



# Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparanjan

<b>I – INTRODUCTION .....</b>	<b>2</b>
<b>II - TECHNOLOGIES.....</b>	<b>3</b>
a) ZigBee.....	3
b) LoRaWAN et LoRa .....	5
<b>III – STATIONS DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR .....</b>	<b>8</b>
a) Explication des différentes stations déployées de nos jours.....	8
b) Airparif & stations urbaines - stations fixes .....	10
c) Airparif & dispositif pollutrack. - station mobile.....	11
d) AQS1 Construction Air Quality Monitor - Aeroqual .....	11
<b>IV – ANALYSE DU MARCHÉ .....</b>	<b>12</b>
a) Le capteur Flow.....	12
b) Nanoenvi .....	12
c) Atmotube.....	13
d) Machinemax.....	13
<b>V – ETUDES ET PROJETS SCIENTIFIQUES .....</b>	<b>14</b>
a) uRADMonitor A3 .....	14
b) Observ'Air .....	14
c) Solution WAPMS (Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System).....	15
d) Solution d'intergiciel .....	15
e) Air Pollution monitoring.....	16
f) CITYOS: Sensing the air we breathe .....	16
g) ZURICH-OPENSENSE.....	17
<b>VI) ETUDE D'ARTICLES .....</b>	<b>19</b>
a) « Smart Water Grid Management using LPWAN IoT Technology » .....	19
b) « Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE 802.15.4 Technologies ».....	20
c) « Evaluation of Precalibrated Electrochemical Gas Sensors for Air Quality Monitoring Systems » .....	22
d) « Design of Compact LoRa Devices for Smart Building Applications ».....	23
e) « A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things » .....	25
f) « Using geosocial search for urban air pollution monitoring ».....	26
g) « Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation ».....	27
h) « An Architecture Offering Mobile Pollution Sensing with High Spatial Resolution ».....	28
i) MOSDEN: An Internet of Things Middleware for Resource Constrained Mobile Devices.....	30
j) « Air pollution monitoring system using LoRa module as transceiver system ».....	32
<b>VII - CONCLUSION .....</b>	<b>33</b>
<b>VII - BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>34</b>



## I – Introduction

La qualité de l'air est un sujet de plus en plus important dans notre société actuelle. Dans certaines villes en Chine, l'air est si pollué que les habitants sont obligés de porter des masques pour se protéger. Ce constat inquiète les résidents des grandes villes de France où l'air est le plus contaminé. C'est dans ce contexte que de plus en plus d'initiatives sont mises en place pour limiter l'émission de polluants en ville.

Considérant ce problème comme une **urgence**, la mairie de Paris a décidé d'agir, en visant un objectif de réduction de 25% les émissions de polluants dans la capitale entre 2004 et 2020.



Figure 1 - Site de construction urbain

Un système de capteurs de pollution de l'air comme Smart Construction pourrait aider à atteindre ces objectifs, en permettant de **surveiller et de contrôler la qualité de l'air sur les chantiers**, qui sont **l'une des premières sources d'émission de particules fines**. En effet, ces sites de construction émettent des polluants nocifs pour la santé pouvant être à l'origine de certains cancers, comme par exemple le cancer des poumons.

Notre projet s'inscrit dans une démarche innovante de l'école ECE Paris afin de permettre aux jeunes étudiants d'être sensibilisés aux enjeux de demain et proposer des solutions innovantes.

Nous allons dans cet ouvrage, établir l'état de l'art des différents capteurs de polluants et des multiples réseaux que nous allons utiliser, pour avoir une meilleure maîtrise du domaine de recherche que nous souhaitons aborder. De même, il est important de savoir ce qui se trouve déjà sur le marché, afin de ne pas développer un produit déjà existant ou en cours de développement. Enfin, cette étude nous permet de faire émerger la valeur ajoutée de notre projet par rapport aux solutions existantes.

Remarque :

*Pour assurer la confidentialité des projets R&D et des projets sur le marché, les chercheurs/entreprises ne communiquent pas leurs technologies et les réseaux employés par soucis de concurrence. Ainsi, lors de nos recherches nous n'avons pas pu avoir accès à tous les détails techniques.*

## II - Technologies

### a) ZigBee

**ZigBee** est un protocole de haut niveau qui est devenu un nouveau **zigbee alliance** standard mondial pour la connectivité sans fil, en étant basé sur la norme **IEEE 802.15.4**. Il est maintenu par des entreprises, des universités et des organismes gouvernementaux connus sous le nom de **ZigBee Alliance**. Il ressemble un peu à la technologie Bluetooth mais avec un débit de données plus faible. L'un de ces objectifs est de simplifier et rendre moins onéreuse l'utilisation de protocoles de communication sans fils, pour concurrencer directement cette autre technologie similaire qu'est le Bluetooth.

Il tire son nom de la façon dont les abeilles zigzaguent entre les fleurs, formant un nuage mouvant. Chaque abeille relaye à sa voisine de l'information sur l'endroit où les trouver des ressources. Ce mouvement de zigzague a donc inspiré le nom de ZigBee.

Ce protocole possède trois caractéristiques majeures, qui le rend attrayant :

- Il permet **l'interopérabilité**, ce qui permet à différents produits de travailler ensemble sans problèmes, malgré le fait qu'ils viennent d'entreprises différentes. Cela présente un atout majeur dans notre projet, car l'interopérabilité est un élément clé de « Smart construction ».
- Il a une **faible consommation énergétique**. Il permet à des appareils de durer beaucoup plus longtemps, élément aussi important pour notre projet. Il faut savoir qu'il a été mis au point en mettant l'accent sur les produits à faible coût d'applications alimentées par batterie. Sachant que nous allons utiliser des capteurs, ces derniers n'ont pas besoin d'une bande passante élevée mais d'une faible latence et d'une très faible consommation d'énergie pour une longue durée de vie de leur batterie.
- Il fournit une norme de communication à **courte portée**. Cela lui permet de transférer des données sur de faibles distances. C'est pour cela qu'il est beaucoup utilisé dans la domotique.

Identiquement à la norme 802.15.4, le protocole ZigBee prévoit deux types de périphériques physiques :

- **« Full Function Device » (FFD)**, qui peuvent fonctionner dans n'importe quelle topologie. Ces derniers ont trois rôles possibles : coordinateurs, routeurs ou équipements finaux.
- **« Reduced Function Device » (RFD)**, qui sont limités à la topologie en étoile. Ils sont peu gourmands tant au niveau énergétique que sur l'utilisation mémoire du microcontrôleur. Les équipements RFD sont donc des équipements finaux et ne peuvent être des coordinateurs ou routeurs.

# Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

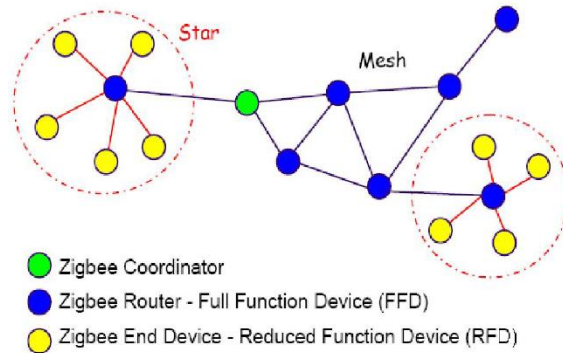


Figure 2 - Modèle de réseau ZigBee

La couche réseau ZigBee supporte 3 topologies différentes : la topologie en **étoile**, **maillée** et en **arbre** (voir schéma ci-dessous).

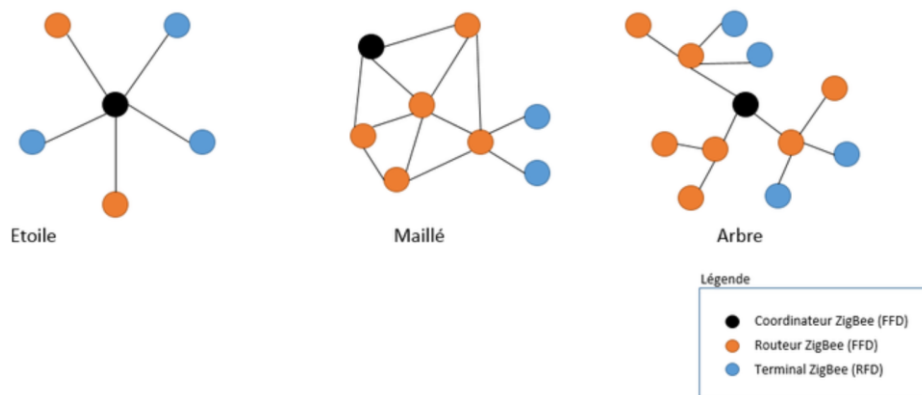


Figure 3 - Schéma des topologies ZigBee possibles

Bien que ZigBee soit inférieur à la quasi-totalité des autres débits de données, il les dépasse en termes de probabilité dans l'équipement sophistiqué et le contrôle de données. Ce protocole est donc une des meilleures solutions pour les communications à faible débit et à courte portée, ce qui est très intéressant pour notre projet.

Toutefois, ZigBee présente aussi d'autres limitations telles que :

- L'utilisation de **basses fréquences**, ce qui entraîne un **manque de données transférables**, impliquant une utilisation sur des objets simples tels des capteurs.
- Les signaux ne sont **pas directement compatibles avec les systèmes dits « avancés »**, tels que les tablettes ou les smartphones. Il faut donc utiliser une **passerelle**, qui sera connectée au réseau local via WiFi ou câble Ethernet.

## b) LoRaWAN et LoRa

Aujourd'hui, nous essayons de déployer des solutions de réseaux pouvant couvrir une large zone en utilisant la technologie LPWAN (Low Power Wide Area Networking). Elle combine des avantages comme la basse consommation, la large couverture réseau et une topologie de réseau en étoile, ce qui simplifie son déploiement et sa maintenance. Les domaines d'application sont nombreux comme par exemple les villes intelligentes ou l'agriculture connectée.

Le protocole de communication **LoRaWAN** est celui qui a le plus de succès dans le domaine du LPWAN et est le plus utilisé dans l'Internet des Objets. La technologie **LoRa**, la **couche physique du LoRaWAN**, permet de connecter plusieurs objets. Cette technologie fut créée en 2009 par une start-up française appelée Cycléo puis rachetée par Semtech en 2012.

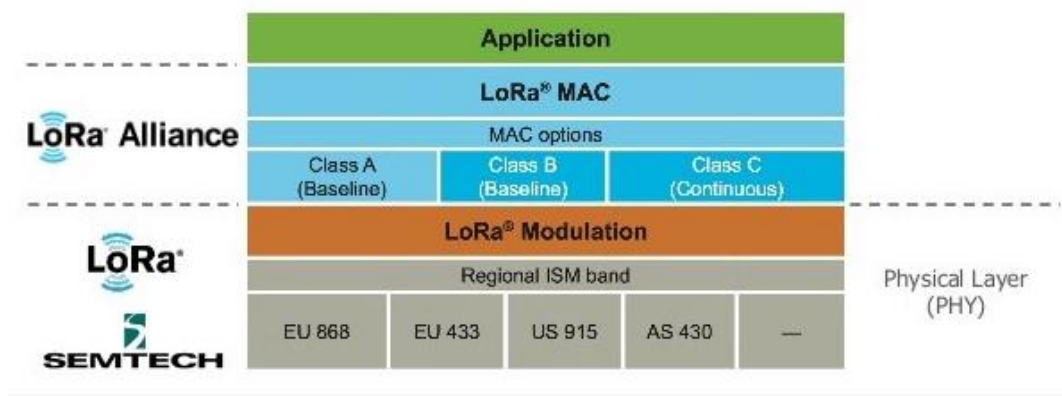


Figure 4 - Schéma de la technologie LoRa

La technologie LoRa possède un taux de données de 27 kbps et peut, à travers une seule passerelle, collecter des données de milliers de nœuds dispersés sur plusieurs kilomètres. Le nombre de solutions utilisant le réseau LoRa augmente sans arrêt et opère sur la bande **ISM** qui est utilisable sans License contrairement aux réseaux cellulaires IoT. Cela favorise alors le déploiement de réseaux privés LoRaWAN, sans obligation d'utiliser des opérateurs mobiles. De plus, il est appuyé par de grandes entreprises telles que Cisco, IBM et HP. Ses avantages sont nombreux : basse consommation d'énergie, environ 10 ans d'autonomie, communication bidirectionnelle, de 2 à 5 km de couverture réseau en zones urbaines et 15 km en dehors.

Il existe 3 types de classe pour les appareils utilisant la technologie LoRa appelés Classe A, Classe B et Classe C. La première utilise le réseau ALOHA pour la liaison montante et se doit d'être implémentée sur tous les dispositifs terminaux. La réception de la liaison descendante n'est possible qu'après un succès d'une liaison montante. De plus, elle est la classe qui consomme le moins. La Classe B est similaire à la Classe A mais n'a pas besoin de liaison montante réussie pour recevoir une liaison descendante. Elle consomme plus d'énergie que la précédente. La Classe C quant à elle, est en permanence active sur le canal, sauf lors de la

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

transmission d'un message. On peut voir sur le schéma ci-dessus, que ces 3 classes ont la même couche physique.

Dans la bande ISM utilisée, 3 canaux de 125 kHz sont possibles pour les dispositifs terminaux. Plusieurs morceaux d'un même message (frame) peuvent être échangés en même temps. Cependant, plusieurs bandes passantes peuvent être choisies, comme les bandes de 125, 150 et 500 kHz dans les Hautes Fréquences de l'ISM 868 et 915 MHz. Pour les Basse Fréquences ISM 160 et 480 MHz, ce sont les bandes passantes de 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.2, 41.7 et 62.5kHz. La taille du message que l'on peut transmettre est de 51 à 222 octets. Enfin, le taux de données varie entre 22 bps et 27 kbps selon le Facteur de Diffusion (« **Spreading Factor** », aussi appelé **SF**) et la bande passante. Plus ce facteur est grand, plus la communication est lente et plus la couverture réseau est grande.

Plusieurs limites sur LoRaWAN peuvent être observées. Le « Duty-Cycle », qui correspond au pourcentage de temps maximum durant lequel le dispositif terminal occupe un canal, est une contrainte du réseau LoRa fonctionnant sur des bandes sans licence. Cette contrainte limite le débit maximum d'envoi de messages, surtout s'il y a peu de capteurs. De plus, plus on envoie de messages en même temps sur plusieurs canaux, plus on augmente le risque de collision. Celui-ci diminue avec l'augmentation du nombre de dispositifs terminaux. Le principal nouveau challenge de cette technologie sera de pouvoir coordonner les diverses applications qui utilisent cette même infrastructure. Le manque de déploiements coordonnés de passerelle LoRaWAN dans les régions urbaines pourrait augmenter le risque de collisions, dû à l'utilisation de grands Facteurs de Diffusion. Pour les communications en temps réel sur un petit réseau de capteurs, il est conseillé d'avoir un Facteur de Diffusion petit et une passerelle proche des dispositifs terminaux. Enfin, le nombre de canaux utilisés doit être bien adapté pour minimiser le risque de collision et offrir une alternative de canaux rapides, pour rediriger les paquets victimes de collision.

Plusieurs plateformes utilisant la technologie LoRa existent. Par exemple, tout récemment en octobre 2019, Orange a mis en place une plateforme appelé « **Smart Operations** », permettant de récolter les données de capteurs pour mesurer la fluctuation du niveau d'eau des bassins de rétention d'eau pluviale. Afin d'éviter l'hétérogénéité des équipements (types de capteurs différents, communications différentes entraînant l'utilisation de plusieurs interfaces), l'opérateur a décidé de regrouper l'ensemble des équipements dans une seule et même interface. Les informations sont transmises grâce au réseau LoRa et sont affichées sur la plateforme « Smart Operations ».

Airbus a lui aussi une plateforme utilisant la technologie LoRa. Il a choisi **Objenious**, une filiale de Bouygues Telecom, pour déployer un réseau de 700 capteurs connectés sur 3 sites français. Le réseau LoRa ainsi créé, vise à géolocaliser des équipements pour effectuer un inventaire en temps réel, relever les températures pour mieux conserver les pièces détachées ou encore connecter des boutons de commande des chaînes de montage.

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

D'autres réseaux LPWAN existent comme le réseau **NB-IoT**. Contrairement à LoRa, il opère sur des bandes avec licences et le nombre de plateformes dédiées utilisant cette technologie est beaucoup plus faible. Il possède également une latence plus élevée et est plus souvent mis en place pour des projets en intérieur. En France, cette solution est peu déployée.

Le réseau **LTE-M** est également une solution LPWAN. Elle possède un taux de données plus élevé que celui du NB-IoT mais nécessite une bande passante plus élevée et coûte plus cher. Sa plus grande différence avec LoRa et NB-IoT est le fait qu'il peut transmettre de la voix. Néanmoins, cette caractéristique n'est pas utile dans le cadre de notre projet. En effet, le réseau LoRa semble être le plus flexible et le plus adapté pour notre projet parmi les réseaux LPWAN.



## III – Stations de surveillance de la qualité de l'air

### a) Explication des différentes stations déployées de nos jours

Des associations, comme AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air), gèrent le contrôle de la **pollution atmosphérique** et la surveillance de la qualité de l'air ambiant. Ces stations mesurent donc la teneur des composants dans l'air selon les lieux où elles sont installées. Les polluants étudiés sont le **dioxyde de soufre**, le **dioxyde d'azote**, l'**ozone**, le **benzène**, le **plomb**, les **particules** et le **monoxyde de carbone**.

Il existe deux groupes de stations :

- **Les stations de fond**, placées dans les régions **rurales et nationales**. Les stations de ce type sont relativement éloignées de toute source de pollution proche. Elles permettent donc de mesurer un air moyen, un air « de fond », dans le secteur concerné.
- **Les stations de proximité**, implantées dans les zones à **trafic et industrielles**. Ces stations peuvent être **fixes ou mobiles**, situées à proximité plus ou moins grande de la source émettrice de polluants qu'elles sont censées mesurer. Elles peuvent donc être situées bord d'un axe important de circulation, d'un carrefour ou à proximité d'un émetteur industriel.

En France, les stations ont été classées en **sept catégories** différentes parmi ces deux groupes et selon la typologie suivante :

Catégorie de stations	Objectifs des stations
<b>Station trafic</b>	Fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones situées en proximité d'une <b>infrastructure routière</b> qui sont susceptibles d'être exposées.
<b>Station industrielle</b>	Fournir des informations sur les concentrations représentatives du niveau de pollution induit par des <b>phénomènes de panache ou d'accumulation issus d'une source industrielle</b> .
<b>Station urbaine</b>	Permet le suivi du niveau moyen d'exposition de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits « de fond » dans les <b>centres urbains</b> .
<b>Station périurbaine</b>	Permet le suivi du niveau moyen d'exposition de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits « de fond » à la <b>périphérie du centre urbain</b> .
<b>Station rurale régionale</b>	Permet la surveillance de l'exposition des <b>écosystèmes</b> et de la population à la pollution atmosphérique « de fond » notamment <b>photochimique</b> à l'échelle régionale.
<b>Station rurale nationale</b>	Participe à la surveillance dans les <b>zones rurales</b> de la pollution atmosphérique dite « de fond » issue des transports de masse d'air à longue distance, notamment transfrontalière.
<b>Station d'observations spécifiques</b>	Permet de réaliser des <b>études scientifiques</b> .



Figure 5 - Photo de la station de surveillance de la qualité de l'air Atmo Aquitaine

On y trouve soit des stations **fixes**, soit des stations **mobiles**, comme par exemple des véhicules de type camionnette-laboratoire équipés d'analyseurs d'air en continu :

- **Une station fixe** est un lieu de prélèvement permanent de l'**air ambiant**. Les prélèvements sont effectués 24 h/24 et 365 j/365. Une station fixe est en général un petit bâtiment en dur type chalet, station de proximité ou station de fond, muni à son sommet de dispositifs de prélèvement de l'air ambiant et à l'intérieur, d'analyseurs spécifiques des polluants principaux, tels que :
  - Particules de Matières **PM<sub>10</sub>**
  - Dioxyde de soufre **SO<sub>2</sub>**
  - Monoxyde d'azote **NO**
  - Dioxyde d'azote **NO<sub>2</sub>**
  - Ozone **O<sub>3</sub>**
  - Monoxyde de carbone **CO**
  - Benzène, Toluène et Xylène **BTX**

Les stations comportent également un système d'acquisition et de transmission des données.

- **Une station mobile** est l'équivalent mobile d'une station fixe de mesure, équipée des mêmes analyseurs d'air ambiant. Cependant, elle est souvent équipée en plus, de dispositifs pour la détermination des principaux **paramètres météorologiques** (température, pression atmosphérique, direction et vitesse du vent, hygrométrie, etc.).

Dans notre cas, nous allons nous concentrer sur **les stations de surveillance de la qualité de l'air situées en France** avec plusieurs exemples. Nous allons voir à travers ces stations, quels polluants elles détectent et également dans quel milieu elles sont placées.

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparanjan

### b) Airparif & stations urbaines - stations fixes

Airparif est depuis 1979, une association indépendante de mesure de qualité de l'air en Ile-de-France.



Cet organisme se base sur plusieurs stations de mesure qui ont été **installées à différents endroits** dans la région. Ces stations **fixes**, visibles sur la carte ci-dessous, sont colorées d'une certaine couleur en fonction de leur résultat. Elles doivent rester constamment alimentées pour fonctionner et ne mesurent pas les mêmes polluants.

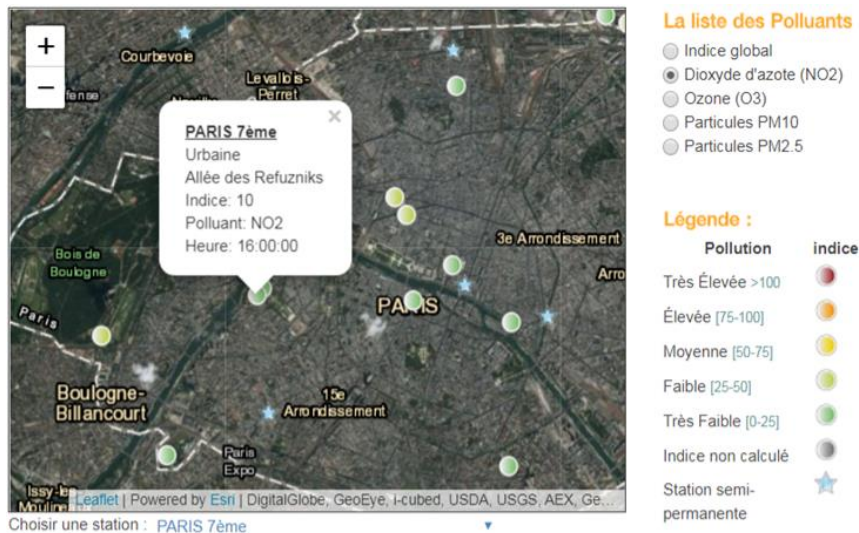


Figure 6 - Carte de Paris et stations fixes d'Airparif

Airparif propose également une application : **Itiner'AIR** (voir image ci-dessous). L'utilisateur peut alors identifier à quoi il est exposé **lors de ses déplacements et au besoin, aménager son itinéraire** pour moins subir la pollution.

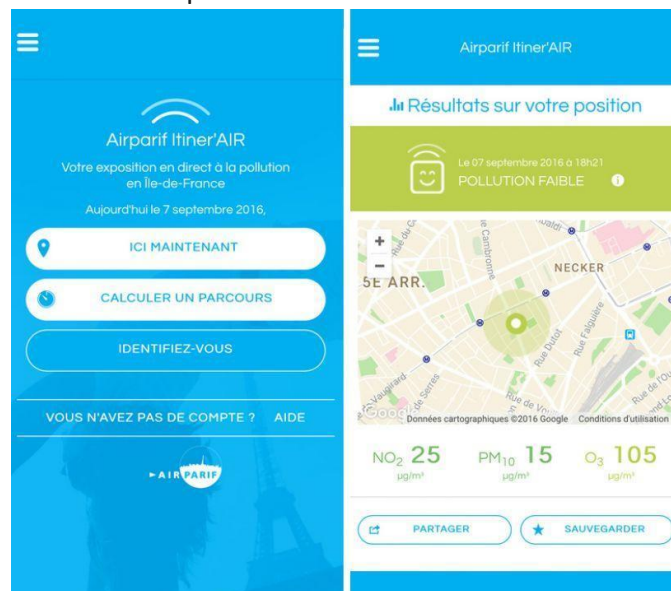


Figure 7 - Application Itiner'AIR

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

### c) Airparif & dispositif pollutrack. - station mobile

Afin de compléter les données récoltées par Airparif, **Enedis**, une société qui gère le réseau d'électricité en France, a proposé un projet pour Paris, en utilisant un dispositif appelé **Pollutrack**. Celui-ci repose sur **300 voitures électriques qui se déplacent dans la capitale et qui mesurent les polluants présents à hauteur d'Hommes**. Les capteurs concernés sont des lasers capables de détecter les particules fines : les PM2.5. L'objectif est de **repérer et cartographier les zones de forte pollution locale** en PM2.5, appelées aussi **hotspots**, afin d'affiner la connaissance de la qualité de l'air à Paris surveillée par Airparif. Les résultats sont visibles sous la forme d'une carte de la capitale avec code couleur qui dépend de la qualité de l'air. Toutes les heures, la carte est actualisée et permet donc d'avoir un suivi quasiment en temps réel de la pollution de l'air. Une estimation de celle-ci pour le lendemain est aussi disponible sur une autre carte.

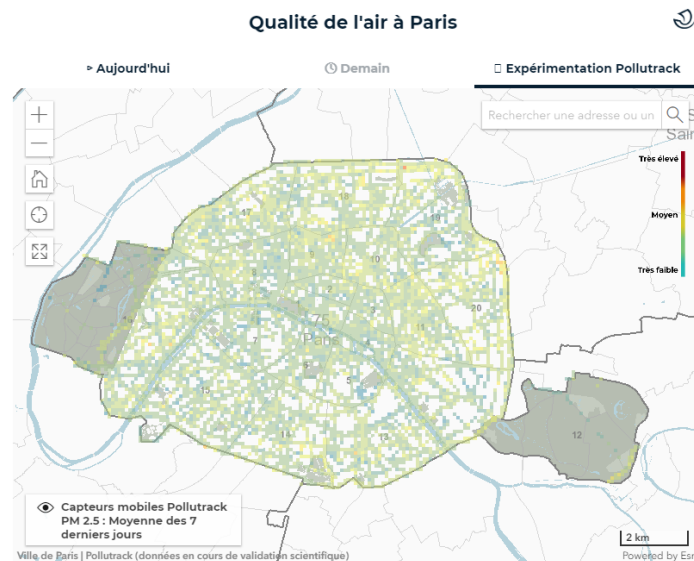


Figure 8 - Carte de mesure de la pollution à Paris grâce à l'expérimentation Pollutrack

### d) AQS1 Construction Air Quality Monitor - Aeroqual

Aeroqual, leader des équipements de surveillance de la qualité de l'air, propose un service de location de stations de **mesure de pollution pour les chantiers**.



L'appareil AQS1 (présent sur la photo ci-contre) est conçu pour mesurer de manière simultanée les polluants tels que le dioxyde d'azote (**NO2**), mais aussi l'ozone (**O3**), les composés organiques volatiles (**COVs**) et les particules fines (**TSP, PM10 et PM2.5**) émises sur les chantiers. Les données, mesurées en temps réel (jusqu'à 1 minute d'intervalle), sont analysées et sont disponibles en ligne. La station a besoin d'être branchée. Pour la communication, l'appareil peut utiliser **le WIFI Ethernet (LAN)** ou encore **Cellular IP 3G HSPA** ou **4G LTE** aux États-Unis seulement.



Figure 9 - Photo de l'AQS1



## IV – Analyse du marché

### a) Le capteur Flow

Si la pollution intérieure est un problème qui peut être réglé en ouvrant la fenêtre, on ne peut en revanche pas faire grand-chose une fois à l'extérieur. Pour répondre à cette problématique, l'entreprise Plume labs a développé un **capteur de pollution nomade**, nommé Flow. Ce **capteur intelligent, capable de mesurer la qualité de l'air** intérieur et extérieur, permet d'indiquer quel trajet opter en ville, pour respirer le moins de particules nocives pour la santé. L'application liée au produit propose des **conseils pour mieux protéger la santé des utilisateurs**.



Figure 10 - Photo du capteur Flow

Les fonctionnalités de Flow :

- Flow fournit des informations en temps réel (minute par minute)
- Il se concentre sur les gaz suivants : **NO<sub>2</sub>, VOC, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>**
- Il permet à l'utilisateur **d'adapter son chemin** de tous les jours en fonction du taux de pollution et de la gravité des polluants présents dans l'air.

### b) Nanoenvi

L'entreprise Enviralot s'attaque également aux problèmes liés à la pollution et produit ainsi des capteurs et systèmes de monitoring principalement pour la pollution et la météo. Un de leur produit est le capteur Nanoenvi, qui permet de surveiller différents gaz grâce à un appareil compact et autonome.



Les fonctionnalités de Nanoenvi sont :

- Il détecte certains gaz où il n'y a pas de station de surveillance de la qualité de l'air, c'est donc une façon de prendre en compte les « **angles morts** ».
- Grâce aux connexions au Cloud, les utilisateurs **reçoivent des données en temps réel** sur la pollution de l'air dans leurs ordinateurs, téléphones mobiles ou tablettes.

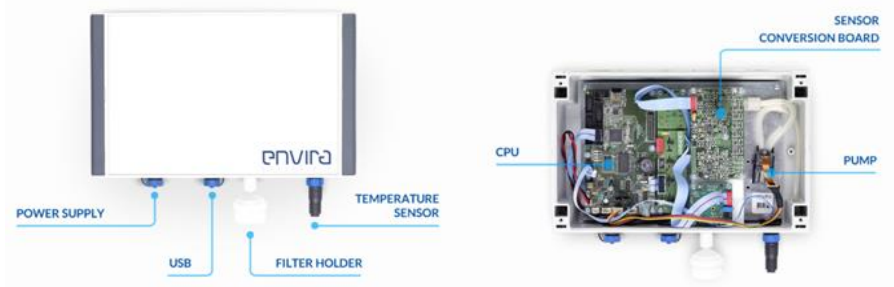


Figure 11 - Composants principaux de Nanoenvi

Le microcontrôleur utilisé est **l'ATMEL SAM4**. Il consomme **200µA** en mode actif tout comme le microcontrôleur **ATmega328P** disponible dans **l'Arduino Uno** que nous souhaitons utiliser pour ce projet. En mode repos cependant, celui de notre Arduino Uno consomme 0.1µA contre 1µA pour l'ATMEL SAM4. Ces 2 microcontrôleurs ont donc des spécificités quasi identiques et sont adaptés pour des objets destinés à une **basse consommation**.

### c) Atmotube

Atmotube est une société qui développe des détecteurs portables de pollution atmosphérique et de conditions météorologiques.

ATMO<sup>®</sup>  
T U B E


La société a développé **Atmotube Plus**, un **appareil portatif portable** qui surveille la qualité et la sécurité de l'air inspiré. **En temps réel** (toutes les quatre secondes), l'appareil mesure la pollution de l'air causée par les gaz nocifs et une large gamme de substances organiques volatiles (COV) telles que **l'acétone**, le **méthanol**, le **benzène**, **l'éthanol**, le **xylène** et le **formaldéhyde**. Il mesure également la pression atmosphérique, la température et l'humidité. En cas d'air ambiant **dangereux**, il va immédiatement envoyer une notification à l'utilisateur.

Grâce à l'application, on peut **rapidement connaître l'hygrométrie (mesure le degré d'humidité de l'air) de notre environnement de travail**. Cette application est utile pour les endroits à l'intérieur d'un bâtiment qui ne disposent pas d'extracteur d'air ou qui ne sont pas aérés régulièrement et pour lesquels l'ouverture d'une fenêtre ne permet pas d'éliminer toute l'humidité.



Figure 12 - Application smartphone Atmotube

### d) Machinemax

Machinemax est une entreprise spécialisée dans la télématique  **MACHINEMAX** sans fil révolutionnaire.

Elle a intégré la technologie **LoRa** de Semtech afin de **proposer une nouvelle solution de construction intelligente en traquant les machines du chantier**. En effet, **elle permet de surveiller efficacement l'état des machines dispersées sur le site de construction**. Ainsi, les directeurs des sites peuvent repérer des problèmes se déroulant sur le chantier, essayer de réduire les pannes des machines, le gâchis d'essence ou le coût de maintenance. Cette solution se met en place en moins d'une minute car elle se pose sur la machine avec un aimant et ne demande aucun apport d'énergie. Elle fournit en **temps réel** les données.



Figure 13 - Relevés d'activité d'une machine avec Machinemax

### V – Etudes et projets Scientifiques

#### a) uRADMonitor A3

uRADMonitor est un projet d'étude de qualité de l'air de la ville. Les développeurs ont alors conçus un réseau mondial de moniteurs automatisés, en tant que système de détection et d'alertes contre les facteurs chimiques et physiques nocifs qui nous entourent.



C'est une solution permettant de surveiller les paramètres de qualité de l'air dans les villes, **conformément aux exigences internationales** en matière de calcul de l'indice de la qualité de l'air. L'appareil est équipé d'un **capteur de diffusion de lumière laser** pour les particules **PM2,5** et **PM10** et de **4 capteurs électrochimiques pour le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone**. Ces 6 paramètres sont reconnus comme ayant un impact significatif sur la santé par plusieurs pays et font partie des processus qui nous entourent dans nos activités quotidiennes. La connectivité est mise en œuvre via **Wifi** et **LoRaWAN**, avec deux versions de circuit imprimé distinctes. La connectivité s'adapte à plusieurs scénarios d'utilisation dans les déploiements en ville.

La directive sur les plafonds d'émissions nationaux limite l'émanation de particules fines et le dioxyde d'azote (**NOx**) au niveau national. Une version révisée de la directive est, à compter de 2016, sous le contrôle du Conseil des ministres et du Parlement européen. Dans l'ensemble de l'UE en 2013, le dioxyde d'azote (**NO2**), qui est principalement produit par le trafic routier, a provoqué **68 000 décès prématurés**. Le scandale Dieselgate a révélé comment Volkswagen avait effectué des tests d'émissions de NO2.

L'ozone (**O3**) a tué 16 000 personnes et les petites particules (**PM2,5**) ont causé **la mort de 436 000 personnes** la même année. Les particules de PM2,5, particules microscopiques de poussière et de suie causées par la combustion de combustibles fossiles, peuvent pénétrer dans les poumons et la circulation sanguine.



Figure 14 – Photos du uRADMonitor A3

#### b) Observ'Air

L'Observ'Air fait partie d'une étude sur les **capteurs grand public** réalisée par un chercheur nommé Salim SRARI. Il a travaillé avec **10 capteurs identiques** de mesure de pollution de l'air (**Ozone, NO2, CL2**). L'Observ'Air est constitué d'un **capteur électrochimique** ainsi que d'une mémoire intégrée permettant de stocker des mesures sur une période de dix mois. Il est accompagné d'un **logiciel de visualisation** des données de mesure des polluants.

# Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

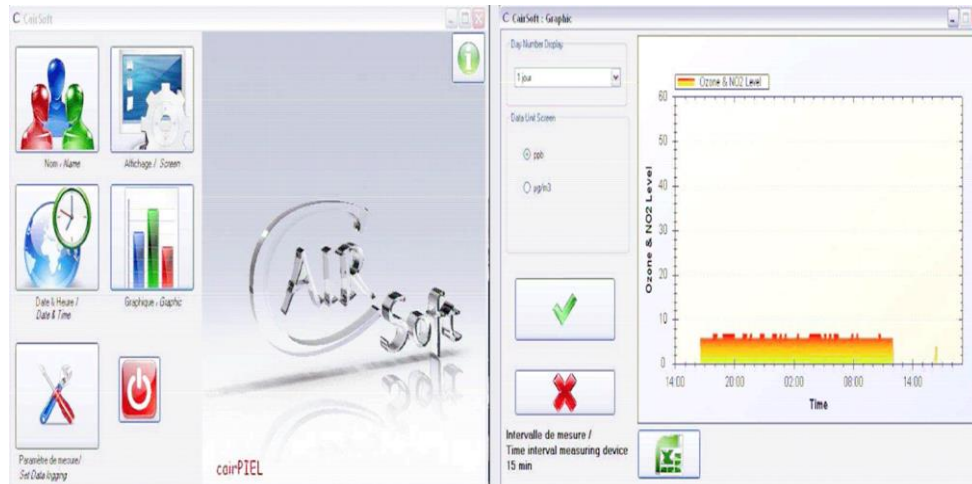


Figure 15 – Image de l'Observ'Air

## c) Solution WAPMS (Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System)

C'est une solution proposée par des chercheurs pour mesurer la pollution de l'air sur l'île Maurice. Elle est basée sur **un réseau de capteurs** (Wireless Sensor Network (WSN)) dispersés dans une zone. Le réseau de communication n'est pas précisé dans l'article mais plusieurs standards peuvent être envisagés : **Thread**, **ZigBee**, **IEEE 802.15.4**, **LORA** ou **LTE-M**.

Dans ce même article, une solution de fusion et d'agrégation des données est proposée. De plus, lors de nos mesures, **nous risquons d'avoir des données dupliquées qu'il faudra éliminer**. Une solution envisagée pour réaliser cela est le RCQ (**Recursive Converging Quartiles**). Elle utilise **3 quartiles** (1er quartile, médiane et 3ème quartile) pour sélectionner les données pertinentes pour les utilisateurs.

## d) Solution d'intergiciel

La conférence « *MOSDEN : An internet of Things Middleware for resource Constrained Mobile Devices* », propose une solution d'intergiciel (appelé « middleware » en anglais) pour **Android** appelée MOSDEN qui **collecte et transmet les données captées par les capteurs à une application (interface)**. Cet intergiciel est basé sur le **GSN** (Global Sensor Network). Il peut être installé sur des **mobiles** ou **Raspberry Pi** (appareil de niveau bas) et peut traiter les données à partir d'une base de données avec des requêtes SQL.

Le document **conseille également d'effectuer le traitement de données dans l'intergiciel avant que celles-ci ne soient dans la base de données**. Pour économiser de l'énergie, la méthode de transmission de données décrite dans ce projet scientifique s'effectue qu'après requêtes des utilisateurs. Pour notre solution, cette méthode n'est pas nécessaire car nous voulons mettre en place une période entre 2 transmissions de mesures.



### e) Air Pollution monitoring

Semtech propose une solution d'application de la technologie **LoRa** pour le contrôle de la pollution en ville. Elle propose le même principe que nous voulons appliquer pour notre projet.



En effet, la solution est basée selon le système suivant :

1. Le réseau de capteurs dispersés dans la ville communique avec la technologie LoRa.
2. Les capteurs envoient périodiquement les mesures de la qualité de l'air à une passerelle (appelée « Gateway » en anglais).
3. La passerelle transmet les données à un serveur qui les analyse et les traite.
4. L'application, mise à disposition des utilisateurs, les alerte de l'efficacité des mesures prises pour améliorer la qualité de l'air, des suggestions d'amélioration etc.

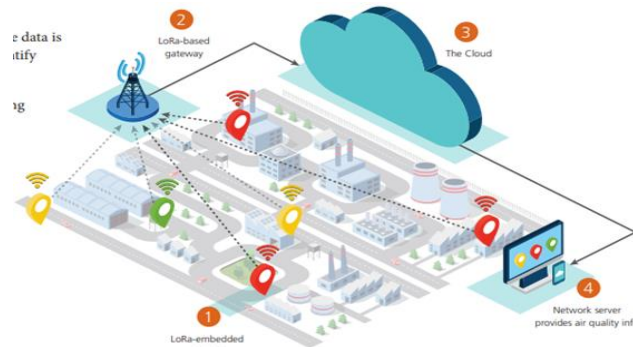


Figure 16 - Système de surveillance de la pollution utilisant le réseau LoRa

Cette solution, très semblable à la nôtre, possède plusieurs avantages :

- Réduire la pollution en ville en fournissant des données précises et un contrôle de la qualité de l'air.
- Peu cher à mettre en place.
- Réduire le coût de maintenance en assurant aux capteurs une autonomie de batterie allant jusqu'à 20 ans.
- Large couverture réseau avec l'utilisation du réseau LoRaWAN.
- Peut envoyer des millions de messages.

Cette solution peut donc s'appliquer pour mesurer la pollution de l'air dans un chantier. En effet, pour « Smart Construction », nous souhaitons utiliser un réseau LoRa afin de consommer peu d'énergie et parcourir une large zone.

### f) CITYOS: Sensing the air we breathe

La plate-forme ouverte CityOS est un projet qui donne vie aux villes en visualisant des données en temps réel sur de grands écrans et des applications mobiles.



### g) ZURICH-OPENSENSE

OpenSense est un des projets de la ville de Zurich. Il utilise des **cartes de particules ultrafines** créées à partir des mesures de son réseau de surveillance de la pollution atmosphérique **pour créer les applications iOS et Android**. L'application permet de fournir un service de routage optimal pour la santé des citoyens afin de **passer par des routes ayant une pollution moindre**. La plateforme de mesure OpenSense est basée sur le prototype de plateforme développée dans le cadre du projet **Nano-Tera X-Sense** et étendue pour la surveillance de la pollution atmosphérique.

Le noyau de la station de mesure est un ordinateur embarqué **Gumstix**, exécutant le système d'exploitation **Linux**. La station prend en charge **GPRS** (General Packet Radio Service)/**UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System) et **WLAN** (Wireless Local Area Network) pour la communication et le transfert de données. **Un récepteur GPS va permettre de fournir à la station des informations géospatiales précises**. La localisation dans les villes est une tâche difficile dû au faible nombre de satellites directement visibles. Pour pouvoir les repérer, la station de mesure est équipée d'un accéléromètre. Elle reçoit le signal de déverrouillage de la porte une fois installé sur un tramway. Ceci permet de faciliter la reconnaissance des arrêts de tramway afin de minimiser l'incertitude de positionnement. Le poids de la station OpenSense développée est d'environ **4,5 kg** et la consommation d'énergie est de **40W**. **La station est alimentée par le tram.**

### h) CHICAGO – ARRAY OF THINGS

The Array of Things (AoT) est un effort de collaboration des universités, des administrations locales et des communautés, afin de **collecter** et **réunir** des données en **temps réel** sur **l'environnement urbain**, les **infrastructures** et les **activités à des fins de recherches et d'utilisations publiques**. AoT consiste à mettre à disposition des utilisateurs, des informations météorologiques et de qualité de l'air grâce à un **réseau de capteurs urbains** constitués de **nœuds programmables** et **modulaires**. L'AoT servira essentiellement de « suivi de la condition physique » pour la ville, en mesurant les facteurs qui ont une incidence sur la qualité de vie dans les villes. On peut citer par exemple le climat, la qualité de l'air et le bruit.

Le projet AoT s'intéresse au suivi de l'environnement et de l'activité en milieu urbain, et non aux individus. En effet, la technologie et la politique ont été conçues afin de **respecter la vie privée des citoyens** et donc **minimiser toute collecte potentielle de données sur des personnes**. La protection de la vie privée est donc intégrée à la conception des capteurs et aux politiques d'exploitation.

### i) SENSING IN THE CITY

CENSIS et l'Université de Glasgow travaillent ensemble sur le projet « Sensing in the City », qui sera utilisé à l'avenir pour d'autres applications de ville intelligente. Le but est de **surveiller** de manière dynamique les principaux paramètres de l'air dans différentes zones, en temps réel, depuis une ville.

Libelium et CENSIS, le centre d'excellence des technologies des systèmes de capteurs et d'imagerie, ont mis au point un système portable basé sur des réseaux de capteurs sans fil afin de surveiller la qualité de l'air, respecter les normes réglementaires et surtout réduire les émissions de gaz et la pollution. Le système a été déployé dans la ville de Glasgow sur une flotte de fourgonnettes.

Le système à faible coût a été construit avec la plate-forme de **capteurs Libelium Wasmote** et peut être déployé de manière flexible et rapide dans des configurations mobiles pour compléter les stations statiques, offrant ainsi une plus grande capillarité aux projets de villes intelligentes.

La boîte fonctionne avec le logiciel **Wasmote Plug & Sense! Smart Environment PRO** et un certain nombre de capteurs différents afin de mesurer : la **poussière**, le **CO**, la **température**, **l'humidité**, la **pression**, le **NO**, le **NO2** et l'**O3**. Toutes les informations surveillées par la plate-forme sont envoyées au concentrateur de capteurs, situé dans la boîte à gants du véhicule, via la norme IEEE **802.15.4**. Il est composé d'un **Raspberry Pi2**, d'une **antenne GPS** (pour permettre le suivi) et de **Zigbee**. Les informations recueillies sont envoyées vers le cloud via la **3G** et visualisées dans CitySense, sur la plate-forme **Microsoft Azure IoT**.

CitySense est une interface utilisateur Web qui permet la visualisation des données et l'interaction avec les services de cloud computing. Elle peut intégrer des sorties de traitement et d'analyse de données. Le système d'aide à la décision **permet la création de cartes de qualité de l'air à haute résolution, spatiales et temporelles**.

Le projet est actuellement en phase 1 et sera éventuellement utilisé pour tester un plus grand nombre de villes. La plateforme sera également étendue à d'autres applications de ville intelligente en plus de la qualité de l'air, telles que la surveillance de l'état des routes, la gestion du trafic ou la conservation de l'énergie des bâtiments via l'imagerie thermique. Le but ultime est de développer un système offrant une solution complète aux pouvoirs publics.

## VI) Etude d'articles

Dans le cadre de la réalisation de l'état de l'art, nous avons cherché des articles connexes à ce que nous voulions faire.

### a) « Smart Water Grid Management using LPWAN IoT Technology »

Alors que la population mondiale augmente à un rythme constant, fournir de l'eau propre à la population de manière efficace est l'un des plus grands défis de l'ère moderne. **Contrôler le flux de l'eau pour qu'elle ne soit pas gaspillée est un autre défi.**

**Les chercheurs ont mis en place un nouveau réseau étendu de faible puissance (LPWAN) appelé LoRa**, qui est exploré dans notre étude pour la communication de ces dispositifs IoT. Les appareils LoRa peuvent communiquer entre **2 et 4 km** tout en utilisant des batteries qui durent des années.

Le système proposé est très intéressant pour notre projet car il présente beaucoup de similitudes techniques qu'on peut utiliser. En effet, il comprend divers composants permettant de surveiller en permanence la qualité de l'eau et aider à la décision de la fabrication. Le système comprend cinq composants principaux :

- **Capteurs** - Sept capteurs au total sont déployés sur trois sites, dont deux canaux et le réservoir commun du village. Ces capteurs calculent l'ORP, le pH, la salinité, le niveau, la turbidité, la température et le débit de l'eau.
- **Module LoRa** - Le module LoRa est responsable d'extraire les données du capteur via un Arduino Microcontrôleur et de transmettre celui-ci à la passerelle LoRa.
- **Passerelle LoRa** - La passerelle LoRa est configurée pour rassembler les données de tous les modules LoRa puis les envoyer afin de procéder au traitement dans le cloud.
- **Ericsson Cloud** - Après avoir récupéré les données de la passerelle, le nuage Ericsson (implémenté dans Ericsson Laboratoire de recherche) est responsable du stockage et du fonctionnement d'analyse sur les données.
- **Site Web** - Le site Web affiche des données en temps réel de l'Ericsson Cloud de différentes valeurs de capteurs. L'algorithme de prédiction permet de déterminer la valeur de jauge qui représente la qualité de l'eau en un coup d'œil.

Ce système possède des similitudes avec le nôtre par le fait qu'on a choisi le Module Lora qui va extraire les données des capteurs polluants pour notre cas via un Arduino puis va transmettre ensuite à la passerelle (« Gateway » en anglais).

**L'inconvénient** dans cette étude est que l'Ericsson Cloud est très coûteux. Nous allons donc pour **Smart Construction**, utiliser notre PC comme serveur, faute de budget, pour récupérer les données de la passerelle. Ensuite, nous afficherons les données en temps réel à l'aide de l'interface web.



### b) « Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE 802.15.4 Technologies »

Dans ce document, deux projets sont présentés. Pour chacun des deux projets, un choix différent de technologie et d'architecture réseau a été effectué. Ainsi, les technologies IEEE et LoRa ont toutes deux été utilisées pour ce projet, ce qui est très intéressant pour nous. Néanmoins, elles ne sont pas utilisées en parallèle (**non-hétérogénéité des réseaux**), alors que notre but est justement de parvenir à utiliser ces deux technologies dans un même projet.

Le but du projet Smart City est de pouvoir détecter la présence des voitures sur une route et allumer la portion de route correspondante pour la voiture et au pourcentage intéressant. Le but est également d'éclairer les places de parking libres dans un parking et éteindre les autres.

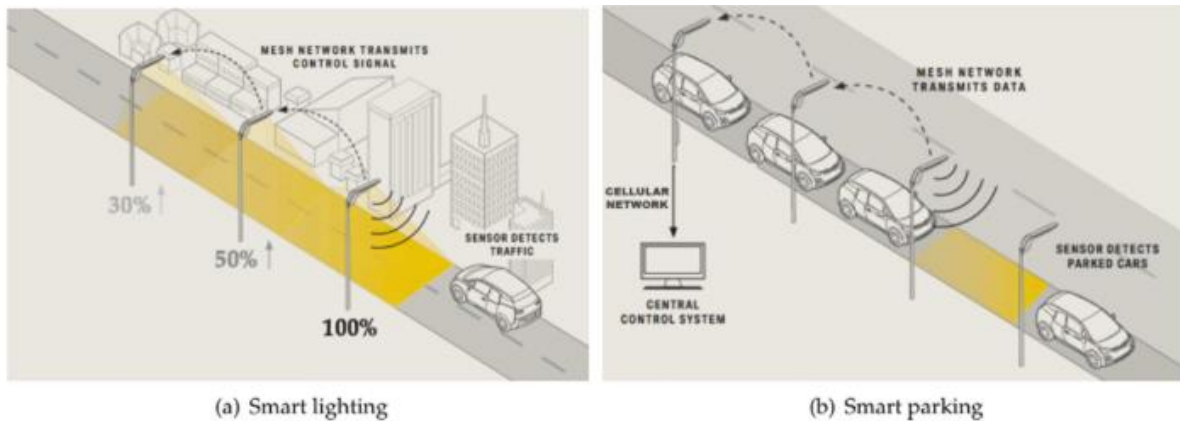


Figure 18 - Exemples de services intelligents liés à des lampadaires intelligents

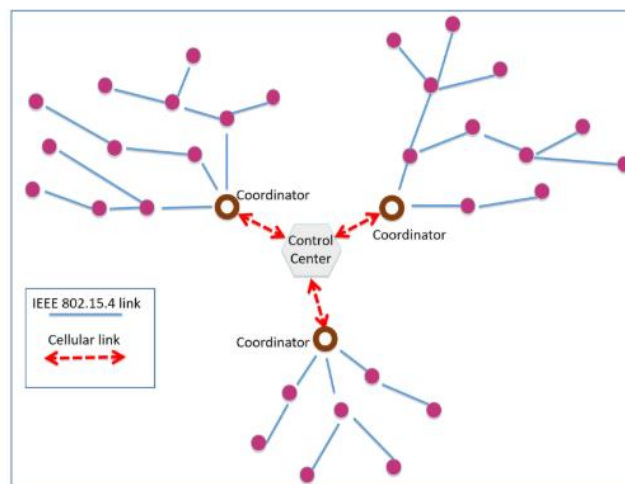


Figure 19 - Schéma de l'architecture réseau

La communication faite à partir de la technologie IEEE est représentée par des lignes bleues sur la figure ci-dessus. Comme on peut le voir, **l'architecture réseau est maillée**. La puissance de transmission est de **20 dBm** et le taux de transmission est de **250 kbit/s**. Les paquets échangés ont une taille de puissance max de 64 octets. Le réseau est composé de groupes de 100 à 150 pôles (comprenant des lampadaires et des capteurs) et est contrôlé par un coordinateur. Le nombre de sauts entre un coordinateur et un pôle va de 5 à 10, en fonction

Figure 17 : Ville connectée chez Fondation Alma Mater

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparanjan

de l'architecture du groupe, ce qui induit un **délai** dans le pire cas de **100ns** (pour aller du coordinateur à un pôle situé en bout du groupe). Chaque groupe a un canal différent pour minimiser les interférences entre les groupes.

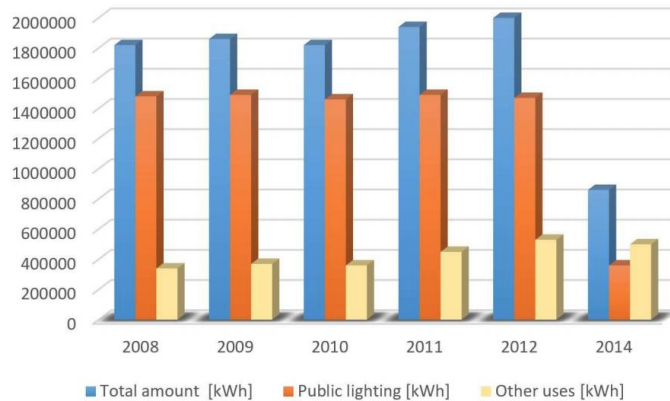


Figure 20 - Impact de la technologie d'éclairage intelligent dans Montechiarugolo

La figure ci-dessus montre l'impact économique considérable que la technologie d'éclairage intelligent a eu à Montechiarugolo. En 2014, première année de vie de la nouvelle infrastructure d'éclairage public, la consommation de l'alimentation électrique est passée de 1 500 000 kWh à 358 000 kWh (-76%), avec une économie importante (-73%).

Dans le deuxième projet de Smart City, « The Rigers Project », le but est de mesurer la **température**, l'**humidité**, le **taux de lumière** et le **CO2** dans des salles (donc en intérieur) avec une plate-forme multi-capteurs utilisant un **émetteur-récepteur LoRa** pour communiquer les données mesurées au centre de contrôle. La communication se fait via le protocole **LoRaWAN**. Chacun de ces capteurs fera périodiquement (chaque cinq minutes) une mesure de l'environnement et, toutes les heures la moyenne des valeurs mesurées sera envoyée à la passerelle LoRa via un seul saut (**topologie en étoile**). La passerelle fera alors suivre les données reçues au centre de contrôle via un réseau **3G**.

L'**inconvenient de Smart City** est le fait d'utiliser une topologie en réseaux maillés car le **temps d'attente est élevé** entre l'étude de données par un capteur et l'arrivée de ces données sur la passerelle. En outre, ce type de réseaux nécessite une **forte consommation d'énergie**.

Pour notre projet, nous utiliserons une **topologie en étoile** et le protocole **LoRaWAN**, qui a une communication s'effectuant en **un seul saut capteur-passerelle**.

### c) « Evaluation of Precalibrated Electrochemical Gas Sensors for Air Quality Monitoring Systems »

Les polluants atmosphériques nocifs ont été attribués à des conditions météorologiques défavorables et à des problèmes de santé qui sont particulièrement répandus dans les régions les plus peuplées du monde, telles que les mégapoles. Il a été relevé que le niveau de pollution actuel est associé à des affections telles que l'**asthme bronchique**, l'**emphysème** et la **pneumonie**. Par ailleurs, des études épidémiologiques ont révélé un risque alarmant de problèmes cardiaques exacerbés et graves, liés à une exposition à court et à long terme aux niveaux actuels de contaminants présents dans l'air, tels que les **PM2,5** et **PM10**, et de **contaminants gazeux** tels que l'**ozone troposphérique** et **oxydes d'azote**.

Or, les systèmes classiques de surveillance de la pollution atmosphérique sont principalement **basés sur des instruments volumineux, lourds et sophistiqués**. Les équipements ont tendance à appliquer des méthodes statistiques complexes et des outils d'appui complexes tels que des contrôleurs de température et d'humidité relative, des filtres à air ou des capteurs de particules et de gaz ainsi que des étalonneurs intégrés garantissant précision et performance. Ces équipements sont généralement **coûteux, volumineux** et utilisent une **quantité d'énergie excessive** entraînant une déficience dans les réseaux systématiques d'équipement de surveillance en temps réel. Ceci induit une inefficacité dans le suivi des gradients marqués de la concentration de polluants, dans l'espace et dans le temps. On a donc une incapacité à comprendre de manière exhaustive les effets de ces polluants sur la santé humaine et l'environnement. Dans une situation dans laquelle la pollution de l'air est de plus en plus grave, il est extrêmement souhaitable d'utiliser des capteurs ambiants peu coûteux, de petite taille et avec un temps de réponse rapide.

Ils ont analysé et validé l'efficacité des capteurs dans la surveillance des polluants de l'air extérieur, tels que le **CO**, l'**ozone**, le **NO2**, le **SO2** et les **particules**, dans les villes.

La conception de base est composée de trois parties :

- Une **libelium waspmote** contenant les différents capteurs de gaz
- Un **composant logiciel intermédiaire** pour la sauvegarde et la transmission de données graphiques
- Une **station de base** permettant de recevoir des informations qui se connectent également à d'autres utilisateurs sur le réseau.

Les équipements ont un plafond de **portée légèrement supérieur à 1 km contre 7 km dans un espace civil non cloisonné ouvert**. L'installation des waspmotes se font des **poteaux lumineux à 300 cm du sol**. Dans un autre article, « *Experience from the Design of an Air Pollution Monitoring System Based on Off-the-Shelf Equipment* », les gaz et les polluants pris en compte pour la mesure sont :

- Le CO
- Le plomb
- PM10, PM 2.5

- Le SO<sub>2</sub>
- Le NO<sub>2</sub>
- L'O<sub>3</sub>

Néanmoins, ils ne pouvaient pas tous être surveillés simultanément.

Sous la couche de détection, la fréquence de fonctionnement de l'émetteur-récepteur était de **2,4 GHz**. La pile de protocoles a été achetée à Digi International Inc. Les nœuds des capteurs étaient alimentés par des **piles au lithium** et la partie logicielle de waspmote était complétée par la fonctionnalité API. Le nœud du capteur a été réveillé périodiquement **toutes les 15 minutes** à partir d'un mode de conservation d'énergie. En ce qui concerne la couche intermédiaire de stockage de données, elle était responsable de la collecte ou de la quantification des entrées de capteurs et de l'accès aux mesures de composants externes. Cela a été incorporé avec une conception de meshlium provenant du commerce de Libelium. La troisième couche d'accès aux données a facilité la gestion à haut niveau de la fonctionnalité de surveillance de la pollution de l'air : outils pour diverses configurations de réseau, ainsi que l'adaptation des nœuds de capteurs et la représentation graphique ou l'illustration des valeurs.

L'**inconvenient principal** du projet est que des problèmes de communication ont été constatés entre les stations et la passerelle distante de 60 m à peine en raison de la structure contraignante de la ville.

Pour **Smart Construction**, on peut pré-calibrer les capteurs afin d'avoir des données fiables et donc avoir une bonne interprétation. On peut aussi cibler sur les gaz qui sont dits les plus dangereux qui sont : dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, ozone de surface et particules. On peut également voir comment réduire la sensibilité des capteurs dû à l'humidité et la température.

### d) « Design of Compact LoRa Devices for Smart Building Applications »

Cet article consiste à nous expliquer **l'optimisation des caractéristiques de transmission** (énergie, transmission de données...). Un « smart building » c'est l'intégration de systèmes intelligents, de mécaniques de contrôle, d'architectures et de matériaux de construction fonctionnant comme un ensemble de bâtiments permettant d'être amélioré en termes d'utilisation d'énergie, de longévité, de confort...

Dans « Smart building » il n'y a pas de standard de communication basse consommation, ainsi on utilise des standards plus anciens des autres industries comme LoRa ou SigFox.

L'article se concentre donc sur l'utilisation du LoRa dans le cadre de smart buildings.

Les critères de sélection des protocoles réseaux sont les suivants :

- Le coût
- Le taux de données (« data rate »)
- L'autonomie
- La portée



# Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

Les avantages du LoRa sont : sa **basse consommation** et sa **large couverture réseau**.

	LoRa[5]	SigFox[6]	NB-IoT [7]	Z-Wave[8]	Wi-Fi[9]
<b>Cost</b>	3-5€	2-5€	10-20€	8-12€	< 2€
<b>Data Rate</b>	<50 kbps	<100 bps	<200 kbps	<40 kbps	<300 Mbps
<b>Autonomy</b>	<10 years	<10 years	<10 years	<2 years	<10 days
<b>Range (urban)</b>	<5 km	<10 km	<1 km	<100 m	<40 m
<b>Modulation</b>	CSS	BPSK	QPSK	FSK	BPSK/QAM
<b>Bandwidth</b>	125/250 kHz	100 Hz	200 kHz	300 kHz	20/40 MHz
<b>Frequency (EU)</b>	868 MHz	868 MHz	LTE bands	868 MHz	2.4/5.0 GHz
<b>Spectrum Cost</b>	Free	Free	Very High	Free	Free
<b>Max. msg/day</b>	Unlimited	140(↑), 4(↓)	Unlimited	Unlimited	Unlimited
<b>Max. payload</b>	243 bytes	12(↑), 8(↓) bytes	1600 bytes	64 bytes	64 KB

Figure 21 - Technologies sans fil utilisées dans les Smart Buildings

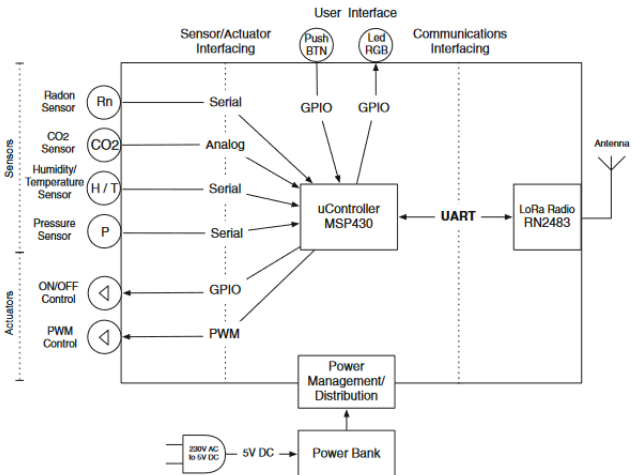


Figure 22 - Diagramme du système LoRa

Le bloc ci-dessus peut être utilisé dans deux modes différents : collection de données (DCU) ou unité d'activation (PAU). Pour le DCU il y a un certain nombre de capteurs connectés à un microcontrôleur ayant une consommation basse qui active ou non les capteurs en fonction de la gestion de la batterie. Pour le PAU on peut utiliser soit un contrôle ON/OFF soit un contrôle de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

Il y a trois modes de consommation : le **mode transmission**, le **mode capteur** et le **mode sommeil**. Ces modes font des choses différentes et consomment une quantité d'énergie différente.

L'inconvénient dans ce projet est l'utilisation d'une autre méthode de communication **SigFox coûte en revanche cher**. Z-Wave est une technologie sans fil faite pour la domotique. Et de l'utilisation du Wi-Fi qui est aussi très populaire puisque très répandue, mais il existe deux problèmes liés à son utilisation : la grande consommation d'énergie et le peu de portée (environ 40m).

Pour **Smart Construction**, il est crucial de prendre en compte **le design de l'antenne avec le circuit** pour obtenir des performances optimales. On peut obtenir des communications jusqu'à 4,2 km en ligne de vue directe, 1,2 km en environnement urbain et 152 m en communication dans un bâtiment sans compromettre la caractéristique basse consommation du LoRa. En ce qui concerne la conception de l'appareil on peut aussi le rendre **plat, imperméable à l'eau, peu cher**, en jouant avec l'optimisation de l'antenne.

### e) « A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things »

Dans le domaine des objets connectés, il y a toujours moins de ressources disponibles (batterie, mémoire, bande passante...). L'idée est donc de faire le plus possible avec le moins possible. Utiliser des **protocoles LPWAN** est donc intéressant **puisque'ils optimisent les transmissions de données pour faire moins diminuer la batterie des appareils qui reçoivent les données**. Le LoRaWAN est un exemple de LPWAN.

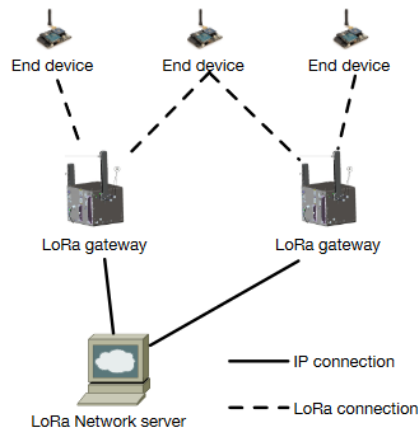


Figure 23 - Architecture du réseau LoRa

L'architecture d'un réseau LoRaWAN fonctionne de la manière suivante : **les dispositifs terminaux communiquent avec des passerelles et celles-ci transmettent les données** (sous forme de trames) à un serveur qui va les interpréter et les traiter. La modulation du LoRa est une technologie propriétaire Semtech et n'est donc pas complètement ouverte.

Le LoRaWAN est un protocole MAC, construit pour utiliser la couche physique du LoRa. Il est surtout fait pour faire **communiquer des réseaux de capteurs**. Les capteurs envoient des trames qui passeront par des passerelles, et les trames vont être envoyées directement au serveur qui va les traiter. Ce traitement peut consister à renvoyer des informations aux capteurs ou communiquer avec internet.

Il est possible de trouver les caractéristiques de transmission de données en amont en se concentrant sur les paramètres d'entrée permettant de **calculer des facteurs comme la portée ou la batterie consommée**.

### f) « Using geosocial search for urban air pollution monitoring »

Il y a 45 ans (1974), l'UNEP (United Nation Environment Program) et le WHO (World Health Organization) ont lancé un système mondial de surveillance de l'environnement pour la pollution de l'air (GEM/Air). Néanmoins, le déploiement généralisé n'étant pas possible pour le moment, l'article nous parle d'une autre solution.

Il propose d'utiliser les **réseaux sociaux en lignes (OSN pour Online Social Networks)**, comme réseau mondial de capteurs pour les mesures physiques. Il y aurait donc la possibilité d'intégrer les réseaux de détection de la pollution atmosphérique déjà existants, avec des mesures basées sur des publications Twitter qui parlent de la pollution de l'air. Le tout via un **système de recherche géosocial par mot clé**. L'avantage principale de cette idée est la gratuité des informations reçues.

L'**inconconvénient** est que l'expérience peut être réalisée uniquement dans des grandes villes afin d'avoir un large éventail de posts générés sur le réseau social. De plus, les utilisateurs peuvent avoir un point de vue subjectif et ainsi fausser les résultats. La création d'un **dictionnaire de termes** pour chaque ville analysée est également nécessaire car chaque région a sa propre façon de parler.

Cette solution fournit une information en temps réel. Pour pallier les contraintes de temps, les chercheurs ont pensés à réduire l'ensemble des messages sur lesquels ils travaillaient. Afin de prédire la pollution future, ils se sont servis d'une **approche prévisionnelle**, reposant sur la série chronologique du nombre de postes. Par ailleurs, lors de leurs calculs, ils ont utilisé le coefficient de corrélation de **Spearman**. Le schéma ci-dessous présente comment fonction la solution.

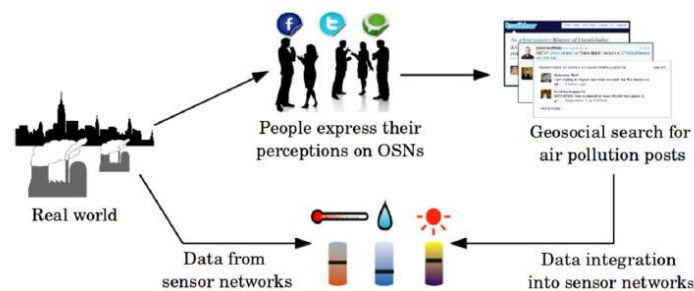


Figure 24 – Schéma du système proposé

Les polluants analysés par les stations de surveillance de la pollution atmosphérique sont :

- Les **particules en suspension respirables (PM2.5)**, particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm. Ils contribuent à la brume dans les contextes urbains.
- Les **particules fines en suspension (PM10)**, particules d'un diamètre égal ou inférieur à 2,5 µm.
- Le **dioxyde d'azote (NO2)**, un gaz brun rougeâtre ayant une odeur âcre. C'est un élément important du smog urbain.

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparanjan

Il faut savoir que la directive européenne 1999/30/CE indique que la concentration de particules d'un diamètre égal ou inférieur à 10  $\mu\text{m}$ , ne doit pas dépasser la moyenne horaire de **50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  et

**200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  pour le **dioxyde d'azote**.

Les chercheurs ont également remarqué qu'il y avait moins de posts Twitter en Chine à cause de l'effet d'accoutumance de la population après une longue période d'exposition à une mauvaise qualité de l'air.

### g) « Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation »

**LoRaWAN** (Long Range Wide Area Network) est un protocole de télécommunication qui permet de fournir des services d'abonnement basés sur la couche physique (PHY) de LoRa. Il utilise une topologie en étoile.

**LoRa** (Long Range) est une technique de transmission sans fil à longue portée. En effet, un dispositif LoRa peut transmettre des données sur 15 km dans une zone ouverte. Le problème est que s'il y a des obstacles entre les capteurs, cela va atténuer la puissance du signal sans fil et provoquer des pertes de données et des erreurs de communication.

Plusieurs solutions existent pour augmenter la sensibilité du récepteur, la portée de transmission et la **performance de livraison des données (PDR)** :

- Augmentez le « **Spreading Factor** » (SF) de LoRa PHY . Néanmoins, cela engendre un accroissement de la **collision de données**.
- Déployer plus de **passerelles LoRa**. Cependant, cela est coûteux et contraire au but original de LoRa, qui est de fournir un service de communication IoT économique et efficace.

Les facteurs qui affectent le plus la PDR sont les bâtiments, les obstacles, les interférences sur le terrain et l'emplacement des capteurs (intérieur/extérieur ou premier étage/dernier étage).

L'article nous propose alors une alternative, qui serait d'utiliser la **topologie en réseaux maillés** (Wireless Mesh Networks). Cela permettrait aux périphériques LoRa d'agir en tant que routeurs et ainsi augmenterait la PDR sans déployer de passerelles supplémentaires. En effet, nous n'aurions besoin que d'**une seule passerelle** qui collecterait séquentiellement les données accumulées par les capteurs IoT. Ces derniers essaieraient alors de trouver un parent qui serait le plus proche de la passerelle et qui offrirait une bonne qualité de communication pour transmettre leurs données.

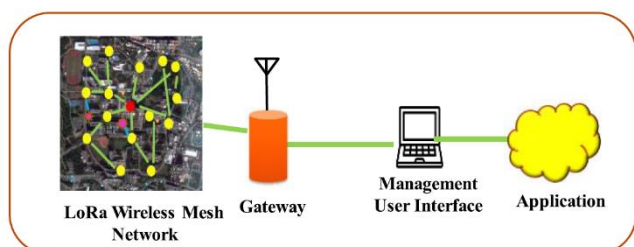


Figure 25 - Architecture du système présenté dans l'article

Pour mettre en place l'expérience, les chercheurs ont permis à la passerelle de collecter des données à intervalles d'une minute pendant huit jours. Ils ont alors remarqué que si l'on souhaitait augmenter la PDR, il fallait une **valeur élevée pour le SF** et une **valeur faible pour la bande passante**. Néanmoins, cela prolongeait considérablement la durée nécessaire pour transmettre les données sans fil et pouvait causer de graves **collisions de paquets de données** si plusieurs émetteurs envoient des données simultanément. Cela est similaire aux systèmes LoRaWAN, qui souffrent d'une PDR faible avec une densité élevée de périphériques LoRa. De plus, ces derniers ne fonctionnent pas de manière optimale sur des capteurs se trouvant à l'intérieur.

Lors de l'expérience, le module de réseau maillé LoRa était capable de former de manière dynamique un réseau maillé sans fil et de s'adapter aux changements environnementaux. De plus, la passerelle était responsable de l'interrogation des données provenant des capteurs. Ces derniers, contrairement à l'approche ALOHA LoRaWAN, n'étaient pas autorisés à envoyer des données sans attendre une **requête** de la part de la passerelle.

L'**inconconvénient principal** d'utiliser une topologie en réseaux maillés est que le **temps d'attente est élevé** entre la génération de données par un capteur et le téléchargement de ces données sur la passerelle. De plus, ce type de réseaux nécessite une **forte consommation d'énergie**.

Pour Smart Construction, nous utiliserons une **topologie en étoile** et le protocole **LoRaWAN**, qui a une communication s'effectuant en **un seul saut capteur-passerelle** (et pas en réseau multi-sauts).

### h) « An Architecture Offering Mobile Pollution Sensing with High Spatial Resolution »

Cet article parle d'une équipe de chercheur ayant un projet très similaire au nôtre. Ils veulent mettre au point des capteurs mobile de pollution car ceux qui existent aujourd'hui sont trop chers et surtout fixes (pas assez flexible).

La différence dans leur projet est qu'eux veulent que les capteurs soient vraiment mobiles, donc posées sur des vélos ou des taxis pour qu'ils puissent bouger dans une ville et élargir la zone analysée, alors que nous c'est sur un chantier précis.

Dans l'ensemble de l'Europe, environ 1 500 stations de surveillance de l'air ont été déployées pour contrôler la pollution de l'air à grande échelle. Même si cela semble beaucoup, à l'échelle d'une grande ville c'est très peu. C'est pourquoi des capteurs mobiles sont intéressants car en les déplacements on couvre plus d'espace, comme si on avait plus de capteurs.



# Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

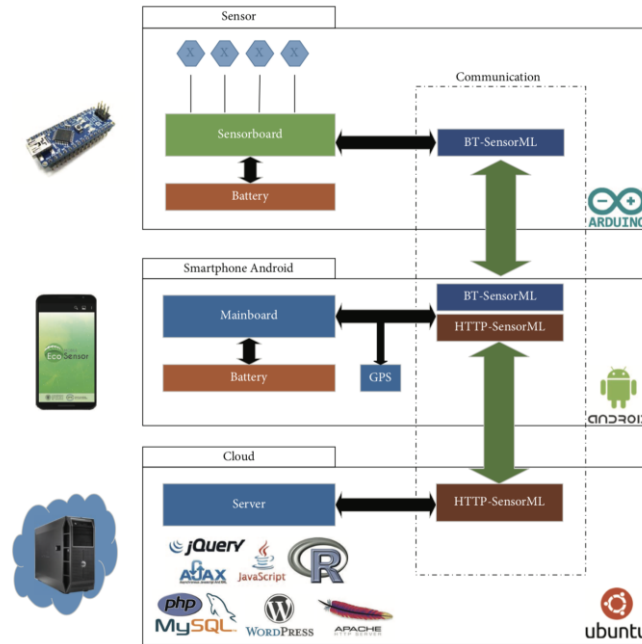


Figure 26 - Architecture de ce projet

**Le capteur :** Le capteur mobile est basé sur une plate-forme Arduino et mesure les paramètres d'environnement au travers de divers capteurs (ozone, CO2, pollution de l'air ou température).

Une fois que les données sont prêtes, elles peuvent être mises à la disposition du périphérique Android via une connexion Bluetooth.

## L'application : 2 parties

1. un service qui reçoit en permanence les données envoyées par le capteur et qui les enregistre dans une base de données interne
2. une interface utilisateur qui permet de démarrer ou d'arrêter une capture de données de trace à partir du capteur et qui fournit également un retour d'information en temps réel sur la pollution

## Le serveur :

Les données reçues sont enregistrées dans une base de données MySQL. Ensuite, les informations sont traitées à l'aide de différentes statistiques. Enfin, les informations détaillées sont présentées à l'administrateur système par le biais d'une interface Web.

Il y a aussi un site web où l'utilisateur peut retrouver les différents trajets et statistiques, il propose des graphiques.

Ils ont par la suite réalisé une série de tests pour estimer l'impact d'événements extérieurs sur la qualité des capteurs, comme l'inclinaison ou l'échantillonnage temporel et spatial.

L'**inconvenient** dans ce projet est l'utilisation du Bluetooth de communications permettant l'échange bidirectionnel de données à très courte distance en utilisant des ondes radio alors que LoRa est à grande portée.

De plus, ils ont relevé 4 problèmes majeures :

- Filtrer les données capturées afin de réduire la variabilité des mesures consécutives ;
- Convertir la sortie du capteur en niveaux de pollution réels ;
- Réduire les variations temporelles produites par le processus de détection mobile ;
- Appliquer des techniques d'interpolation pour créer des cartes de pollution détaillées.

Ce projet est très **proche** du nôtre, les calculs au niveau de l'analyse des données peuvent resservir. De plus, tous leurs tests de comparaison avec les capteurs mobiles sont intéressants. **L'architecture du projet** similaire à la nôtre, avec un smartphone Android en plus.

### i) MOSDEN: An Internet of Things Middleware for Resource Constrained Mobile Devices

Cet article parle d'une solution middleware qui collecte et traite des données provenant de capteurs. Cette solution est basée sur un middleware déjà existant : le GSN (Global Sensor Network). Elle s'appelle MOSDEN : Mobile Sensor Data Processing Engine. Les utilisateurs n'ont pas besoin de coder des algorithmes.

Cette solution est utile car c'est impossible et non pratique de connecter tous les capteurs directement à internet. En effet, cela coûterait trop cher en termes de bande passante, hardware et calculs. De plus, il faut prendre en compte les contraintes comme la consommation d'énergie et le type de communication au réseau.

En ce qui concerne la consommation d'énergie, il en existe 2 principales : l'énergie consommée (notée  $E^{\alpha}$ ) par le traitement de données et l'énergie consommée par le réseau utilisé (notée  $E^{\beta}$ ). Si  $E^{\alpha} < E^{\beta}$  alors on effectue le traitement de données localement sinon on envoie au nœud avec une plus grande capacité pour économiser de l'énergie.

MOSDEN effectue le traitement de données avant de les transmettre. Elle peut être installée sur des mobiles ou Raspberry Pi (appareils de niveau bas) et peut traiter à partir d'une base de données avec des requêtes SQL. Ce middleware ne collecte pas les données sauf si l'utilisateur fait une requête. C'est une application (software) indépendante qui est basée sur 3 exigences: l'évolutivité (compatible avec tous capteurs), la facilité d'utilisation (récupérer les données sans avoir besoin de programmer) et le fait qu'il soit gratuit et open source dans le futur.

## Smart Construction - Etat de l'art

Amandine Ducruet, Marie Yahiaoui, Aurelio Rognetta, Martin le Mintier, Solène Consten, Manar Aggoun, Agetha Sugunaparan

MOSDEN est 100% compatible avec GSN. Les principales interactions entre les instances MOSDEN et GSN cloud sont :

- MOSDEN enregistre les nouveaux capteurs détectés dans le cloud GSN
- Cloud GSN combine toutes les informations et modèles de données en utilisant le Semantic Sensor Network
- Méthode « pull » : GSN effectue une requête à chaque fois qu'il veut des données du MOSDEN
- Méthode « push » : GSN effectue une requête et MOSDEN renvoie des données tant que la requête n'expire pas
- 

MOSDEN est codée en Java et fonctionne sur les appareils Android. Les principales fonctionnalités sont : le traitement de données, architecture REST et communication peer-to-peer en HTTP.

Une expérience est réalisée sur 3 appareils Android différents. Plusieurs paramètres sont étudiés : la consommation du CPU, l'évolutivité (scalability), l'exigence de mémoire, la Latence. On remarque que plus il y a de capteurs, plus l'utilisation du CPU (surtout si RAM faible) et de la mémoire augmente. De plus, la consommation en énergie augmente également. Plus on a de mémoire disponible sur l'appareil, plus MOSDEN en occupe. Enfin, plus il y a de requêtes plus la latence augmente. L'expérience montre que la mémoire est plus importante que le CPU, que réduire le taux d'échantillonnage permet un gain d'énergie et une diminution de consommation de ressources importants.

D'autres solutions IoT middleware existent : Microsoft Sensor map, Linked Sensor Middleware, Cosm, TWINE, Ninja Blocks, Smart Things. (voir plus bas pour leur descriptions). On peut également avoir des capteurs mobiles comme les smartphones.

L'**inconvenient** dans ce projet est que le nombre d'objets connectés augmente et MOSDEN est une solution qui connecte facilement les capteurs à des appareils mobiles. Un grand nombre de ressources peut être économisé en effectuant le traitement de données localement au lieu de transmettre toutes les données à un serveur à distance.

Pour **Smart Construction**, il faudra que nous ayons nous aussi une solution middleware pour transmettre les données captées par nos capteurs à notre site web. Nous devons également avoir un **algorithme de traitement de données** afin de donner les meilleures informations à l'utilisateur. Nous devons aussi avoir une base de données contenant les informations transmises par les capteurs. L'article conseille d'effectuer le traitement de données **localement** avant que celles-ci ne soient dans la base de données. Pour économiser de l'énergie, la transmission de données devraient s'effectuer qu'après requêtes des utilisateurs.

### j) « Air pollution monitoring system using LoRa module as transceiver system »

Le but est de **mesurer la qualité de l'air** à des endroits précis et envoyer les résultats traités et mis en forme aux utilisateurs en temps réel.

Ils utilisent :

- **Des capteurs** (MQ-7 pour CO, NQ-135 pour NO2, MQ-136 pour SO2, GPS pour la localisation (coordonnées en latitude, longitude et altitude)).
- **Une RPi3** pour recevoir les données, les convertir dans un format adéquat, en « ppm » (part per million), et les envoyer aux utilisateur (sans connexion à internet).
- **Une communication via LoRa** avec des modules de signaux aux fréquences radio intégrés, utilisant deux scénarios différents :
  - LOS, avec comme condition que la zone séparant les parties ne doit pas avoir d'obstacles. Les résultats sont : une transmission intacte des données jusqu'à 800m (pour 300m il y a 2-3s de délai, pour 500m il y a 2s de délai et pour 800m il y a 5s de délai).
  - NLOS (ce qui correspond à notre projet), sans condition : la communication peut se faire y compris s'il y a obstruction entre les parties. Les résultats sont : une transmission intacte des données jusqu'à 350m (pour 100m il y a 3-5s de délai, pour 200m il y a 2-3s de délai et pour 350m il y a 5-12s de délai).

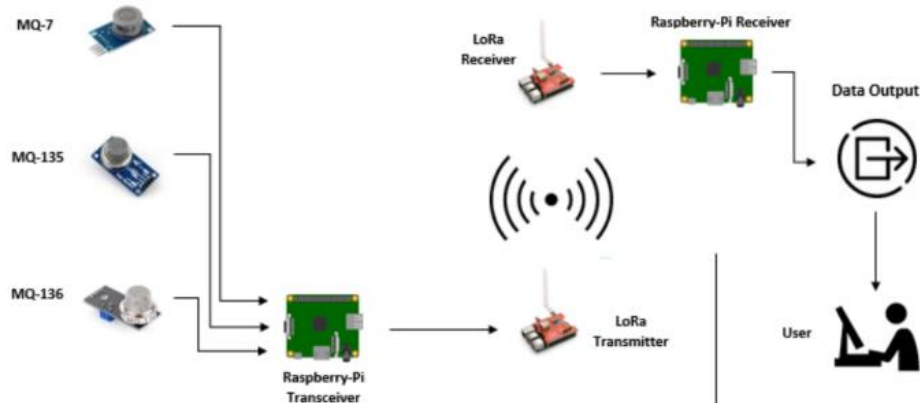


Figure 27 - Typologie du système de contrôle de l'air

L'**inconvénient** dans ce projet est qu'ils effectuent une communication à un sens, des dispositifs terminaux à la passerelle. Au contraire, nous souhaitons une communication double sens entre ces éléments pour avoir une meilleure étude (traitements) des données.

Pour **Smart Construction**, les calculs se feront sur notre **passerelle RPi**. Nous aurons néanmoins quelques conversions à faire en fonction du type de données qui est communicable via nos deux réseaux ou de la rapidité qui en résulte (temps de calcul sur différentes cartes, temps d'émission/réception des données).

## VII - Conclusion

Au travers de nos recherches sur les solutions existantes de contrôle de pollution et sur les technologies LoRa et ZigBee, nous avons pu établir plusieurs éléments qui nous seront utiles pour notre projet. Toutes ces informations nous ont aidés à le perfectionner et à déterminer comment apporter une plus-value.

Tout d'abord, nous avons vu les solutions de stations fixes de détection qui existent depuis plusieurs années en France et dans le monde entier. Ces solutions, chères et complexes à mettre en place, permettent de surveiller la pollution à différents points définis dans une zone. Elles sont gourmandes en énergie et nécessitent de rester constamment alimentées. L'avantage de notre projet est qu'il sera **mobile**, les capteurs pourront être déplacés au sein d'un chantier. Pour cela, il sera **autonome en énergie** et possédera une **grande autonomie**.

De plus, nous ne souhaitons pas que notre solution ait besoin d'être rechargée de manière fréquente. Pour cela, nous nous sommes renseignés sur différents projets utilisant la technologie **LoRa**, connue pour être un réseau à **basse consommation couvrant une large zone**. Ce réseau possède donc des avantages, à la fois énergétiques et géographiques, qui seront parfaitement adaptés à notre PFE.

D'autre part, nous souhaitons également utiliser un 2ème protocole de communication : **l'IEEE 802.15.4**. Faire coexister le réseau ZigBee et le réseau LoRa permettrait ainsi à notre projet d'utiliser l'hétérogénéité des réseaux.

Des objets connectés pour la mesure de la pollution existent déjà mais pas dans le secteur de la construction et n'utilisent pas la technologie LoRa. Bien que plusieurs ébauches de projets existent, ceux-ci n'ont pas été implémentés et c'est pourquoi Smart Construction est un projet innovant.

En effectuant ces recherches, nous avons également pu déterminer quels polluants nous souhaitons mesurer : **CO**, **NO2**, **H2**, **NH3** et **CH4** (qui font parties de certains composés organiques volatiles) et également la concentration en poussière et particules fines dans l'air (**PM2.5** et **PM10**). En effet sur un chantier, ces types de polluants nocifs pour la santé peuvent être émis en grande quantité et nécessitent donc un contrôle. Enfin, nous analyserons la pollution sonore générée par le chantier et étudierons l'emplacement des capteurs grâce à des balises GPS.



## VII - Bibliographie

- [1] « À Paris, “Pollutrack”, une carte interactive pour connaître le niveau de pollution de l’air », 17-sept-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.franceinter.fr/environnement/a-paris-pollutrack-une-carte-interactive-pour-connaître-le-niveau-de-pollution-de-l-air>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [2] K. K. Khedo, R. Perseedoss, et A. Mungur, « A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System », *IJWMN*, vol. 2, n° 2, p. 31-45, mai 2010.
- [3] « K. Khedo et al. - 2010 - A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring.pdf ». .
- [4] « Accueil », *Ifsttar*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ifsttar.fr/accueil/>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [5] « Airbus inaugure le nouveau réseau IoT dédié pour les industriels d’Objenious », *usine-digitale.fr*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usine-digitale.fr/article/airbus-utilise-le-reseau-dedie-d-objenious-pour-exploiter-ses-objets-connectes.N808510>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [6] « AQS 1 Construction Air Quality Monitor for NO2 and PM », *Aeroqual*. .
- [7] « Array of Things ». [En ligne]. Disponible sur: <https://arrayofthings.github.io/>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [8] *Array of Things Introductory Video*. .
- [9] « CAPTEUR DE QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR », *Cat Phones*. .
- [10] A. Arfire et A. Martinoli, « Enabling High Resolution Urban Pollution Monitoring through Mobile Sensor Networks », p. 27.
- [11] « Arfire et Martinoli - Enabling High Resolution Urban Pollution Monitorin.pdf ». .
- [12] « État de la qualité de l’air à Paris ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.paris.fr/pages/etat-des-lieux-de-la-qualite-de-l-air-a-paris-7101>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [13] « Introduction à LoRa – Linux Embedded ». .
- [14] M. Teachman, *miketeachman/micropython-street-sense*. 2019.
- [15] « NB-IoT, LTE-M, EC-GSM-IoT. Les nouveaux LPWAN », *FRUGAL PROTOTYPE*, 06-avr-2018. .
- [16] L. Figaro et A. F. P. agence, « Paris met en place un dispositif inédit de mesure de la pollution atmosphérique », *Le Figaro.fr*, 22-mai-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lefigaro.fr/sciences/2017/05/22/01008-20170522ARTFIG00325-paris-met-en-place-un-dispositif-inedit-de-mesure-de-la-pollution-atmospherique.php>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [17] P. Pickering, « Part 2: Methods for monitoring NO2 and PM at construction sites », *Aeroqual*, 14-sept-2017. .
- [18] « Saint-Quentin-en-Yvelines surveille ses bassins de rétention d’eau grâce à la plate-forme IoT d’Orange », *usine-digitale.fr*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usine-digitale.fr/article/saint-quentin-en-yvelines-surveille-ses-bassins-de-retention-d-eau-grace-a-la-plate-forme-iot-d-orange.N896989>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [19] « Semtech\_Enviro\_AirPollution\_AppBrief-FINAL.pdf ». .
- [20] « Semtech’s LoRa® Technology Enables More Efficient Construction and Mining Machines ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semtech.com/company/press/semtechs-lora-technology-enables-more-efficient-construction-and-mining-machines>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [21] « Sensing in the city », *Smart Cities World*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/sensing-in-the-city-1231>. [Consulté le: 24-nov-2019].

- [22] « Station de mesure de la qualité de l'air », *Wikipédia*. 04-sept-2017.
- [23] « Street Sense ». [En ligne]. Disponible sur: <https://hackaday.io/project/162059-street-sense>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [24] « TEC / Public / OpenSense », *GitLab*. [En ligne]. Disponible sur: <https://gitlab.ethz.ch/tec/public/opensense>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [25] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia, et T. Watteyne, « Understanding the limits of LoRaWAN », *arXiv:1607.08011 [cs]*, févr. 2017.
- [26] « uRADMonitor A3 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://hackaday.io/project/12066-uradmonitor-a3>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [27] « World's Best City Projects for Air Quality Monitoring ». [En ligne]. Disponible sur: <https://cityos.io/competitor/28679/Worlds-Best-City-Projects-for-Air-Quality-Monitoring>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [28] « World's Best City Projects for Air Quality Monitoring ». [En ligne]. Disponible sur: <https://cityos.io/competitor/28460/Worlds-Best-City-Projects-for-Air-Quality-Monitoring>. [Consulté le: 24-nov-2019].
- [29] S. Safaric et K. Malaric, « ZigBee wireless standard », in *Proceedings ELMAR 2006*, Zadar, Croatia, 2006, p. 259-262.
- [30] « Safaric et Malaric - 2006 - ZigBee wireless standard.pdf ».
- [31] A. R. Al-Ali, I. Zuolkernan, et F. Aloul, « A Mobile GPRS-Sensors Array for Air Pollution Monitoring », *IEEE Sensors J.*, vol. 10, n° 10, p. 1666-1671, oct. 2010.
- [32] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, et W. Townsley, « A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things », *Sensors*, vol. 16, n° 9, p. 1466, sept. 2016.
- [33] K. K. Khedo, R. Perseedoss, et A. Mungur, « A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System », *IJWMN*, vol. 2, n° 2, p. 31-45, mai 2010.
- [34] M. Rosmiati, Moch. F. Rizal, F. Susanti, et G. F. Alfisyahrin, « Air pollution monitoring system using LoRa modul as transceiver system », *TELKOMNIKA*, vol. 17, n° 2, p. 586, avr. 2019.
- [35] O. Alvear, W. Zamora, C. Calafate, J.-C. Cano, et P. Manzoni, « An Architecture Offering Mobile Pollution Sensing with High Spatial Resolution », *Journal of Sensors*, vol. 2016, p. 1-13, 2016.
- [36] A. Abane et S. Bouzeffrane, « Déploiement d'une architecture LoRa pour l'IoT », p. 19.
- [37] S. I. Lopes, F. Pereira, J. M. N. Vieira, N. B. Carvalho, et A. Curado, « Design of Compact LoRa Devices for Smart Building Applications », in *Green Energy and Networking*, vol. 269, J. L. Afonso, V. Monteiro, et J. G. Pinto, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 142-153.
- [38] P. Mehndiratta, A. Jain, S. Srivastava, et N. Gupta, « Environmental Pollution and Nanotechnology », *EP*, vol. 2, n° 2, p. p49, mars 2013.
- [39] « Tout, tout, tout vous saurez tout sur le ZigBee | Connect - Edition Diamond ». [En ligne]. Disponible sur: <https://connect.ed-diamond.com/MISC/MISC-086/Tout-tout-tout-vous-saurez-tout-sur-le-ZigBee>.
- [40] S. Malky, « Evaluation of Precalibrated Electrochemical Gas Sensors for Air Quality Monitoring Systems », p. 7.
- [41] M. A. M. Albreem *et al.*, « Green internet of things (IoT): An overview », in *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, Putrajaya, 2017, p. 1-6.
- [42] P. Deshayes, « Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement », *Innovations*, vol. n°37, n° 1, p. 219-236, févr. 2012.
- [43] J. V. M. Bor, « LoRa for the Internet of Things », p. 7.

- [44] H.-C. Lee et K.-H. Ke, « Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 67, n° 9, p. 2177-2187, sept. 2018.
- [45] C. Perera, P. P. Jayaraman, A. Zaslavsky, P. Christen, et D. Georgakopoulos, « MOSDEN: An Internet of Things Middleware for Resource Constrained Mobile Devices », *arXiv:1310.4038 [cs]*, oct. 2013.
- [46] « Particules fines : définition, impact sur la santé, sources de la pollution... », *La RSE et le développement durable en entreprise : e-RSE.net*. .
- [47] « qualite-air-emissions-polluants-chantiers-btp\_2017-rapport\_v2.pdf ». .
- [48] G. Pasolini *et al.*, « Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies », *Sensors*, vol. 18, n° 4, p. 1118, avr. 2018.
- [49] M. Saravanan, A. Das, et V. Iyer, « Smart water grid management using LPWAN IoT technology », in *2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, Geneva, Switzerland, 2017, p. 1-6.
- [50] M. Sammarco, R. Tse, G. Pau, et G. Marfia, « Using geosocial search for urban air pollution monitoring », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 35, p. 15-31, févr. 2017.