

# Monitoring de la qualité de l'air dans la ville de Dakar

Bassirou Ngom, Moussa Diallo, Bamba Gueye, Mamadou Simina Dramé

Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal

**Résumé** La pollution de l'air est le principal risque environnemental pour la santé. Face à une forte urbanisation, Dakar, capitale du Sénégal, est confrontée à un niveau de pollution extrême dépassant les normes définies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Nous proposons une solution à faible coût qui mesure la qualité de l'air. Ce dispositif est composé par des capteurs qui évaluent le monoxyde de Carbone ( $CO$ ), le dioxyde de Carbone ( $CO_2$ ) et le taux de particules minuscules en suspensions ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ ). Le dispositif de monitoring mis en œuvre peut être itinérant ou fixe et permet la visualisation en temps réel du niveau de pollution via une interface Web. Nous avons déployé le dispositif dans la ville de Dakar et les données collectées sont comparées avec l'Indice de Qualité de l'Air (IQA) défini par le Centre Sénégalais de Gestion de la Qualité de l'Air (CGQA) et les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé OMS.

**Keywords:** Pollution de l'air, Monitoring, Polluants, Internet des objets.

## 1 Introduction

Une pollution atmosphérique importante a des effets sur la santé humaine, sur l'environnement et la biodiversité et impacte le climat. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a notifié que la pollution de l'air est devenu le principal risque environnemental pour la santé dans le monde [1]. Dakar, Capitale et ville la plus urbanisée du Sénégal, est représentative de l'ensemble des défis auxquels sont confrontés les pays de la sous-région. En effet, l'agglomération de Dakar, ne représente que 0,3% du territoire national alors qu'elle accueille 80% des activités économiques et industrielles nationales. Face à une urbanisation mal contrôlée, la ville de Dakar est confrontée, à certains endroits, à des niveaux de pollution au-delà des limites définies par la norme  $NS-05-62$ [2]. Elle possède un taux annuel d'exposition au  $PM_{2.5}$  qui dépasse 3.4 fois le taux recommandé par l'OMS [3].

Quelques rares enquêtes sur le type et la source des éléments composant l'aérosol ont été menées à Dakar et ont prouvé leurs degrés de toxicité pour la santé [4,5]. D'ailleurs, le gouvernement sénégalais a mis en place un Centre de Gestion de la Qualité de l'Air (CGQA) [6] pour évaluer la pollution de l'air afin d'alerter la population. Pour suivre les émissions atmosphériques, Le CGQA utilise des stations de mesure industrielles qui sont fixes et chères. Les polluants concernés sont particulièrement les particules en suspension ( $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ ), le monoxyde de carbone ( $CO$ ), les oxydes d'azote ( $NO_x$ ) avec le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) et le monoxyde d'azote ( $NO$ ). Le CGQA a déployé cinq stations de mesures installées dans les quartiers de Médina, Yoff, Bel-air, HLM et Cathédrale. C'est station sont géographiquement distant et ne prennent pas en compte la plupart des polluants toxiques.

Pour évaluer la qualité de l'air globale pour une station de surveillance particulière, un indice est calculé pour chaque polluant mesuré et le maximum est considéré comme l'Indice de Qualité de l'Air (IQA) pour cette station de surveillance, car il représente le plus mauvais des polluants mesurés. L'IQA est devenu un moyen important de mesurer et de réagir aux épisodes de pollution grave[7]. Il est calculé selon la procédure décrite en [8] et est basé sur la valeur la plus élevée de la concentration normalisée de chaque polluant.

L'IQA est mesuré sur une échelle de 0 à 500, sachant que la situation est satisfaisante lorsque les valeurs sont inférieures à 100 et la qualité de l'air n'est pas bonne lorsqu'elles sont supérieures à 100. Au Sénégal, le Centre de Gestion de la Qualité de l'Air a adopté quatre classes de IQA et chaque classe correspond à un niveau d'impact sanitaire selon le groupe de population. Les résultats sont affichés sur le site de CGQA et celui du ministère de l'environnement.

Aujourd'hui, la rareté de l'information sur la qualité de l'air entrave la sensibilisation du public aux problèmes de santé liés à la pollution. Une plate-forme de détection évolutive couplée avec un

système de captation en temps réel pourrait efficacement diffuser des informations sur la pollution auprès des populations. C'est ce qui constitue l'objet de notre proposition. Avec l'utilisation de capteurs à faible coût, nous avons mis en place un système de détection capables de collecter des données sur la qualité de l'air en temps réel. Ensuite, ces données sont, en fonction de leur zone de collecte, affichées sur une plate-forme web.

La suite de l'article est organisée comme suit. Dans la section 2, nous présentons la conception du système de détection en commençant par l'acquisition jusqu'à l'application. La Section 3 est dédiée au prototype réalisé et les scénarios de communications adoptés. Les résultats des tests effectués dans la région de Dakar sont présentés à la section 4. La section 5 conclut le travail.

## 2 Architecture de monitoring déployée

La figure 1 illustre l'architecture déployée pour la mesure de la pollution. Le système de détection mesure la concentration des polluants, récupère les données de pollution avec des informations pertinentes, telles que l'heure de collecte et la position GPS du point collecte, et envoie les données à un serveur cloud. Les données de pollution brutes sont ensuite traitées par au niveau du serveur et mappées sur une carte. Les utilisateurs peuvent voir l'illustration des données de pollution en temps réel sur une carte géo-référencée.

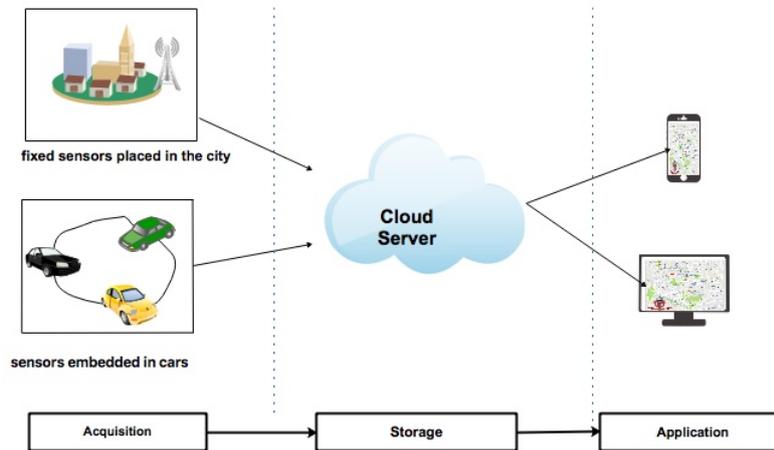


Figure 1. Architecture globale du système

Le système de détection peut être subdivisé en trois sous systèmes : un sous système acquisition, un sous système de stockage et un sous système de traitement (figure 1).

### 2.1 Kit d'acquisition

L'acquisition représente le réseau de capteurs pour la détection de la qualité de l'air. Elle peut être un système mobile embarqué dans une voiture[9] ou fixe et dans ce cas placé dans les endroits les plus pollués de la ville[10].

L'architecture du sous système d'acquisition est composée de 5 unités comme illustré par la figure 2 :

- **Unité de détection** : l'unité de détection qui représente l'ensemble des capteurs du système. Dans cette unité, nous avons utilisé un capteur  $CO_2$  [11], un capteur de monoxyde de carbone  $CO$  [12] et un capteur de particule de poussière [13].
- **Unité d'alimentation** : l'unité d'alimentation peut être constituer d'une alimentation solaire ou batterie. Pour le capteur mobile, il pourra être branché sur la batterie de la voiture comme source d'énergie supplémentaire.

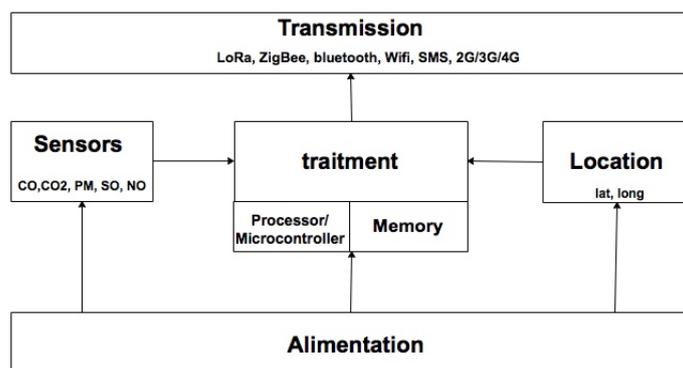


Figure 2. Architecture du Système d'Acquisition

- **Unité de localisation** : L'unité de localisation est composée d'un capteur GPS permettant de récupérer les positions GPS des points de mesures. Cette unité permet de géolocaliser les points pollués afin de reproduire la capte de pollution de la ville.
- **Unité de traitement** : l'unité de traitement est composée d'un processeur pour le traitement des données provenant des différents capteurs ainsi que d'une mémoire pour le stockage des données de manière temporaire.
- **Unité de Transmission** : Avec l'émergence des réseaux de capteurs sans fil, plusieurs travaux se sont focalisés sur la réduction de la consommation d'énergie [14,15,16].

Les "Low-Power Wide-Area Network" (*LPWAN*) exploitent les liaisons sans fil à faible consommation énergétique tout en permettant d'envoyer sur une grande distance. D'ailleurs une étude est effectuée pour la couverture de la ville de Dakar par un réseau *LoRa* [17]. En plus des *LPWAN*, il existe plusieurs autres moyens de transmission adaptés aux réseaux de capteurs sans fil comme les normes *IEEE802.15.4*, *IEEE802.11x*, le protocole *ZigBee*, et les réseaux *2G/3G/4G*.

La plupart de ces réseaux de transmission nécessitent d'avoir des passerelles placées dans plusieurs endroits de la ville afin de récupérer les données collectées par les capteurs mobiles. Ensuite, puis via une connexion Internet (*2G/3G/4G* ou filaire) envoyer les données au serveur cloud pour le traitement (figure 3a). L'autre option consiste à équiper à notre dispositif d'un connexion internet afin qu'il envoie directement les données sur le cloud sans l'intermédiaire d'une passerelle (figure 3b).

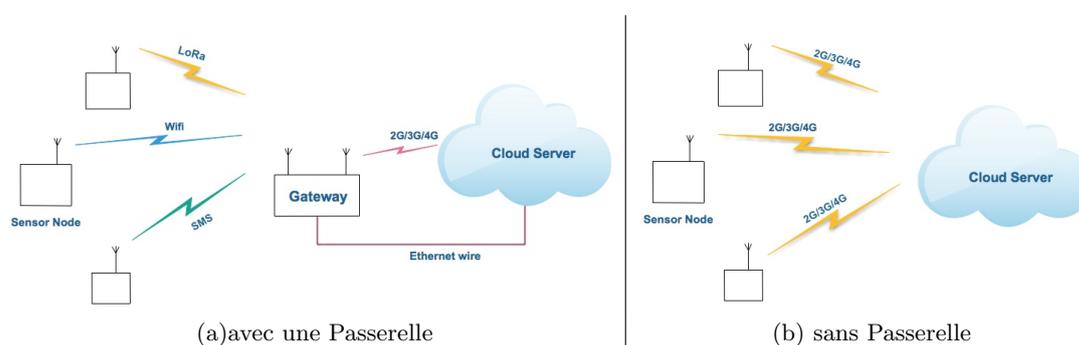


Figure 3. Transmission

## 2.2 Système de stockage

Le système de stockage représente les entités où seront stockées les données provenant des capteurs. Après la réception, la passerelle sauvegarde les données en local. Puisque la connexion

internet n'est pas tout le temps stable dans le contexte de nos pays, un processus vérifié de façon continue l'accès au serveur. En cas de connexion stable, les données sont répliquées dans cloud via une API RESTFUL. Pour les capteurs mobiles qui embarquent une connexion internet, leurs données collectées sont stockées directement dans le cloud.

### 2.3 Système de traitement

Le sous système de traitement représente une plateforme web pour la consultation des données. Cette plateforme présente les graphes et la carte de pollution de la ville avec les données collectées dans la journée en temps réel. Ainsi les utilisateurs pourront se connecter sur la plateforme pour visualiser les données de la journée ou toutes les données d'une année précise. Les chercheurs du domaine pourront aussi télécharger les données pour leurs travaux de recherche.

## 3 Implémentation

### 3.1 Nœud d'acquisition

Comme énoncé dans la partie conception, le nœud d'acquisition est composé d'une unité de traitement qui est dans notre cas une carte *ArduinoUno*. L'utilisation de cette carte nous permettra de pouvoir traiter les informations provenant au capteurs et de les envoyer au serveur. la particularité de cette carte est qu'elle ne coûte pas cher et sa facilité d'utilisation. Nous avons ensuite l'unité de détection qui est formée ici par les capteurs. Nous utilisons 3 types de capteurs : *CO2*, *CO* et *particules*(*PM10*, *PM2.5*, *PM1*). L'unité de localisation est représentée par un *shieldGPS*. Pour l'unité d'alimentation, comme tous les autres composants sont sur la carte *Arduino*, donc l'alimentation concerne simplement celle-ci. La carte ( ou *shields*) ont besoin d'une alimentation de 7 – 12V donc une batterie lithium ou bien un panneau solaire de 15V pourra assurer la consommation d'énergie. Pour l'unité de transmission, nous avons utilisé un *shieldDradino*(*LORA/GPS*) pour le capteur mobile. L'ensemble du système ainsi constitué est donnée sur la figure 4.

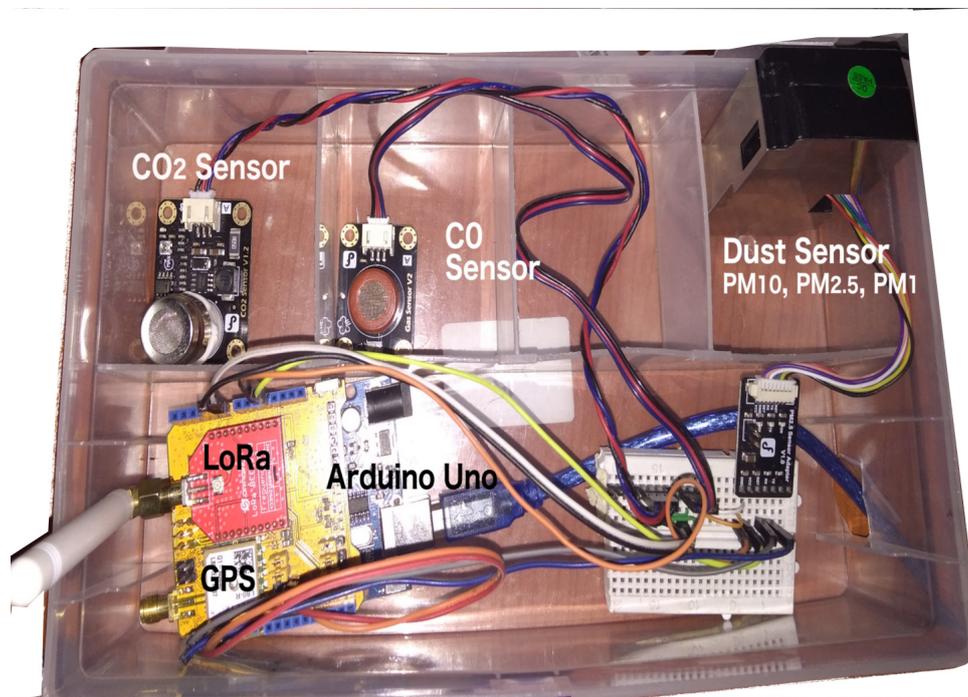


Figure 4. Nœud d'acquisition déployé

### 3.2 Architecture de transmission

Pour le système de transmission, nous avons deux cas :

- *transmission avec un gateway (relais)* : le gateway est composé d'un module de réception et d'une base de données pour le stockage local. Donc l'information envoyée par le nœud d'acquisition par *LoRa* est récupérée par le module de réception. Ce dernier est relié par câble à une machine. Les informations reçues sont ensuite transmises sur le câble et un programme en python récupère les données pour un stockage local puis une réplication est effectuée sur une base de données distante du cloud.

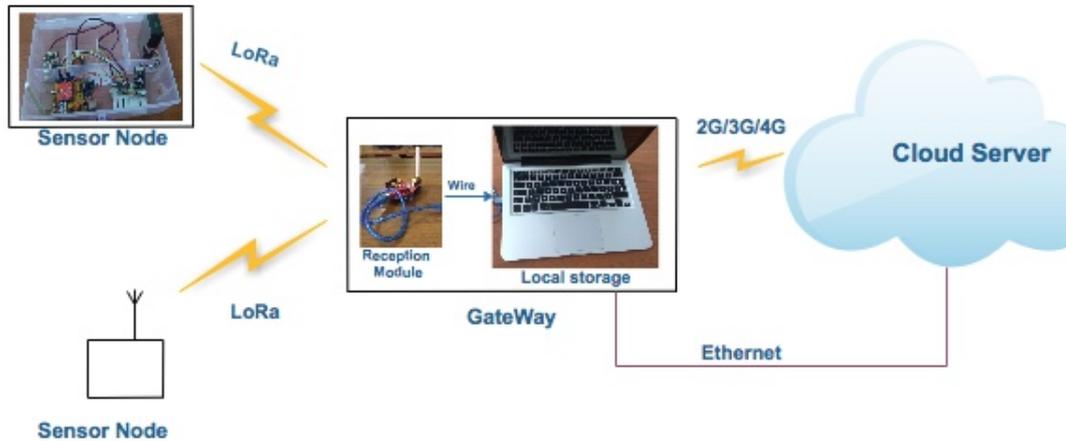


Figure 5. schéma de transmission

- *transmission directe sans gateway* : le système d'acquisition est couplé avec un module de transmission lui permettant d'envoyer les données directement dans le cloud sans l'intermédiaire d'un gateway. Le module de transmission peut être un ordinateur relié par câble au système d'acquisition ou bien un *shield* réseaux mobile pour l'envoi directe des données par 2G/3G/4G.

La transmission des données est effectuée chaque minute ce qui nous permet d'avoir les données en temps réel.

### 3.3 Stockage et Traitement

Pour un meilleur traitement, nous avons défini un format de trame. Les trames du réseau ont une taille de 10 octets avec la structure suivante :

- *id* : représente l'identifiant du capteur mobile. Il est codé sur 1 octet.
- *data* : le champs data contient les données de pollution mesurées couplées avec la position GPS.

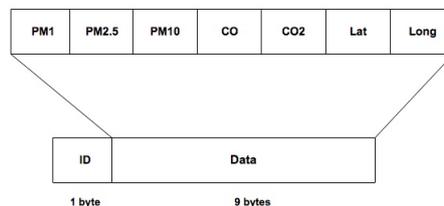


Figure 6. trame

Les données arrivées au système de stockage, sont sauvegardées suivant l'ordre défini dans la figure 6 en plus de la date et de l'heure de réception.

Le gestionnaire de base de données utilisé pour le système de stockage est MYSQL.

La plateforme de traitement est entièrement développée en PHP. Nous avons utilisé la librairie de *Highchart* pour la visualisation des graphes et l'*API Googlemaps* pour la carte de la ville. Dans le système de traitement, les requêtes AJAX nous permettent de rafraîchir les graphes toutes les 10 secondes afin d'avoir une visualisation en temps réel des données.

## 4 Résultats

Nous décrivons dans cette section les scénari de tests que nous avons effectué suivi de la présentation des résultats obtenus.

### 4.1 Kit mobile itinérant pour le monitoring de la pollution

Dans ce test, le système de détection mobile est embarqué dans une voiture. Nous avons parcouru les zones ou il y a plus de circulation dans ville de Dakar. Durant le parcours, pour chaque point mesuré, le système enregistre la concentration des particules minuscules  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_1$  en plus celle du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone. Ensuite une carte de température *Googlemap* est utilisée pour mapper les points relevé en temps réel. La figure 7 représente la carte de température de la pollution au  $PM_{10}$  de la ville.



Figure 7. carte de pollution au  $PM_{10}$

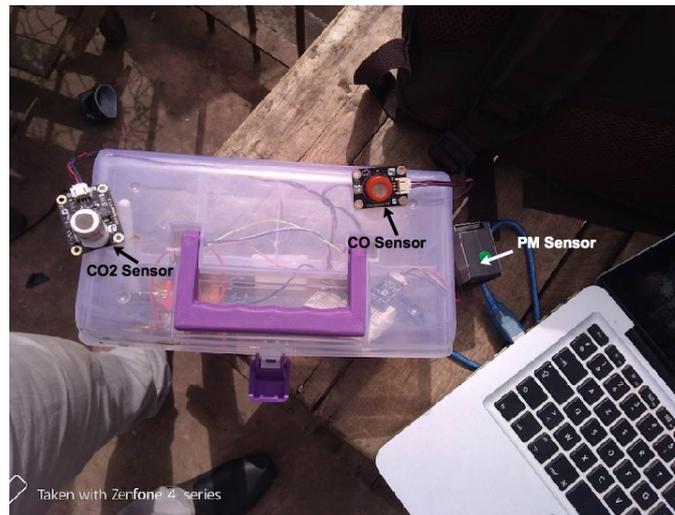
Les points sont mappés en fonction de leurs IQA calculé avec la formule utilisée par le CGQA :

$$IQA = \frac{sensorValue}{limitedValue} \times 100$$

Les valeurs limites sont définies dans la norme sénégalaise [2]. Pour chaque point, on calcule l'IQA correspondant ce qui constitue la variation de couleur dans la carte de température de la ville. Ainsi plus un point est rouge ce qui veut dire que la valeur du IQA est supérieure au seuil défini dans [2] donc plus ce point est pollué. Durant ces tests, on rencontre plus de pollution ( $IQA > 100$ ) dans les ronds points cela est dû au trafic routier très dense dans ces endroits.

#### 4.2 Kit mobile fixe pour le monitoring de la pollution

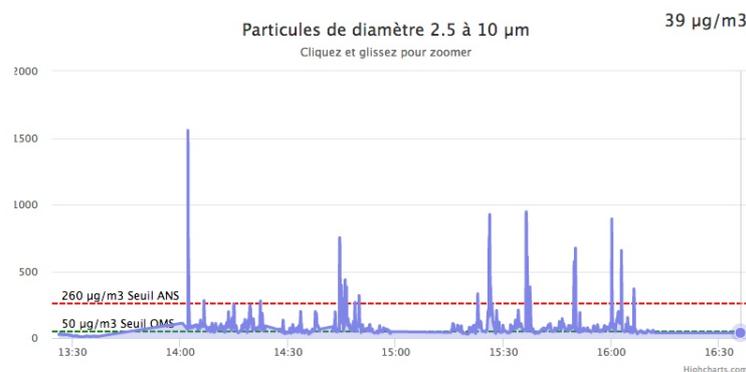
Pour tester notre système de détection fixe, nous avons choisi le marché Colobane (figure 8). Ce choix se justifie du fait que la fréquentation à ce niveau est importante surtout aux heures de pointes. Nous avons déployé le capteur au niveau du rond point, ensuite nous avons mesuré les données pendant un demi-journée. Les résultats illustrés sur la figure 9 ont été pris le 04 janvier entre 13H30 et 16H30.



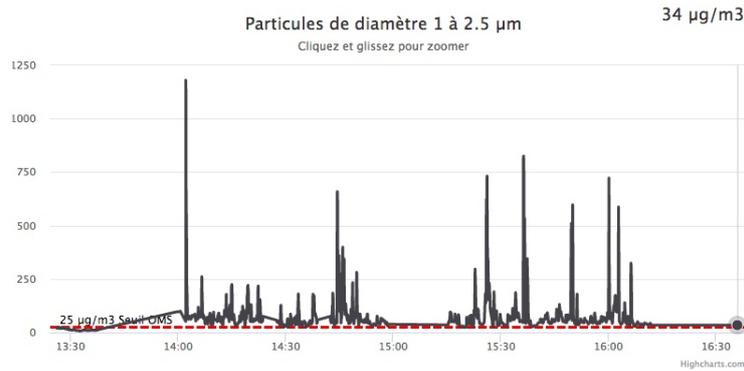
**Figure 8.** Kit de mesure de la pollution

Au niveau du graphe de la figure 9 nous constatons que les seuils définis en moyenne par l'OMS ( $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et celui défini par la norme sénégalaise ( $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sont largement dépassés pour une demi-journée de mesure.

La figure 10 représente la variation du  $PM_{2.5}$  à Colobane. Ce graphe a la même allure que celle du  $PM_{10}$ . Les valeurs représentées dans ce graphe sont supérieures au seuil défini par l'OMS ( $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figure 9.** Courbe de pollution au  $PM_{10}$



**Figure 10.** courbe de pollution au  $PM_{2.5}$

Les deux courbes montrent des pics importantes aux heures de pointes (14h – 15h et 15h25 – 16h). A ces heures, le trafic routier est très dense au niveau du rond-point de Colobane. Le trafic sur le marché de Colobane génère une pollution de l’air plus importante pendant les heures de pointe. Cela montre que l’augmentation de la concentration des particules d’air est influencée par le trafic routier.

## 5 Conclusion

Cet article présente la conception d’un système de mesure de la pollution de l’air en temps réel. Ce système peut être fixe pour recueillir la pollution au niveau d’une localité de la ville ou bien un système mobile pouvant être embarqué dans une voiture. Et les données sont transférées vers une plateforme web qui se charge de la présentation et de la représentation la carte de la pollution de la ville.

Les données sur la qualité de l’air obtenues à l’aide de tels modèles de détection pourraient servir à diverses applications. Les patients atteints de maladies respiratoires ou cardiovasculaires trouveraient nos résultats utiles pour déterminer les voies moins polluées. Les personnes soucieuses de leur santé pourraient également profiter de cette forme de navigation plus propre. Les personnes qui utilisent notre système seront mieux renseignées sur l’étendue de la pollution et seront motivées à suivre de meilleurs schémas de conduite, comme ne pas laisser leur véhicule tourner au ralenti pendant de longues périodes ou conduire des voitures plus respectueuses de l’environnement. Mis à part ces applications au niveau individuel, ces données pourraient être utilisées comme une contribution supplémentaire à l’élaboration de politiques à grande échelle. Par exemple, les responsables de la santé publique et les décideurs pourraient utiliser nos résultats pour prédire les effets potentiels sur la santé fondés sur la qualité de l’air dans diverses régions afin de prendre des décisions, comme les emplacements possibles pour une future école ou communauté résidentielle.

Nous prévoyons d’étudier un déploiement à grande échelle. Par conséquent, nous devons déterminer la position géographique optimale des kits de mesure. En outre, nous visons à améliorer notre système en tenant compte d’autres capteurs de polluants tels que l’ozone, le nitroxyde d’azote et l’oxyde de soufre.

## Références

1. OMS . Air Quality Guidelines Global Update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. Regional Office for Europe, & World Health Organization. 2006
2. Norme Senegalaise <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/sen54266.pdf>, 2017
3. C Liousse, E Assamoi, P Criqui, C Granier and R Rosset. Explosive growth in African combustion emissions from 2005 to 2030. 2014. Environmental Research Letters , Volume 9 , Number 3
4. WHO Global Platform on Air Quality & Health, 2012
5. EHT Doumbia et al., Chemical composition and contributing sources of urban aerosol in Bamako and Dakar during POLCA experiment, 2013

6. Centre de Gestion de la Qualite de l'Air de Dakar, <http://www.air-dakar.org/>, 2017
7. OTT, Wayne R. Environmental indices : theory and practice. 1978.
8. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality–The Air Quality Index (AQI). (2013, Dec). [On-line] Available : <http://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-dec2013.pdf>
9. DEVARAKONDA, Srinivas, SEVUSU, Parveen, LIU, Hongzhang, et al. Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas, Proc. of the 2nd ACM SIGKDD international workshop on urban computing, 2013. p. 15.
10. BATHIYA, Bhavika, SRIVASTAVA, Sanjay, et MISHRA, Biswajit. Air pollution monitoring using wireless sensor network. Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 2016 IEEE International WIE Conference on. IEEE, 2016. p. 112-117.
11. CO2 Sensor, <https://www.dfrobot.com/product-1023.html>, 2017
12. co sensor, <https://www.dfrobot.com/product-686.html>, 2017
13. dust sensor, <https://www.dfrobot.com/product-1272.html>, 2017
14. KURT, Sinan, YILDIZ, Huseyin Ugur, YIGIT, Melike, et al. Packet size optimization in wireless sensor networks for smart grid applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, vol. 64, no 3, p. 2392-2401.
15. GUBBI, Jayavardhana, BUYYA, Rajkumar, MARUSIC, Slaven, et al. Internet of Things (IoT) : A vision, architectural elements, and future directions. Future generation computer systems, 2013, vol. 29, no 7, p. 1645-1660.
16. GUNGOR, Vehbi C. et HANCKE, Gerhard P. Industrial wireless sensor networks : Challenges, design principles, and technical approaches. IEEE Transactions on industrial electronics, 2009, vol. 56, no 10, p. 4258-4265.
17. Robert M. Seye, Bamba Gueye, Moussa Diallo. An Evaluation of LoRa Coverage in Dakar Peninsula. IEEE IEMCON 2017, Vancouver, Canada.