



## Table des matières

Introduction.....	3
Contexte .....	4
Etat de l'art .....	5
Généralités .....	5
OpenAir .....	5
Vue générale .....	6
Les capteurs.....	7

## Introduction

De par, l'accroissement démographique toujours constant et la centralisation des entreprises, ce dernier quart de siècle le taux de population a explosés dans les zones urbaines nécessitant une organisation bien particulière des villes. Accroissement des superficies urbaines, augmentation de consommation de ressources naturelles, hausses des transports et de l'industrialisation... Tous ces éléments survenus rapidement, ont placés les zones urbaines au cœur des enjeux de santé publiques et environnementaux.

En effet, la qualité de l'aire mais aussi le bruit ont été reconnus comme ayant un impact direct sur la santé. Mais dans quelle mesure peut-on évaluer précisément les conséquences des pollutions urbaines sur un individu ?

C'est pour répondre à cette problématique qu'a été développé la chaire Mobilité et qualité de vie en milieu urbain (MoUVie). Portée par le docteur Laurence Eymard, directrice de l'Observatoire des sciences de l'Univers (OSU) Ecce Terra UPMC/CNRS et financée par le mécénat de PSA Peugeot Citroën et Renault, le but de ce projet est de mesurer sur Paris les pollutions auquel est exposé un enfant avant d'établir un lien avec la santé.

Ainsi, afin de récolter les différentes mesures, des capteurs, sensibles aux particules fines, aux gazs et aux bruits, seront fournis à un panel d'enfants qui sont, de par nature, plus vulnérables aux pollutions que les adultes. Ces capteurs devront permettre par la suite d'obtenir une cartographie de Paris et des zones polluées. Le développement de ces outils de mesures s'inscrit donc dans la catégorie des objets connectés.

De nombreuses start-up sont actuellement présentes dans le domaine de la qualité de l'aire, cependant, de manière à répondre aux exigences spécifiques du projet la conception du capteur MouVie sera entièrement effectuée au sein des laboratoires de recherches.

Le présent rapport a pour but de mettre en évidence les différentes phases de conception à mettre en œuvre avant de fournir un appareil fiable et discret pour les tests.

## Contexte

La conception des capteurs s'inscrit dans le cadre du projet MoUVie regroupant différentes équipes de recherches spécialisées dans des domaines variés. L'OSU Ecce Terra, tout d'abord, dirigé par Laurence Eymard, c'est un observatoire concentré sur les portées environnementales que peuvent avoir les Science de la Terre, de Climat et de l'Ecologie.

Concernant les développements acoustiques c'est Régis Marchiano et Nicolas Misdariis qui sont en charge des dtectons de bruits. Le premier, professeur à l'UPMC, travaille sur la propagation des ondes acoustiques linéaires et non linéaires en milieux complexes à l'Institut Jean le Rond d'Alembert UPMC/CNRS. Le second, Nicolas Misdariis, est responsable-adjoint de l'équipe « Perception et design sonores » de l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique de l'Ircam.

L'étude de la qualité de l'aire est assurée par le LATMOS et Sebastien Payant professeur des universités à l'UPMC et chercheur dont les recherches s'articulent autour de plusieurs axes à l'interface entre la physique moléculaire et la physique de l'atmosphère.

Côté santé, Isabella Annesi-Maesano, responsable de l'équipe Epidémiologie des maladies allergiques et respiratoires (EPAR, INSERM/UPMC), mène des travaux de recherche sur la compréhension de l'étiologie de la rhinite, l'asthme, la broncho pneumopathie chronique obstructive et identifie les sujets à risque. Annick Clément, professeur de pédiatrie à l'UPMC, dirige le service de pneumologie pédiatrique de l'hôpital Trousseau. Elle anime au niveau européen un groupe de recherche sur les pathologies pulmonaires rares de l'enfant et siège dans de nombreux conseils scientifiques en France et à l'étranger.

Ces différents acteurs sont donc les forces vives de la chaire MoUVie d'un point de vu général. Concernant la technique et plus particulièrement la conception du capteur on distingue d'autres acteurs impliqués.

Le capteur acoustique est réalisé par l'équipe de Regis Marchiano de l'institut D'Alembert. Pour ce qui est des capteurs de gaz Simon Guillier ingénieur de recherche au LATMOS travaillera conjointement avec Vincent Dupuis et Christian Simon tous deux fondateurs du laboratoire participatif : fablab de l'UPMC. Un capteur a déjà été conçu par le fablab mais ne comporte pas toutes les fonctionnalités et la précision nécessaires pour mener à bien le projet. Ainsi une nouvelle version sera développée conjointement avec la chaire. La dimension connectée du capteur implique également des connaissances en gestion et transmission de données. Cette partie sera quant à elle développée par Giovanni Pau, docteur en génie électrique et informatique de l'université de Bologne en 2002, et Pierre Brochart spécialiste dans la gestion de base de donnée.

Le projet MoUVie regroupe donc de nombreuses entités pluridisciplinaires et collabore avec plusieurs laboratoires pour la conception des capteurs en particulier. Ce partage d'idée est nécessaire et semble inévitable au vu des nombreuses entreprises travaillant dans ce secteur.

## **Etat de l'art**

Le développement de capteurs connectés est actuellement en véritable expansion. Le domaine de la mesure de la qualité de l'air n'est pas épargné par l'expansion de ce secteur. De nombreuses entreprises ont choisies de s'orienter sur cette voie mais également des particuliers et des passionnés désireux de fabriquer eux même leurs propre capteur. Les documentations sont donc nombreuses, on se propose dans ce qui suit d'éclaircir un peu les différentes technologies existantes.

## **Généralités**

Parmi les différents capteurs dis de mesure de qualité de l'aire, il est déjà possible de différentier chacun d'eux en fonction de leurs données mesurées

## **OpenAir**

## Aperçue générale

## Les capteurs

### Paramètres à évaluer

Le choix des capteurs se fera à la suite de plusieurs tests mettant en évidence la capacité de chacun des composants à obtenir des résultats proches de ceux obtenus par les instruments de mesures. Plusieurs paramètres schématisés en figure sont à prendre en compte pour la sélection des éléments.

La **linéarité** tout d'abord, il s'agit de la plage de valeur sur laquelle le rapport tension concentration suit une courbe linéaire. Indirectement ce paramètre indiquera les valeurs minimum et maximum qu'il est possible de mesurer.

La **précision** est également un paramètre essentiel à évaluer puisqu'il indique la variation qu'un résultat peut avoir pour une même mesure mais à deux instants différents. Cette valeur peut être déterminée en calculant  $P = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{1}{3} (\sum_{i=1}^n P_i)^2 \right\}}$  où  $P_i$  est la mesure d'un même milieu à un instant donné.

Le signal, s'il est trop faible, peut parfois être noyé dans le bruit propre à l'électronique du capteur. Il est donc important de définir le niveau à partir duquel on ne considère plus la mesure comme du bruit à savoir la **limite de détection**. De manière générale on détermine cette valeur en observant la tension sous atmosphère « propre » et en multipliant par 2 cette grandeur.

De même, une donnée essentielle pour la caractérisation d'un capteur est sa **résolution**. Le plus petit écart de concentration observable par le capteur est évalué ici. Plus généralement il s'agit du nombre de point qu'il est possible de déterminer sur la plage de valeur.

De manière à vérifier comment réagit un capteur face à une perturbation le **temps de réponse** doit être évalué. On distinguera ici le temps nécessaire pour observer une première variation significative suite à une perturbation (passage de la limite de détection) et le temps de montée qui correspond au moment entre le passage de la limite et l'atteinte de 95% de la valeur stable.

Enfin la caractérisation du capteur sous l'effet de la variation de la **température et de l'humidité relative** devra aussi être effectuée.

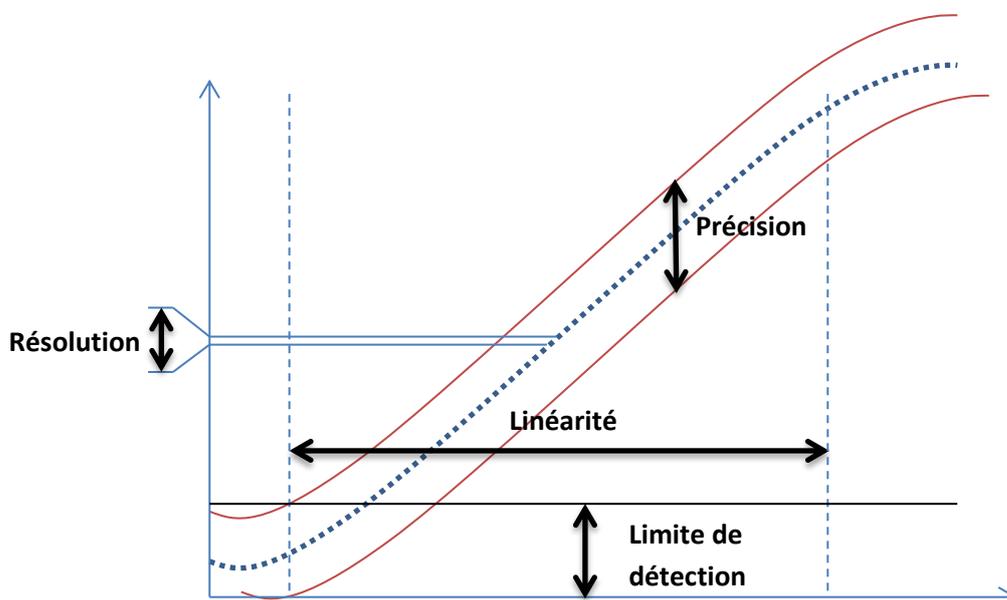


Figure 1 Objets à évaluer

Une première estimation des objectifs à atteindre pour chacun des capteurs a été effectuée dans le tableau.

Pour chacune des catégories de capteurs une procédure de test différente sera effectuée mais les caractéristiques à évaluées seront quant à elle toujours linéarité, précision, détection, résolution, temps de réponse et RH/Température.

## Capteur de particule

### Mesures d'une particule en suspension

Une particule est une micro poussière dont la composition peut-être très variable selon sa provenance. En effet, une particule peut concerner aussi bien les pollens que les fumées d'échappements des voitures. La principale caractérisation d'une PM (Particul Matter) ne va donc pas provenir de sa composition mais de sa taille. En effet de par son faible volume une particule aura d'avantage tendance à venir se loger dans l'appareil respiratoire et avoir des effets néfastes sur la santé.

On va ainsi classer ces éléments en suspension selon leurs diamètres aérodynamiques et distinguer les PM10 des PM2.5. Les particules dont le diamètre est inférieur à 10µm tel que les pollens ou la cendre constituent les PM10, les PM2.5 en revanche regroupent les fumées et poussières inférieurs à 2.5 µm. La figure donne un aperçu des différents types de particules existantes.

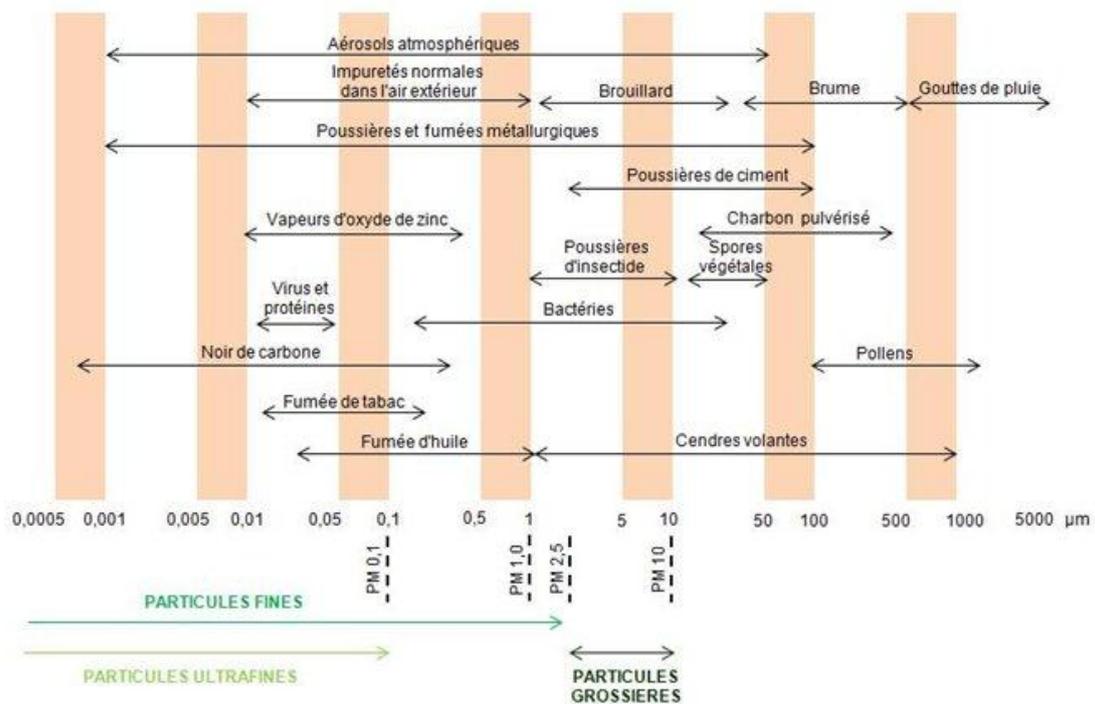


Figure 2 Classification des particules en suspension

De par ses conséquences sur la santé le niveau de particules dans l'air est une donnée essentielle à mesurer.

Différentes techniques permettent d'obtenir des résultats, la plus répandue est la mesure optique. Basé sur le principe de la diffraction rencontrée quand une particule vient passer devant un rayon

lumineux, l'objectif et de venir l'intensité d'un signal optique lorsqu'il est traversé par des éléments en suspension. La figure résume ce fonctionnement

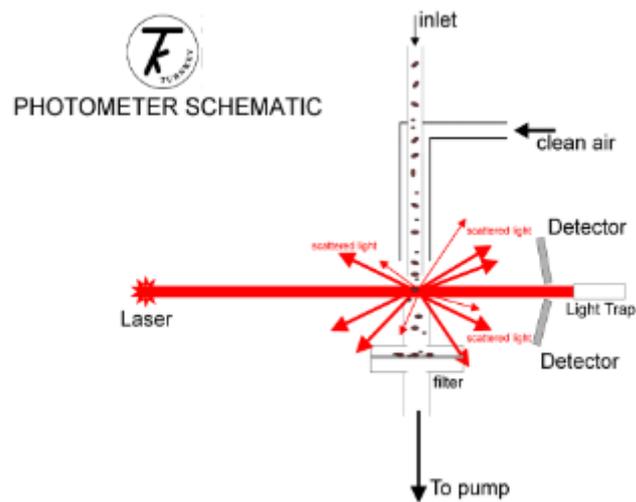


Figure 3 Fonctionnement de l'analyseur de particule OSIRIS

Les capteurs que nous allons utiliser se basent exactement sur ce même principe : la mesure de l'intensité lumineuse d'un rayon lumineux émis par une LED et soumis à un échantillon d'air. Ainsi, en mesurant la tension en sortie d'une photodiode, le taux de lumière diffracté peut être obtenu et donc une indication sur les particules.

Il convient toutefois de faire très attention puisque l'amplitude du signal électrique ne donne pas la concentration des particules. En effet, il est important de ne pas négliger le paramètre caractéristique d'une particule : sa taille. Une PM10 peut être 4 fois plus grosse qu'une PM2.5, par conséquent, en s'intercalant entre la LED et la photodiode, UNE seule particule réfléchira autant de lumière que QUATRE particules.

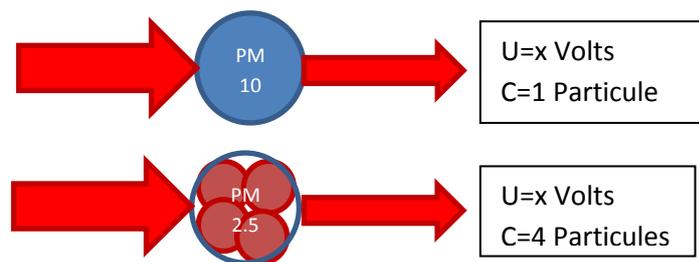


Figure 4 Mesure taux de particule par intensité lumineuse

Le même problème peut être illustré en comptant sur une durée donnée le nombre de fois qu'une valeur de tension est obtenue. Ainsi pour deux cas différents, la fumée (1µm) et le pollen (10µm) on obtiendra les histogrammes figure.

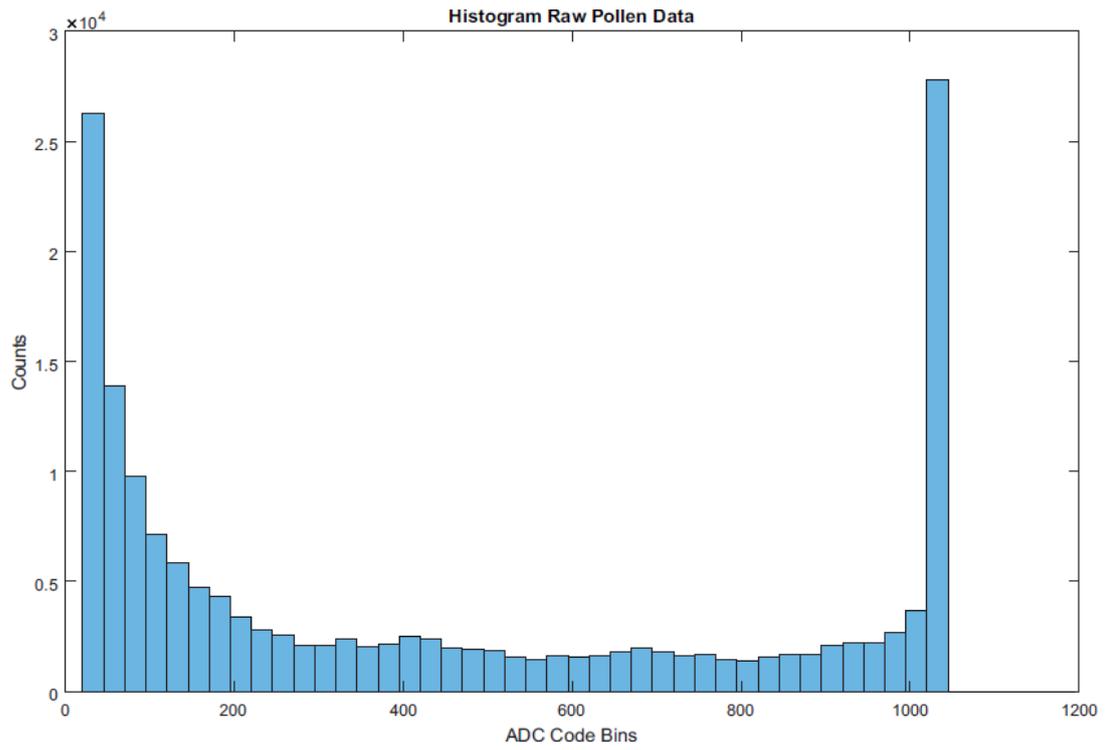


Figure 5 Comptage du nombre de pollen

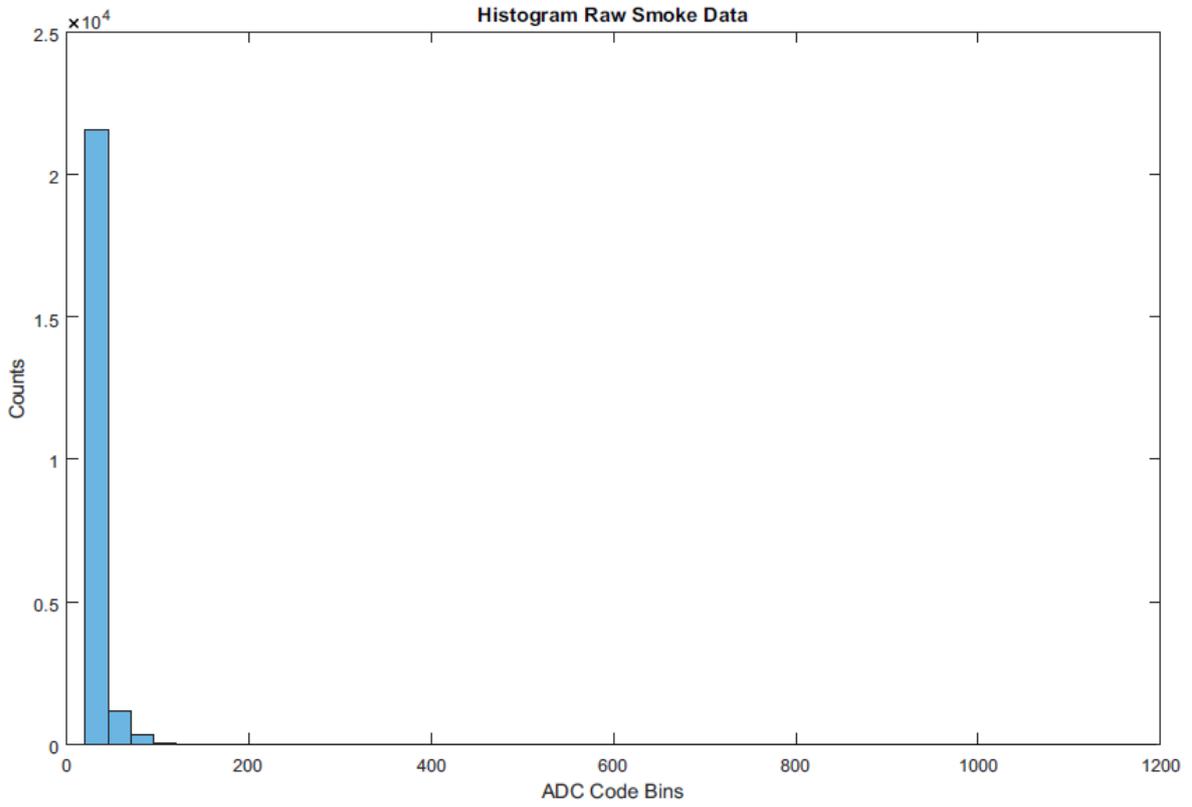


Figure 6 Comptage du nombre de particules de fumées

Au final autant de particules seront présentes dans les deux cas néanmoins la mesure de l'intensité sera plus forte pour le cas du pollen et donc le taux obtenu faussé. L'amplitude mesurée sera donc d'avantage un indicateur sur la taille que sur la concentration.

Dans ces conditions comment mesurer convenablement la concentration ?

Puisque pour chaque passage de particules, une variation de la tension sera détectée, un moyen simple de mesurer la concentration sera donc de compter le nombre de fois que l'intensité lumineuse varie brusquement.

Ainsi, la fréquence à laquelle apparait une particule, sera d'avantage un indicateur du taux que l'intensité qui reflète la taille de l'élément rencontré.

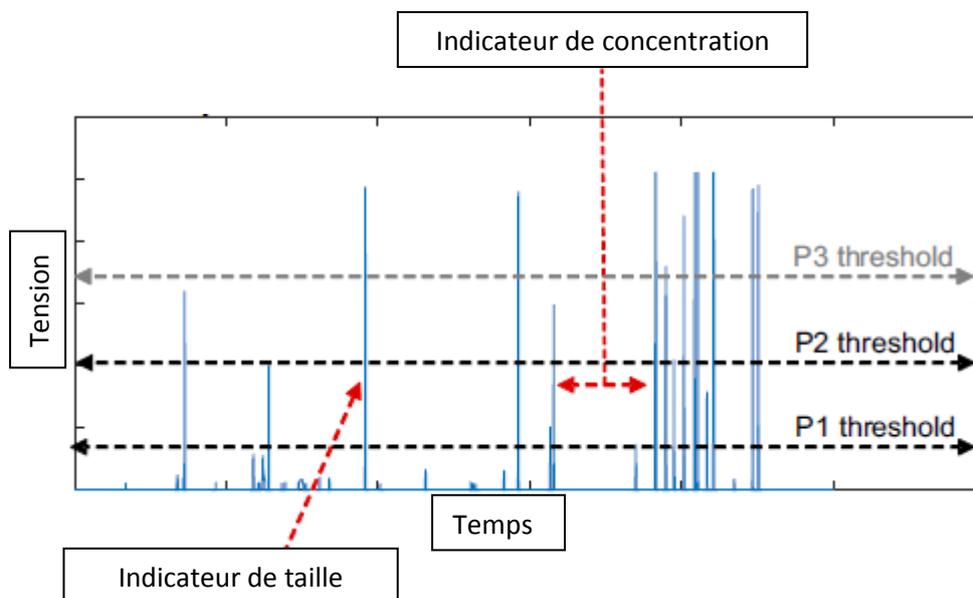


Figure 7 Mesure de la tension en sortie de capteur optique

En observant la figure il est possible d'établir une première approche du traitement des données. En effet il est possible de déterminer plusieurs seuils pour les tensions observées. En deçà de la première limite P1, les tensions sont trop petites pour savoir s'il s'agit simplement de bruit ou du passage d'une particule. Au-dessus il va être possible de faire une distinction entre PM2.5 et PM10 en établissant un autre seuil P2.

En résumé, lorsque l'on mesure avec un capteur optique les particules présentes dans l'air deux données sont à mesurer. La fréquence de passage de particule d'une part et l'intensité lumineuse réfléchi par cet élément. Plusieurs niveaux peuvent être déterminés chacun indiquant si la tension mesurée donne une indication sur un bruit ou sur la taille d'une particule. Comme décrit en figure notre système va donc tout d'abord déterminer la nature de l'élément et l'ajouter au total d'élément qu'il a détecté sur une durée donnée.

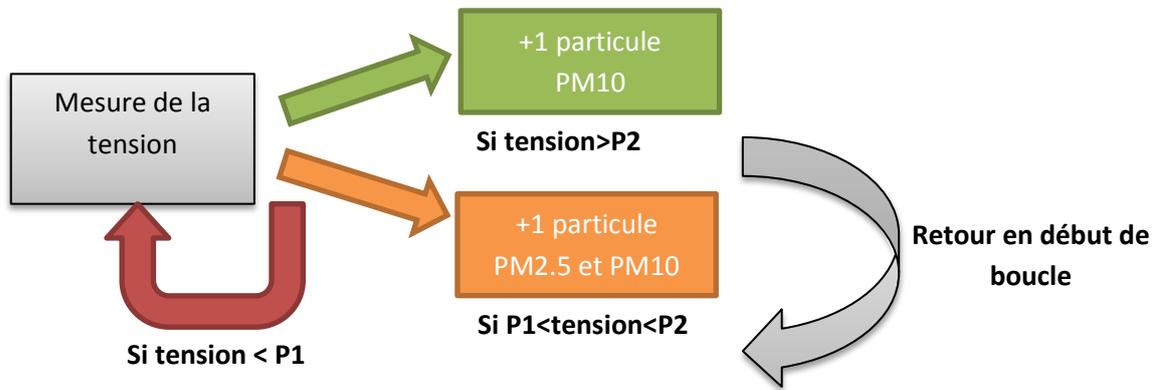


Figure 8 Boucle de traitement des données mesurées par le capteur

Ainsi, on cherchera à déterminer en premier lieu sur un capteur : son niveau de bruit, son seuil P2 et sa corrélation entre tension et taux.

### Procédure de test

Pour évaluer la qualité d'un capteur on utilisera une chambre de test. Une boîte de 30cm sur 19cm contiendra un certain nombre de capteur à tester ainsi que l'instrument de mesure OSIRIS qui servira de référence. Un ventilateur placé à l'entrée permettra de faire circuler l'air.

Il faudra dans un premier temps s'assurer que l'air ambiant est un maximum dénué de particule. Un purificateur d'air sera donc utilisé en début de test. De même température et humidité devront aussi être mesurées tout au long de test.

Au niveau matériel, on connectera le capteur conformément à sa description dans la notice d'utilisation. Trois composants différents seront utilisés : le SHARP GP2Y1010AU0F, le SHINYEI PPD42NS et le SHINYEI PPD60PV. Pour chacun la description est fournie en annexe. La prise de donnée se fera sous arduino UNO avec enregistrement des données sur carte SD. Le code sera également fourni en annexe. Une fois tous ces outils connectés les tests peuvent être effectués.

Une fois l'atmosphère « purifiée », le bruit sera mesuré en premier lieu. Pour ce faire un adhésif sera placé sur l'orifice du capteur empêchant ainsi l'entrée d'éventuelles particules. Une mesure sur quelques heures de l'intensité en sortie du capteur permettra d'obtenir la valeur maximale pouvant être atteinte par le bruit électronique (P1).

Pour la détermination de la limite PM2.5/PM10 le capteur sera cette fois testé sous une atmosphère polluée par différents échantillons. Comme décrit en figure les fumées sont particulièrement caractéristique des particules inférieures à 2.5µm de diamètre. De l'encens et de la fumée d'huile seront ainsi utilisés pour identifier la plage de valeur caractéristique des éléments de faible taille. Pour les PM10 de la magnésie sera utilisée afin de déterminer les effets de particules de grosses tailles sur le capteur. En établissant un histogramme des valeurs rencontrées il sera possible de déterminer pour chacune des tailles les tensions caractéristiques et ainsi établir P2. Ce test devra toutefois être établie un nombre de fois important et sous différentes conditions pour être validé.

Polluant	Taille
Magnésie	10 à 20 µm
Huile	0.5 à 1 µm
Encens	0.2 à 0.5µm

Une fois les seuils déterminée la calibration de la concentration pourra être envisagée. Pour ce faire, le nombre de pulsation sera compté sur une durée de 30 secondes avant d'être comparé aux résultats obtenu par l'OSIRIS. L'idée sera donc d'enfumer au maximum la boîte de test, celle-ci n'étant pas totalement étanche va subir une perte de matière lente qui sera utile pour notre estimation.

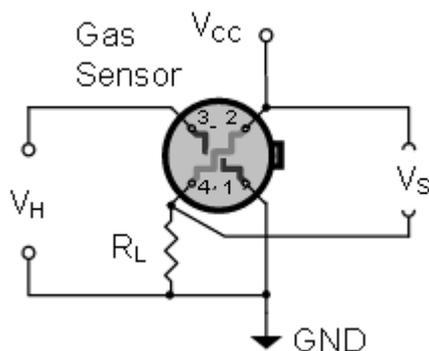
Une fois ces premiers tests effectués, les sept objets à évaluer pourront être déterminés (linéarité, précision, etc). Par la suite plusieurs évaluations pourront être effectuées soit auprès de la circulation soit sur grue grâce à la participation de Bouygues.

## Capteur de gaz

### Mesure de gaz

La mesure de la concentration en gaz est relativement plus simple que pour les particules dans la mesure où la tension délivrée par le capteur donne directement une indication sur le taux de gaz présent dans l'air. Le principe de mesure est basé sur la variation de la conductivité d'une couche métallique d'un semi-conducteur. En effet, pour des températures élevée, le composant sera sensible à certain composés gazeux qui auront pour conséquence de faire varier la résistance interne du capteur.

Un détecteur de gaz sera donc décrit comme selon la figure



$$R_s = R_L \left( \frac{V_{CC} - V_s}{V_s} \right) \times V_s$$

Figure 9 Schéma de fonctionnement d'un capteur de gaz

Une résistance de chauffe va venir augmenter la température du capteur et un diviseur de tension sera utiliser pour mesurer les variations de la résistance interne.

Le montage et le traitement des données ne nécessitent pas de démarche particulière, le seul élément supplémentaire à déterminer sera l'interférence engendrée par la présence d'autre gaz. En effet, il est fréquent qu'un capteur soit également sensible à un autre élément que celui évalué par conséquent certaine mesure peuvent être biaisée. De manière générale les fiches d'utilisations fournissent une liste des gaz les plus perturbateurs pour une mesure donnée comme décrit dans le tableau.

Nom du gaz	Interférant principaux
Composés Organique Volatiles (COV)	H

Dioxyde d'Azote (NO <sub>2</sub> )	Cl <sub>2</sub> ; O <sub>3</sub>
Ozone (O <sub>3</sub> )	NO <sub>2</sub> ; H <sub>2</sub> S ; Cl <sub>2</sub>

Tableau 1 Influence des gaz sur les capteurs

L'influence de chacune de ces perturbations sera calculer en mesurant la résistance avec et sans la présence des gaz problématiques.

La mesure de la concentration d'un gaz repose donc essentiellement sur la mesure d'une résistance reste désormais à établir comment effectuer la calibration.

### Processus expérimental

La boîte de test utilisée pour les manipulations sera précisément la même que celle des capteurs de particule. L'atmosphère sera également contrôlée au maximum la différence principal proviendra de la source pollution.

La fabrication d'Ozone se fera à l'aide d'un arc électrique conçu par le fablab de l'UPMC et la référence sera fourni par un instrument de mesure de type Personal Ozone Monitor (POM). Le phénomène d'arc électrique résulte de l'ionisation d'un milieu isolant, créant ainsi un canal conducteur entre 2 surfaces chargées proches. La foudre, par exemple, est un arc électrique de grande intensité. Chimiquement, l'énergie apportée est tel qu'elle vient rompre la liaison de covalence du dioxygène, les atomes d'oxygènes vont ensuite venir se recombinaison de façon plus stable sous forme d'ozone. Le système fabriqué ici est constitué d'un timer fournissant un courant oscillant ; d'un MoSFET pour amplifier le signal et d'un condensateur utile pour atteindre la zone d'ionisation de l'air.

Concernant le Dioxyde d'Azote, sa provenance est principalement due à la circulation automobile et les combustions d'essences. Pour créer ce gaz en laboratoire il est judicieux d'utiliser un briquet à essence. Cette combustion permettra d'obtenir un taux suffisant de gaz à mesurer.