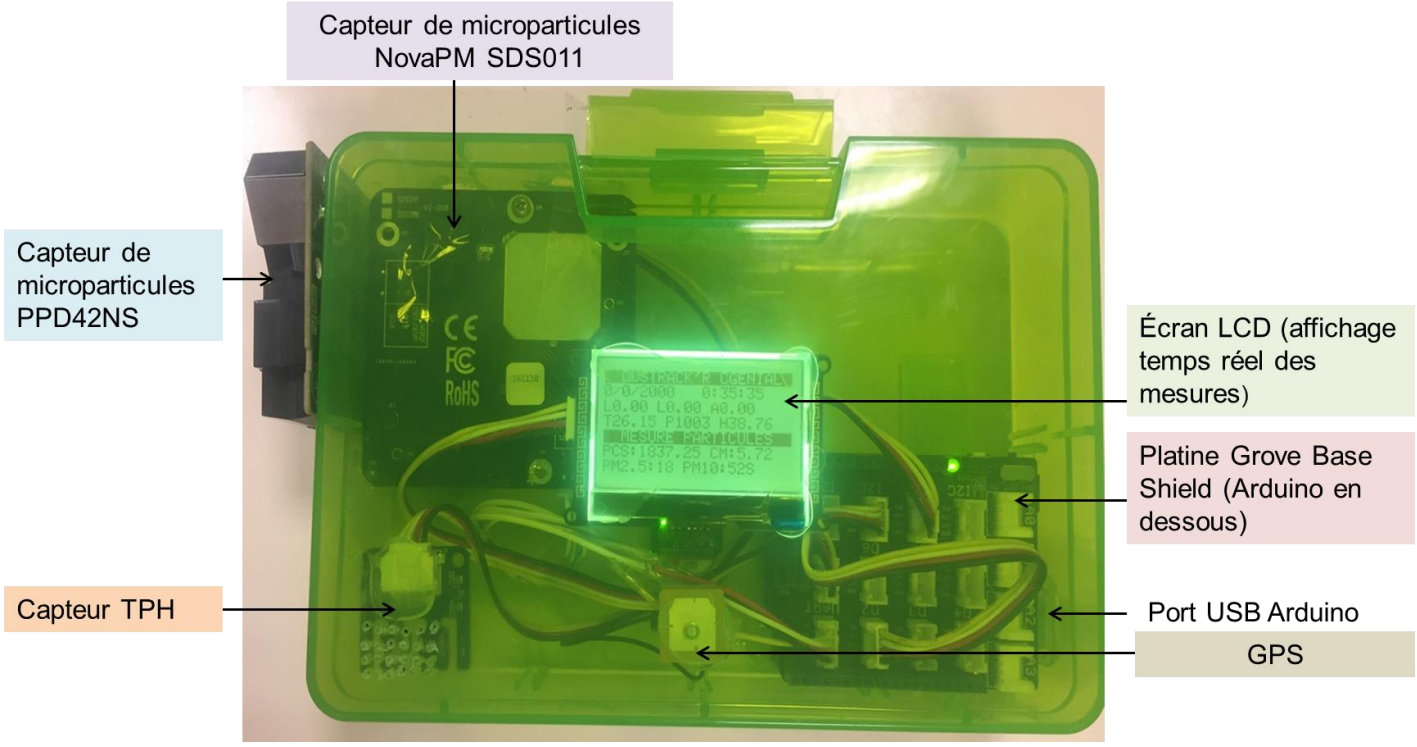


Figure 13 : module permettant les mesures des concentrations en PM10 et des facteurs qui influent

Les données brutes sont imprimées sur l'écran LCD (fig.14) et sont également renvoyées à l'ordinateur grâce à la carte Arduino.

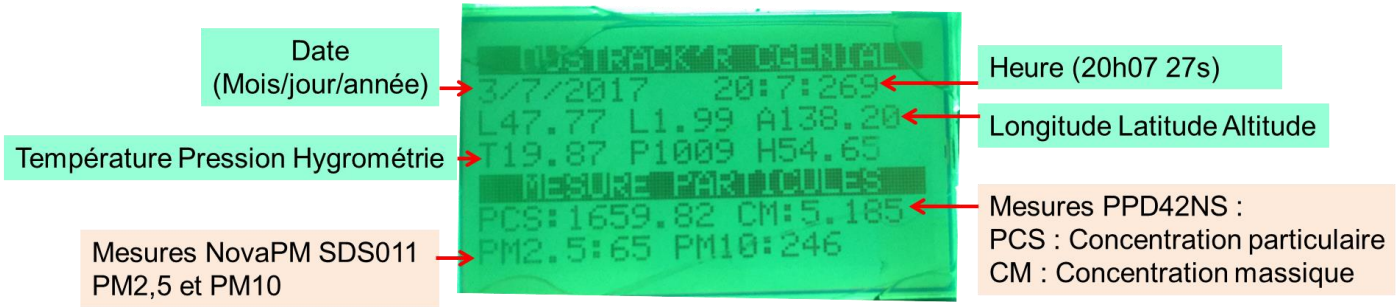


Figure 14 : photo de l'écran LCD du module

PARTIE 3 : tests du module

3.1 Tests en intérieur avec une concentration en microparticules constante

Afin d'évaluer les fluctuations de mesures des capteurs, nous avons mesuré toutes les 30 secondes et pendant 5 heures (640 mesures) les concentrations en PM10 et en PM2,5 le cas échéant avec les deux capteurs. La pression (1000 hPa), l'hygrométrie (48%) et la température (22°C) sont restées stables. Les données brutes sont en annexe 3.
Les résultats obtenus avec le capteur PPD42NS sont présentés sur la figure 15.

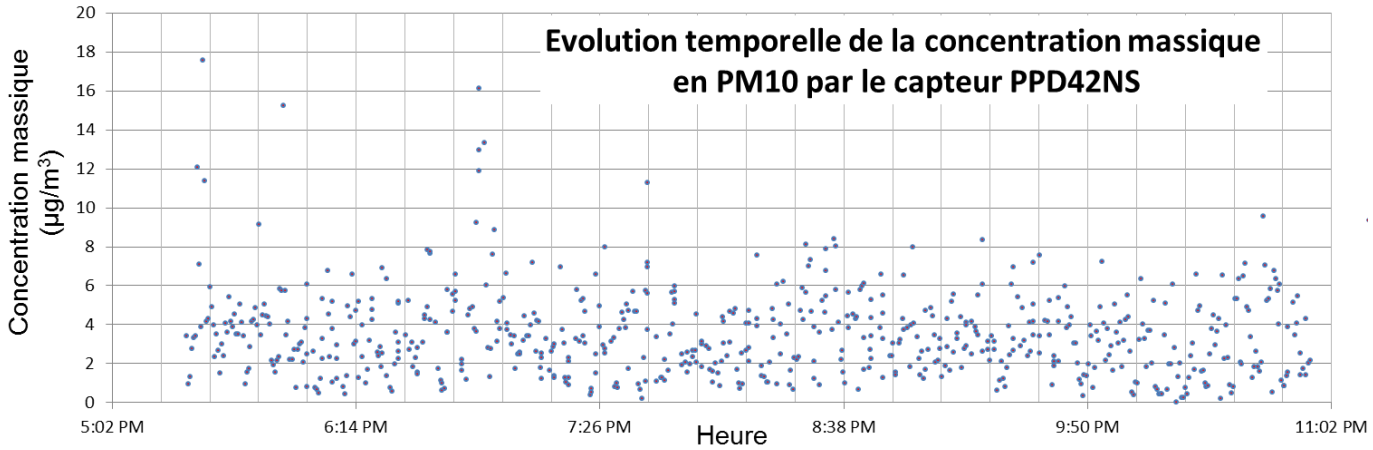


Figure 15 : graphe montrant l'évolution temporelle de la concentration massique en PM10 en intérieur obtenue avec le capteur PPD42NS

Moyenne : 3,5 µg/m^3
Ecart type : 2,2 µg/m^3
On remarque d'importantes fluctuations liées à la qualité relativement faible du capteur. Les capteurs officiels indiquaient une concentration en PM10 comprise entre 4 et 5 µg/m^3 sur ces horaires ce qui donne du sens aux valeurs mesurées.

Les mesures avec le capteur NovaPM (fig. 16) renvoient des valeurs dont l'unité est arbitraire et que nous noterons UA. Il permet de différencier les concentrations massiques en PM2,5 et en PM10.

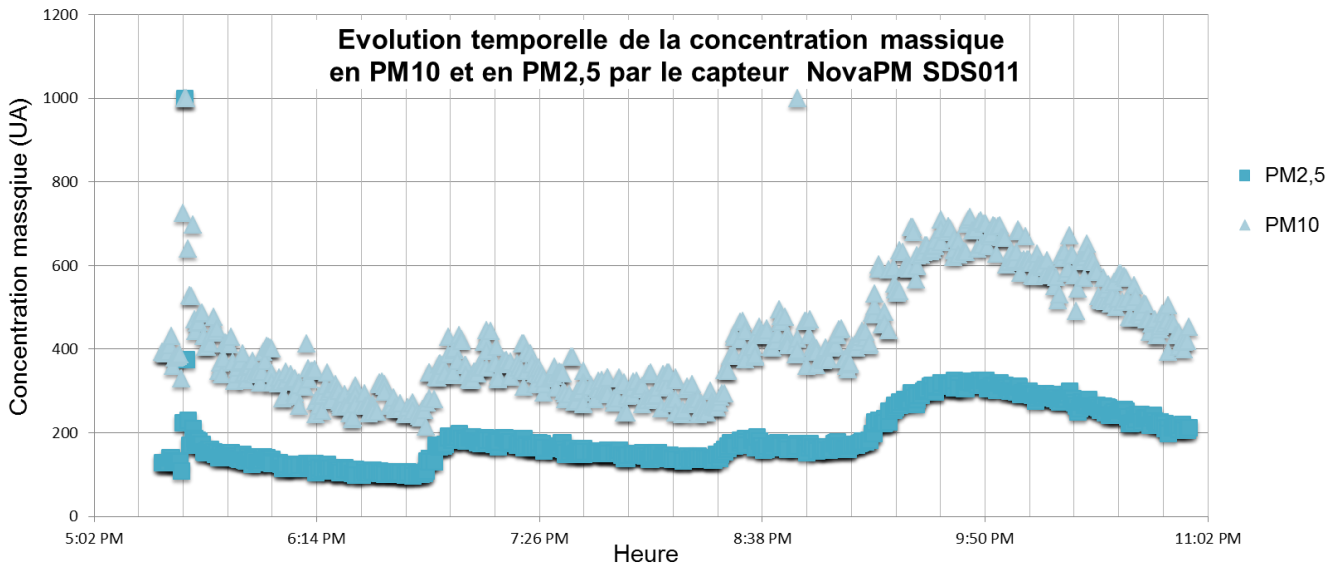


Figure 16 : graphe montrant l'évolution temporelle de la concentration massique en PM10 et en PM2.5 en intérieur grâce au capteur NovaPM SDS011

Nous observons ici encore d'importantes fluctuations comme le montre les valeurs des écarts types.

	PM2,5	PM10
Moyenne (UA)	189	422
Ecart type (UA)	72	136

3.2 Mesures en extérieur à Orléans et ses environs

Dans un premier temps, nous avons choisi d'utiliser comme support une perche télescopique dont la hauteur est de 3 mètres (photo ci-contre).
Nous avons choisi trois endroits : le centre ville d'Orléans (place du Martroi), le Zénith d'Orléans (proche de la RN20 très encombrée) et la campagne (Saint Cyr en Val) comme on le voit sur la carte ci-dessous (fig. 17).

Figure 17 : carte montrant les différents lieux où ont été effectuées les mesures

Les mesures sont répertoriées dans le tableau 4 (il s'agit de moyennes sur 10 mesures) :

Lieux	CM ($\mu g/m^3$)	PM2,5 (UA)	PM10 (UA)	T (°C)	P (hPa)	hygrométrie (%)
Campagne	3,7	44	213	11	1008	55
Martroi	5,4	57	271	12	1008	55
Zenith	3,5	84	298	11	1008	55

Tableau 4 : tableau des mesures en extérieur obtenues en moyennant 10 valeurs. CM est mesurée par le capteur PPD42NS (mesure grise non cohérente) et PM2,5 et PM10 sont mesurées par le capteur NovaPM SDS011.Mesures du 07/03/2017.

Nous remarquons que le capteur PPD42NS est peu sensible contrairement au NovaPM. Ce manque de sensibilité rend peu intéressantes les mesures à différentes altitudes dans un environnement habituel (on ne remarque pas de variations). Par contre, on note bien une augmentation des concentrations massiques lorsqu'on se situe proche des axes routiers ce qui concorde avec les observations d'AirParif (Paris) qui dispose de stations dédiées à la surveillance du trafic routier.

PARTIE 4. Construction du drone

La dernière étape a constitué en l'élaboration du drone que nous avons construit afin de limiter le coût (150 euros) et de le paramétrer plus finement en fonction de nos besoins.

Pour commencer la construction nous avons commencé par découper des *profilers* (fig. 18) en aluminium de 60cm. Nous les avons maintenus par deux plaques en aluminium afin d'avoir une structure solide et pas trop lourde (350g).

Ensuite nous avons soudé les fils aux 4 moteurs brushless A2212.

Les moteurs sont commandés par des contrôleurs « Electric Speed Controller ». En effet, pour stabiliser le drone lors de son vol et qu'il reste horizontal, on modifie la vitesse de certains des 4 moteurs. Pour effectuer ces réglages, le drone est équipé d'un accéléromètre et d'un gyroscope (modèle GY-521). Ces derniers envoient les données à la carte Arduino qui commande en retour la vitesse des moteurs.

Pour piloter le drone à distance, nous connectons à la carte Arduino l'émetteur de la télécommande Fly Sky FS-T6.

Enfin, nous avons installé une batterie lipo zippy compact. Pour vérifier que la tension de la batterie ne soit pas trop faible, afin d'éviter sa dégradation et de prévenir une chute du drone, nous avons installé un *Voltage Buzzer Alarm*.

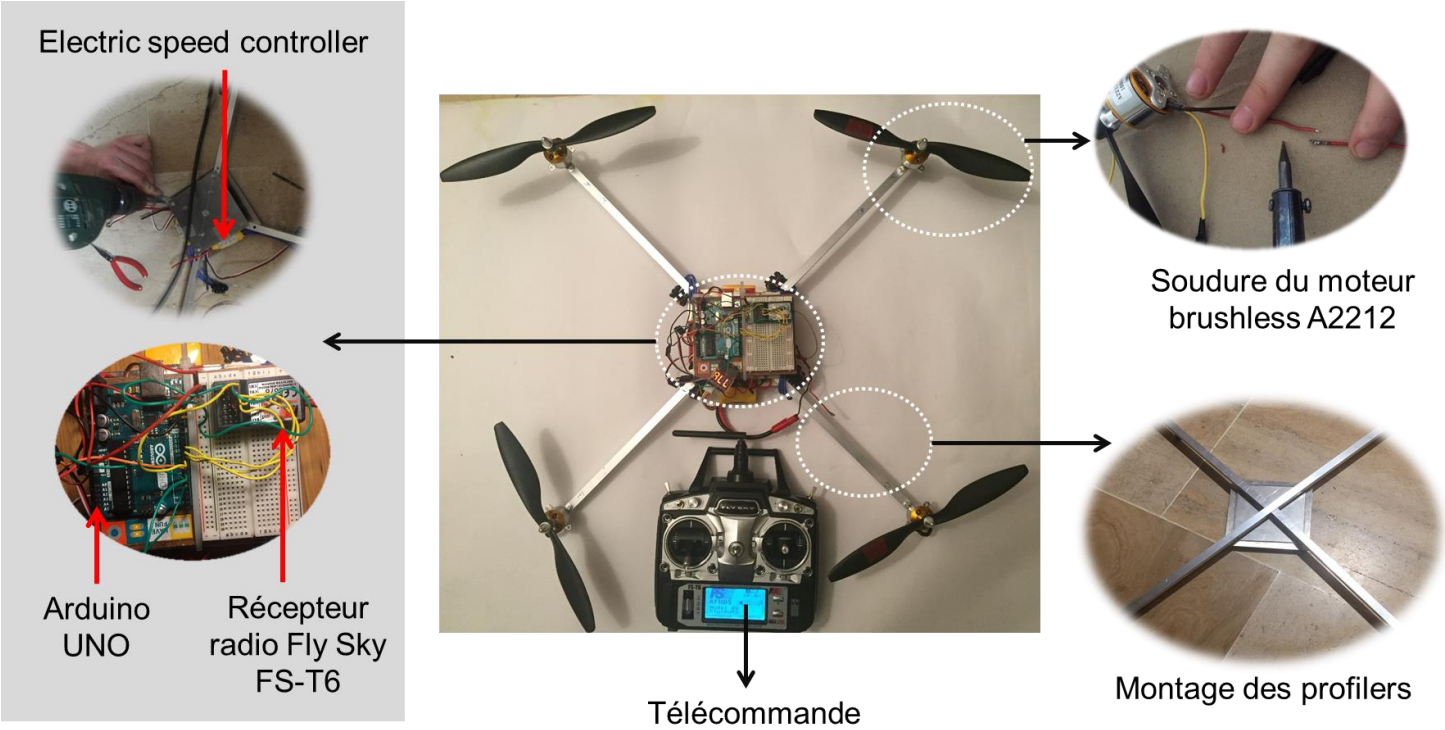


Figure 18 : drone et les différentes étapes de contruction

Caractéristiques du drone quadricoptère :

Masse totale	1160 grammes
Temps de vol (lié à la capacité de la batterie)	15 minutes
Portée de la télécommande	50 mètres
Moteurs brushless A2212 (x4)	1000 tours/min
Batterie lipo zippy compact	Capacité 3700 mAh
Masse maximale	800 g

Bilan de l'avancement actuel

Pour le moment, le drone vole (fig. 19) mais nous avons des difficultés à le stabiliser. Nous travaillons sur les réglages PID, délicats à régler car chaque paramètre agit l'un sur l'autre. Le but est de maintenir l'horizontalité et la direction du vol en limitant les oscillations (**PID** : car les corrections se font de manière :

Proportionnelle
Intégrale
Dérivative

} Par rapport au paramètre Δ = écart entre la sortie mesurée et l'entrée désirée

Ensuite, nous devrons étudier les flux d'air du drone et plus précisément ceux engendrés par les hélices afin d'optimiser la position du module pour ne pas avoir trop de perturbations dans les mesures de concentrations massiques. Nous espérons ainsi mesurer des concentrations relatives afin d'évaluer la pollution dans les environs d'un émetteur important (lors d'une explosion par exemple) et comprendre l'évolution de la répartition des microparticules dans l'espace et dans le temps. Une autre utilisation du drone serait de l'utiliser comme un capteur mobile et d'effectuer les mesures à l'arrêt afin d'éliminer la problématique des flux d'air.

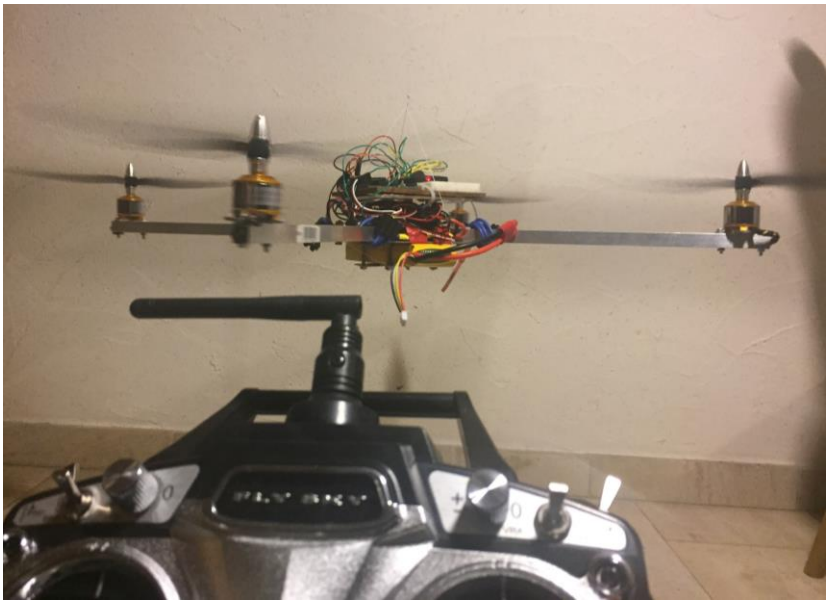
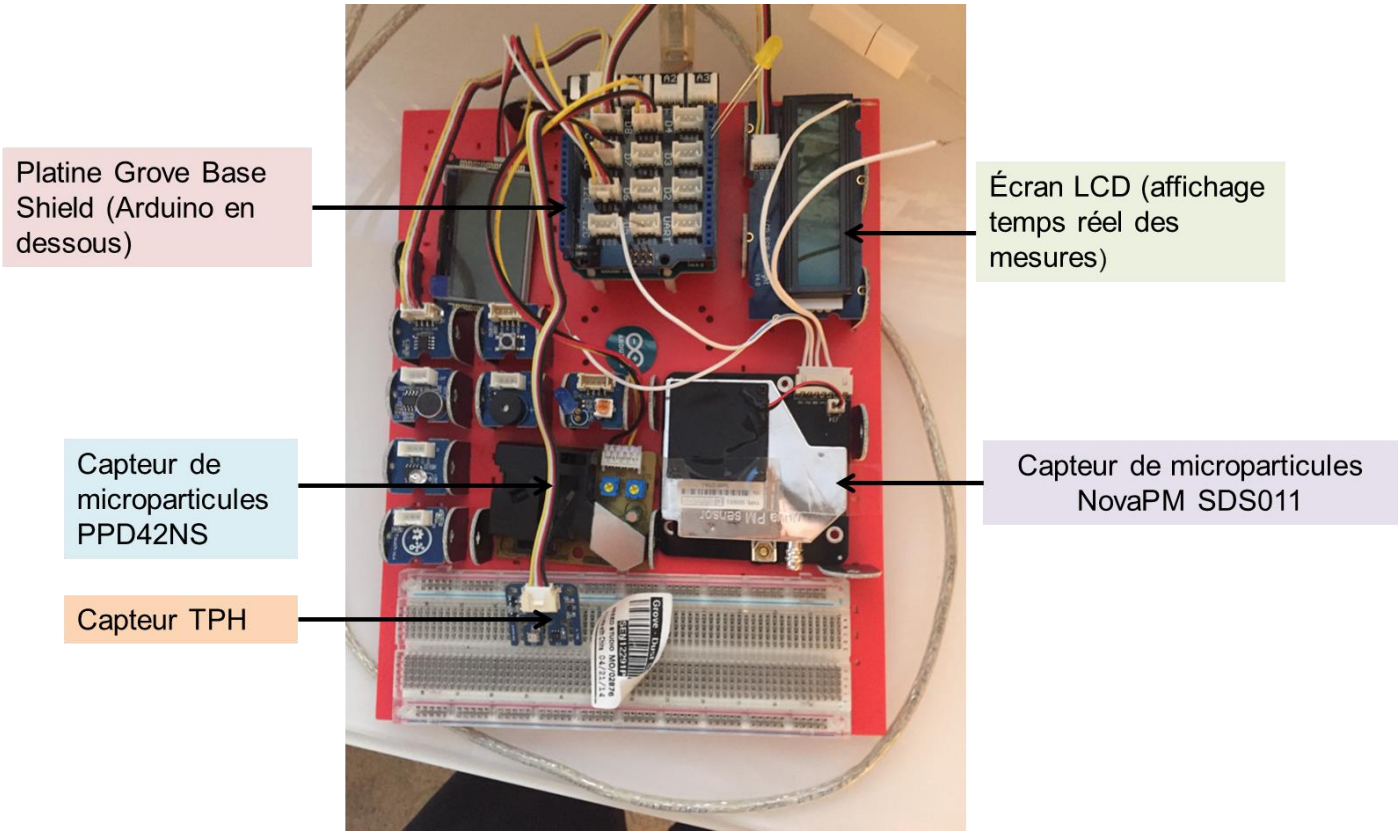


Fig. 19 : photo du drone

CONCLUSION et PERSPECTIVES

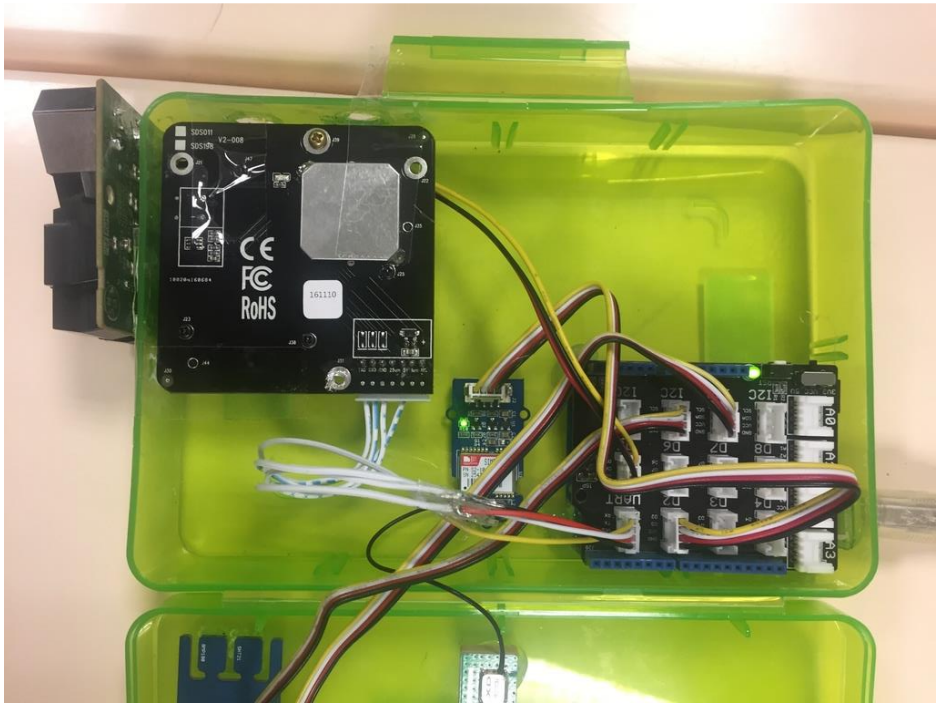
Afin de renforcer le réseau de surveillance de la pollution atmosphérique de la région centre uniquement constitué de stations fixes, nous avons élaboré un module pouvant être fixé sur un dispositif mobile. Ce module, équipé d'un GPS permet de mesurer la concentration massique en PM10 et en PM2,5, la température, la pression et l'hygrométrie. Ceci est rendu possible grâce à un microcontrôleur Arduino. Les tests effectués en extérieur et en intérieur ont permis de montrer que nos mesures étaient en accord avec celles des réseaux de surveillance (capteur PPD42NS) mais nous devons calibrer le deuxième capteur afin d'interpréter quantitativement les données qu'il renvoie. Ils ont aussi permis de montrer l'intérêt d'un dispositif mobile dans le cadre d'une pollution intense et localisée car les variations de concentration sont alors conséquentes. Enfin, le drone est en phase de finalisation et devrait permettre d'effectuer les mesures de manière dynamique. Une seconde version du prototype inclura des capteurs plus fiables afin d'observer des fluctuations moindres et l'implémentation de modèles mathématiques afin de tenir compte des valeurs de la température, de l'hygrométrie et de la pression et de corriger les valeurs mesurées.

ANNEXE 1 : prototype V1.0

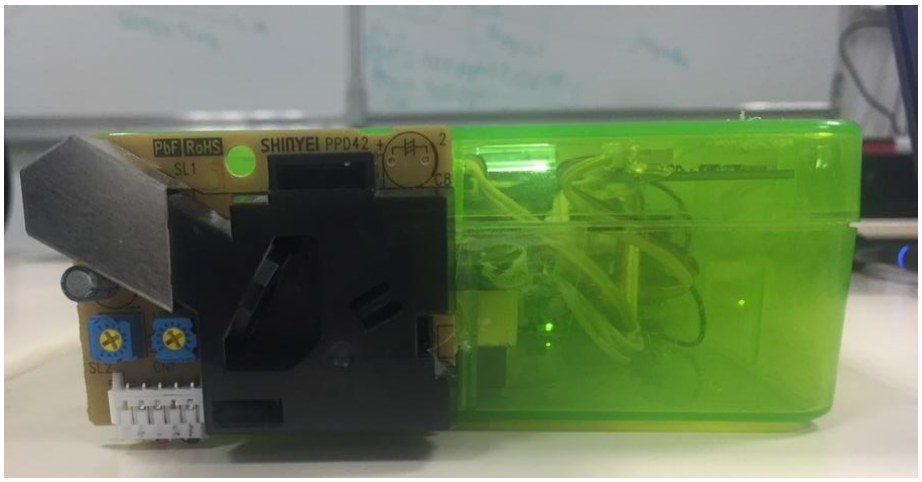


ANNEXE 2 : photos du module

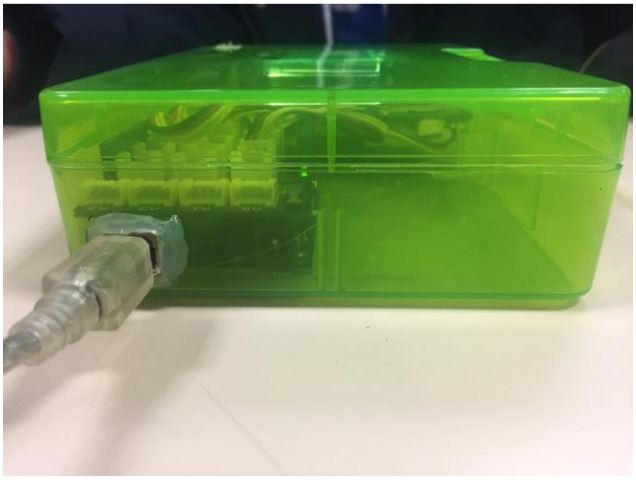
Capteur Nova PM SDS0111 + Arduino et platine GROVE



Capteur PPD42NS



Port USB



ANNEXE 3 : mesures brutes

- **Mesures brutes en intérieur**

Heure	T°C	Patm	Hygro	LPOT	Ratio	PCS	CM	PM2,5	PM10	Date
17:23:54	22,34	993	46,32	964070	3,21	1668,94	5,21	127	395	0/0/2000
17:24:25	22,34	993	46,49	635864	2,12	1096,19	3,43	128	393	0/0/2000
17:24:57	22,34	993	46,39	176045	0,59	304,68	0,95	128	391	0/0/2000
17:25:28	22,34	993	46,42	244583	0,82	422,63	1,32	128	389	0/0/2000
17:25:59	22,32	993	46,35	508595	1,7	876,62	2,75	128	392	0/0/2000
17:26:31	22,33	993	46,35	618843	2,06	1066,77	3,34	129	394	03/05/2017
17:27:03	22,32	993	46,39	633122	2,11	1091,45	3,42	141	408	03/05/2017
17:27:34	22,35	993	47,47	2232950	7,44	4114,14	12,06	140	430	03/05/2017
17:28:05	22,41	993	47,77	1315432	4,38	2300,38	7,1	133	360	03/05/2017
17:28:36	22,43	993	46,61	718038	2,39	1238,53	3,88	130	379	03/05/2017
17:29:07	22,49	993	46,41	3251354	10,84	6590,26	17,56	131	381	03/05/2017
17:29:38	22,56	993	46,11	2107614	7,03	3847,68	11,38	131	383	03/05/2017
17:30:10	22,6	993	45,88	769227	2,56	1327,51	4,15	130	387	03/05/2017
17:30:41	22,64	993	45,98	794039	2,65	1370,73	4,29	109	330	03/05/2017
17:31:12	22,67	993	45,77	1102673	3,68	1915,2	5,95	225	725	03/05/2017
17:31:43	22,71	993	46	911958	3,04	1577,13	4,92	999	999	03/05/2017
17:32:15	22,73	993	45,7	734154	2,45	1266,52	3,96	375	999	03/05/2017
17:32:46	22,78	993	45,64	436222	1,45	752,09	2,36	230	640	03/05/2017
17:33:18	22,8	993	45,64	651259	2,17	1122,81	3,52	171	528	03/05/2017
17:33:49	22,81	993	45,64	498118	1,66	858,58	2,69	170	527	03/05/2017
17:34:21	22,82	993	45,54	277488	0,92	479,22	1,5	210	697	03/05/2017
17:34:50	22,81	993	45,37	551879	1,84	951,2	2,98	187	471	03/05/2017
17:35:22	22,81	993	45,27	440451	1,47	759,36	2,38	177	443	03/05/2017
17:35:54	22,81	993	45,37	749418	2,5	1293,05	4,05	182	462	03/05/2017
17:36:25	22,81	993	45,37	670126	2,23	1155,47	3,62	181	465	03/05/2017
17:36:56	22,81	993	45,44	1001806	3,34	1735,67	5,41	173	485	03/05/2017
17:37:26	22,77	993	45,44	769750	2,57	1328,42	4,16	173	487	03/05/2017
17:37:58	22,73	993	45,47	715574	2,39	1234,26	3,86	155	430	03/05/2017
17:38:30	22,71	993	45,54	839223	2,8	1449,62	4,53	153	404	03/05/2017
17:39:01	22,68	993	45,57	645612	2,15	1113,05	3,49	156	405	03/05/2017
17:39:32	22,66	993	45,71	646752	2,16	1115,02	3,49	161	412	03/05/2017
17:40:04	22,66	993	45,71	934091	3,11	1616,08	5,04	161	412	03/05/2017
17:40:35	22,66	993	45,77	765278	2,55	1320,63	4,13	152	439	03/05/2017
17:41:06	22,66	993	45,74	630577	2,1	1087,05	3,41	154	476	03/05/2017
17:41:38	22,65	993	45,74	175784	0,59	304,23	0,95	149	441	03/05/2017
17:42:10	22,64	993	45,77	283911	0,95	490,26	1,53	153	449	03/05/2017
17:42:42	22,63	993	45,74	320432	1,07	553,04	1,73	141	347	03/05/2017
17:43:12	22,62	993	45,74	526848	1,76	908,06	2,84	148	367	03/05/2017
17:43:43	22,61	993	45,77	774425	2,58	1336,56	4,18	141	340	03/05/2017
17:44:15	22,58	993	45,77	784187	2,61	1353,56	4,23	145	378	03/05/2017
17:44:46	22,57	993	45,84	896052	2,99	1549,19	4,84	147	414	03/05/2017
17:45:17	22,55	993	45,94	736326	2,45	1270,29	3,98	148	413	03/05/2017
17:45:48	22,55	993	45,98	1691618	5,64	3009,15	9,13	148	412	03/05/2017
17:46:19	22,54	993	46,01	640052	2,13	1103,43	3,46	148	411	03/05/2017
17:46:51	22,51	993	45,99	827263	2,76	1428,71	4,47	152	428	03/05/2017

- **Place du Martroi**

Heure	T°C	Patm	Hygro	LPOT	Ratio	PCS	CM	PM2,5	PM10	Date	Longitude	Latitude	Altitude
12:09:30 PM	12,58	1008	53,49	1503868	5,01	2650,4	8,12	60	282	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:09:30 PM	12,28	1008	54,01	1400292	4,67	2456,87	7,56	69	310	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:09:30 PM	12,21	1008	54,75	356032	1,19	614,23	1,92	65	269	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:06 PM	11,61	1008	55,39	212845	0,71	368,03	1,15	62	294	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:06 PM	11,4	1008	56	366014	1,22	631,39	1,98	62	295	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:45 PM	11,44	1008	56,54	837934	2,79	1447,36	4,52	56	225	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:45 PM	11,48	1008	56,45	1234726	4,12	2153,13	6,67	53	223	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:45 PM	11,26	1008	56,4	1387607	4,63	2433,36	7,49	49	258	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:45 PM	11,73	1008	56,28	1416439	4,72	2486,85	7,65	49	258	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4
12:14:45 PM	12,31	1008	54,58	1339320	4,46	2344,25	7,23	49	295	03/07/2017	47,902507	1,903805	118,4

Bibliographie :

http://www.irceline.be
www.airparif.asso.fr
/www.ligair.fr
http://www.takingspace.org
http://wiki.seeed.cc/Grove-Dust_Sensor/
http://aqicn.org/sensor/sds011/fr/
https://hackspark.fr/fr/nova-pm-sensor-dust-air-quality-detection-laser-sds011.html
http://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/grovedust/
http://www.brokking.net/ymfc-al_main.html
http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0137789