

Développement d'un système complet de mesure de la qualité de l'air au sein de l'Internet des objets

Ing. S. DI STEFANO
Ing. M. DUMORTIER
Dr Ir S. EGGERMONT
Ing. F. TRIQUET
CERISIC – Mons

De nos jours, l'industrialisation rapide, la croissance explosive de la population et les développements de l'agriculture intensive sont un ensemble d'éléments impactant négativement la qualité de l'air. Il est donc une priorité de connaître et de maîtriser son environnement. Pour ce faire, le projet IMMERSION propose une solution autonome, « plug and play », low-cost et faible consommation permettant de donner une image de la qualité de l'air. Ce dispositif électronique muni d'une unité de traitement (microcontrôleur) intègre des capteurs de gaz au sein d'une plateforme communicante via les réseaux de l'internet des objets (IoT), et plus précisément les LPWAN (Low Power Wide Area Network).

Mots-clefs : Environnement, Capteurs, IdO, LPWAN, villes intelligentes, pollution, LoRa, Sigfox, capteurs de gaz, faible consommation d'énergie.

Currently, environment is a major concern. The explosive growth of the population, the development of industries and development of intensive agriculture are a set of elements impacting negatively the quality of the air. It's a priority to know and master the environment. To do this, the IMMERSION project offers a plug and play, low-cost and low consumption solution to give an image of the air quality. This system (device) equipped with a processing unit (microcontroller) integrates gas sensors within a communicating platform via IoT networks, specially LPWAN (Low Power Wide Area Network) and BLE (Bluetooth Low Energy), to collect environmental data.

Keywords: Environment, sensors, IoT, LPWAN, smart cities, pollution, LoRa, Sigfox, gas sensors, low power consumption.

1. Introduction

1.1 Contexte

Le projet IMMERSION est un projet FIRST Hautes Écoles développé au CERISIC [1], le Centre d'Études et de Recherche des catégories agronomique, paramédicale et technique de la Haute École Louvain en Hainaut. Ce projet vise le développement d'un dispositif électronique permettant de mesurer la qualité de l'air au sein d'un système communicant.

Depuis de nombreuses années, la lutte contre la pollution de l'air, les villes intelligentes et les plateformes environnementales sont au centre des préoccupations. Les activités économiques comme les transports, l'industrialisation rapide, les développements de l'agriculture intensive ainsi que la croissance explosive de la population produisent des polluants atmosphériques nocifs impactant négativement la qualité de l'air. Parmi les différents gaz aux effets directs ou indirects nocifs pour la santé, voire cancérogènes, on retrouve principalement les composés organiques volatils (COV), tels que les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) ou le formaldéhyde [2]. La présence de tous ces éléments, tant en intérieur qu'en extérieur, peut affecter le système respiratoire, entraîner des maladies ou encore des décès prématurés [3][4].

Les méthodes classiques de détection et mesure des COV font le plus souvent appel à des techniques de prélèvement d'échantillons qui sont ensuite analysés en laboratoire. Ces méthodes sont précises mais onéreuses et lentes [5][6]. Il existe également des stations de mesure mobiles [7]. Toutefois, celles-ci ont généralement la taille d'un conteneur de transport et coûtent plusieurs dizaines de milliers d'euros [8]. Leur déploiement dans les villes ou sites industriels devient alors compliqué. D'autres méthodes, plus légères, ont été mises au point et intégrées dans des appareils portatifs, et commercialisés, mais ces systèmes restent inadaptés pour un suivi en continu dans l'industrie ou pour des mesures ponctuelles chez le particulier qui recherche une mesure à moindres frais.

La mise au point de plateformes environnementales facilement transportables, à faible coût et à faible consommation se justifie dès lors. Actuellement, de nouveaux développements et produits sont apparus sur le marché des capteurs de gaz et des nœuds de capteurs sans fil (Wireless Sensor Nodes ou WSN) ou autres capteurs intelligents (smart sensors) [9] en vue d'améliorer la détection de composés présents dans l'air.

Grâce à l'*Internet des objets* (IdO, *english : IoT*), les dispositifs peuvent fournir des rapports de maintenance et s'auto-diagnostiquer. Ces Objets permettent donc d'envoyer des données au travers de réseaux IoT tels que les technologies Lora [10], Sigfox [11], NB-IoT [12], etc. L'utilisation de ces technologies à l'avantage de

fournir des données sur de grandes distances, n'obligeant donc pas une entreprise ou un particulier d'installer son propre réseau interne et sa propre antenne. Plusieurs dispositifs ou nœuds de capteurs peuvent alors être placés au sein d'une entreprise afin de réaliser le quadrillage d'un site (fig.1) en vue d'un monitoring. Vu leur petite taille, les dispositifs peuvent être placés dans des endroits où l'accès est restreint et non aisé. Le but de ces appareils est d'avoir des éléments purement autonome et durable qui effectuent une mission de surveillance environnementale.

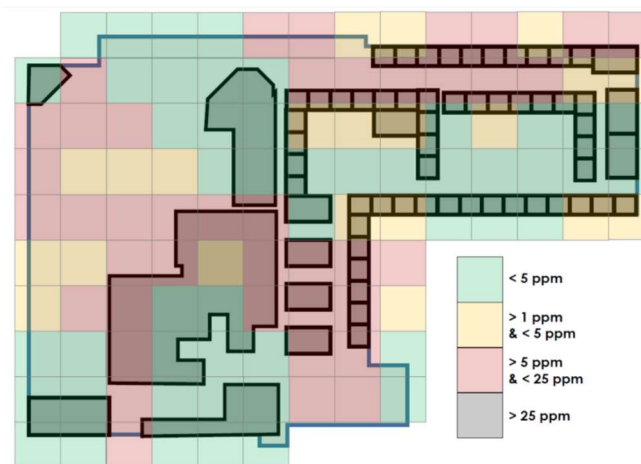


Figure 1 – Illustration du quadrillage d'un site industriel en vue d'obtenir une cartographie environnementale en fonction des concentrations d'un gaz exprimées en partie par million volume (ppm).

Cet article présentera dans un premier temps les objectifs du projet. Ensuite viendront les parties théoriques relatives à la bonne compréhension de celui-ci. Parmi celles-ci, on retrouvera dans un premier temps l'explication des différentes technologies de détection de gaz à interfacer sur le dispositif. On se focalisera dans un deuxième temps sur les technologies de transmission de données utilisées et leur protocole. En dernier lieu, viendront les méthodes d'implémentation du système et les premiers résultats obtenus.

1.2. Objectifs du projet

L'objectif du projet IMMERSION est de développer une plateforme de communication sans fil pour capteurs sur base des protocoles LoRaWAN. Ces protocoles, issus des technologies LPWAN permettent l'envoi de petites quantités de données (débits de l'ordre de 0,25 à 10 kbit/s) sur de longues distances (de 15 à 20 km en extérieur) et à faible consommation (de l'ordre de la dizaine de mW) [13]. Il s'agira de l'étude du développement d'une solution complète compatible avec des microcapteurs de composés volatils à ultra-basse-consommation pour des

applications de surveillance industrielle et environnementale. Ces derniers sont développés dans le cadre du projet FIRST Spin-off SENSEVOC [14] à l'Université catholique de Louvain (pôle ELEN, Institut ICTEAM), partenaire scientifique du projet IMMERSION, en vue d'une future commercialisation. Outre le développement de l'acquisition des données des capteurs, il s'agit d'implémenter le protocole de communication, puis l'intégration et la mise en œuvre du nœud de récupération et d'envoi des données au travers de cette plateforme en respectant des contraintes fortes de consommation et de faibles coûts. La plateforme développée devra être capable de communiquer avec les deux protocoles Sigfox et LoRaWAN afin de répondre à un maximum de réseaux commerciaux et permettre une meilleure valorisation.

La Figure 2 est un concept du produit final proposé par le projet IMMERSION. Comme on peut le voir, des capteurs mesurant différents paramètres seront présents sur la plateforme. Le tout correspondra en un dispositif alimenté via une batterie.

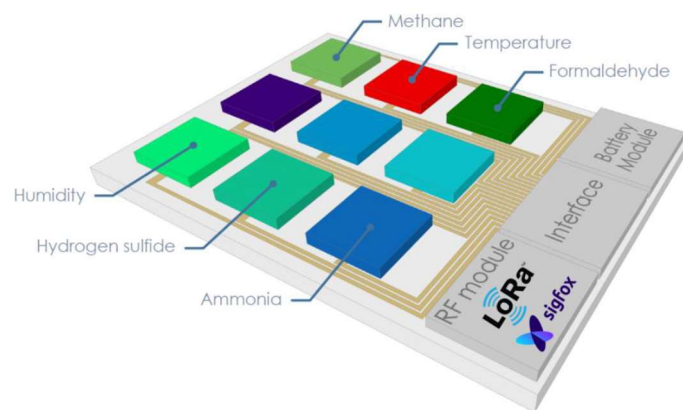


Figure 2 - Concept du produit EnviCam®. [©Gilles Scheen][14].

L'ensemble des développements devront être réalisés en respectant des contraintes de coûts, d'encombrement mais surtout de consommation étant donné que le système doit être autonome et doit avoir une durée de vie de 5 ans.

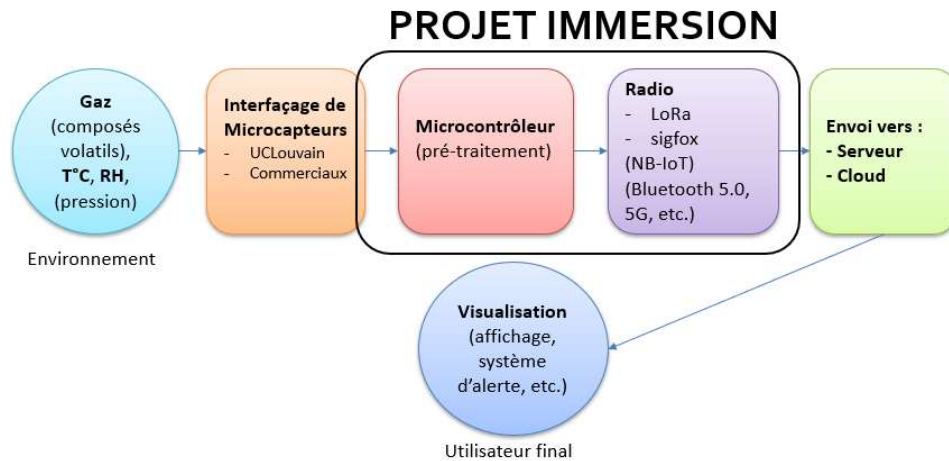


Figure 3 – Positionnement du projet IMMERSION au sein de la chaîne d'acquisition.

2. Les technologies de détection de gaz

Les capteurs sont les premiers éléments que l'on retrouve dans la chaîne d'acquisition. Les informations issues de ces capteurs seront traitées par un microcontrôleur muni d'un processeur ARM M0+ basse consommation et envoyées via les réseaux de télécommunication expliqués dans le chapitre suivant de cet article.

Parmi les différentes technologies de capteurs existants, on s'intéresse aux catégories suivantes détaillées dans les prochaines parties de ce chapitre :

- Les capteurs de types résistifs fabriqués à l'UCLouvain,
- les capteurs MOX (métal oxyde) [15],
- les capteurs électrochimiques [16],
- les capteurs infra-rouge (NDIR) [17].

2.1. Les capteurs de types résistifs UCLouvain

Dans le cadre de ses activités de recherche en microsystèmes, l'UCLouvain développe de nouveaux microcapteurs sur substrat silicium (Si), à ultra-basse-consommation et faible coût, pour des applications de détection de gaz dans l'Internet des objets. La partie sensible, ou transducteur, est composée d'un tableau de microélectrodes interdigitées fonctionnalisées à l'aide de matériaux interagissant

aux gaz à température ambiante de manière plus ou moins sélective (fig.4). Ces derniers sont de type polymères (exemple : Polypyrrole ou PPy, à empreinte moléculaire ou non) ou hybrides à base de nanomatériaux (exemple : graphène) ou nanocomposites. Les premiers gaz d'intérêt sont l'ammoniac (NH_3), le sulfure d'hydrogène (H_2S), certains composés organiques volatils comme l'acétaldéhyde, le formaldéhyde et certains BTEX, l'ozone (O_3) et le dioxyde d'azote (NO_2), entre autres.

Une optimisation de l'architecture du dispositif, ainsi que l'intégration de matériaux sensibles, permettent d'atteindre des consommations par transducteur inférieures à $20 \mu\text{W}$ en continu, donc trois ordres de grandeurs inférieures aux capteurs commerciaux de type MOX ou infrarouges [18].

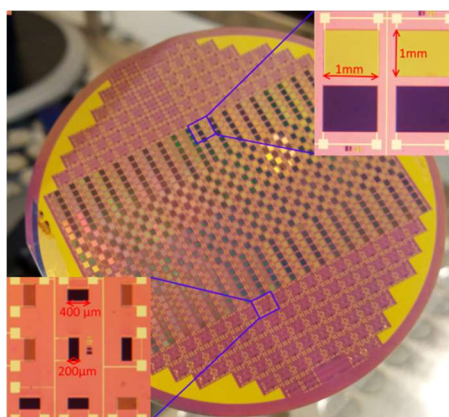


Figure 4 - Photographie et image au microscope optique d'une tranche de Si en cours de fabrication et fonctionnalisée avec du PPy pour des applications de détection d'ammoniac [19].

2.2. Les capteurs de gaz MOX

Les capteurs MOX sont des capteurs permettant la détection de différents types de gaz. Ce capteur voit sa conductivité (et donc sa résistance) varier en fonction du gaz auquel il est sensible. Pour que ce type de capteur ait une sélectivité suffisante ainsi qu'une bonne sensibilité, ils doivent fonctionner à des températures élevées pouvant varier de l'ordre de 200°C à 600°C . Pour ce faire, un circuit résistif additionnel amenant le substrat à haute température est ajouté à proximité du transducteur, rendant dès lors les capteurs énergivores. L'utilisation de ces capteurs se justifie par leurs meilleures sensibilités et pour des mesures plus précises lorsque cela est nécessaire.

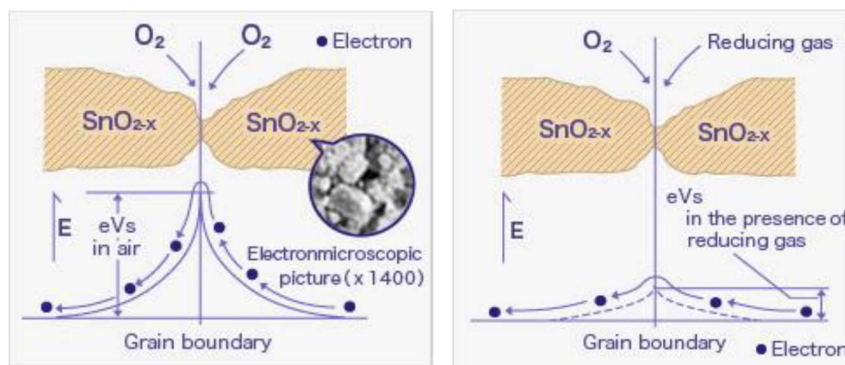


Figure 5 - Principe de fonctionnement d'un capteur à oxydes métalliques [15].

Dans le cas où la concentration d'oxygène est de 0% et lorsque le matériel (typiquement le dioxyde d'étain [SnO_{2-x}]) est chauffé à haute température (environ 400°C), les électrons libres circulent à travers les parties jointes de cristaux de dioxyde d'étain. Dans l'air (environ 21% d' O_2), l'oxygène est adsorbé sur la surface de l'oxyde métallique. C'est grâce à son affinité élevée pour les électrons que l'oxygène adsorbé attire les électrons libres à l'intérieur de l'oxyde métallique, formant une barrière de potentiel (eVs dans l'air fig. 5). Cette barrière de potentiel empêche le flux d'électrons, provoquant une résistance élevée du capteur dans l'air. (Partie gauche de la fig. 5).

Lorsque le capteur est exposé à un gaz combustible ou à un gaz réducteur (tel que le monoxyde de carbone), la réaction d'oxydation de ce gaz avec l'oxygène adsorbé se produit à la surface du dioxyde d'étain. En conséquence, la densité de l'oxygène adsorbé sur la surface du dioxyde d'étain diminue et la hauteur de la barrière de potentiel est réduite. Les électrons circulent facilement au travers de la barrière de potentiel de hauteur réduite, et la résistance du capteur diminue. La concentration de gaz dans l'air peut être détectée en mesurant le changement de résistance des capteurs de gaz de type MOX. La réaction chimique des gaz et de l'oxygène adsorbé sur la surface du dioxyde d'étain varie en fonction de la réactivité des matériaux de détection et de la température de fonctionnement du capteur. (Partie droite de la fig. 5) [15].

2.3. Les capteurs de gaz électro-chimiques

Les capteurs électrochimiques fonctionnent en réagissant avec le gaz d'intérêt et en produisant un signal électrique proportionnel à la concentration de gaz. Un capteur électrochimique typique se compose d'une électrode de détection (ou électrode de travail), et une contre-électrode séparée par une fine couche d'électrolyte (fig.6).

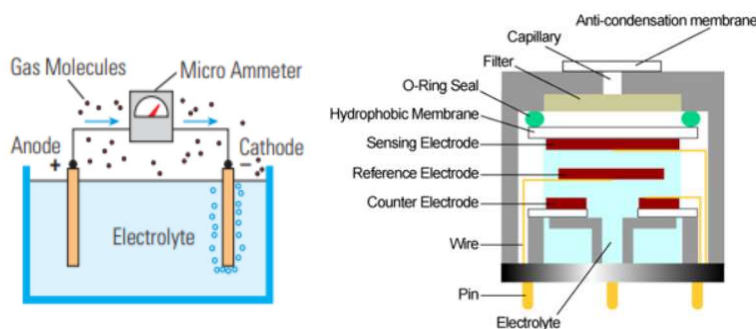


Figure 6 – Schéma de principe d'un capteur électrochimique (à gauche)
[16] Représentation d'un capteur électrochimique (à droite) [20].

Le gaz qui entre en contact avec le capteur traverse d'abord une petite ouverture de type capillaire, puis diffuse à travers une barrière hydrophobe et finit par atteindre la surface de l'électrode. Cette approche est adoptée pour permettre à la quantité appropriée de gaz de réagir à l'électrode de détection pour produire un signal électrique suffisant tout en empêchant l'électrolyte de s'échapper du capteur.

Le gaz qui diffuse à travers la barrière réagit à la surface de l'électrode de détection impliquant un mécanisme d'oxydation ou de réduction. Ces réactions sont catalysées par les matériaux d'électrode développés spécifiquement pour le gaz d'intérêt.

Avec une résistance connectée à travers les électrodes, un courant proportionnel à la concentration de gaz circule entre l'anode et la cathode. Le courant peut être mesuré pour déterminer la concentration de gaz [16].

Cependant, la valeur de courant est tellement faible (de l'ordre du nA) qu'il est nécessaire d'utiliser un circuit de conditionnement analogique « *Analog Front End* » afin de convertir le courant en une tension. Ceci est réalisé à l'aide d'un amplificateur de transimpédance.

2.4. Les capteurs de gaz infrarouges non dispersifs

Les capteurs infrarouges, aussi appelés capteurs infrarouges non dispersifs (NDIR) sont hautement sensibles et sélectifs. Ces capteurs sont souvent des capteurs de CO_2 . Le dioxyde de carbone présente une bande d'absorbance caractéristique dans l'infrarouge à la longueur d'onde de $4,26 \mu\text{m}$. Au moment où le rayonnement infrarouge traverse un gaz contenant du CO_2 , les molécules de CO_2 absorbent une partie du rayonnement. La quantité de rayonnement qui traverse le gaz dépend de la concentration en CO_2 . Un capteur infrarouge qui comporte un détecteur, une source IR et un chemin optique vient alors quantifier le phénomène [17].

3. Les technologies LPWAN

Il s'agit de réseaux sans fils basse consommation, bas débit et longue portée étant optimisé pour des dispositifs aux ressources limitées qui sont implémentés dans le but d'avoir une autonomie de plusieurs années ainsi qu'une portée lointaine, comme on peut le voir sur la figure 7. Ces réseaux conviennent dès lors parfaitement à la plupart des applications IoT qui n'exigent pas de débit élevé [22].

Cette famille utilise des bandes de fréquences à usage libre ISM (Industriel, Scientifique et Médical) [21] disponible dans le monde entier. Ces bandes ISM implique le partage de ressources avec d'autres concurrents présents sur le marché, à savoir les technologies RFID, ZigBee et autres. Toutefois des règles d'utilisation ont été créées afin de ne pas marcher sur le pied des autres.

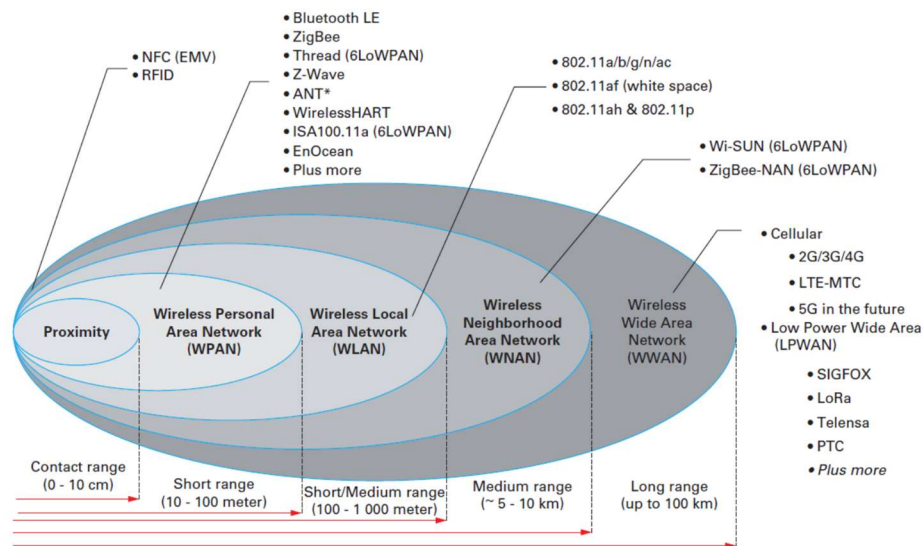


Figure 7- Comparaison des différentes technologies radio pour l'IoT en fonction de leur portée. [21]

Protocoles	Fréquence	Portée	Autonomie sur batterie	Débit
Zigbee	2,4 GHz	10 - 100 m	Années	20 - 250 kbps
WiFi	2,4 GHz	1000 m	Jours	54 Mbps
LTE(4G)	900/1800/1900/2100 MHz	100 km	Jours	3 - 10 Mbps
Sigfox	868 MHz	3 - 10 km	Années	1 bps - 1 kbps
LoRaWAN	868 MHz	1 - 10 km	Années	1 - 50 kbps

Tableau 1- Comparaison des protocoles IoT.

Parmi les différents protocoles de communication le plus adapté aux applications IoT basse consommation, on citera le LoRa. Ce protocole est optimisé pour une basse consommation et pour atteindre des distances plus importantes.

Ce chapitre s'intéresse aux technologies LPWAN et plus précisément à la technologie LoRa, son protocole de communication LoRaWAN et ses spécificités.

3.1. Architecture des réseaux LPWAN

La topologie du réseau, comme on peut le voir sur la figure 8, est en étoile. Les objets communiquent avec les passerelles (gateways). C'est donc à cet endroit que sont centralisés les messages destinés à être transmis au serveur de gestion de réseau. La liaison entre les concentrateurs et le serveur de gestion repose sur des technologies haut débit comme l'Ethernet ou la 4-G. Toutefois, la particularité d'un réseau comme celui-ci est qu'un équipement ne communique pas seulement à travers un concentrateur mais tous les concentrateurs sont capables de recevoir l'information transmise par un équipement.

Les données sont reçues sur des clouds « sigfox, MyThings Proximus ou The Things Network ». Ces clouds assurent le traitement des messages. Ceux-ci peuvent par la suite être envoyés via des interfaces web permettant de visualiser les données.

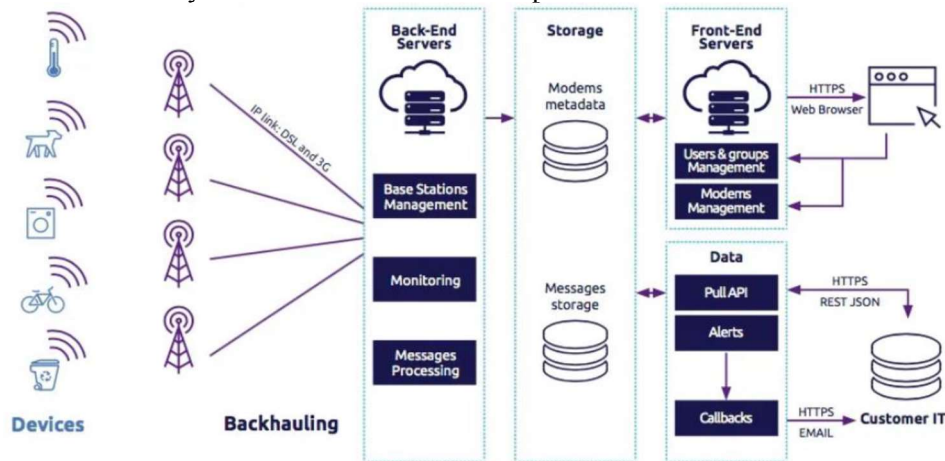


Figure 8- Architecture des réseaux LoRaWAN et Sigfox.

3.2. Le protocole LoRaWAN

LoRaWAN signifie Long Range Wide Area Network. Il s'agit d'un protocole réseau bas débit et longue portée basée sur la technologie radio LoRa. Soutenu par l'association d'industriels LoRa Alliance, il vise une couche physique développée par Semtech utilisant la technique de modulation radio par étalement de spectre (repris sous le terme anglais *Chirp Spread Spectrum* ou technologie LoRa) et une couche MAC nommé le LoRaWAN. Ce type de modulation consiste en une méthode de transmission d'un signal dans laquelle l'énergie émise est distribuée dans le domaine fréquentiel. Cette technique de transmission transmet un signal sur une largeur de bande plus grande que l'ensemble des fréquences qui compose le signal d'origine. Ceci permettant de réduire considérablement la consommation. [23]

Les fréquences d'utilisation sont les gammes : 433, 868 et 915 MHz en fonction de la législation du pays d'utilisation [27]. La taille d'une transmission est entre 2 et 255 octets, le débit peut atteindre 50 kbps. La modulation LoRa est donc propriétaire, contrairement au standard LoRaWAN qui, lui, est une solution ouverte.

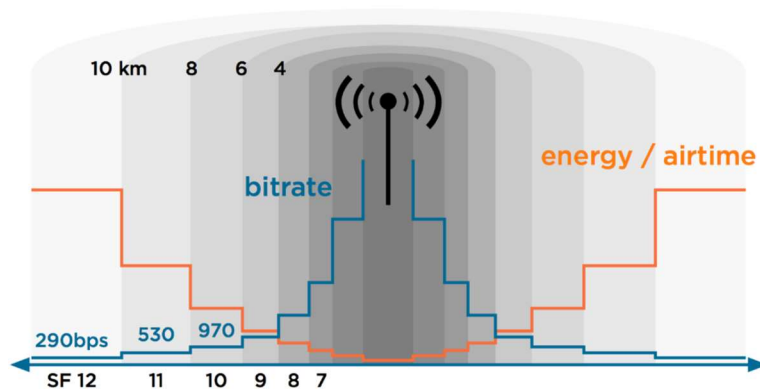


Figure 9- Lien entre Facteur d'étalement, débit et énergie. [25]

La portée de la communication est déterminée par sa bande passante, la puissance du signal de sortie et le facteur d'étalement utilisé (SF pour Spreading Factor). Le réseau LoRa supporte 7 facteurs d'étalement allant de SF6 à SF12. [23][24]. Le facteur d'étalement est déterminé en fonction de plusieurs paramètres. Celui-ci se traduit par la qualité de liaison d'un équipement « end-node » à une passerelle « gateway » (fig.8). Ce qui signifie que le facteur d'étalement travaille sur la robustesse. Il est directement lié à la distance séparant le dispositif d'une passerelle. En fonction du facteur d'étalement, un système sera plus ou moins rapide. En effet, la particularité du LoRa est qu'il s'adapte à sa situation et envoi de l'information à

des débits différents suivant le facteur d'étalement. La figure 9 permet de visualiser le lien entre le SF, le débit et l'énergie consommée.

Les classes du protocole LoRaWAN

Le protocole LoRaWAN assure des communications bidirectionnelles et définit 3 classes d'équipements end-node (fig.10) [26].

La première classe, appelée « Classe A », concerne les équipements à très faible consommation d'énergie. Elle permet une communication bidirectionnelle par l'allocation de deux canaux de réceptions après chaque émission. Il s'agit de l'application la moins énergivore. La « classe B » possède plus de créneaux de réceptions que la classe A. la planification de créneaux se réalise à la réception d'une balise de synchronisation émise par le réseau. L'inconvénient de ce mode est sa consommation plus importante car la liaison radio est plus sollicitée. La dernière classe, appelée « Classe C », se différencie par le fait que les équipements sont constamment à l'écoute d'une donnée émise par le réseau. Les créneaux de réception ne se ferment que lorsque le dispositif transmet. La consommation de ce mode est encore plus élevée que les deux modes précédents.

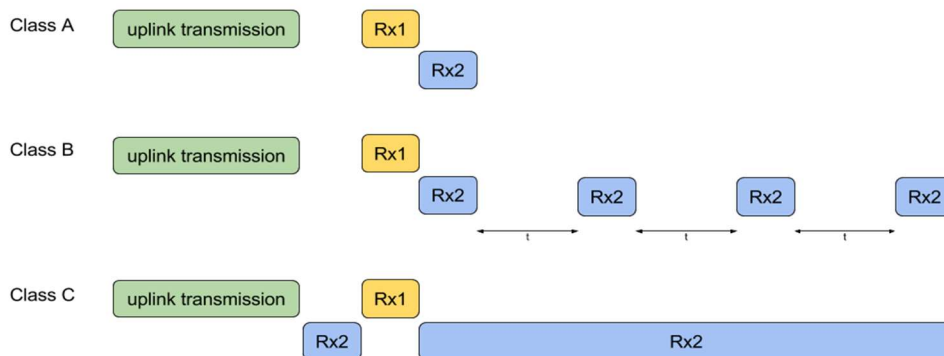


Figure 10- Diagramme TX / RX des différentes classes du protocole LoRaWAN [25].

La classe A du protocole LoRaWAN est choisie pour ce projet étant donné les faibles consommations liées à celle-ci.

4. Implémentation du système

4.1. Outil de traitement

Le microcontrôleur est la partie maitresse du projet. Il s'agit de l'organe de traitement des données provenant des capteurs. Il faut donc que le choix d'un type de microcontrôleur par rapport à un autre soit justifié. Il existe deux types d'approches :

1) Première approche

Celle-ci consiste à utiliser un microcontrôleur et un modem émetteur-récepteur RF de manière séparée. Cette première solution a été testée afin d'obtenir un *proof of concept*.

La plateforme NUCLEO-L073RZ reprise à la figure 11 a été choisie afin de bénéficier d'un démarrage rapide. Celle-ci provient de ST et utilise un organe de traitement ou microcontrôleur d'architecture ARM Cortex M0+. Le choix s'est porté sur cette solution vu le côté très faible consommation du microcontrôleur ARM.

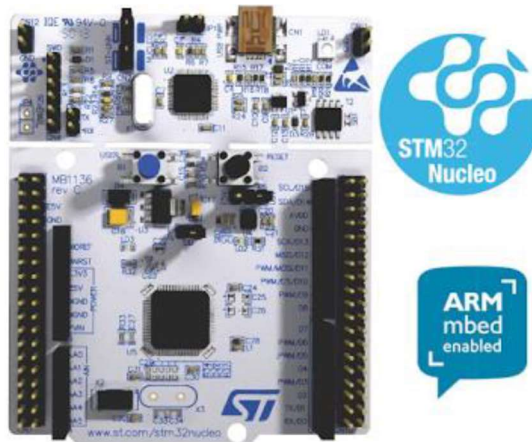


Figure 11- Board de développement NUCLEO-L073RZ de STMicroelectronics [28].

Comme le montre la figure 11, le circuit possède 51 GPIO dont des connecteurs Arduino ainsi que des connecteurs Morpho permettant d'utiliser facilement les fonctionnalités d'entrée et de sortie du microcontrôleur présent. Il est également constitué d'entrées analogiques, des ports de communication SPI, I²C, UART, ULP-UART, des sorties PWM, et des ADC [28].

Cette carte possède un processeur ARM CORTEX M0+ 32 bits de 32 MHz, 192 Kbytes de mémoire flash et 20 Kbytes de mémoire vive, 6 Kbytes de EEPROM. Il peut être alimenté via un port d'alimentation micro USB (alimenté en 5V) ou bien via une batterie externe ayant pour valeur minimale 1,8V. Ce système est également

pourvu d'oscillateurs internes ainsi que de PLL pour la gestion de l'horloge. En termes de contrôle, il possède un compteur de 16 bits ultra basse consommation ainsi que 6 compteurs (Timer) de 16 bits classiques.



Figure 12- Emetteur/ Transmetteur LoRa (SX1272) [29].

Le module SX1272, présenté à la figure 12, est un modem émetteur-récepteur RF. La plateforme SX1272MB2DAS est contrôlée à l'aide d'un BUS SPI dont la vitesse maximale est de 10 Mbps. Ce module possède des broches permettant de se connecter directement sur la plateforme Nucleo. On peut également remarquer que certaines broches ne sont pas utilisées. Ceci est intentionnel car il existe un grand nombre de capteurs qui utilisent des protocoles tels que l'I²C ou encore l'UART et le fait de laisser ses broches libres permet de les connecter au board de développement Nucleo-L073RZ. Cet émetteur/récepteur possède les caractéristiques suivantes :

- 157 dB de bilan de liaison.
- Puissance de transmission de 14 dBm.
- Débit programmable jusqu'à 300 kbps.
- Grande sensibilité, inférieure à -137 dBm.
- Modulation LoRa ou FSK.

2) Deuxième approche

La deuxième consiste, quant à elle, à utiliser un module qui inclus microcontrôleur et émetteur-récepteur radio fréquence. Il est donc plus simple d'intégrer ce type de module dans un design

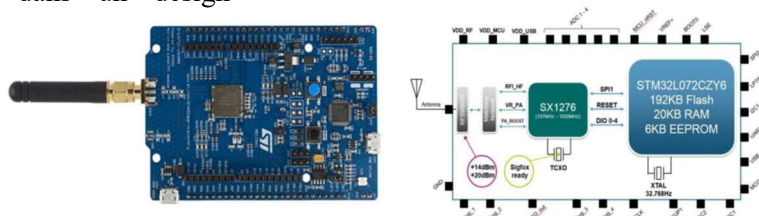


Figure 13- Lora Discovery board intégrant le module Radio + MCU MuRata [30].

complet. Le module s'avère, cependant, être plus coûteux que l'achat d'élément séparé mais les coûts liés au design ne sont plus à prévoir.

La figure 13 représente le module LoRa Discovery board de STMicroelectronics [30]. Ce kit reprend le module intégrant donc le microcontrôleur STM32L072, ayant des caractéristiques semblables au STML073 cité précédemment, et un modem émetteur-récepteur RF SX1276 de chez Semtech permettant d'envoyer des données via le réseau LoRa.

Le module prévoit quelques I/O mais également des broches pour tous les types de communication tels que les standards RS232, SPI, I²C. Des broches peuvent également être utilisées en entrée pour l'utilisation d'un ADC.

Dans ce module, le design RF n'est pas à réaliser. Il suffit simplement de placer une antenne.

4.2. Interfaçage des capteurs

Un algorithme est développé permettant l'activation des capteurs de gaz en fonction des conditions de fonctionnement et du besoin d'effectuer une mesure. Ces mesures de gaz sont combinées à d'autres paramètres environnementaux tels que l'humidité et la température. Les données provenant de ces capteurs sont mesurées toutes les 5 secondes et envoyées toutes les 5 minutes par l'intermédiaire d'un modules RF présenté ci-dessus.

5. Résultats

5.1. Mesure de consommation du système de communication

	Conditionneur R2F	MCU	LoRa (SF 7)	LoRa (SF 12)	Sigfox
Tension d'alimentation (V)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Courant (mA)	200 μ A à 1,2 mA	+/- 10	25	40	20
Durée (ms)	Continu	Continu	60	1300	6300
Puissance (mW)	660 μ W à 3.96 mA	33	82,5	132	66
Énergie par envoi (mJ)	/	/	5	171,6	415,8

Tableau 2- Tableau comparatif des mesures de consommation du système.

Le tableau 2 représente les différentes mesures de consommation du système en fonction de l'utilisation du protocole LoRa ou Sigfox. Les données utiles envoyées sont de **12 Bytes** (payload). La totalité de la trame envoyée faisant quant à elle **38 Bytes**. (Identifiant + header + payload).

En termes de consommation, il est plus avantageux d'utiliser le protocole LoRa que le Sigfox. En effet, la consommation de ce deuxième est plus importante pour un même nombre de bytes envoyés. De plus, une limitation de 12 bytes de données oblige à envoyer la donnée utile en plusieurs parties.

Si on imagine que la Payload est de 24 bytes, le protocole Sigfox devra découper la donnée en 2. Ce qui consommera donc 831.6 mJ. Soit quatre fois plus élevé qu'un envoi en LoRa.

En ce qui concerne le microcontrôleur, celui-ci fonctionne en mode run classique avec une fréquence d'horloge à **32 MHz**. Ceci correspond donc aux **10 mA** de manière continue.

Toutefois, il est possible de diminuer cette consommation en utilisant les mode « **sleep** » ou « **stop** » du microcontrôleur. Ce qui amène la consommation du MCU de l'ordre du **µA**. Si on imagine qu'après chaque mesure, le MCU entre dans un mode de veille, celui-ci verra alors sa consommation considérablement diminuée.

5.2. Mesures environnementales

Les données envoyées à partir du dispositif sont stockées dans un cloud (serveur) appartenant au fournisseur de réseau. Ces données sont par la suite redirigées vers une base de données interne et envoyées vers les serveurs d'un partenaire pour la visualisation des données. Chaque fichier envoyé est de type *json*. (fig.14).

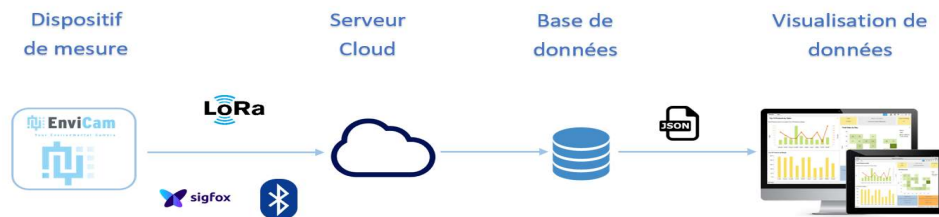


Figure 14- Système complet d'envoi de données.

Des tests ont été réalisés avec le prototype décrit dans la première approche afin de vérifier la solution actuellement proposée. Les données sont envoyées au moyen du système électronique conçu à cet effet. Le protocole utilisé est le LoRaWAN et les

données sont envoyées via le réseau Proximus. Comme dit précédemment, les données sont ensuite envoyées vers une base de données via la méthode « POST » et vers un site de visualisation d'informations via un fichier « .json ».

La figure 15 représente une mesure de la concentration de dioxyde d'azote et d'ozone, mesurées à partir de capteurs électrochimiques, près du rond-point N4-N25 à Louvain-la-Neuve entre le 17 septembre 2018 et le 26 septembre 2018. Le dispositif étant placé près d'un rond-point permet néanmoins de vérifier le lien entre la mobilité et le dégagement de ces gaz. Un capteur de température et d'humidité est également placé dans le but d'obtenir des informations environnementales complètes. Lors de ces mesures, on peut constater la présence de pics d'ozone liée à de forte température.



Figure 15- données provenant d'une plateforme EnviCam près du rond-point N4-N25 à Louvain-la-Neuve.

Ce type de graphique peut être réalisé pour tout type de gaz en fonction des émanations présentes sur un site particulier.

6. Conclusion et perspectives

La mise en avant des risques et des dangers liés à la pollution sur la santé et l'environnement a permis de montrer l'importance de déployer des plateformes environnementales dans les villes, entreprises ou encore les exploitations agricoles.

Ce projet a donc pour objectif de réaliser un système portable, peu encombrant et à faible coût permettant de mesurer de manière précise l'émission de gaz nocif pour la santé et l'environnement. Pour ce faire, le choix de l'utilisation d'un protocole issu des technologies LPWAN et permettant d'envoyer sur de longues distances a été réalisé. Ce type de système a l'avantage qu'aucune infrastructure réseau ne doit être déployée par un client ou bien par les villes pour pouvoir obtenir des données. De plus, l'élément basse consommation rendrait l'appareil autonome et durable, évitant donc les coûts de maintenance.

La version actuelle du prototype montre des résultats plutôt prometteurs. Les données sont dans un premier temps récupérées à partir de kits de développement présentés au cours de cet article. Le dispositif se trouve quant à lui alimenté à partir de 4 piles AAA ou AA, respectivement de 1100 ou 2800 mAh. Les envois sont réalisés toutes les 5 minutes via le réseau LoRa. Les données sont par la suite rapatriées vers les serveurs d'un partenaire afin de visualiser les données de manière graphique et d'en tirer des conclusions en fonction des mesures réalisées.

Bien que le produit soit déjà en partie fonctionnel, de nouveaux interfaçages de capteurs ainsi que des améliorations sont cependant à prévoir. Au niveau des améliorations, l'autonomie du système doit être optimisée de sorte à répondre à une durée de vie allant jusqu'à 5 ans. De la même manière, les méthodes d'acquisition et les envois doivent être étudiés dans le but d'obtenir un dispositif ultra basse consommation.

Afin d'obtenir un grand nombre de données et dans le but de valider le prototype, des campagnes de mesures sur sites et en laboratoires sont en cours de réalisation. Les prochaines étapes du projet sont dès lors l'optimisation du dispositif et l'intégration de l'entièreté du système en une carte électronique. Cela permettant alors de ne plus utiliser les kits d'évaluations.

7. Sources

- [1] CERISIC, Projet IMMERSION
<https://www.cerisic.be/technique/projet-cerisic/integration-et-mise-en-oeuvre-de-microcapteurs-environnementaux-a-ultra-basse-consommation-au-sein-de-linternet-des-objets-et-de-lindustrie/>

- [2] Legout C., Trouillet M., Institut de veille sanitaire, *Exposition environnementale aux composés organiques volatils des riverains d'un ancien site industriel, Val-d'Oise (95)*. Évaluation des risques sanitaires et appui à la décision sanitaire.
- [3] A. Masih, A.S. Lall, A. Taneja, & Singhvi, R. (2016), *Inhalation exposure and related health risks of BTEX in ambient air at different microenvironments of a terai zone in north India*. Atmospheric Environment, 147, pp 55–66.
- [4] Air Climat, Agence wallonne de l'air & du climat, *effet néfaste sur la santé humaine*, Thématiques : qualité de l'air.
<http://www.awac.be/inNdex.php/thematiques/qualite-de-l-air/les-consequences/effet-sur-la-sante-humaine>
- [5] CPTO, AirPACA Qualité de l'air (2017), *Atelier de sensibilisation : Quel air je respire au bureau ?*
http://www.cypres.org/wp-content/uploads/171127_Petit_Dejeuner_QAI_BureauxISPIRA_AIRPACA_CPTO.pdf
- [6] INERIS, Rapport d'étude 21/12/2004, *Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air. Sources, mesures et concentrations*. Ministère de l'Écologie et du développement durable. N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZd
- [7] T. Hosay, ISSeP – Environnement, Qualité de l'AIR (2002), *Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air en Région Wallonne*.
- [8] N. Castell, F.R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, A. Bartonova (2017). *Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?* Environment International, 99, 293–302.
- [9] C. Perera, C.H. Liu, S. Jayawardena, Min Chen. (2014), *A Survey on Internet of Things from Industrial Market Perspective*. IEEE Access, 2, 1660–1679.
- [10] Semtech, *What is LoRa®?*, <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (consulté en Octobre 2017)
- [11] Sigfox, *Sigfox Technology Overview*, <https://www.sigfox.com/en> (Consulté en octobre 2017)
- [12] NB-IoT HUAWEI, *NB-IOT Enabling new business opportunities*
https://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb_iot_whitepaper_en.pdf
- [13] P.S. Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, J. Famaey (2017). *Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption*. 2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT).

- [14] VOCsSens <http://vocsens.com>
EnviCam <http://envicam.io>
- [15] Figaro Engineering inc, *Operating principle – MOX Sensors*
<http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/principle/mos-type.html>
- [16] International Sensor Technology, *chapter 2. Electrochemical sensors*
<http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>
- [17] Vaisala, *Les technologies de capteurs infrarouges et leur impact sur la précision de la mesure du CO2 dans les applications CVC*, Note d'application.
<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HVAC-CO2-Measurement-Accuracy-B211311FR-A.pdf>
- [18] D. Gibson, C. MacGregor (2013). *A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO2 Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment*. Sensors, 13(6), 7079–7103.
- [19] N. Marchand, T. Walewyns, D. Lahem, M. Debliquy, et L. A. Francis (2017), *Ultra-low-power chemiresistive microsensor array in a back-end CMOS process towards selective volatile compounds detection and IoT applications*, ISOCs/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), Montreal, QC, Canada, 2017, p. 1-3.
- [20] Membrapor, *Electrochemical gas sensors: Working principle*
<http://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/>
- [21] M.P. Oadini, *Objets connectés : enjeu de la 5G*, Techniques de l'ingénieur, TE8000, Novembre 2016
- [22] K.A.A. Rabaiei, S. Harous, S. (2016). *Internet of things: Applications and challenges*. 2016 12th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT).
- [23] R.S. Sinha, Y. Wei, S.H. Hwang, (2017). *A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT*. ICT Express, 3(1), 14–21.
- [24] A. Lavric, V. Popa. (2017). *Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey*. 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS).
- [25] Witekio, *LoRaWan, a dedicated IoT Network* (consulté en Aout 2018)
<https://witekio.com/blog/lorawan-dedicated-iot-network/>
- [26] LoRa Alliance, *LoRaWAN: What is the LoRaWAN™ Specification?*
<https://lora-alliance.org/about-lorawan>

- [27] Proximus EnCo, *LoRaWAN device Classes* (consulté en Aout 2018)
<https://enablingsupport.zendesk.com/hc/en-us/articles/206069491-LoRaWAN-device-classes>
- [28] STMicroelectronics, *NUCLEO-L073RZ : Ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU with 192 Kbytes Flash, 32MHz CPU, USB, LCD*
<https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32l073rz.html>
- [29] STMicroelectronics, *I-NUCLEO-SX1272D : High-performance RF transceiver expansion board featuring FSK, OOK and the LoRa long range modem for STM32 Nucleo-64*
https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-eval-tools/stm32-mcu-eval-tools/stm32-3rd-party-evaluation-tools/i-nucleo-sx1272d.html