

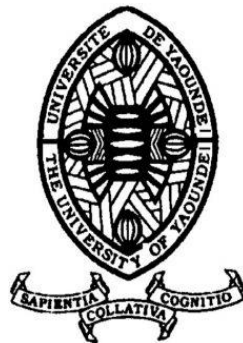
RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN SCIENCES, TECHNOLOGIES
ET GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHES ET DE
FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE
ET APPLICATIONS

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
B.P.812 Yaoundé
Email : crfdstg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROUN
Peace – Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

DEPARTEMENT OF PHYSICS
P.O. Box 812 Yaoundé
Email : crfdstg@uy1.uninet.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE ET DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

LABORATORY OF ENERGY AND ELECTRICAL AND ELECTRONIC SYSTEMS

Utilisation des microcontrôleurs et des capteurs pour la surveillance environnementale : Application à la détection des rayonnements ionisants et de certains polluants atmosphériques

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/PhD en Physique

Option : Électronique – Électrotechnique – Automatique

Par :

MBARNDOUKA TAAMTÉ Jacob

Matricule : 18Z2975

Master en Électronique – Électrotechnique – Automatique

Le 12 Décembre 2022 devant le jury suivant :

Président

ESSIMBI ZOBO Bernard,

Professeur,

(Université de Yaoundé I)

Rapporteurs

SAÏDOU,

Professeur,

(Université de Yaoundé I)

BODO Bertrand

Maître de Conférences,

(Université de Yaoundé I)

Membres

EFFA Joseph Yves,

Professeur,

(Université de Ngaoundéré)

VONDOU DERBETINI Appolinaire,

Maître de Conférences,

(Université de Yaoundé I)

DJUIDJE KENMOE Germaine,

Professeur,

(Université de Yaoundé I)

EYEBE FOU DA Jean Sire,

Maître de Conférences,

(Université de Yaoundé I)



Année 2022



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/PhD


Nous, Professeurs **EFFA Joseph Yves**, **VONDOU DERBETINI Appolinaire**, **DJUIDJE KENMOE Germaine**, **EYEBE FOU DA Jean Sire** et Professeur **ESSIMBI ZOBO Bernard**, respectivement Examineurs et Président du Jury de la thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **MBARNDOUKA TAAMTE Jacob** Matricule 18Z2975, préparée sous la direction des Professeurs **SAÏDOU** et **BODO Bertrand**, intitulée : « Utilisation des microcontrôleurs et des capteurs pour la surveillance environnementale : Application à la détection des rayonnements ionisants et de certains polluants atmosphériques », soutenue le **Lundi, 12 Décembre 2022**, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique. Spécialité **Systèmes Electriques et Electroniques**, attestons que toutes les corrections demandées par le Jury de soutenance ont été effectuées.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé le **08. FEV. 2023**

Les Examineurs


Pr. **EFFA Joseph Yves**


Pr. **VONDOU DERBETINI Appolinaire**


Pr. **DJUIDJE KENMOE Germaine**


Pr. **EYEBE FOU DA Jean Sire**

Le Président du Jury


Pr. **ESSIMBI ZOBO Bernard**


Le Chef de Département de Physique

Professeur

Certification

Je certifie par la présente que le travail effectué dans la thèse intitulée « Utilisation des microcontrôleurs et des capteurs pour la surveillance environnementale : Application à la détection des rayonnements ionisants et de certains polluants atmosphériques » est basé sur le travail original réalisé avec la collaboration entre le Laboratoire d'Energie et des Systèmes Electriques et Electroniques de l'Université de Yaoundé I et le Centre de Recherches en Sciences et Techniques Nucléaires (CRSTN) de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières. Ces travaux ont été menés sous la direction de Pr SAÏDOU et de Pr BODO Bertrand. Cette thèse est authentique et n'a pas été soumise auparavant pour un diplôme dans une autre université.

Auteur

MBARNDOUKA TAAMTE Jacob

Etudiant,

Université de Yaoundé 1

Sous la supervision de :

BODO Bertrand

Maître de conférences,
Université de Yaoundé 1

SAÏDOU

Professeur,
Université de Yaoundé 1

Dédicace

Je dédie ce travail
A mes parents

Remerciements

Ce travail de thèse de Doctorat/Ph.D, est le résultat des recherches menées de 2018 à 2022 avec l'encadrement et le soutien de nombreuses personnes. Il a été possible grâce aux structures de recherche telles que le Laboratoire d'Energie et des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE) de l'Université de Yaoundé I et le Centre de Recherches en Sciences et Techniques Nucléaires (CRSTN) de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM).

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude à mes directeurs de thèse, Pr SAÏDOU et Pr BODO Bertrand, qui malgré leurs multiples occupations académiques, administratives et familiales, ont accepté de diriger ce travail de recherche. Cette thèse de Doctorat/Ph.D n'aurait pas été possible sans leurs diverses visions pointilleuses en physique nucléaire, dosimétrie et radioprotection, électronique et instrumentation scientifique ainsi que les multiples séminaires organisés au Laboratoire de l'Unité Centrale de Traitement et de Prototypage (CPU Laboratory). Je les remercie énormément pour les conseils qu'ils m'ont prodigués et l'expertise qu'ils m'ont permis d'acquérir.

Je tiens à remercier vivement les honorables membres du jury, qui ont accepté de mettre de côté leurs multiples occupations afin d'évaluer ce travail. Je leur exprime mon plus grand respect.

Je remercie le Pr NDJAKA Jean Marie Bienvenu, Chef de Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I.

Je remercie le Pr ESSIMBI ZOBO Bernard, responsable du Laboratoire d'Energie et Systèmes Electriques et Electroniques de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I.

Je remercie le Pr EYEBE FOU DA Jean Sire Armand, responsable de l'Unité de Prototypage des Circuits du Laboratoire d'Electronique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I.

Je tiens à remercier :

- Le Ministère de la Recherche Scientifique et de l’Innovation (MINRESI) qui a soutenu et encouragé ce travail de thèse, à travers le BIP 2020 et le prix spécial de l’innovation en faveur de la jeunesse, qui nous a été décerné à la 7^{ème} édition des Journées d’Excellence de la Recherche Scientifique et de l’Innovation au Cameroun (JERSIC 2021) ;
- L’Agence Internationale de l’Energie Atomique (AIEA), qui a soutenu et encouragé ce travail, à travers la formation en instrumentation nucléaire (2019) et le projet CRP J02014 (2020-2022) de recherche coordonnée ;
- L’Association pour la Promotion de la Science en Afrique (APSA), qui a soutenu et encouragé ce travail, à travers la formation sur la programmation des microcontrôleurs (2019) et le prix de finaliste qui nous a été décerné à la 2^{ème} édition du concours « challenge physique expérimentale en Afrique » (2019) ;
- L’Académie des Sciences du Cameroun (ASC), qui nous a décerné en 2019, le prix d’encouragement suite aux résultats obtenus dans ce travail.

J’adresse un grand merci à tous mes collègues du CRSTN ainsi qu’à mes camarades doctorants du Laboratoire d’Energie et des Systèmes Electriques et Electroniques de l’Université de Yaoundé I, pour leurs multiples soutiens.

Merci à mes parents, mes frères et sœurs, cousins et cousines, ma petite famille ainsi qu’à mes amis et connaissances pour leur assistance et encouragement tout au long de ce travail.

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	iv
Sommaire	vi
Liste des abréviations	xii
Liste des figures	xii
Liste des symboles	xiii
Liste des tableaux	xiii
Résumé	xiii
Abstract	xiv
Introduction générale	1
1 Revue de Littérature	4
1.1 Introduction	4
1.2 Capteurs électroniques : Définition et Classification	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Classification des capteurs selon le type de corps d'épreuve	5
1.2.3 Classification des capteurs selon le mode de traitement interne du signal	5
1.2.4 Classification des capteurs selon la grandeur de sortie	6
1.3 Technologie et matériau de fabrication des capteurs de gaz et de particules matières	7
1.3.1 Capteurs de gaz semi-conducteurs à oxyde métallique	8
1.3.2 Capteurs électrochimiques de gaz	12
1.3.3 Capteurs de gaz à Infra-rouge	14
1.3.4 Capteurs de gaz à photo-ionisation	16
1.3.5 Capteurs "Low Pulse Occupancy Time" (LPO Time)	18
1.3.6 Principales caractéristiques des capteurs de gaz et de particules en suspension	18

1.4	Technologies de transmission sans fil et Internet of Things	22
1.5	Introduction à la radioactivité et détecteurs des rayonnements ionisants . .	25
1.6	Interactions rayonnement-matière	25
1.6.1	Classement des différents types de rayonnements	26
1.6.2	Phénomènes de transfert d'énergie dans les interactions photons-matière	27
1.6.3	Classification des détecteurs de rayonnements ionisants	29
1.6.3.1	Détecteurs à gaz (compteur proportionnel et Geiger-Müller)	29
1.6.3.2	Paramètres de détection des rayonnements ionisants	34
1.7	Microcontrôleurs	35
1.8	Polluants atmosphériques et techniques de surveillance environnementale . .	44
1.8.1	Polluants primaires et secondaires	44
1.8.2	Techniques de surveillance environnementale	45
1.9	Conclusion	47
2	Matériel et méthodes	48
2.1	Introduction	48
2.2	Effets des polluants atmosphériques et rayonnements ionisants sur la santé et l'environnement	48
2.3	Capteurs électroniques de gaz atmosphériques utilisés	50
2.3.1	Capteurs de gaz de type MQ	51
2.3.2	Capteur MG-811 de dioxyde de carbone (CO_2)	54
2.3.3	Capteur SPEC de dioxyde de soufre (SO_2)	57
2.3.4	Capteur CJMCU-6814 de dioxyde d'azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO)	59
2.3.5	Capteurs CJMCU-811 de Composés Organiques Volatiles (COV_s) . .	60
2.3.6	Capteurs DHT22 / DHT11 de température et humidité	61
2.4	Capteurs de particules en suspension	63
2.4.1	Description des capteurs de particules en suspension	63
2.4.2	Principe de fonctionnement des capteurs de particules matières	66
2.5	Détecteurs de rayonnements ionisants et Conditionnement du signal nucléaire	67
2.6	Microcontrôleurs et cartes électroniques programmables	71
2.6.1	Microcontrôleur ATMEL ATmega 328	71
2.6.2	Microcontrôleur ATMEL ATmega 2560	72
2.7	Principe de réalisation des dispositifs de mesure des polluants atmosphériques	73

2.8	Principe de réalisation des dispositifs de détection des rayonnements ionisants	80
2.9	Configuration des modules Xbee de transmission sans fil	83
2.10	Méthodes d'analyse et d'interprétation des résultats de la surveillance envi- ronnementale	84
2.10.1	Indice de la qualité de l'air (IQA)	85
2.10.2	Indice de l'air santé ou «Air Quality Health Index (AQHI)»	86
2.11	Conclusion	86
3	Résultats et discussion	87
3.1	Introduction	87
3.2	Appareils électroniques de surveillance environnementale réalisés et applica- tions	87
3.2.1	Dispositifs de mesure des polluants atmosphériques avec système d'alerte SMS et appel d'urgence	87
3.2.2	Appareil électronique de surveillance de la qualité de l'air basé sur une technique de l'Internet des Objets (IoT)	99
3.2.3	Dispositif intelligent de surveillance de la radioactivité environnementale	106
3.3	Comparaison de fonctionnalités des capteurs et appareils utilisés	114
3.3.1	Comparaison des capteurs électroniques utilisés	114
3.3.2	Comparaison des dispositifs électroniques développés aux appareils de référence	114
3.3.3	Comparaison des dispositifs développés avec ceux existant dans la lit- térature	114
3.4	Conclusion	116
	Conclusion générale et perspectives	117
	Bibliographie	119
	Annexe A : Approches de traitement et d'analyse des données issues des capteurs	132
	Annexe B : Courbes de sensibilité des capteurs MQ et MG-811	135
	Liste des publications	137

Liste des abréviations

<i>ADN</i>	: Acide DésoxyriboNucléique
<i>AES</i>	: Advanced Encryption Standard
<i>AIEA</i>	: Agence Internationale de l'Energie Atomique
<i>ALU</i>	: Arithmetic Logic Unit
<i>AMS</i>	: Automated Manifest System
<i>AOP</i>	: Amplificateur Opérationnel
<i>APSA</i>	: Association pour la Promotion de la Science en Afrique
<i>AQHI</i>	: Air Quality Health Indice
<i>ARM</i>	: Advanced RISC Machine
<i>AT</i>	: International Data Encryption Algorithm
<i>ATMEL</i>	: Avanced Technologies for MEmory and Logic
<i>AVR</i>	: Automatic Voltage Regulator
<i>BF</i>	: Basse Fréquence
<i>BLR</i>	: Base Line Restorer
<i>BPI</i>	: Byte Peripheral Interface
<i>CAN</i>	: Convertisseur Analogique Numérique
<i>CLB</i>	: Configurable Logic Blocks
<i>CE</i>	: Chip Enable
<i>CE</i>	: Contre-Electrode
<i>CISC</i>	: Complex Instruction Set Computer ou Complex Instruction Set CPU
<i>CJMCU</i>	: Marque du capteur de CO et NO ₂
<i>CJMCU</i>	: Marque du capteur de COV
<i>CMOS</i>	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
<i>CPLD</i>	: Complex Programmable Logic Device
<i>CPU</i>	: Central Processing Unit
<i>CSV</i>	: Comma Separated Values
<i>DDR</i>	: Double Data Rate

<i>DGM</i>	: Marque du détecteur Geiger Müller des particules gamma
<i>DEL</i>	: Diode Electro Luminescente
<i>DES</i>	: Data Encryption Standard
<i>DHTxx</i>	: Digital Humidity and Temperature
<i>DRAM</i>	: Dynamic Random Access Memory
<i>DSM</i>	: Marque du capteur de particules matières (PM ₁ , PM _{2,5})
<i>DSP</i>	: Digital Signal Processor
<i>EC</i>	: Electrochimique
<i>EEPROM</i>	: Electrically Erasable Programmable Memory
<i>EM</i>	: Electrode de Mesure
<i>EPROM</i>	: Erasable Programmable Memory
<i>ER</i>	: Electrode de Référence
<i>E/S</i>	: Entrée/Sortie
<i>ESP</i>	: Espresso
<i>ET</i>	: Electrode de Travail
<i>FC</i>	: Facteur de Conversion
<i>FPGA</i>	: Field Programmable Gate Arrays
<i>FPU</i>	: Floating Point Unit
<i>GCC</i>	: GNU Compiler Collection
<i>GND</i>	: Ground
<i>GPL</i>	: Gaz de Pétrole Liquéfié
<i>GPIO</i>	: General Purpose Input/Output
<i>GPRS</i>	: General Packet Radio Service
<i>GPS</i>	: Global Positioning System
<i>GSM</i>	: Global System Mobile
<i>H</i>	: Humidité
<i>I²C</i>	: Inter-Integrated Circuit
<i>ICSP</i>	: In Circuit Serial Programming
<i>IDE</i>	: Integrated Development Environment
<i>IdO</i>	: Internet des Objets
<i>IEEE</i>	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>IoT</i>	: Internet of Things
<i>IRGM</i>	: Institut de Recherches Géologiques et Minières

- J305βγ* : Marque du détecteur Geiger Müller des particules gamma et bêta
- JERSIC* : Journées de l'Excellence de la Recherche Scientifique et de l'Innovation au Cameroun
- JTAG* : Joint Test Action Group
- LCD* : Liquid Crystal Display
- LED* : Light-Emitting Diode
- LFSR* : Linear Feedback Shift Registers
- LPOTime* : Low Pulse Occupancy Time
- LUA* : Langage C ANSI strict, compilable sur plusieurs systèmes
- LPWA* : Low Power Wide Area
- MCA* : Multi Channel Analyzer
- MCU* : Microcontrôleurs
- MEMS* : Microelectromechanical Systems
- MG811* : Marque du capteur de CO_2
- MINRESI* : Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Innovation
- MISO* : Master In – Slave Out
- MOSI* : Master Out- Slave In
- MOS* : Metal–Oxide–Semiconductor
- MOX* : Metal Oxide
- MQ* : Marque de certains capteurs de gaz
- NaI(Tl)* : Iodure de Sodium dopé au thallium
- OSHA* : Occupational Safety and Health Administration (États-Unis d'Amérique)
- PC* : Personal Computer
- PID* : Photo-Ionisation
- PROM* : Programmable Memory
- PM1* : Particules Matières de taille $1\mu\text{m}$
- PM2,5* : Particules Matières de taille $2.5\mu\text{m}$
- PPB* : Part Per Billion
- PPD42NS* : Marque du capteur de particules matières (PM_1 , $PM_{2,5}$)
- PPM* : Part Per Million
- PSPICE* : Personal Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
- PS/2* : Personal System/2
- PWM* : Pulse Width Modulation
- RAM* : Random Access Memory

<i>RF</i>	: Radio Fréquence
<i>RISC</i>	: Reduced Instruction Set Computer (Reduced Instruction Set CPU)
<i>RMSE</i>	: Root Mean Square Error
<i>ROM</i>	: Read Only Memory
<i>RTC</i>	: Real Time Clock
<i>RSA</i>	: Rivest, Shamir, and Adleman
<i>RXD</i>	: Received Data
<i>SAW</i>	: Surface Acoustic Wave
<i>SCLK</i>	: Serial Clock
<i>SCL</i>	: Serial Data Clock
<i>SD</i>	: Secure Digital
<i>SDA</i>	: Serial Data
<i>SMPS</i>	: Switch Mode Power Supply
<i>SMS</i>	: Short Message Service
<i>SoC</i>	: System on a Chip
<i>SPEC</i>	: Marque du capteur de SO ₂
<i>SPI</i>	: Serial Peripheral Interface
<i>SRAM</i>	: Static Random Access Memory
<i>T</i>	: Température
<i>TCP</i>	: Transmission Control Protocol
<i>TIA</i>	: Trans-Impedance Amplifier
<i>TFT</i>	: Thin-Film Transistor
<i>TOR</i>	: Tout Ou Rien
<i>TVOC</i>	: Total Volatile Organic Compounds
<i>TWI</i>	: Two Wire Interface
<i>TXD</i>	: Transmitted Data
<i>UART</i>	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
<i>UAL</i>	: Unité Arithmétique et Logique
<i>UDP</i>	: User Datagram Protocol
<i>UE</i>	: Union Européenne
<i>ULPSM</i>	: Ultra-Low Power Analog Sensor Module
<i>USB</i>	: Universal Serial Bus
<i>USEPA</i>	: U.S. Environmental Protection Agency

- UV* : Ultra Violet
- VGA* : Video Graphics Array
- VLIW* : Very Long Instruction Word
- WECA* : Wireless Ethernet Compatibility Alliance
- WPAN* : Wireless Personal Area Network
- Wifi* : Wireless Fidelity
- XCTU* : Application du protocole ZigBee de communication sans fil

Liste des symboles

CO	Monoxyde de Carbone
CO_2	Dioxyde de Carbone
CPM	Counts Per Minute
eCO_2	équivalent CO_2
GHz	Giga Hertz
He	Hélium
H_2SO_4	Sulfate d'Hydrogène ou Acide Sulfurique
Mb/s ou $Mbps$ ou $Mbit/s$	mégabit par seconde
MHz	Méga Hertz
MeV	Méga-électron Volt
$\mu Sv/h$	Micro Sievert par heure
nGy/h	nano Gray par heure
NH_3	Ammoniac
NO_2	Dioxyde d'Azote
O_3	Ozone Troposphérique
S_nO_2	Dioxyde d'étain
SO_2	Dioxyde de Soufre
T_iO_2	Dioxyde de Titane
WO_3	Oxyde de Tungstène
X_e	Xénon
Z_nO	Oxyde de Zinc
α	Alpha
β	Bêta
Bq	Becquerel
γ	Gamma
λ	Lamda

Résumé

Cette thèse porte sur la conception et le développement des appareils portables et intelligents à faible coût dédiés à la surveillance en temps réel des polluants atmosphériques et des rayonnements ionisants. Deux types d'appareils basés sur les cartes à microcontrôleurs, capteurs de gaz ou détecteurs à tube Geiger-Müller ont été réalisés, à savoir un radiamètre et deux dispositifs de mesure des gaz toxiques (un pour les polluants atmosphériques et l'autre pour l'évaluation de la qualité de l'air). Le radiamètre détecte le débit de dose ambiante de rayonnements ionisants alors que les dispositifs de la qualité de l'air permettent de mesurer les particules matières ($PM_{2,5}$), les gaz toxiques (O_3 , CO , SO_2 , NO_2 , CO_2 , la fumée, le gaz de pétrole liquéfié, etc.) et les paramètres atmosphériques tels que la température (T) et l'humidité (H). Ces appareils intègrent des composants électroniques tels que la carte GPRS et les modules XBee de la technologie ZigBee qui permettent d'établir la fonctionnalité Internet des Objets (IoT) avec un ordinateur distant ou un opérateur via le téléphone portable. Une analyse comparative des concentrations de particules matières ($PM_{2,5}$) obtenues à partir du prototype de mesure des polluants atmosphériques et d'une méthode conventionnelle basée sur le "Gent Sampler" (méthode de référence) est effectuée en plaçant les deux appareils sur un même site d'échantillonnage pour collecter les données pendant deux mois. La régression linéaire des données obtenues a permis de mettre en évidence une bonne concordance entre les deux méthodes avec un coefficient de corrélation de 0,8897. De plus, un coefficient de fiabilité de 1,00 obtenu à l'issue de cette analyse, vient confirmer l'efficacité du dispositif de mesure des polluants réalisé.

Une autre analyse comparative des données issues du radiamètre réalisé et celles d'une méthode de référence (le Gamma RAD5) a été effectuée. Les deux appareils sont utilisés au même endroit à des périodes différentes moyennant les coordonnées GPS. Cette analyse a donné une valeur moyenne de 64,30 nGy/h des données issues du radiamètre réalisé, comparé à 50,67 nGy/h obtenue par le spectromètre gamma RAD5. De plus, les appareils réalisés sont portables et ont un faible coût de réalisation (200 à 350 mille FCFA le dispositif), ils fonctionnent en temps réel et consomment moins d'énergie (1,7 à 6,68 Watt) comparés aux appareils de référence (1,5 et 352 Watt) utilisés. Ils mesurent plusieurs polluants et génèrent un grand nombre de données en très peu de temps (quelques minutes). Ils constituent une solution locale alternative à l'offre commerciale.

Mots-clés : Capteurs, microcontrôleur, IoT, Qualité de l'air, débit de dose ambiante, particules matières.

Abstract

This thesis focuses on the design and development of portable and intelligent low-cost devices dedicated to the real-time monitoring of atmospheric pollutants and ionizing radiation. Two types of devices based on microcontroller cards, gas sensors or Geiger-Müller tube detectors have been realized, namely a survey meter and two devices for measuring toxic gases (one for atmospheric pollutants and the other for air quality assessment). The survey meter detects the ambient dose rate of ionizing radiation while the air quality devices measure particulate matter ($PM_{2.5}$), toxic gases (O_3 , CO , SO_2 , NO_2 , CO_2 , smoke, liquefied petroleum gas, etc.) and atmospheric parameters such as temperature (T) and humidity (H). These devices incorporate electronic components such as the GPRS card and the XBee modules of ZigBee technology that allow the Internet of Things (IoT) functionality to be established with a remote computer or an operator via the mobile phone.

A comparative analysis of the particles matter concentrations ($PM_{2.5}$) obtained from the prototype for measuring atmospheric pollutants and a conventional method based on the "Gent Sampler" (reference method) is carried out by placing both devices at the same sampling site to collect data for two months. The linear regression of the data obtained made it possible to highlight a good agreement between the two methods with a correlation coefficient of 0.8897. In addition, a reliability coefficient of 1.00 obtained from this analysis confirms the effectiveness of the realized pollutant measurement device.

Another comparative analysis of data from the survey meter developed and that of a reference method (the Gamma RAD5) was carried out. The two devices are used in the same place at different times using the GPS coordinates. This analysis gave an average value of $64.30nGy/h$ of the data from the realized survey meter, compared to $50.67nGy/h$ obtained by the RAD5 gamma spectrometer. Moreover, beyond the aforementioned precision, the realized devices are portable and have a low production cost (200 to 350 thousand FCFA per device), they operate in real time and consume less energy (1.7 to 6.68 Watt) compared to the reference devices used (1.5 and 352 Watt). They measure several pollutants and generate a large amount of data in a very short time (a few minutes). They are an alternative local solution to the commercial offer.

Keywords : Sensors, microcontroller, IoT, air quality, ambient dose rate, particles matter.

Introduction générale

La croissance industrielle et le développement urbain ont contribué à l'augmentation de la pollution atmosphérique ou la dégradation de la qualité de l'air qui engendre des problèmes sanitaires, économiques et environnementaux. Les polluants chimiques relâchés sur d'immenses surfaces dans l'environnement, se transforment en gaz toxiques, touchant de nombreuses villes dans le monde. Selon l'OMS, plus de 2 millions de décès prématurés sont chaque année attribués aux effets de la pollution atmosphérique [1]. Parmi ces polluants atmosphériques se trouvent les particules matières (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) et les gaz toxiques comme le CO , le gaz de pétrole liquéfié, les NO_x , le CO_2 , le O_3 , le SO_2 et la fumée qui impactent directement la santé et la sécurité de la biomasse [2, 3]. De nos jours, la surveillance environnementale est incontestablement l'un des enjeux majeurs auxquels l'humanité doit faire face et particulièrement dans le contexte actuel marqué par la crise sanitaire du Covid-19. Car il a été établi scientifiquement que le taux de CO_2 dans l'air ambiant a un impact sur le risque de transmission de virus (coronavirus) et agents pathogènes [4, 5]. De plus, l'OMS estime que 30 % des bâtiments présentent des problèmes importants de pollution de l'air intérieur et l'« U.S. Environmental Protection Agency » (US EPA) a montré que les personnes passent plus de 90 % de leurs temps dans des espaces intérieurs [6]. Ils existent généralement dans ces espaces confinés des matériaux et/ou des produits qui libèrent une grande variété de polluants dans l'air [7–9]. D'autre part, l'exploitation minière est à l'origine d'exposition accrue des personnes aux matières radioactives naturelles. La modification de la répartition et l'état physique de l'uranium, du thorium et de leurs descendants initialement présents dans le sous-sol, entraînent un risque accru de dissémination dans l'environnement et donc d'exposition humaine. Même après l'arrêt de l'exploitation minière, il apparaît une augmentation de la radioactivité ambiante et des concentrations du radon dans l'air [10]. Certes, les effets biologiques des rayonnements ionisants ne sont pas immédiats sur les personnes exposées, mais il ne fait aucun doute qu'à partir d'un certain seuil ils sont nocifs et se manifestent [11–14]. En général, la radioactivité présente plusieurs avantages. Pour chaque application nucléaire, il faut comparer ses avantages avec les risques potentiels car malgré

les applications utiles dans l'énergie, la médecine (imagerie, radio, scanner, stérilisation de matériels et instruments, etc.), la datation et le marquage, l'agriculture, l'industrie et l'environnement, les rayonnements ionisants sont nocifs pour la santé [15–17]. Leurs effets nocifs sur l'homme et l'environnement sont perceptibles dans les endroits où des bombes nucléaires ont été testées, où sont déposés des déchets radioactifs et des accidents nucléaires (Tchernobyl, Fukushima, etc.) qui affectent grandement le public, l'environnement et les générations futures [18–20].

Certains polluants atmosphériques et rayonnements ionisants peuvent causer diverses maladies respiratoires (comme l'asthme) et cancérigènes etc. Le monoxyde de carbone est très toxique pour l'homme et peut provoquer de graves maux de tête, l'asphyxie et même la mort si l'on est exposé pendant une longue période [21, 22]. Ces polluants sont également responsables des problèmes environnementaux tels que les pluies acides et l'appauvrissement de la couche d'ozone. Par conséquent, la surveillance des polluants atmosphériques et rayonnements ionisants dans l'air est primordiale, en particulier dans les zones urbaines et industrielles [23, 24]. Pour cela, l'émergence des cartes à microcontrôleurs et l'amélioration de la sensibilité des capteurs électroniques de surveillance environnementale, permettent d'envisager l'emploi de ces technologies dans la mesure des polluants atmosphériques [25]. Les systèmes classiques de référence couramment utilisés pour la surveillance environnementale à savoir l'échantillonneur d'air « GENT Sampler » et la spectrométrie gamma sont coûteux, complexes et difficiles à mettre en œuvre (énergivores, lourds et non portables). Ainsi, plusieurs questions de recherches ont été établies, au regard des évolutions technologiques, à savoir s'il est possible de développer dans notre pays des appareils de surveillance environnementale à fonctionnement IoT, moins coûteux, efficaces et commercialisables, qui peuvent mesurer simultanément plusieurs polluants atmosphériques. Plusieurs scientifiques ont travaillé dans cet ordre d'idée pour la conception et le développement des dispositifs de surveillance environnementale [26, 27]. C'est le cas de Kaur et ses collaborateurs qui ont étudié un système basé sur un réseau de capteurs sans fil pour l'acquisition et la transmission à distance de données atmosphériques [28]. D'autres chercheurs ont effectué des mesures de la qualité de l'air en utilisant le Wi-Fi comme moyen de transmission sans fil d'informations [29, 30]. Canh et al., [31] ont réalisé un dosimètre portable utilisant un détecteur Geiger-Müller associé à un microcontrôleur ARM et des circuits intégrés. Enfin, Nur Aira et al., [32] ont conçu un appareil de mesure des rayonnements basé sur un tube Geiger-Müller LND7121 et un microcontrôleur Atmega328P. L'interconnexion de plusieurs dispositifs ca-

pables de détecter et de partager les données constitue l'Internet des Objets (IoT) [33, 34] et grâce à cette technologie, d'énormes quantités de données sont transférées en permanence entre les dispositifs de mesure et le terminal de contrôle.

Motivé par les nouvelles techniques de surveillance environnementale et la complexité des appareils de référence utilisés, des innovations remarquables sont apportées dans cette thèse pour surmonter les limites des méthodes de références sus-évoquées. En effet, le « GENT Sampler » par exemple, utilisé pour la caractérisation chimique des aérosols est conçu, d'après Castanho et al., [35–37] avec une efficacité de collecte de 50% de la pollution normale. Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est de réaliser, à base des capteurs et microcontrôleurs, des systèmes électroniques de surveillance environnementale, à faible coût, réalisés et expérimentés, permettant de réduire les risques liés à la pollution atmosphérique et aux rayonnements ionisants, à savoir :

- Des systèmes électroniques de surveillance de la qualité de l'air permettant de déceler le niveau de pollution de certains polluants atmosphériques ;
- Des systèmes électroniques de mesure du débit de dose ambiante des rayonnements ionisants pour assurer la radioprotection et la sécurité nucléaire (acte de malveillance et détection des explosifs).

Ces appareils présentent d'énormes avantages parmi lesquels nous pouvons citer :

- La mesure simultanée en temps réel de plusieurs polluants permettant de déterminer efficacement la qualité de l'air ;
- Une faible consommation énergétique et un faible coût de réalisation ;
- Des dispositifs peu encombrants (légers) et portables ;
- Des dispositifs à fonctionnement IoT qui peuvent partager les données sécurisées ;
- L'enregistrement automatique des données issues des capteurs/détecteurs dans un système de stockage pour des besoins d'analyse.

Ce travail de thèse est réparti en trois grands chapitres. Le chapitre 1 est entièrement consacré à l'état de l'art sur les différentes micro-capteurs, microcontrôleurs ainsi que les techniques de surveillance environnementale. Le chapitre 2 est basé sur la description complète des capteurs, détecteurs et microcontrôleurs utilisés pour le dimensionnement des dispositifs réalisés. Enfin, le chapitre 3 présente les différents prototypes réalisés et leur application dans la surveillance de la qualité de l'air et la radioactivité environnementale. Il présente également les analyses comparatives entre dispositifs réalisés et appareils de référence.

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Apparus dans les années 1960, les capteurs sont de nos jours largement utilisés au quotidien. La course à la miniaturisation ainsi que les progrès réalisés en chimie et en sciences des matériaux ont permis une amélioration significative des performances et la taille des capteurs. De plus, l'émergence depuis les années 2000 des cartes à microcontrôleur et des FPGA favorise le développement des dispositifs de mesure à base de capteurs électroniques. Car l'association de plusieurs capteurs à un système adéquat de traitement et d'analyse du signal donne naissance à un « nez électronique », qui depuis quelques années fait l'objet d'une activité de recherche et de développement intenses. Ces dispositifs trouvent aussi leur application dans la surveillance environnementale. Ce chapitre présente une description de quelques capteurs de polluants de l'air, des cartes électroniques à microcontrôleur ainsi que les méthodes de surveillance environnementale.

1.2 Capteurs électroniques : Définition et Classification

1.2.1 Définition

Un capteur est un dispositif convertissant une grandeur physique, le mesurande m , en une grandeur exploitable, la grandeur de sortie. Cette conversion, appelée transduction est effectuée par un transducteur. La grandeur de sortie ou réponse désignée par R se définit par l'équation suivante :

$$R = f(m) \quad (1)$$



Figure 1 – Représentation synoptique d'un transducteur

Dans les applications développées dans ce travail de thèse, le mesurande est la concentration d'un gaz atmosphérique, des particules matières ou encore le débit de dose des rayonnements ionisants (γ , β ou α) alors que la transduction est la variation de la conductance électrique du capteur. En effet le capteur est au moins constitué d'un élément sensible et d'un transducteur, mais aussi d'un système électronique de traitement de l'information. Ces capteurs sont avantageux en termes d'encombrement, de consommation énergétique, de coût et ont un temps de réponse relativement court [38].

1.2.2 Classification des capteurs selon le type de corps d'épreuve

En fonction du type de corps d'épreuve, on peut classer les capteurs en deux grandes familles; les capteurs à contact qui nécessitent un contact direct avec l'objet à détecter et les capteurs de proximité. Chaque catégorie peut être subdivisée en capteurs mécaniques, électriques ou pneumatiques qui peuvent être logiques ou analogiques.

1.2.3 Classification des capteurs selon le mode de traitement interne du signal

Lorsqu'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs et en fonction de la caractéristique électrique de leur grandeur de sortie, on peut classer les capteurs en deux grands groupes à savoir les capteurs passifs et les capteurs actifs.

– Les capteurs actifs

Lorsque le phénomène physique utilisé pour la détermination du mesurande à l'intérieur du capteur effectue directement la transformation en grandeur électrique, on est en présence d'un capteur actif (Tableau 1). La sortie d'un capteur actif est assimilée à un générateur ou un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge électrique Q (en coulombs).

Tableau 1 – *Grandeurs d'entrée et de sortie et effet utilisé pour les capteurs actifs [39]*

Grandeur mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux de rayonnement optique	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectrique	Tension
Force, Pression	Effet piézo-électrique	Charge électrique
Accélération, Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant), Courant	Effet-Hall	Tension

– Les capteurs passifs

Les capteurs passifs utilisent un élément intermédiaire pour réagir au phénomène physique et une alimentation électrique extérieure pour obtenir un signal électrique. Ils sont souvent modélisés par une impédance et la variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance. Il faut alors leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie. Ces capteurs se comportent en sortie comme des dipôles passifs qui peuvent être résistifs, capacitifs ou inductifs [39], tel que présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2 – *Type de matériau utilisé et caractéristique électrique des capteurs passifs [39]*

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique	Matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliage de nickel, silicium dopé Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine, d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

1.2.4 Classification des capteurs selon la grandeur de sortie

Suivant la nature du signal exploitable obtenu à la sortie des capteurs, on peut regrouper ceux-ci en trois catégories :

– Les capteurs analogiques

Le signal délivré par ces capteurs est la traduction exacte de la loi de variation de la grandeur physique mesurée. Cette grandeur évolue dans le temps et peut prendre une infinité de valeurs. Selon le conditionneur mis en œuvre, l'information analogique peut être délivrée sous forme de courant ou de tension.

– Les capteurs numériques

Le signal numérique est codé au sein du capteur par une électronique associée. Les informations peuvent être délivrées sous forme d'un code numérique binaire (0 ou 1) ou d'un train d'impulsions. Une information numérique peut prendre un nombre fini de valeurs et le nombre de valeurs nécessaires pour coder cette information est déterminé par la formule suivante :

$$\text{Nombre de valeur} = 2^N, \quad (2)$$

avec N , le nombre de bits nécessaires au codage. Les capteurs numériques sont capables de transmettre des valeurs déterminant la position, la pression ou la température. Ainsi, les codeurs optiques, les lecteurs de cartes magnétiques sont des exemples de capteurs numériques.

– Les capteurs logiques

Le signal des capteurs logiques ne présente que deux niveaux ou états qui s'affichent par rapport au franchissement de deux valeurs. L'information est simple à exploiter et ces capteurs du type Tout ou Rien (TOR) sont également désignés comme détecteurs. Les capteurs logiques sont fortement représentés par les interrupteurs de position électromécaniques, les détecteurs de proximité inductifs, capacitifs, photo-électriques, robots, etc. De manière générale, les détecteurs ou capteurs, sont principalement constitués de trois parties :

- a. **Le corps d'épreuve** (tête ou dispositif de commande) est l'élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur qu'il faut mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable, cette grandeur constitue la réaction du corps d'épreuve.
- b. **L'élément de transduction** est une partie sensible liée au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.
- c. **Le boîtier** (ou corps) est un élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

Le choix d'un capteur dépend de l'objet à détecter et de son environnement. Selon les cas, le capteur peut être complété par un module électronique de conditionnement (voir Figure 2), encore appelé "transmetteur" qui permet d'alimenter électriquement le capteur (le cas échéant), de mettre en forme et d'amplifier le signal de sortie, de filtrer et corriger ce signal avant sa transmission [39].

1.3 Technologie et matériau de fabrication des capteurs de gaz et de particules matières

Le besoin de capteurs électroniques pour la surveillance de la qualité de l'air est de plus en plus important [40] et imposé par la multitude de polluants atmosphériques à suivre [41]. Les capteurs de gaz, par exemple ont tous le même principe de base ; ils sont constitués d'un

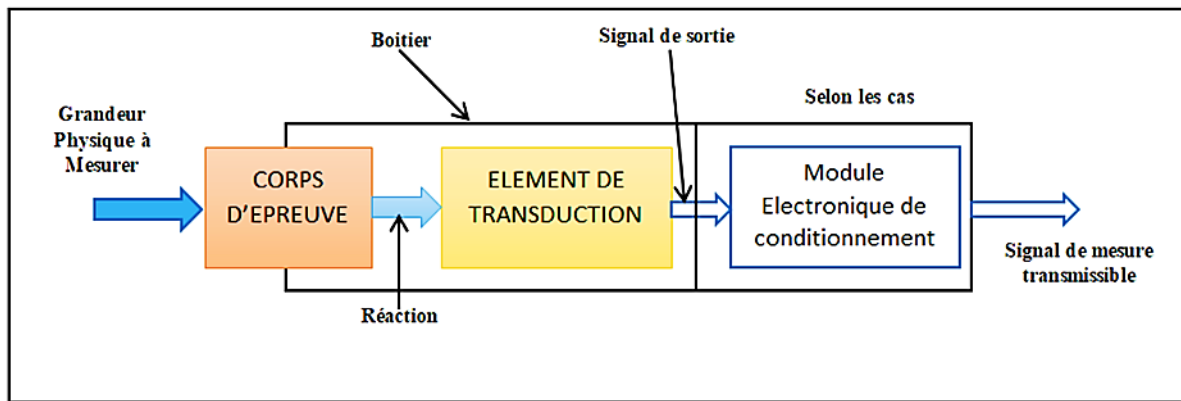


Figure 2 – Schéma de principe d'un capteur avec module électronique de conditionnement

substrat et d'une couche de matériau actif qui interagit avec le composé gazeux à détecter [42]. Le Tableau 3 présente quelques capteurs de gaz et leur principe de fonctionnement.

Tableau 3 – Classification des capteurs de gaz selon leur principe de détection [43]

Principe	Grandeur mesurée	Exemple de capteur
Potentiométrique	Tension	Cellule électrochimique
Ampérométrique	Courant	Cellule électrochimique
Capacitif	Capacité/ charge	Capteur d'humidité
Calorimétrique	Température	Pellistor
Optique	Pic d'absorption	Détecteur infrarouge
Fluorescence	Intensité lumineuse	Fibre optique
Résistif	Résistance	Capteur MOX

1.3.1 Capteurs de gaz semi-conducteurs à oxyde métallique

a) Historique des capteurs MOX (Metal-oxide)

L'utilisation d'oxydes métalliques comme matériaux sensibles aux gaz [44] a été introduite dans les années 1960 par les chercheurs Japonais. Ainsi, Seiyama a montré que les variations de résistance électrique d'un film d'oxyde de zinc (ZnO) permettaient de détecter des gaz réducteurs. Il a fallu attendre 1962 pour voir Taguchi proposer le premier capteur de gaz à base d'une céramique poreuse de dioxyde d'étain (SnO_2) [44], puis 1968 pour une production industrielle dont la commercialisation est assurée par la société Figaro Engineering Inc. De nombreux travaux de recherches sont encore entrepris de nos jours autour de ces capteurs en raison de leurs avantages variés, en particulier une bonne durée de vie et une grande facilité d'utilisation. Les oxydes métalliques les plus utilisés outre le dioxyde d'étain SnO_2 sont les oxydes de tungstène WO_3 , de zinc SnO ou de titane TiO_2 [45–48]. Les capteurs de gaz à base d'oxydes

métalliques sont donc composés d'une couche sensible, des électrodes et d'une partie chauffante (électriquement isolée des électrodes). Le schéma fonctionnel de ces capteurs est présenté par la Figure 3.

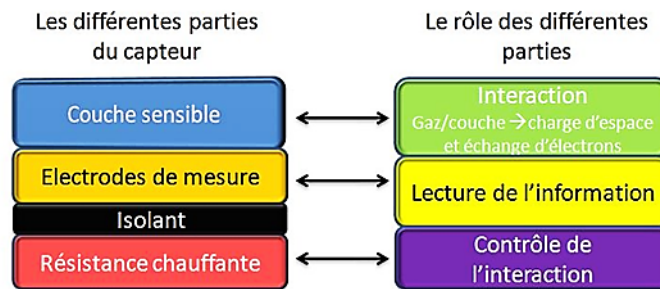


Figure 3 – Schéma fonctionnel d'un capteur de gaz semi-conducteur [49]

L'élément chauffant est d'une grande importance pour ces capteurs. Il va permettre de porter la couche sensible à de très hautes températures (300°C , 500°C) ce qui, suivant la nature de la couche et du gaz à détecter, permettra la réaction optimale entre le gaz et la surface [49].

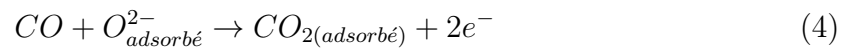
b) Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des capteurs à oxydes métalliques est basé sur la variation de la conductivité électrique de la couche sensible d'oxyde métallique semi-conducteur en présence d'un gaz [50]. Dans ces capteurs, l'information chimique est traduite à travers la structure électronique du matériau et de ses surfaces en des caractéristiques électriques mesurables, comme le changement de conductivité. En effet, pour qu'elles soient mesurables, les interactions sont principalement des réactions d'oxydo-réduction (d'adsorption) qui font intervenir des échanges d'électrons entre le gaz et le matériau sensible. Les principaux facteurs agissant sur la détection d'espèces gazeuses sur la couche sensible sont la température de la surface, les concentrations de O_2 et H_2O (relatif au nombre de molécules en contact avec la surface) et le flux gazeux en surface (relatif au nombre de collisions gaz/surface). L'existence d'une espèce oxygénée en surface de la couche sensible dépend fortement de l'énergie fournie c'est-à-dire de la température de fonctionnement du capteur et de ses variations. En d'autres termes, la sensibilité au gaz est fonction de l'état de la surface d'une part et de la température de la couche sensible d'autre part. La sensibilité des capteurs MOX varie selon cette température qui doit être maintenue constante pour permettre des mesures reproductibles. Certains travaux de recherche proposent l'utilisation de la modulation de cette température de fonctionnement comme un facteur de différenciation entre les gaz [51–55].

Mais cette technologie est difficile à mettre en œuvre. La nécessité d'une température élevée de fonctionnement est l'un des inconvénients des capteurs MOX pour une application embarquée, car elle augmente de manière importante la consommation d'énergie (environ 300mW par capteur) et par conséquent la puissance du module d'alimentation associé [38, 56]. Le choix du matériau d'un capteur dépend de la nature du gaz à mesurer. Pour la détection des gaz réducteurs (CO , CH_4 , hydrocarbures) dans l'air (milieu oxydant), certains oxydes métalliques de type n sont bien adaptés. Alors qu'un semi-conducteur de type p sera utilisé pour la détection de gaz oxydants [57]. L'adsorption d'oxygène sur un semi-conducteur de type n comme le SnO_2 conduit à un transfert électronique vers les molécules adsorbées et par suite à une diminution de la conductivité électrique. Ceci s'écrit suivant l'équation :



L'influence des autres gaz peut alors se traduire par deux effets majeurs. D'une part, par transfert direct de charge suite à l'adsorption comme décrit précédemment, mais aussi par réaction chimique avec les espèces pré-adsorbées, en particulier les espèces oxygénées. En reprenant l'exemple du semi-conducteur de type n comme SnO_2 , l'action des gaz peut être schématisée comme suit (avec le CO comme gaz réducteur) :



Ce qui entraîne une augmentation de conductance électrique. En termes de zone de charge d'espace, cela se traduit par une diminution de la largeur de la zone désertée en électrons. Avec un gaz oxydant comme le NO_2 , on obtient :



Ce qui entraîne une diminution de conductance électrique et en termes de zone de charge d'espace, cela se traduit par une augmentation de la largeur de la zone désertée en électrons [44]. Les électrodes permettent alors d'établir un contact électrique avec la couche sensible afin de mesurer sa conductivité (ou sa résistivité). Elles permettent la conduction des charges du matériau vers le circuit qui récupère le signal [49]. La

conductivité d'un semi-conducteur est définie par l'équation suivante :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (6)$$

Où q est la charge en Coulomb, n et p les concentrations en électrons libres et en trous, μ_n et μ_p la mobilité des électrons et des trous [43]. Le dioxyde d'étain étant un semi-conducteur extrinsèque de conductivité de type n (les porteurs électroniques majoritaires sont les électrons), son nombre d'électrons libres est très supérieur à celui des trous et sa conductivité peut s'écrire :

$$\sigma = qn\mu_n \quad (7)$$

Comme dans tous les semi-conducteurs, l'augmentation de la température entraîne un passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Le nombre de porteurs de charges libres croît de façon exponentielle avec la température [43].

c) Circuit électronique des capteurs MOX

Les capteurs MOX présentent tous le même brochage (Figure 4), avec une tension d'alimentation continue (V_c) maximale de 5 Volts. Pour mesurer les variations de la résistance des capteurs dues à la présence d'un gaz, on les place dans un circuit en demi-pont, en série avec une résistance de charge R_L .

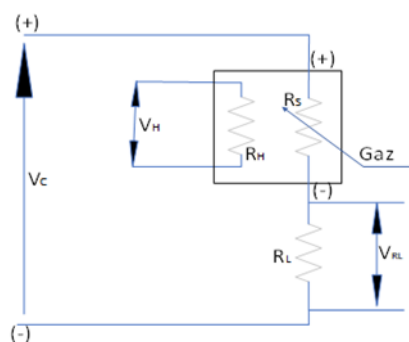


Figure 4 – Schéma de principe des capteurs de gaz MOX [58]

Dans ce circuit, les variations de la conductance G du capteur se traduisent par une variation de la tension V_{RL} aux bornes de la résistance de charge R_L . La tension de sortie V_{RL} varie dans la gamme de 0 à 5 volts et peut être convertie en valeur de la

conductance du capteur à partir de la relation suivante [56] :

$$G = \frac{1}{R_S} = \frac{1}{R_L} \times \frac{V_{R_L}}{V_C - V_{R_L}} \quad (8)$$

d) **Avantages et inconvénients**

Les oxydes métalliques font à l'heure actuelle, l'objet de plus d'attention car ce sont des matériaux ioniques avec une grande sensibilité gazeuse [49]. Les capteurs MOX sont certes très anciens mais restent les plus vendus et les plus étudiés à travers le monde. Ils présentent une bonne sensibilité et un faible coût de fabrication mais aussi une faible sélectivité et des problèmes de stabilité [49]. Les principaux axes d'améliorations sont les techniques visant à modifier physiquement le capteur et sa couche sensible pour améliorer ses performances. La sensibilité et la sélectivité du capteur peuvent être améliorées en jouant sur sa morphologie, sa température de fonctionnement ainsi que le dopage et son filtre [56].

1.3.2 Capteurs électrochimiques de gaz

a) **Description du dispositif**

Un capteur électrochimique de gaz possède une électrode de travail (ET) aussi nommée électrode de mesure (EM), une électrode de référence (ER) et une contre-électrode (CE). En fonction du gaz cible la réaction électrochimique qui en découle peut-être l'oxydation ou la réduction. Ces types de capteurs sont utilisés pour détecter l'oxygène et les gaz toxiques. Les capteurs électrochimiques sont comme des piles, où on peut mesurer le signal électrique généré entre les bornes de deux électrodes, par une réaction d'oxydo-réduction de l'espèce à détecter. Selon le paramètre de mesure, on distingue les capteurs ampérométriques (variation de courant), potentiométriques (variation de tension) ou conductimétriques (variation de conductivité). La différence de potentiel entre les électrodes dépend de la température et de la pression du gaz mesuré [59]. La Figure 5 présente le schéma de principe d'un capteur électrochimique, constitué d'une cellule électrochimique et d'une membrane semi-perméable qui joue le rôle de barrière de diffusion, d'un électrolyte et de deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. L'électrolyte peut être liquide, gel ou solide. L'absorption du composé à détecter donne lieu à une réaction électrochimique spécifique, ce qui induit une force électromotrice liée au transfert de charges entre ce composé et la cellule de mesure [60]. Le principe le plus utilisé pour la détection des gaz toxiques est

l'ampérométrie qui est la mesure du courant produit par une réaction d'oxydoréduction [42].

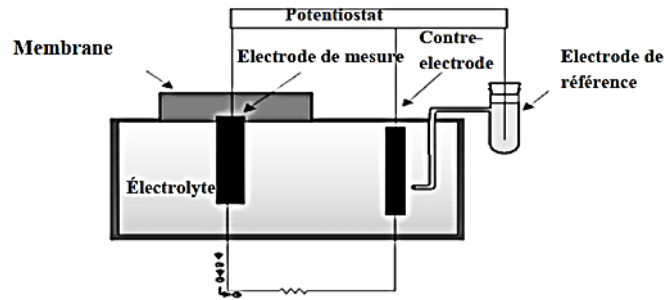
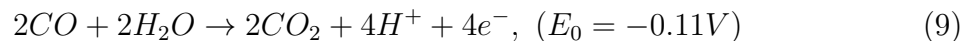


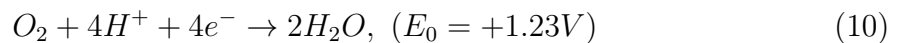
Figure 5 – Schéma de principe du capteur électrochimique (ampérométrie) [42]

b) Exemples de fonctionnement d'un capteur électrochimique

Pour la détection du monoxyde de carbone par exemple, on utilise une membrane semi-perméable en Téflon. En l'absence de gaz réactif dans l'air ambiant, l'oxygène diffuse dans la cellule du capteur sans engendrer de différence de potentiel aux électrodes et sans générer de courant. Si le capteur est mis en présence d'un gaz réducteur comme le monoxyde de carbone (CO), ce gaz diffuse vers l'électrode de mesure où il est oxydé (en dioxyde de carbone dans le cas présent) en libérant un proton (H^+) et des électrons (Figure 6). La réaction à l'électrode de mesure (anode) est :



Simultanément, la contre-électrode ou électrode auxiliaire (cathode) est le siège d'une réaction avec l'oxygène de l'air ambiant, suivant l'équation :



La réaction globale nous donne l'équation (11) :



Le CO_2 produit au cours de la réaction est rejeté par l'électrolyte et ressort à travers la membrane du capteur. Pour des gaz oxydants comme le dioxyde d'azote NO_2 et l'ozone O_3 , on assiste à une libération d'électrons à la contre-électrode et apparition d'un courant en sens inverse :

NO_2 (réduction) à l'électrode de mesure :

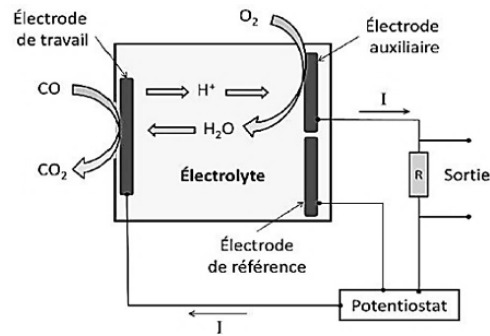
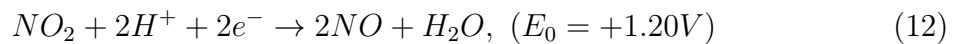
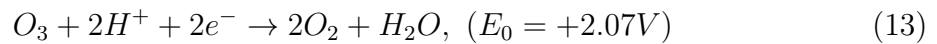


Figure 6 – Détection du CO par un capteur électrochimique [42]



O_3 (réduction) à l'électrode de mesure :



Le changement de potentiel à l'électrode de mesure en présence du gaz oxydant ne dépend pas de la polarisation de la contre-électrode mais du courant généré à l'électrode de mesure par le gaz et est utilisé comme signal exploitable [40].

c) Avantages et inconvénients

Les capteurs électrochimiques ont des multiples avantages parmi lesquels une sensibilité élevée, la faible consommation d'énergie, la reproductibilité et un faible coût [61]. Les limites de ces capteurs sont la faible sélectivité de la réponse, les interférences de certains gaz, la sensibilité à la pression, la température, la poussière, les dérives (étalonnage tous les 3 à 6 mois) et une durée de vie limitée (actuellement 1 à 2 ans). Les cellules électrochimiques actuelles fournissent un courant de 0,1 à $1\mu A$ par ppm (partie par million) de gaz mesuré [62].

1.3.3 Capteurs de gaz à Infra-rouge

a) Définition

Un capteur à Infra-rouge (IR) mesure les traces de gaz en déterminant l'absorption d'une source de lumière infrarouge émise à travers un échantillon d'air. Ces types de capteurs sont utilisés pour détecter le dioxyde de carbone ainsi qu'un grand nombre de gaz combustibles. Chaque gaz absorbe la lumière d'une manière particulière, c'est pourquoi les gaz apparaissent en des couleurs différentes. Les gaz combustibles (hydro-

carbures) absorbent différemment les longueurs d'onde de la lumière comparativement à certaines composantes de l'air telles que l'oxygène, l'azote et l'argon. Les capteurs infrarouges reposant sur le principe d'absorption de la lumière, exploitent cette distinction afin de mesurer la quantité d'hydrocarbures et de gaz présents dans l'air. La Figure 7 présente les ondes électromagnétiques classées selon la longueur d'onde λ (ligne du bas) et la fréquence (ligne du haut). Le domaine des ondes infrarouges est entouré en vert ; c'est la gamme des longueurs d'onde allant des micro-ondes à quelques millimètres [59].

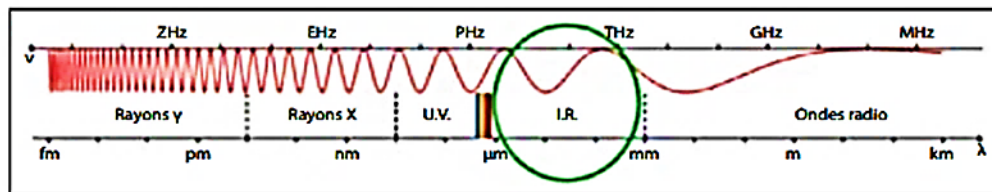


Figure 7 – *Domaine de l'infrarouge (entouré en vert) [59]*

b) Principe de fonctionnement des capteurs infrarouges (détection du CO_2)

De nombreux gaz toxiques ou inflammables possèdent des bandes d'absorption dans la zone infrarouge du spectre lumineux électromagnétique. Dans un gaz, les liaisons entre atomes vibrent et pour effectuer ces mouvements, les molécules absorbent de l'énergie. Cette énergie peut être apportée par une onde électromagnétique du domaine de l'infrarouge. Ce phénomène est utilisé pour fabriquer certains capteurs de CO_2 ou de particules matières. Le gaz à analyser traverse un cylindre éclairé par une source de rayons infrarouges. Après la traversée du gaz, les rayons infrarouges traversent un filtre qui ne laisse passer que la longueur d'onde du gaz à mesurer et un photo-détecteur mesure l'intensité de ce rayon. La Figure suivante décrit le principe de fonctionnement des capteurs infrarouges.

Pour connaître la concentration en CO_2 , la loi de Beer-Lambert montre que l'intensité de la lumière après le filtre dépend de l'absorption molaire propre au CO_2 (qui est $\lambda = 4,25$ microns), de la longueur de la cellule (qui ne varie pas pour un dispositif donné) et de la concentration en CO_2 . Par une simple mesure d'intensité relative, on peut donc déterminer la concentration du CO_2 . Soit I l'intensité en candela de radiation lumineuse d'infrarouge réceptionnée par une thermopile, la loi de Beer-Lambert s'exprime par :

$$I = I_0 e^{-kCL} \quad (14)$$

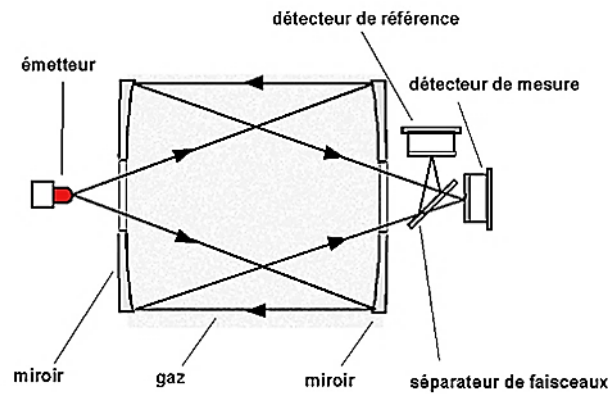


Figure 8 – Schéma de principe d'un détecteur de gaz infrarouge ponctuel [41]

Où I_0 est l'intensité en candela de radiation lumineuse d'infrarouge émise au départ, k est une constante d'absorption spécifique pour le gaz cible, L la longueur du chemin en mètre de la chambre d'absorption de l'émetteur au récepteur et C le rapport de la concentration du gaz cible exprimé en *ppm* [59–61] :

$$C = -\ln \frac{(I/I_0)}{KL} \quad (15)$$

c) Avantages et inconvénients

Les capteurs de CO_2 à infrarouge sont assez gros car il faut une quantité suffisante de mélange gazeux pour détecter le CO_2 . Ils sont de loin les plus performants mais l'inconvénient est leur coût élevé (au-delà de la centaine d'euros) et leur encombrement important [58]. En général, les capteurs à infrarouge sont sensibles à la pression, la poussière et leur sélectivité dépend du gaz cible et la longueur d'onde sélectionnée [62].

1.3.4 Capteurs de gaz à photo-ionisation

a) Définition

Un capteur à photo-ionisation brise les molécules de gaz en ions chargés positivement ou négativement afin de mesurer la charge électrique des ions et afficher la quantité de gaz ou de vapeur présente. Ces types de capteurs sont utilisés pour détecter les vapeurs de composés organiques volatiles (*COV*) et les gaz toxiques en faibles concentrations de parties par milliard (*ppb*) à quelques milliers de parties par million (*ppm*). Le capteur à photo-ionisation est un capteur à large spectre non spécifique à un seul gaz.

b) Principe de fonctionnement des capteurs à photo-ionisation

Le capteur à photo-ionisation est constitué d'un boîtier, de deux électrodes et d'une

lampe ultraviolette. Le gaz à mesurer entre dans la chambre du capteur par sa membrane. Les photons de la lampe ultraviolette (UV) à l'intérieur du capteur brisent les molécules de gaz en ions chargés positivement et négativement. Ces ions chargés sont comptabilisés par l'électrode collectrice (la cathode) dans le capteur qui produit un courant de sortie mesuré par le système électronique de l'appareil. Ce courant est proportionnel à la concentration des molécules ionisées à l'intérieur de la chambre, ce qui rend possible la détermination de la concentration du gaz dans l'air. Le capteur à photo-ionisation est important pour les concentrations de gaz combustibles qui sont toxiques à très faibles concentrations. La gamme de mesure de ces capteurs dont le schéma de principe est présenté par la Figure 9, varie de 0 à 1000 ppm [41]. Ils ont trois différents types de lampes UV à savoir : 9,8 ; 10,6 et 11.7 eV.

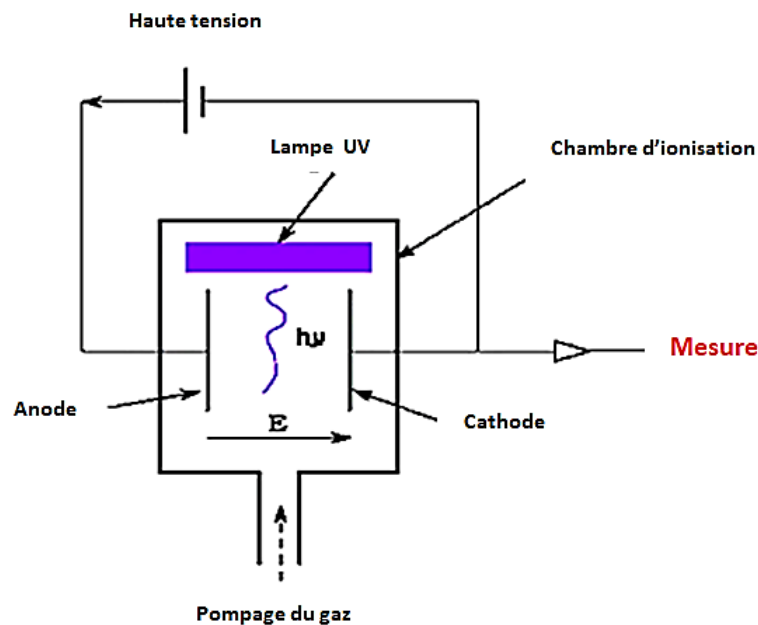


Figure 9 – Schéma de principe d'un capteur à photo-ionisation [4]

c) Avantages et inconvénients

Les capteurs à photo-ionisation sont souvent utilisés pour des mesures d'hygiène et de COV sur les sites industriels. Ces capteurs ne sont pas sélectifs, il faut au préalable connaître le composé recherché pour obtenir une réponse valide (concentration réellement lue) [41]. Dans le cas où plusieurs composés sont présents dans l'air, il n'est plus possible d'exploiter les résultats obtenus par une simple lecture. Les capteurs à photo-ionisation sont influencés par l'humidité et la pression. La durée de vie des lampes UV varie suivant l'énergie et le contexte d'utilisation (quelques mois pour la lampe 11,7 eV et 1 à 2 ans pour les lampes 9,8 et 10,6 eV), hors phénomène d'encrassement [41].

1.3.5 Capteurs "Low Pulse Occupancy Time" (LPO Time)

Utilisé pour la mesure de la concentration des particules matières (PM), le capteur LPO Time fonctionne selon le principe de réflexion optique de la lumière infrarouge mais n'utilise pas les signaux modulés en entrée. Sa spécificité est de permettre le comptage du nombre de dépassement d'un seuil de tension électrique aux bornes de la cellule photosensible. Ces dépassements de tension électrique sont causés par la présence d'une certaine quantité de lumière réfléchiée par un grand nombre de particules. Le capteur ne compte pas les particules mais la quantité de temps pendant laquelle les particules sont détectées par une photodiode. Le graphe de la Figure 10 ci-dessous présente la façon dont le capteur Shinyei PPD42NS « calcule » la qualité de l'air. Il applique un filtre passe-bande (ligne rouge) pour éliminer le bruit ou les très petites particules. Ensuite, indépendamment de l'intensité (ou de la taille des particules), il compte le temps pendant lequel une particule est vue. Cette durée, appelée "Low Pulse Occupancy", peut être considérée comme le "pourcentage d'opacité" de l'air circulant à travers le capteur. Afin de mesurer le LPO pour différentes tailles de particules, le capteur fournit une entrée variable qui permet d'ajuster le filtre passe-bande [63, 64].

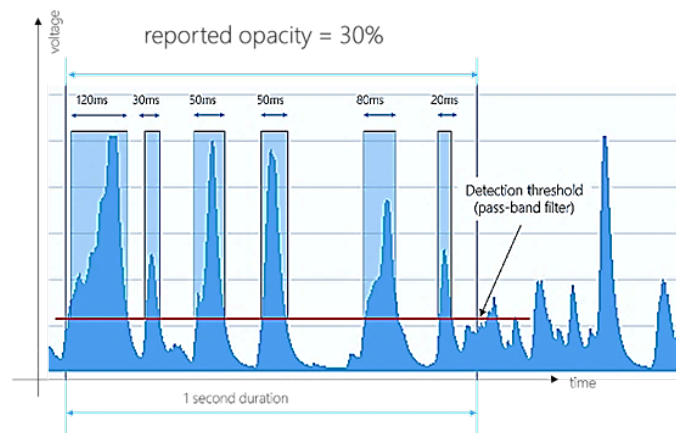


Figure 10 – Principe de détection LPO [63]

Le schéma de principe des capteurs LPO fonctionnant selon le procédé de comptage de crêtes, est décrit par la Figure 11 :

1.3.6 Principales caractéristiques des capteurs de gaz et de particules en suspension

La mesure des grandeurs physiques est une discipline à part entière avec son propre vocabulaire. Pour répondre au besoin croissant et exigeant des mesures, les capteurs doivent

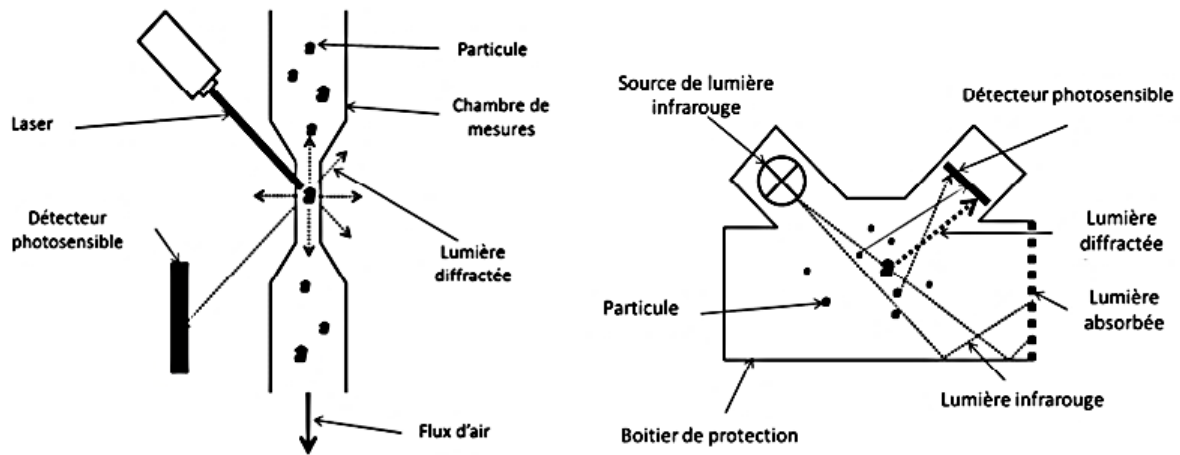


Figure 11 – Schéma d'un exemple de capteur OPC (Optical Particle Counter) [65]

être performants. Ainsi, les principales caractéristiques des capteurs sont : la sensibilité, la sélectivité, la stabilité, la réversibilité, le seuil de détection, le temps de réponse et de recouvrement, la durée de vie ou la reproductibilité. Les trois premières caractéristiques appelées les 3"S" sont les plus importantes [38, 56].

– Sensibilité

La sensibilité traduit l'évolution de la réponse du capteur en fonction de la variation du mesurande (concentration d'un gaz). Elle se définit par l'équation suivante :

$$S_i = \frac{\Delta R}{\Delta [C]_i} \quad (16)$$

Avec S_i la sensibilité au gaz i , R la réponse du capteur et $[C]_i$ la concentration du gaz i dans l'environnement. Une petite variation du mesurande engendre une grande variation de la réponse et meilleure sera la sensibilité du capteur. Dans la majorité des cas, la réponse des capteurs est fortement non-linéaire. Il est donc difficile de comparer la sensibilité de plusieurs capteurs différents. C'est pour cela que la « réponse relative », basée sur des calculs différentiels et relatifs est introduite [38]. Différentes équations sont utilisées pour la calculer :

Dans le cas du calcul différentiel relatif

$$r_{relative} = \frac{R_{référence} - R_{gaz}}{R_{référence}} \quad (17)$$

Dans le cas du calcul relatif

$$r_{relative} = \frac{R_{gaz}}{R_{référence}} \quad (18)$$

Avec $r_{relative}$ la réponse relative du capteur, $R_{référence}$ la réponse du capteur sous ambiance neutre ou servant de référence et R_{gaz} la réponse pour une concentration de gaz cible. Ces calculs permettent de quantifier l'impact d'un environnement sur un capteur et de comparer les performances de différents capteurs pour un même environnement.

– **Sélectivité**

C'est la capacité d'un capteur à être sensible à certain(s) gaz sans être impactée par d'autres. Elle se détermine selon l'équation suivante :

$$Sélectivité = \frac{S_i}{S_j} \quad (19)$$

Avec S_i et S_j , respectivement la sensibilité pour un gaz i et j . Un capteur est dit sélectif si sa sensibilité pour un gaz cible est faiblement affectée par la présence d'autres gaz, dits interférents.

– **Stabilité**

La stabilité se détermine par la capacité d'un capteur à conserver une ligne de base constante au cours du temps pour un environnement de référence. Pour qu'un capteur soit qualifié de stable, la mesure de la réponse pour une atmosphère fixée ne doit pas dépendre du moment où la mesure a été prise [54, 55].

– **Seuil de détection**

Le seuil de détection est la concentration limite en dessous de laquelle le capteur ne va pas répondre à une stimulation. En dessous de cette valeur, le bruit engendré par le capteur devient non négligeable par rapport au signal généré.

– **Durée de vie**

La durée de vie est la période pendant laquelle les caractéristiques du capteur permettent son utilisation avec un degré de précision suffisant. Généralement la limite d'utilisation est fixée par l'instant où le signal de mesure devient insuffisant par rapport au bruit pour un seuil de concentration donné.

– **Temps de réponse / Temps de recouvrement**

Le temps de réponse coïncide avec la durée que met le capteur à répercuter une modification de son environnement. Traditionnellement cette durée correspond au temps mis par le capteur pour atteindre 90% de la réponse maximale (Figure 12).

Le temps de recouvrement (ou temps de régénération) est l'opposé du temps de réponse et correspond à la durée mise par le capteur pour revenir à son état d'origine après la fin d'une exposition à un environnement modifié.

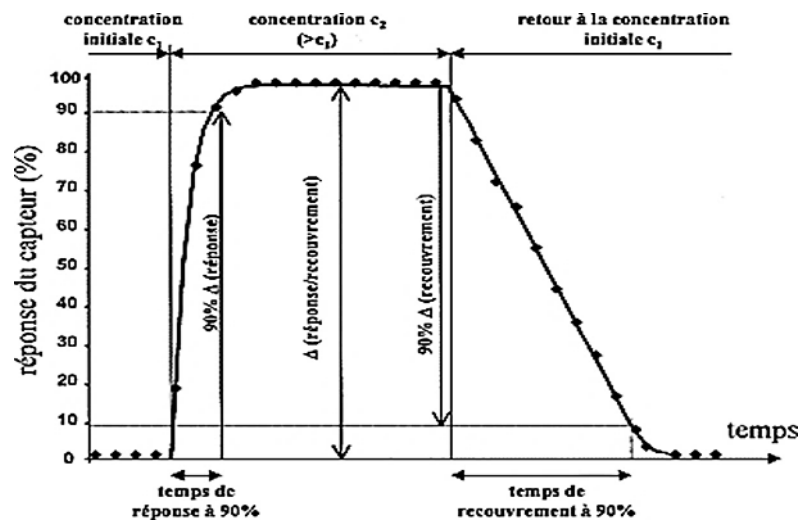


Figure 12 – Temps de réponse et temps de recouvrement [38]

– **Reproductibilité (ou répétabilité)**

La reproductibilité traduit l'aptitude d'un capteur à reproduire une même réponse pour un environnement identique. Pour cela, la sensibilité, les temps de réponse et de recouvrement doivent être similaires et indépendants du moment de la mesure.

– **Étendue ou plage de mesure**

L'Étendue ou plage de mesure est la variation possible de la grandeur à mesurer définie par une valeur minimale (portée minimale) et une valeur maximale (portée maximale).

– **Précision**

Le capteur est d'autant plus exact que les résultats de mesure qu'il indique coïncident avec la valeur vraie (par définition théorique) que l'on cherche à mesurer.

– **Linéarité**

La linéarité surtout pour les capteurs analogiques, les valeurs de sortie doivent toujours être proportionnelles aux valeurs d'entrée dans toute l'étendue de la mesure.

– **Réversibilité**

La réversibilité définit la capacité du capteur de gaz à revenir à son état initial lorsqu'on supprime l'excitation gazeuse. L'utilisation fiable des capteurs à gaz nécessite donc un nettoyage de la couche sensible après l'exposition gazeuse appelé « régénération ». Dans le cas contraire on aurait un empoisonnement progressif du capteur qui aboutirait à des résultats de mesures erronés.

1.4 Technologies de transmission sans fil et Internet of Things

Les travaux effectués par le groupe 802.11 de « Institute of Electrical and Electronics Engineers » (IEEE) ont contribué à l'amélioration des performances des protocoles d'accès au canal radio. Le résultat de ces travaux est la norme IEEE 802.11, couramment appelée WI-FI qui a favorisé l'avènement des normes dédiés aux réseaux personnels tels que le Bluetooth (IEEE 802.15.1) et le ZigBee (IEEE 802.15.4) très utilisées dans le contexte des réseaux de capteurs. Ces réseaux sans fil se distinguent selon le périmètre géographique de connectivité.

– Technologie ZigBee

La technologie ZigBee (IEEE 802.15.4) permet d'obtenir des liaisons sans fil à bas prix, avec une très faible consommation énergétique (3.3V, 50 mA). Ceci rend les modules ZigBee particulièrement utiles pour des petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets, etc.). La technologie ZigBee opère sur la bande de fréquences 2,4 GHz et 16 canaux. Elle permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 Kb/s avec une portée maximale de 1200 mètres environ (XBee S2C). Le protocole ZigBee utilise les modules XBee (Figure 13) comme support de communication radio et se distingue des autres par ses faibles besoins en mémoire. Sa durée de vie très importante ainsi que sa capacité à supporter un grand nombre de nœuds dans un réseau. Le ZigBee est la technologie sans fil destinée à l'électronique embarquée et utile dans la réalisation des capteurs interrogeables à distance. C'est le cas de la société française BeanAir qui réussit à associer les capteurs de température SAW avec des modules sans fil ZigBee [66].



Figure 13 – Module Xbee [67]

Les modules Xbee peuvent être utilisés avec un ordinateur ou une carte à microcontrôleurs mais ils peuvent aussi fonctionner seuls. Ils disposent de six entrées analogiques et de huit entrées numériques dont ils peuvent transmettre l'état tout seul si on les a préalablement configurés correctement. Les modules peuvent fonctionner dans deux

modes principaux distincts :

- Le mode transparent qui permet le remplacement immédiat de n'importe quelle liaison série asynchrone filaire par une liaison radio sans aucune manipulation particulière au niveau des modules Xbee, ce mode peut supporter ou non, au gré de l'utilisateur, la programmation d'un certain nombre de fonctions du modem au moyen de la commande AT.
- Le mode API (Application Program Interface) qui permet d'accéder aux possibilités plus fines de mise en réseau des modules mais ne se justifie vraiment que lorsque l'on veut gérer tout un groupe de modules avec des possibilités de diffusion multiple, d'adressage, etc.

La structure du système Zigbee est composée de trois différents types de périphériques à savoir le coordinateur Zigbee, le routeur et le périphérique final. Chaque réseau Zigbee doit être composé d'au moins un coordinateur qui joue le rôle de racine et de pont du réseau. Le coordinateur est responsable du traitement et du stockage des informations tout en effectuant des opérations de réception et de transmission de données. Les routeurs Zigbee jouent les fonctions d'un module End-Device (dispositif terminal du réseau) et sont utiles pour étendre le réseau. Le nombre de routeurs, de coordinateurs et de périphériques dépend du type de réseaux à savoir les réseaux en étoile, en arborescence ou maillés.

L'architecture du protocole Zigbee consiste en une pile de différentes couches où IEEE 802.15.4 est défini par les couches physiques et MAC tandis que ce protocole est complété par l'accumulation des propres couches réseau et application de Zigbee.

- Couche physique : Cette couche effectue des opérations de modulation et de démodulation lors de l'émission et de la réception de signaux respectivement.
- Couche MAC : Cette couche est responsable de la transmission fiable des données en accédant à différents réseaux avec les évitements de collision à accès multiple de détection de porteuse.
- Couche réseau : Cette couche prend en charge toutes les opérations liées au réseau telles que la configuration du réseau, la connexion du périphérique final et la déconnexion au réseau, le routage, les configurations des périphériques, etc.
- Sous-couche de prise en charge des applications : Cette couche permet aux services nécessaires aux objets de périphérique Zigbee et aux objets d'application de s'interfacer avec les couches réseau pour les services de gestion des données. Cette couche est chargée de faire correspondre deux appareils en fonction de leurs services et de

leurs besoins.

– Technologie GPRS

Le module GSM/GPRS est une carte d'interface compatible sur Arduino. Il permet d'envoyer et recevoir des SMS, des données ou des communications vocales depuis un réseau mobile. Le module est basé sur le circuit SIM900 de la société SIMCOM. Il est contrôlé via les commandes AT (ATtention; définies par la norme GSM 07.07) depuis une carte Arduino.



Figure 14 – *Module GPRS [68]*

La communication entre le module et une carte Arduino est réalisée par la liaison série asynchrone : UART ou une liaison série logicielle. Les caractéristiques principales de la carte GPRS sont résumées dans le Tableau suivant.

Tableau 4 – *Caractéristiques principales de la carte GPRS (SIM 900) [69]*

Module Quad-band	850/900/1800/1900 MHz
Protocoles supportés	TCP/UDP
Tension d'alimentation	5V par la broche 5V, 6,5V à 12V par la broche Vin
Consommation	1,5mA en veille , 400 mA max
Puissance	Classe 4 (bandes 850/900 MHz) : 2W Classe 1 (bandes 1800/1900 MHz) : 1W
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Dimensions	68.58 × 53.34 mm

– Internet of Things

L'Internet of Things (IoT) décrit le réseau de terminaux physiques, des « objets » qui intègrent des capteurs, des softwares et d'autres technologies en vue de se connecter à d'autres terminaux et systèmes sur Internet et d'échanger des données avec eux. Bien que l'idée de l'Internet of Things soit loin d'être nouvelle, c'est un ensemble de progrès récents de différentes technologies qui a permis de le concrétiser, à savoir :

- L'accès à une technologie de capteurs à coût réduit et faible consommation ;
- La connectivité ;

- La plates-formes cloud ;
- Le machine learning et analyses ;
- L’Intelligence Artificielle (IA) conversationnelle.

Le ZigBee est un réseau local sans fil WLAN (Wireless Local Area Network) à basse consommation. Il vise à fournir à l’IoT des fonctionnalités permettant de prendre en charge des réseaux peu coûteux et très fiables pour la communication entre appareils. Il est devenu aujourd’hui le protocole IoT accepté dans le monde entier [70].

1.5 Introduction à la radioactivité et détecteurs des rayonnements ionisants

La radioactivité est un phénomène naturel lié à la structure de la matière. La matière est constituée d’atomes au sein desquels les électrons gravitent autour du noyau. Ce noyau atomique comporte un nombre bien défini de neutrons et de protons. Tous les corps liquides, solides ou gazeux sont composés d’atomes et la plupart de ces atomes ont des noyaux stables (neutrons et protons en équilibres). Certains sont instables (isotopes radioactifs) et possèdent un excédent d’énergie qui est évacué sous forme de rayonnements ionisants. Ce sont :

– Des substances radioactives naturelles

La radioactivité naturelle issue de l’uranium, du radium, du thorium, du radon, etc., représente plus de la moitié de l’exposition moyenne et se divise en rayonnement cosmique (8%), rayonnement terrestre (9%) et en rayonnement interne du corps humain(7%) [71, 72].

– Des substances radioactives artificielles

Les sources radioactives telles que le Californium, l’Américium, le Plutonium, etc., sont des substances radioactives artificielles très utilisées dans les secteurs d’activités comme les centrales nucléaires, la médecine nucléaire et les laboratoires de recherche nucléaire [73].

1.6 Interactions rayonnement-matière

Lors de leur passage à travers la matière, les particules constitutives de la radiation interagissent avec les électrons et les noyaux des atomes de la matière. A la suite de ces interactions une particule peut céder toute son énergie au milieu (absorption) ou elle peut changer de

direction (diffusion) avec perte d'énergie (diffusion inélastique) ou sans perte d'énergie (diffusion élastique). Ces interactions conduisent à un transfert d'énergie du rayonnement à la matière.

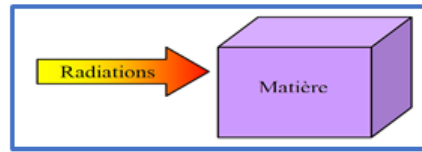


Figure 15 – *Principe d'interaction rayonnement-matière (détecteur) [73]*

Pour détecter une radiation, il faut tout d'abord que celle-ci interagisse dans un milieu détecteur (matière; sous forme gazeuse, liquide ou solide). Ce milieu, considéré comme pur est caractérisé par un nombre atomique Z , un nombre de masse A et une masse volumique ρ .

1.6.1 Classement des différents types de rayonnements

On distingue deux grandes classes de radiations, à savoir :

- Les rayonnements directement ionisants composés de particules chargées (électrons, protons, particules α , etc.).
- Les rayonnements non directement ionisants qui comprennent toutes les particules non chargées (photons, neutrons).

Lors du passage dans la matière, une particule chargée perd une partie plus ou moins importante de son énergie on dit qu'elle s'ionise (voir Figure 16). Dans la catégorie des particules chargées on distingue également les particules lourdes (particules α et les protons), dont la masse est très supérieure à celle de l'électron et les particules légères (particules β).

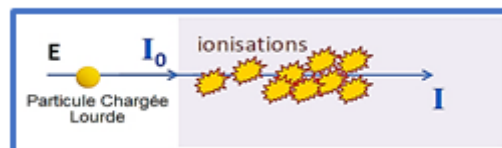


Figure 16 – *Exemple d'ionisation d'une particule chargée lourde [73]*

1.6.2 Phénomènes de transfert d'énergie dans les interactions photons-matière

La détection du rayonnement ionisant s'effectue uniquement par un appareillage spécifique (Dosimètre, Radiamètre, Débitmètre et spectromètre) et pour se faire, il doit y avoir une interaction par transfert d'énergie entre le rayon et le détecteur. Dans le cas des rayons X et γ , le transfert pour la détection se fait par :

– Effet photoélectrique

Dans ce processus, le photon γ incident ayant une énergie $h * \nu$ suffisante, transmet toute son énergie lors d'une collision unique avec un électron situé sur une couche profonde. L'énergie transmise est utilisée pour extraire l'électron d'énergie de liaison E_L et lui transmettre une énergie cinétique E_C telle que [74] :

$$E_C = h\nu - E_L \quad (20)$$

Les photons interagissent principalement avec les électrons des couches internes (K, L). Un électron des couches supérieures vient combler le trou produit par l'éjection de l'électron comme décrit par la Figure 17.

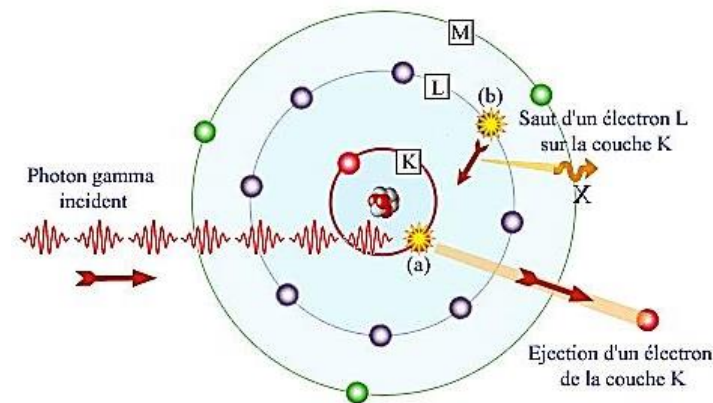


Figure 17 – Description du phénomène de l'effet photoélectrique [62]

– Effet Compton

Lors du choc entre un photon γ et l'électron, le photon est diffusé avec un changement d'énergie (perte d'énergie du photon ou effet parasite) : il s'agit d'un mécanisme de diffusion. Le photon incident d'une énergie $E_\gamma(h * \nu)$, transmet une partie de son énergie à un électron libre (principalement des couches externes de l'atome). Ce dernier est éjecté avec une énergie cinétique égale à l'énergie cédée par le photon. Au cours de ce processus, le photon incident est dévié de sa trajectoire. Le photon résultant possède

une énergie $E_{\gamma'}(h * \nu')$ inférieure à l'énergie du photon incident [75]. Il s'agit d'une interaction élastique représentée par la Figure 18. A partir des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement on obtient [75] :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))} \quad (21)$$

Avec $\alpha = E_{\gamma}/m_0C^2$, C la célérité de la lumière dans le vide, E_{γ} l'énergie du photon incident et m_0 la masse de l'électron, h la constante de Planck ($6,626 * 10^{-34} J.s$), θ l'angle de déviation du photon résultant et ν la fréquence de la lumière en Hz

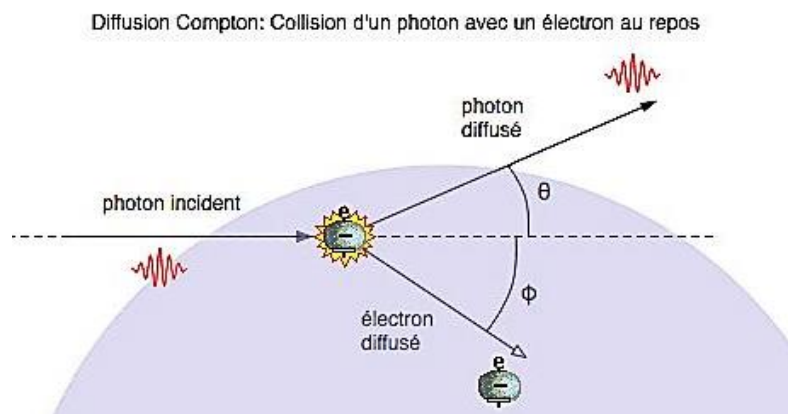


Figure 18 – Phénomène de diffusion Compton ou collision d'un photon avec un électron au repos [75]

– **Création de paires**

La création d'une paire électron-positon ou effet de matérialisation, n'a lieu que pour des photons possédant une énergie $E_{h\nu} > 2m_eC^2 = 1022 keV$ (m_e la masse de l'électron). Cette valeur correspond à l'énergie équivalente à la masse de deux électrons au repos. Lorsqu'un photon possédant une énergie entre dans le champ électrique entourant un noyau, il peut se transformer en une paire électron-positon. L'annihilation rapide du positon par un électron de la cible (électron environnant) génère deux photons d'énergie 511 keV se propageant dans la même direction mais en sens opposé [74]. Il y a perte d'énergie (pic d'échappement) et le photon se matérialise en une paire électron-positon (voir Figure 19). L'énergie électromagnétique se transforme en énergie de masse et en énergie cinétique.

$$E_{e^-} + E_{e^+} = E_{\gamma} - 2m_0C^2 \quad (22)$$

Pour les particules chargées, ce sont des phénomènes d'excitations et d'ionisations

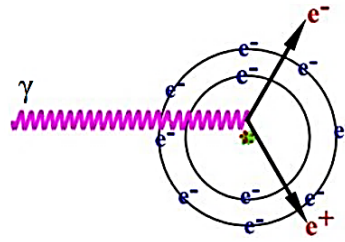


Figure 19 – Phénomène de création de paires électron-positron [75]

indirectes qui permettent leur détection. Ces particules peuvent entrer en collision inélastique avec les électrons du nuage électronique des atomes de la cible, provoquant ainsi l'ionisation et/ou l'excitation de ces atomes. Elles peuvent entrer en collision élastique avec les noyaux des atomes de la cible. Ce type d'interaction n'est toutefois observé que pour des électrons incidents très énergétiques.

1.6.3 Classification des détecteurs de rayonnements ionisants

Les détecteurs décrits dans le Tableau 5 sont couramment utilisés pour la détection des rayonnements ionisants. Ils sont généralement regroupés en deux grandes familles à savoir les détecteurs physiques et les détecteurs de rayonnements ionisants [76] qui font partie de cette thèse.

Tableau 5 – Récapitulatifs des détecteurs de rayonnements ionisants et leurs applications [76]

Type de détecteur	Application
Plaque photographique	Radiographie / Dosimétrie
Calorimètre	Phénomènes thermiques
Compteur proportionnel Compteur Geiger-Müller	Ionisation d'un gaz
Détecteur à semi-conducteur	Ionisation d'un solide
Phénomènes lumineux	Chambre à scintillation

1.6.3.1 Détecteurs à gaz (compteur proportionnel et Geiger-Müller)

a) Description des détecteurs à gaz

La détection d'un rayonnement ionisant revient à prélever tout ou une partie de l'énergie du rayonnement pour la transformer sous une forme plus maniable. Les détecteurs à gaz sont parmi les plus anciens et les plus utilisés. La faible densité de gaz confère à ces détecteurs une mauvaise efficacité aux photons X et γ ; ils sont en général utilisés pour la détection des particules chargées ou la mesure des flux importants de rayonne-

ments gamma (dosimétrie, radioprotection). Les détecteurs de rayonnement ionisant possèdent une partie composée de matériau sensible qui subit des changements lorsqu'ils sont exposés aux rayonnements et d'une deuxième partie conditionnement qui convertit les changements du matériau sensible en signaux mesurables. L'ensemble tel que présenté par la Figure 20 est constitué [77] :

- D'une enceinte fermée jouant le rôle de cathode délimitant une cavité remplie de gaz ;
- D'une anode centrale (fil) traversant la cavité ;
- D'un filament (fil de fer) passant au centre du boîtier et isolé du boîtier ;
- D'un générateur et régulateur de haute tension qui crée une haute tension entre le boîtier et le filament (le filament est chargé positivement et le boîtier négativement) ;
- D'un circuit électronique d'amplification, de filtrage et de comptage.

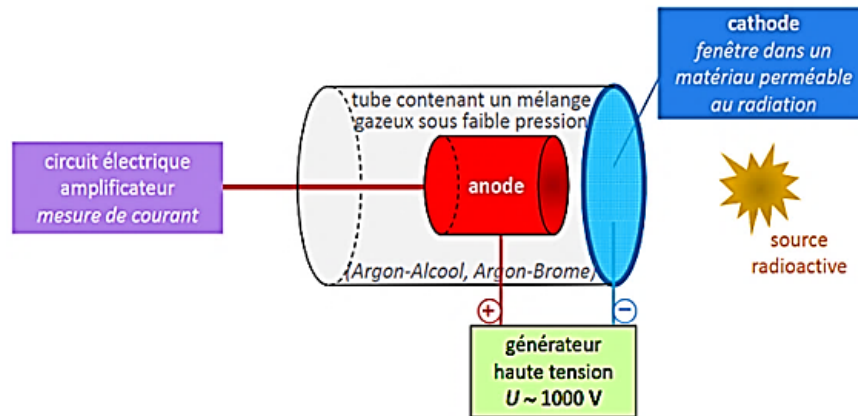


Figure 20 – Schéma de Principe d'un détecteur à GAZ [77]

On distingue des compteurs à flux gazeux dont le boîtier est connecté à une bouteille de gaz renouvelable en permanence et les compteurs scellés dont le détecteur est clos, il faut le changer lorsque la qualité du gaz est dégradée. Le gaz utilisé dans ces détecteurs est souvent un mélange d'argon (90 %) et de méthane (10 %) pour les compteurs à flux gazeux et un gaz amortisseur ou halogène (dichlore ou dibrome) pour les compteurs scellés. De manière générale, le choix des gaz de remplissage s'oriente surtout vers ceux qui n'ont pas d'affinité avec les électrons. On utilise alors des gaz rares (He, Ar, Xe, etc.) si possible de numéro atomique élevé pour une bonne efficacité aux photons γ [78].

b) Principe de fonctionnement des détecteurs à gaz

En général la géométrie d'un détecteur à gaz est cylindrique avec l'anode en position centrale. On applique une très haute tension entre l'anode et la cathode. Lorsqu'un

rayonnement ionisant traverse l'enceinte (voir Figure 21), il y a formation d'un grand nombre d'ions positifs et d'électrons par interaction avec les molécules de gaz. A la suite des ionisations créées par la particule sur son passage, les charges positives et les charges négatives peuvent être séparées sous l'action d'un champ électrique, donnant ainsi naissance à un courant électrique. C'est sur ce principe que fonctionnent les détecteurs gazeux (chambre d'ionisation, compteur Geiger-Müller, compteur proportionnel, etc.). L'énergie perdue par la particule pendant l'ionisation sur une distance du détecteur dx est ΔE .

$$\Delta E = \int_x^{x+dx} -\frac{dE}{dx} dx \quad (23)$$

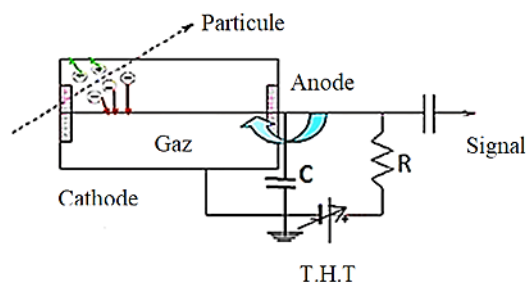


Figure 21 – Schéma descriptif du fonctionnement d'un détecteur à gaz [79]

En l'absence de source de rayonnements ionisants, quelle que soit la différence de potentiel appliquée, le courant électrique traversant l'enceinte reste nul. Par contre, si la particule pénètre dans l'enceinte, elle libère sur son passage un grand nombre de paires d'ions (atomes de gaz ionisés positivement, électrons libres) qui migrent respectivement vers l'anode et la cathode. Les électrons produits par ionisation sont collectés par l'anode et les ions formés sont recueillis sur la cathode. On observe ainsi une circulation de charges électriques à travers le circuit. La collection des charges produit une variation de tension aux bornes de la résistance R (voir Figure 21) qui constitue une impulsion dont l'amplitude pour une particule donnée, dépend de la différence de potentiel appliquée entre les électrodes. En raison de la grande différence de masse entre électrons et ions, la vitesse de déplacement des électrons est 1000 fois plus grande que celle des ions. La charge collectée en fonction du temps croît très rapidement pour la collection des électrons et lentement pour la collection des ions [79].

c) Différents régimes de fonctionnement des détecteurs à gaz

Le fonctionnement d'un détecteur à gaz diffère selon la tension appliquée à ses bornes. Lorsqu'on fait varier la différence de potentiel entre les deux électrodes d'un détecteur à gaz, la charge collectée varie comme l'indique la Figure 22, sur laquelle on peut

distinguer six régions. Sous l'effet de la très haute tension, les électrons sont attirés vers l'anode et les particules positives (plus lourdes) vers la cathode. Le signal obtenu est dû uniquement aux électrons et la quantité d'électricité recueillie sur les électrodes constitue une impulsion électrique mesurable [80].

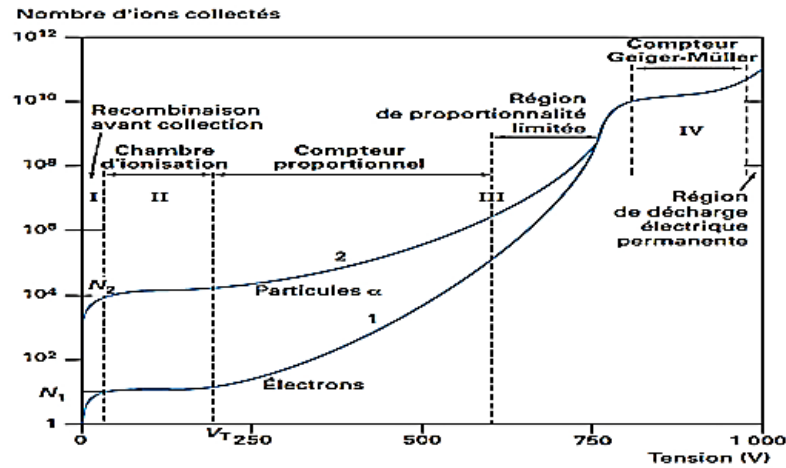


Figure 22 – Courbes gain/tension des détecteurs gazeux cylindriques [80]

Les régimes de fonctionnement présentés par la Figure 22 sont :

– **Région 1 (régime de recombinaison partielle)**

Pour une différence de potentiel inférieure à V_1 (< 100 volts), les ions et électrons sont peu accélérés et se recombinent sous l'effet de l'agitation thermique ; seule une partie des charges créées est collectée. Cette fraction augmente avec la tension et la hauteur de l'impulsion.

– **Région 2 (régime d'ionisation primaire)**

Entre V_1 et V_2 (100 – 200 volts), la valeur de la tension est suffisante pour que les recombinaisons n'aient plus lieu, toute la charge créée par ionisation est collectée. Cette charge est indépendante de la tension appliquée et directement proportionnelle à l'énergie cédée par le rayonnement dans le gaz. Cette plage de tension est appelée régime d'ionisation primaire sous lequel fonctionnent les chambres d'ionisation.

– **Région 3 (régime proportionnel)**

Entre V_2 et V_3 (200 – 600 volts), les ions initialement créés par le passage de la particule sont suffisamment accélérés par le champ pour provoquer des ionisations secondaires s'ajoutant à l'ionisation primaire. Soit k le coefficient de multiplication du nombre d'électrons secondaires créés par les électrons primaires et n le nombre de paire électron-trou. Au total, une avalanche de $k.n$ ($N = k.n$) électrons est créée et k varie avec la tension appliquée entre les électrodes. Les appareils fonctionnant

dans cette région sont les compteurs proportionnels. Les compteurs proportionnels fonctionnent toujours en mode impulsion et sont utilisés pour la détection et la spectrométrie des rayons X de faible énergie ($< 100 \text{ keV}$ avec un détecteur à fenêtre d'entrée mince) et la détection de neutrons [81].

– **Région 4 (régime de semi-proportionnalité)**

Au-dessus de V_3 (600 volts), l'énergie communiquée aux électrons au voisinage de l'anode est suffisante pour que certains des ions produits se retrouvent dans un état excité. Ces ions excités retournent à leur état fondamental en émettant des photons ultraviolets qui peuvent arracher par effet photoélectrique des électrons sur la cathode. La quantité de charges collectée n'est plus rigoureusement proportionnelle à l'énergie primaire cédée dans le gaz. C'est la région de proportionnalité limitée.

– **Région 5 (régime de Geiger-Müller)**

A partir de V_4 (800 volts), chaque ionisation primaire entraîne des avalanches d'ions multipliées en chaîne. Le détecteur délivre le nombre maximum d'électrons qu'il est capable d'émettre. L'amplitude de l'impulsion est grande mais reste la même pour une différence de potentiel donnée, quelle que soit la particule. L'appareil fonctionne en régime de Geiger-Müller. Les appareils fonctionnant dans cette région sont des compteurs Geiger-Müller où chaque impulsion est indépendante de l'ionisation primaire. On ne peut pas remonter à l'énergie cédée mais seulement effectuer des comptages [82].

Développé en 1928 par Geiger et Müller et très utilisé en raison de sa portabilité, le compteur Geiger-Müller (voir Figure 23) est l'un des instruments de détection des radiations le plus répandu au monde. utilisé en dosimétrie et en radioprotection, il sert à la détection des particules α (rarement), β et γ . Cependant, il ne distingue pas la nature des radiations et ne mesure pas leur énergie. Ses performances sont limitées pour la mesure de taux de radiation élevés [83].



Figure 23 – Photos de quelques tubes Geiger-Müller

– **Région 6 : Régime de décharge électrique permanente**

Au-dessus de V_5 (900 volts), le détecteur devient instable (décharge permanente). En pratique, les détecteurs sont conçus pour fonctionner dans une unique région déterminée et ne peuvent être utilisés que dans cette région [84].

1.6.3.2 Paramètres de détection des rayonnements ionisants

Tout comme les capteurs de gaz, les détecteurs de rayonnements ont des paramètres caractéristiques indispensables à savoir :

– **Le bruit de fond**

En l'absence de source radioactive, on détecte des particules ayant pour origine les rayons cosmiques et telluriques, des activités parasites ou le bruit électronique. Le bruit de fond ou mouvement propre du détecteur est son taux de détection en l'absence de source.

– **Le temps mort τ**

Lorsqu'une particule est détectée, il faut un temps minimal avant qu'une autre particule puisse être détectée. C'est une période réfractaire appelée temps mort τ . Si une particule entre dans le détecteur pendant ce temps, elle n'est pas prise en compte. Les pertes de comptage augmentent avec l'activité de la source. On distingue ainsi deux types de détecteurs à savoir :

- a. Les compteurs non paralysables où le temps mort n'est pas allongé si une particule arrive pendant ce temps :

$$N' = \frac{N}{1 + N\tau} \quad (24)$$

- b. Les compteurs paralysables où le temps mort est allongé si une autre particule arrive pendant ce temps :

$$N' = Ne^{-N\tau} \quad (25)$$

Avec N' le nombre de particules détectées et N le nombre de particules réelles ($N > N'$)

– **L'efficacité du détecteur ε**

L'efficacité d'un détecteur est la probabilité pour qu'une particule entrant dans ce détecteur soit réellement détectée. Elle s'exprime par :

$$\varepsilon = \frac{\text{Evènements détectés}}{\text{Particules ayant pénétré}} \quad (26)$$

Elle est comprise entre 0 et 1 et dépend du type de détecteur, de particule et de l'énergie

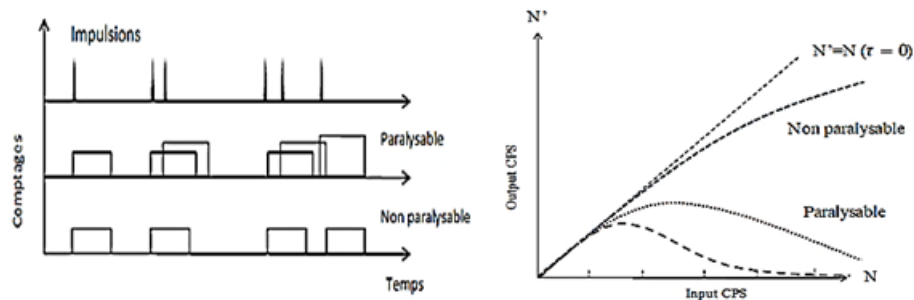


Figure 24 – Description du temps mort d'un détecteur [84]

du rayonnement.

– **Le rayonnement diffusé**

Les rayonnements diffusés peuvent fausser par surestimation les résultats donnés par le système de détection. On utilise pour contrer ce phénomène un blindage en plomb latéral et postérieur. Cependant, certains rayonnements diffusés peuvent entrer par la fenêtre du détecteur.

– **Le rendement du détecteur (r)**

Toute mesure avec un détecteur n'est pas une mesure absolue, il faut donc calibrer le détecteur avec une source d'activité connue :

$$r = \frac{\text{Nombre de rayonnements détectés par unités de temps}}{\text{Nombre de désignations par unités de temps (= activité)}} \quad (27)$$

Le rendement dépend de la distance entre la source et le détecteur, de la surface de la source et du support sur lequel elle se trouve. D'un point de vue pratique, on détermine le rendement par une mesure au contact d'une source ponctuelle.

– **Linéarité**

Un détecteur est linéaire lorsque le comptage est proportionnel au flux de rayonnement incident.

1.7 Microcontrôleurs

Un microcontrôleur est un ensemble constitué d'un processeur informatique relié à des entrées/sorties numériques ou analogiques. Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties (voir Figure 25). Il se programme à l'aide d'un ordinateur et peut fonctionner de manière autonome. Il existe de

nombreux types de microcontrôleurs avec plus ou moins d'entrées/sorties et d'interfaces qui sont en général programmés en $C/C++$ et nécessitent des connaissances approfondies en électronique. Le microprocesseur (CPU), muni d'une mémoire, est considéré comme le « cerveau » du microcontrôleur, capable d'effectuer des opérations diverses (opérations arithmétiques, logiques) et de les enchaîner dans un processus cohérent [85].

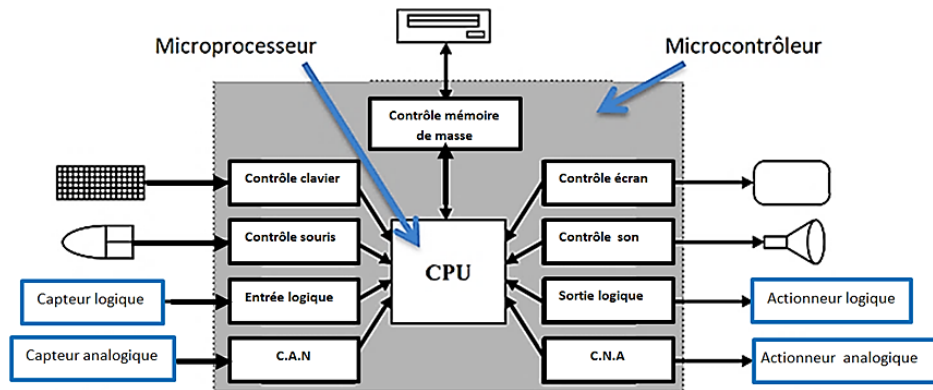


Figure 25 – Passage du microprocesseur au microcontrôleur [85]

Le microcontrôleur appelé à tort microprocesseur, est l'équivalent d'un petit ordinateur, contenu dans un boîtier de circuits intégrés à plus ou moins grand nombre de pattes. Il existe plusieurs familles de microcontrôleurs, se différenciant par la vitesse de leur processeur et le nombre de périphériques. Les différentes familles de microcontrôleurs telles que Atmel (AT91, AVR), ESP-Wroom-32 (SILICON LABS cp2102), Hitachi H8, Intel (8051, 8085), des PIC de Microchip, ST6 de STMicroelectronics, ADuC d'Analog Devices et PICBASIC de Comfile Technology... , ont pour point commun l'assemblage des éléments essentiels d'une structure à base de microprocesseur sur une même puce. Il est bien évident que, dans le cadre de ce chapitre, il ne va pas être possible de donner toutes les informations matérielles et logicielles relatives aux microcontrôleurs. Nous allons nous intéresser dans la suite à la famille Atmel AVR indispensables dans le développement des projets de mesure. Ainsi, le choix d'un microcontrôleur pour un dispositif de mesure est dicté par des critères tels que :

- L'adaptation de l'architecture interne du microcontrôleur, aux besoins de l'application (présence de convertisseurs A/N ou d'un timer disposant d'un mode particulier, ...) ;
- Le fait de posséder déjà ou non un système de développement associé au microcontrôleur (carte électronique Arduino, Raspberry Pi...) ;
- Le développement rapide et efficace des applications complexes (sur FPGA).

Pour cela, les fabricants ont développé non seulement des microcontrôleurs isolés mais aussi des familles de circuits, plus ou moins compatibles avec les microcontrôleurs et la

programmation. La plate-forme Arduino par exemple, à travers sa simplicité d'utilisation et son coût abordable a apporté une avancée majeure dans l'accessibilité de cette technologie au public. Ces cartes électroniques (Arduino, ESP32, Raspberry Pi . . .) donnent la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. La carte FPGA par contre, est un circuit intégré et une matrice de blocs logiques configurables (Configurable Logic Blocks : CLB, en anglais) [86–88]. Les FPGA peuvent servir à plusieurs applications et leur mise en œuvre est radicalement différente de la programmation des microcontrôleurs (MCU). En effet, ces derniers fonctionnent de façon séquentielle (tâche 1 puis tâche 2 de manière indépendante) selon leur constitution (lecture du registre d'instruction, traitement de l'instruction etc.). Les FPGA quant à eux, jouissent d'un parallélisme total si bien que deux tâches s'effectuent simultanément et ce parallélisme leur confère une grande rapidité en comparaison aux MCU.

Les microcontrôleurs améliorent l'intégration et le coût lié à la conception et la réalisation d'un système à base de microprocesseur en rassemblant plusieurs éléments essentiels dans un seul circuit intégré. On parle alors de "système sur une puce" (en anglais : "System On chip"). On trouve ainsi, à l'intérieur d'un microcontrôleur :

- Un processeur (C.P.U.) ;
- Des bus ;
- De la mémoire de donnée (RAM et EEPROM) ;
- De la mémoire programme (ROM, OTPROM, EPROM, UVPROM ou EEPROM) ;
- Des interfaces parallèles pour la connexion des entrées / sorties ;
- Des interfaces séries (synchrone ou asynchrone) pour le dialogue avec d'autres unités ;
- Des timers pour mesurer des signaux avec une grande précision temporelle ;
- Un chien de garde (Watchdog) qui assure la surveillance du programme ;
- Une sortie PWM pour la modulation d'impulsion ;
- Un convertisseur analogique-numérique et numérique-analogique (CAN/CNA) pour le traitement des signaux analogiques.

Le microcontrôleur apparaît comme un système extrêmement complet et performant, capable d'accomplir une ou plusieurs tâches très spécifiques pour lesquelles il a été programmé. La Figure 26 présente le contenu très simplifié d'un microcontrôleur. On peut constater que tous les éléments contenus dans le boîtier sont reliés entre eux par des bus qui véhiculent les adresses, les données et les signaux de contrôle échangés entre ces différents sous-ensembles [89].

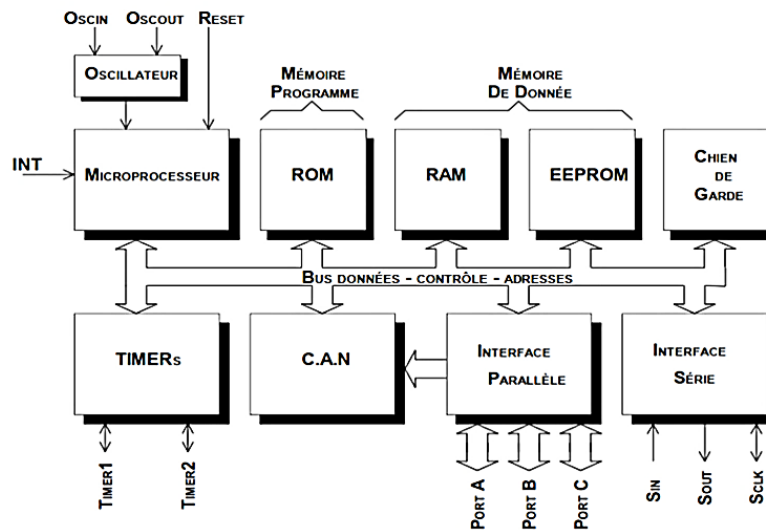


Figure 26 – Schéma simplifié du contenu type d'un microcontrôleur [89]

a) Processeur

Le processeur ou unité centrale de traitement (CPU) d'un microcontrôleur exécute séquentiellement des instructions. Il est donc nécessaire d'"alimenter" cette CPU avec des instructions à exécuter et des données sur lesquelles exécuter ces instructions. L'exécution des instructions est cadencée par une horloge (CPU clock), souvent fournie par un oscillateur à quartz. Le microcontrôleur contient plusieurs bus qui transportent respectivement les instructions ou les données (Architecture Harvard) ou les deux indifféremment (architecture Von Neumann). Ainsi, les deux grandes classes d'architectures de processeurs (voir Figure 27) sont :

- L'architecture Von Neumann ; les données et les programmes sont stockés dans la même zone mémoire, c'est une architecture ancienne ;
- L'architecture Harvard où les données et les programmes sont stockés dans 2 zones mémoires différentes.



Figure 27 – Architecture Von Neumann (à gauche), architecture Harvard (à droite) [90]

Les microcontrôleurs récents utilisent tous une architecture de type Harvard [90]. Il existe en outre trois types de bus, qui communiquent avec la CPU :

- Le bus d'adresse qui transporte de manière unidirectionnelle l'adresse mémoire dont

la CPU lit ou écrit le contenu ;

- Le bus de données qui véhicule de manière bidirectionnelle les instructions en provenance ou à destination du processeur ;
- Le bus de contrôle qui rassemble de manière unidirectionnelle les signaux logiques de contrôle de l'échange. Il existe sur le marché plusieurs types de processeurs parmi

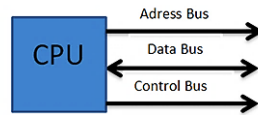


Figure 28 – *Processeur/Microprocesseur [90]*

lesquels nous pouvons citer :

- **Les CISC** : Complex Instruction Set Computer (Complex Instruction Set CPU)
Ils ont peu de registres internes et un jeu d'instructions très complet avec la mémoire. Exemple : Intel 386, Motorola 68k ;
- **Les RISC** : Reduced Instruction Set Computer (Reduced Instruction Set CPU)
Ils ont beaucoup de registres internes, un Jeu d'instructions très réduit avec la mémoire et les seules opérations sont les échanges de données en lecture ou écriture. Exemple ARM, Intel et Apple ;
- **VLIW** : very long instruction word : Ce sont des processeurs à mot d'instruction très long couramment supérieur à 128 bits. Ces processeurs sont très utilisés comme processeurs DSP avec de très bonnes performances et une consommation réduite ;
- **Les DSP** : Digital Signal Processor.
Les DSP disposent de plusieurs unités de calculs spécialisés. Ils possèdent beaucoup de registres internes, plusieurs bus et ALU internes avec un jeu d'instructions orienté au traitement du signal.

b) Structures Actuelles d'un processeur

Les processeurs actuels intègrent des éléments complexes à savoir :

- Plusieurs UAL, pour traiter plusieurs instructions en même temps : L'architecture super-scalaire en particulier permet de disposer des UAL en parallèle. Chaque UAL pouvant exécuter une instruction indépendamment de l'autre tandis que l'architecture super-pipeline permet de découper temporellement les traitements à effectuer ;
- Une unité de prédiction de saut, qui permet au processeur d'anticiper un saut dans le déroulement d'un programme. Ceci permet d'éviter d'attendre la valeur définitive d'adresse du saut et de mieux remplir le pipeline ;

- Une unité de calcul en virgule flottante (en anglais Floating Point Unit :FPU), qui permet d'accélérer les calculs sur des nombres réels codés en virgule flottante ;
- La mémoire cache, qui permet d'accélérer les traitements, en diminuant les accès à la RAM. Ces mémoires tampons sont en effet beaucoup plus rapides que la RAM et ralentissent moins le CPU.

c) **Jeu d'instructions**

On peut classer les instructions qu'un microcontrôleur est capable d'effectuer en quelques groupes :

– **Instructions de transfert**

Le microcontrôleur passe une grande partie de son temps à transférer des octets d'un emplacement vers un autre : d'un périphérique vers un registre interne, d'un registre interne vers la mémoire RAM ou vice-versa, d'un registre interne vers un périphérique ; ce qui ne peut en général pas être fait, c'est un transfert direct d'une case mémoire à une autre ou vers un périphérique.

– **Instructions arithmétiques**

La majorité des microcontrôleurs ne comprennent que les instructions arithmétiques de base ! Tout au plus ils sont capables d'effectuer des additions, des soustractions, des multiplications et des divisions sur des nombres binaires de 8 bits ou 16 bits. Toutes les opérations mathématiques complexes faisant intervenir des puissances, des racines carrées, des fonctions trigonométriques, logarithmiques et exponentielles doivent être ramenées à une succession d'opérations simples portant seulement sur des octets.

– **Instructions d'entrées/sorties**

Ces instructions sont utilisées pour :

- Lire l'état d'un port d'entrée (permettant l'interfaçage d'interrupteurs, de commutateurs, d'optocoupleurs, de convertisseurs analogiques/numériques, de claviers...);
- Ecrire une information dans le registre d'un port de sortie, qui maintient l'information à la disposition des circuits extérieurs : LEDs, moteurs, relais, convertisseurs numériques /analogiques ;
- Ecrire ou lire une information dans les registres d'un port série.

– **Instructions de saut et de branchement**

Il s'agit d'instructions qui altèrent le déroulement normal du programme. On dis-

tingue :

- Les sauts qui provoquent un branchement conditionnel ou inconditionnel du programme vers une adresse mémoire qui n'est pas contiguë à l'endroit où l'on se trouve. L'exécution du programme continuera à l'adresse du saut ;
- Les branchements qui provoquent un saut vers un sous-programme. Une fois l'exécution du sous-programme faite le processeur pointe sur l'instruction qui est juste après l'instruction qui a provoqué le branchement vers le sous-programme.

– **Instructions diverses**

On trouve dans ce groupe :

- Des instructions de gestion de la pile. La pile est une zone de mémoire RAM gérée automatiquement par le microcontrôleur pour la sauvegarde des registres ou la mémorisation des adresses de retour en cas d'un branchement vers un sous-programme ;
- Des instructions de contrôle du processeur : par exemple le passage en mode basse consommation et le contrôle des périphériques embarqués (sur la même puce que le processeur) ;
- Des instructions permettant de positionner des indicateurs internes du processeur.

d) **Modes d'adressage pour les données**

De nombreuses instructions font référence à des données se trouvant à différents endroits du microcontrôleur : registres internes du processeur, RAM, EEPROM, ports d'E/S, périphériques intégrés. On appelle modes d'adressage les différentes façons de spécifier les endroits où se trouvent les données dont on a besoin.

– **Adressage implicite**

Certaines opérations ne peuvent être réalisées que sur une donnée se trouvant à un endroit bien précis du processeur (par exemple, l'accumulateur ou la pile). Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de spécifier l'adresse du registre en question et on parle d'adressage implicite.

– **Adressage registre ou inhérent**

Le processeur dispose d'un certain nombre de registres de travail. De nombreuses instructions y font référence ; vu leur nombre peu élevé (8, par exemple), il suffit d'un petit nombre de bits pour spécifier le registre désiré (3 bits dans notre cas). On parle dans ce cas d'adressage registre ou inhérent.

– **Adressage direct**

Dans ce mode d'adressage, on donne l'adresse (généralement en 16 bits) de la donnée en mémoire (RAM, ou port d'E/S s'il est intégré à la mémoire). Ce mode d'adressage permet d'indiquer n'importe quel endroit dans la mémoire, l'inconvénient étant que l'on doit spécifier l'adresse concernée dans son intégralité (2 à 4 octets). Ce qui conduit à des instructions assez longues.

– **Adressage indirect à registre**

Dans ce mode d'adressage, l'adresse de la donnée se trouve dans un registre spécial du processeur (du même nombre de bits que son bus d'adresses), le pointeur de données. L'avantage par rapport à l'adressage direct est que cette adresse peut être manipulée commodément, par exemple pour accéder à une suite de données consécutives en mémoire. Ceci est particulièrement utile lorsqu'on manipule des données stockées dans un tableau.

– **Adressage immédiat**

C'est un peu un abus de langage que de parler d'adressage dans ce cas-ci. En effet, la donnée suit tout simplement l'instruction.

– **Adressage indexé**

Ce mode est assez semblable à l'adressage indirect à registre. Il fait appel à un registre spécial appelé registre d'index. Certains microcontrôleurs ne supportent pas ce mode, d'autres au contraire ont 1 ou 2 registres d'index. Deux registres d'index sont particulièrement bienvenus lorsqu'il s'agit de déplacer un bloc de données dans la mémoire RAM d'un emplacement vers un autre. Le premier servira à pointer la zone mémoire source et le second pour pointer la zone mémoire destination.

e) **Mémoires**

Un microcontrôleur possède plusieurs mémoires qui indépendamment de leur structure interne et des détails de leur technologie concernée sont caractérisées par leur mode de programmation et leur faculté à retenir l'information quand l'alimentation est interrompue. Les mémoires sont des circuits intégrés de forte densité d'intégration, capables de stocker de l'information sous forme binaire. Elles sont réalisées en technologie bipolaire ou CMOS et on distingue les mémoires à accès parallèle (très rapide avec une grande capacité et encombrant car commande beaucoup de signaux) et les mémoires à accès sériel (moins encombrant mais très lente). Dans les mémoiresérielles, il existe plusieurs protocoles de communication. Les plus répandus étant le I^2C -Bus, SPI-Bus, Microwire-Bus [91].

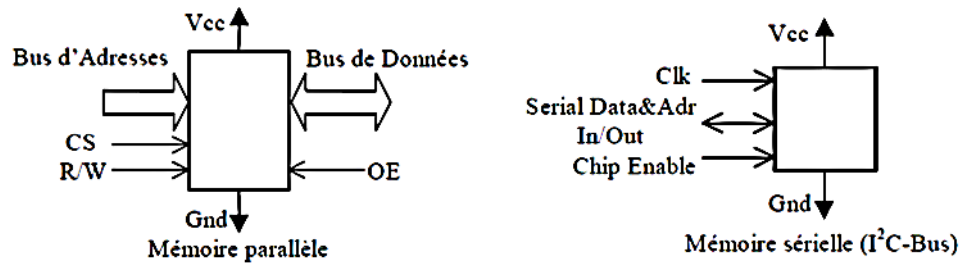


Figure 29 – Types de mémoires [92]

Les mémoires des circuits programmables se différencient également par leur mode de fonctionnement :

- **Les mémoires de type PROM** sont programmables une seule fois au moyen d'un appareil spécial : le programmeur. Elles conservent les informations quand l'alimentation est interrompue et ne peuvent pas les modifier ;
- **La mémoire de type ROM** est une mémoire dont le contenu a été défini et réalisé une fois au moment de la fabrication. On utilise cette mémoire quand l'information qu'on y enregistre est une information figée, qui n'est pas susceptible de subir un changement (exemple les valeurs de sinus des angles compris entre 0 et 90°C) ;
- **Les mémoires de type EPROM** sont programmables par l'utilisateur au moyen d'un programmeur, effaçables par une exposition aux rayons ultraviolets et reprogrammables après avoir été effacées. Elles conservent aussi les informations quand l'alimentation est interrompue ;
- **Les mémoires de type EEPROM ou FLASH**, sont effaçables et reprogrammables électriquement. Non alimentées, elles conservent les informations mémorisées. Les technologies FLASH sont de loin les plus séduisantes pour les circuits programmables moins complexes ;
- **Les mémoires RAM statiques, ou SRAM**, sont constituées de cellules accessibles, en mode normal, en lecture et en écriture. Elles sont utilisées dans certains circuits programmables complexes pour conserver la configuration du circuit. Ces mémoires perdent leur information quand l'alimentation est supprimée.

1.8 Polluants atmosphériques et techniques de surveillance environnementale

La notion de la qualité de l'air ou de surveillance environnementale a démarré dans les années 1960 avec les particules matières puis en 1970 pour l'établissement des normes sur les gaz d'échappement des véhicules afin de protéger l'humanité et son environnement. On note en parallèle le phénomène de la radioactivité naturelle qui constitue avec les gaz atmosphériques, un problème de pollution complexe, mondial et difficile à évaluer. Cette complexité est due au fait que la pollution ne tient pas compte des frontières entre les pays, elle peut être diluée ou transportée sur de longues distances par le vent et les phénomènes météorologiques [93].

1.8.1 Polluants primaires et secondaires

Les substances polluantes sont réparties en deux grandes catégories à savoir les polluants primaires et les polluants secondaires. Les polluants primaires proviennent directement d'une source polluante identifiable (gaz d'échappement des véhicules). Alors que les polluants secondaires sont formés par plusieurs polluants primaires (précurseurs). Ces polluants secondaires se forment dans l'air à la suite de réactions chimiques entre différents composés des sources primaires et l'oxygène, l'eau ou les rayons solaires (O_3 , $COVs$, H_2SO_4 , O_2 , ...). Les sources de pollution de l'air existent aussi bien en atmosphère extérieure que dans les espaces intérieurs des bâtiments.

a) Sources extérieures

En atmosphère extérieure, les polluants les plus néfastes sont les suies, les particules fines ou particules matières (PM), l'ozone troposphérique ainsi que leurs constituants précurseurs qui favorisent leur formation [94]. Les différents polluants issus de ces sources et classés, par l'OMS, comme polluants dangereux pour l'écosystème sont le PM, O_3 , NO_x , CO_x , SO_2 , et les COVs.

b) Sources intérieures

Dans les espaces confinés ou bâtiments, la pollution est très répandue et n'est pas moins dangereuse. Les concentrations de polluants varient dans l'espace et dans le temps à des proportions dynamiques car les sources sont très nombreuses, certaines d'entre elles sont intermittentes ou ont des zones d'accumulation et des réservoirs [91]. De plus, nous passons plus de temps à l'intérieur des bâtiments et consommons environ 15 m^3 d'air

quotidiennement. Notre appareil respiratoire apparait comme une voie d'exposition privilégiée aux aéro-contaminants. Les conséquences possibles sur la santé peuvent être des allergies, des inflammations pulmonaires, l'asthme ou encore des maladies cardiovasculaires. Les polluants physiques très fréquents dans les espaces clos et en atmosphère extérieure sont généralement l'humidité, la température, l'infiltration du radon, l'amiante, les sources de champs électromagnétiques, les sources de rayonnement radioactif...

1.8.2 Techniques de surveillance environnementale

a) Surveillance des polluants atmosphériques

La dangerosité des polluants atmosphériques a conduit l'Union Européenne et l'OMS à réfléchir sur des objectifs à atteindre pour obtenir un air plus sain. Elles ont édicté des normes et des directives pour limiter, contrôler et surveiller les émissions polluantes des sources anthropiques et naturelles [94]. C'est dans ce contexte que plusieurs scientifiques ont travaillé sur la conception et le développement de dispositifs de mesure des polluants atmosphériques, capables de détecter des gaz toxiques et des particules matières [27, 93, 95]. Ces dispositifs ont permis la collecte des données afin de faire des analyses et des prévisions qu'on peut projeter au niveau national et international. L'un des appareils de référence dans la mesure des particules matières est le Gent Sampler fourni par l'AIEA dans le cadre du projet RAF 4/019 sur la surveillance de la qualité de l'air en zones urbaines africaines. C'est un échantillonneur d'air à filtres permettant d'évaluer la pollution atmosphérique des aérosols (Particules Matières : fines $PM_{2,5}$ de taille $2,5 \mu m$ et grosses PM_{10} de taille $10 \mu m$) [96]. Il est composé d'une unité de filtres empilée placée à l'air libre et d'une pompe à air programmable (débit moyen de $17 l/min$), toutes deux reliées par un tuyau flexible de $10 m$ de long. Les deux filtres $PM_{2,5}$ et PM_{10} sont enduits de graisse pour l'adhérence des particules et ont un diamètre de $47 mm$ et des pores de $0,4 \mu m$ ($PM_{2,5}$) et $8 \mu m$ (PM_{10}). Une balance de haute résolution Sartorius QUINTIX65-1S ($\pm 0,00001g$) sert à peser les filtres avant et après leur utilisation. Elle a également été fournie par l'AIEA dans le cadre du projet RAF 7016.

Ayant la masse des particules accumulées durant l'échantillonnage et le débit d'air moyen à partir duquel le volume moyen est obtenu, nous pouvons calculer la concentration massique (C) des particules $PM_{2,5}$ et PM_{10} en $\mu g/m^3$:

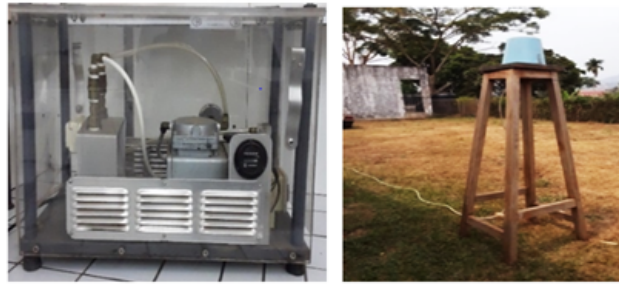


Figure 30 – Pompe et système d'échantillonnage tel que déployé sur le terrain

$$C(PM_{x=2,5-10}) = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{m_f - m_i}{V_f - V_i} \quad (28)$$

Où $m_f - m_i$ et $V_f - V_i$ sont respectivement la masse totale de particules collectées et le volume d'air total prélevé; $m_f(\mu g)$ et $v_f(m^3)$ sont respectivement la masse finale du filtre et le volume d'air final après échantillonnage; $m_i(\mu g)$ et $v_i(m^3)$ sont respectivement la masse du filtre et le volume d'air initial avant l'échantillonnage [96].

b) Surveillance de la radioactivité environnementale

La protection des populations et de l'environnement contre les rayonnements ionisants est une priorité pour l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Elle s'articule sur une surveillance de la radioactivité environnementale à travers la détection des concentrations des radionucléides dans l'environnement et l'évaluation de la dose et du risque associé. En réalité, cette surveillance est une démarche ancienne, qui s'exerce sur l'ensemble des compartiments de l'environnement (air, eau, sols, faune et flore). La surveillance s'est développée et s'est renforcée en 1986 suite à l'accident de Tchernobyl. Par ailleurs, les chercheurs comme Prasanna et al. [29], Nur Aira et al. [30] et Nguyen et al. [31] ont développé des dispositifs électroniques de surveillance de la radioactivité naturelle dans le but de contribuer à la protection de la population contre les effets nocifs des rayonnements ionisants. Le GAMMA-RAD5 est un appareil de référence pour la détection des rayonnements gamma. Il a été utilisé dans le cadre du projet mené de 2014 à 2016 par l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) et l'Université de Hirosaki (Japon), portant sur la surveillance du radon et du thoron dans les habitations des régions uranifères du Cameroun [97–99]. Le GAMMA-RAD5 est un spectromètre à rayons γ complet et intégré. Il est portable puissant et combine une sonde à scintillation NaI complète avec un amplificateur de mise en forme du signal et un MCA (analyseur multicanal), qui fournissent une détection de haute qualité et

des informations spectroscopiques. Le GAMMA-RAD5 est un système idéal pour une utilisation sur le terrain et possède une protection contre les chocs mécaniques et les vibrations. Il possède une interface Ethernet pour un fonctionnement à distances (100 m) avec un logiciel Internet. L'ensemble est utilisé sur des piédestaux à 1 m du sol et communique avec un ordinateur portable via un port USB. Cet appareil est certes portable mais lourd (3,35kg) et il faut absolument l'associer à un ordinateur portable pour qu'il fonctionne sur le terrain. L'ordinateur lui sert non seulement de source d'alimentation mais aussi de transfert et d'affichage des données mesurées.

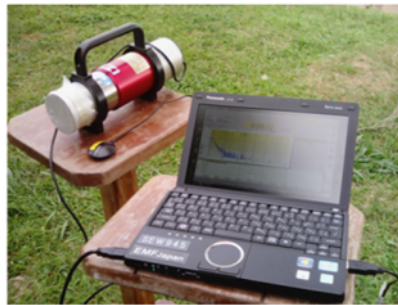


Figure 31 – *Appareil de référence de spectrométrie gamma in-situ*

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, une revue des travaux sur les capteurs, microcontrôleurs et méthodes de surveillance environnementale nous a permis de mettre en évidence les aspects de recherches réalisées pour mesurer les polluants atmosphériques, la radioactivité naturelle et connaître la qualité de l'air. Ces études sont très prometteuses, elles montrent la nécessité de développer les systèmes électroniques moins coûteux, dédiés à la surveillance environnementale, qui peuvent mesurer simultanément plusieurs polluants atmosphériques. Car la pollution atmosphérique est composée d'un grand nombre d'espèces polluantes qui impactent directement la santé humaine. De plus, l'échantillonnage d'air (par Gent Sampler) et la spectrométrie sont les méthodes les plus rigoureuses d'analyse et d'appréhension de la pollution atmosphérique. Ces méthodes sont malheureusement trop complexes et trop lourdes à mettre en œuvre. C'est pourquoi dans la suite de ce travail, nous nous attellerons à réaliser des dispositifs électroniques simples et efficaces qui peuvent mesurer un grand nombre de polluants tout en insistant sur leurs applications à la détection des gaz atmosphériques et des rayonnements ionisants afin d'assurer la surveillance environnementale. Une technique (OMS) d'analyse et d'évaluation de la qualité de l'air sera également présentée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Introduction

L'évolution technologique a permis la conception de nombreux systèmes électroniques introduits dans les domaines tels que l'automobile, l'avionique, les systèmes multimédias, les appareils électroménagers ou encore les terminaux de communication sans fil. Parmi ces systèmes électroniques on trouve les micro-capteurs et les cartes programmables indispensables pour la réalisation des dispositifs de surveillance environnementale. Ce chapitre est entièrement consacré à la description des circuits électroniques utilisés pour le développement des dispositifs de mesure. Il présente progressivement les effets des polluants atmosphériques et rayonnements ionisants sur la santé et l'environnement, les différents capteurs et cartes à microcontrôleurs utilisés, les méthodes de développement des différents dispositifs de mesure ainsi que les méthodes de traitement et d'analyse des données atmosphériques (OMS).

2.2 Effets des polluants atmosphériques et rayonnements ionisants sur la santé et l'environnement

La pollution se caractérise par l'altération de l'environnement par des substances toxiques, naturelles ou anthropiques. Si on distingue la pollution atmosphérique (ou pollution de l'air extérieur) de la pollution intérieure, elles sont toutes deux un réel problème de santé puisque nous côtoyons quotidiennement chacune d'entre elles. Elles sont induites par la diffusion de polluants atmosphériques, mais comprennent également la pollution industrielle, chimique, biologique, organique et la radioactivité environnementale. Les polluants atmosphériques qui rentrent dans notre étude sont en général des microparticules, des particules matières (PM) et des gaz toxiques comme le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de carbone (CO_2), l'ozone (O_3) et le dioxyde de soufre (SO_2) qui sont particulièrement dangereux (OMS) car ils ont un impact direct sur la santé humaine et l'environnement [100]. Ainsi, la pollution de l'air extérieur précisément l'exposition aux particules fines ($PM_{2,5}$)

entraîne une augmentation des crises d'asthme, des bronchites et des difficultés respiratoires [101]. La pollution intérieure nuit, quant à elle, quotidiennement au développement de l'enfant et cause des maux de tête, des allergies et l'asthme. La pollution de l'environnement est à l'origine de nombreuses pathologies respiratoires, cardiovasculaires et allergiques et de leur aggravation. Elle a également un impact sur la fertilité et le développement du fœtus. Elle est responsable de près de 50 000 décès prématurés en France [102]. Les impacts négatifs des rayonnements ionisants, sur la santé et l'environnement, sont également très perceptibles dans les endroits où des bombes nucléaires ont été testées, où des déchets radioactifs sont déposés et des accidents nucléaires (Tchernobyl, Vandellos, Fukushima, etc.) qui affectent grandement le public, les générations futures et l'environnement [103]. La surveillance en temps réel des polluants et rayonnements ionisants permet non seulement de déceler la concentration de ces éléments dans l'air mais aussi de les réduire à la source afin de protéger l'environnement et la santé de la population. Les Tableaux 6 et 7 résument les différents impacts sanitaires et environnementaux des gaz et rayonnements ionisants mesurés dans cette thèse.

Tableau 6 – *Principaux effets des polluants atmosphériques sur la santé et l'environnement*

Polluants	Origine	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
Les particules très fines ($PM_{2,5}$)	Les particules $PM_{2,5}$ (inférieures à $2,5\mu m$) résultent de processus de combustion (industries, chauffage, transport, ...)	Les particules fines peuvent pénétrer dans les voies respiratoires. Elles peuvent avoir des propriétés mutagène ou cancérigène	Les poussières absorbent et diffusent la lumière, limitant ainsi la visibilité. Elles suscitent la formation de salissure par dépôt et peuvent avoir une odeur désagréable.
Le dioxyde de carbone (CO_2)	Il provient essentiellement de la combustion de carburant fossile pour le transport, le chauffage et les activités industrielles...	Il n'a pas d'effet connu sur la santé	L'augmentation de la concentration en CO_2 accroît sensiblement l'effet de serre et contribue à une modification du climat planétaire.
Les rayonnements ionisants	Les rayonnements cosmiques sont des rayonnements ionisants d'origine naturelle. Ils peuvent provenir du Soleil mais également d'autres sources galactiques et extra-galactiques.	Des effets sanitaires aigus tels que des brûlures cutanées ou un syndrome d'irradiation aigu et le risque de cancer à long terme peuvent se produire lorsque les doses de rayonnements dépassent un certain niveau	Les rejets des substances radioactives dans l'atmosphère peuvent exposer les populations directement ou par le biais de la contamination de l'environnement (faune et flore, eau)

Tableau 7 – Principaux effets des polluants atmosphériques sur la santé et l’environnement (suite)

Polluants	Origine	Effets sur la santé	Effets sur l’environnement
L’ozone troposphérique (O_3)	L’ozone est une forme particulière de l’oxygène. Il n’est pas émis par une source particulière mais résulte de la transformation photo-chimique de certains polluants de l’atmosphère, issus du transport routier, (NO_X et COV) en présence des rayonnements ultra-violet solaires.	C’est un gaz agressif qui provoque (à partir de concentration de 150 à 200 $\mu g/m^3$) des migraines, des irritations des yeux et de la gorge, de la toux et une altération pulmonaire, surtout chez les personnes sensibles.	L’ozone contribue à l’acidification de l’environnement et perturbe la composition de l’air, des eaux de surface et du sol. L’ozone dégrade les bâtiments et les cultures.
Les oxydes d’azote (NO_X)	Les NO_X proviennent surtout des véhicules et des installations de combustion. Ces émissions ont lieu principalement sous la forme de NO et dans une moindre mesure sous la forme de NO_2 .	Le NO_2 peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyper activité bronchique. Chez les enfants et les asthmatiques, il peut augmenter la sensibilité des bronches aux infections microbiennes.	Les NO_X interviennent dans la formation d’ozone troposphérique et contribuent au phénomène des pluies acides qui attaquent les végétaux et les bâtiments.
Le dioxyde de soufre (SO_2)	Il provient essentiellement de la combustion des matières fossiles contenant du soufre (comme le fuel et le charbon)	C’est un gaz irritant. Des expositions courtes à des valeurs élevées (250 $\mu g/m^3$) peuvent provoquer des affections respiratoires (bronchites,...) surtout chez les personnes sensibles.	En présence d’eau, le dioxyde de soufre forme de l’acide sulfurique (H_2SO_4) qui contribue, comme l’ozone, à l’acidification de l’environnement.
Le monoxyde de carbone CO	Le monoxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et toxique qui résulte d’une combustion incomplète, et ce quel que soit le combustible utilisé : bois, butane, charbon, essence, gaz naturel,...	Le monoxyde de carbone est très dangereux et prend la place de l’oxygène quand on le respire. On a mal à la tête, envie de vomir, on est très fatigué et on peut s’évanouir ou mourir	Le monoxyde de carbone participe à la formation de l’ozone troposphérique et son oxydation aboutit à la formation du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre, responsable du dérèglement climatique

2.3 Capteurs électroniques de gaz atmosphériques utilisés

Les capteurs de gaz utilisés répondent aux gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone (CO), dioxyde d’azote (NO_2), dioxyde de soufre (SO_2), méthane (CH_4), ozone (O_3), dioxyde

de carbone (CO_2), le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) ainsi que les Composés Organiques Volatiles (COV). Ce sont en général, des capteurs électrochimiques (SO_2), infrarouges (CO_2) et des capteurs MOX (CO, CO_2, GPL, COV). Ces capteurs, présentés dans le Tableau 8, proviennent des fabricants tels que TGS-Figaro (Japon), SP-FIS (Japon), SGX sensortech (Suisse) et MQ-Hanwei (Chine) qui sont experts en développement et fabrication des capteurs de surveillance environnementale.

Tableau 8 – Gaz mesurés et caractéristiques techniques des capteurs électroniques utilisés

capteurs utilisés	Gaz mesurés	Capacité de détection	Temps de réponse(s)	Tension (VCC)	Erreur
MQ2	Smoke	200 à 10000 ppm	≈ 1	$5 \pm 0,1$	± 3 ppm
MQ6	LPG	100 à 10000 ppm	≈ 1	$5 \pm 0,1$	± 3 ppm
MQ7	CO	20 à 2000 ppm	≈ 1	$5 \pm 0,1$	± 3 ppm
MQ135	CO_2	10 à 1000 ppm	≈ 1	$5 \pm 0,1$	± 3 ppm
MQ131	O_3	10 à 10000 ppm	≈ 1	$5 \pm 0,1$	± 3 ppm
MG811	CO_2	350 à 10000 ppm	≈ 1	$6 \pm 0,1$	± 1 ppm
SPECsensor	SO_2	0 à 20 ppm	≈ 1	3,3	± 1 ppm
CJMCU6814	NO_2 CO	0,05 à 10 ppm 1 à 1000 ppm	≈ 1	5,1	$\pm 0,5$ ppm ± 2 ppm
CJMCU811	TVOC eCO_2	0 à 1187 ppb 400 à 10000 ppm	≈ 1	3,6	± 2 ppb ± 2 ppm
DHT22	Température Humidité	$-40^\circ C$ à $125^\circ C$ 0 à 100%	≈ 2	6	$\pm 5^\circ C$ $\pm 2\%$

Le *ppm* ou *ppb* est l'unité de mesure des gaz et *s* la seconde. L'amélioration du comportement des capteurs de gaz, nécessite un étalonnage et une configuration avant toute utilisation. Ainsi, chaque capteur a été calibré suivant les paramètres recommandés par le constructeur. Certains capteurs disposent d'un circuit de conditionnement du signal, qui sert non seulement à l'alimentation électrique du capteur (cas échéant) mais aussi pour la mise en forme, l'amplification, la filtration et la correction du signal analogique [38].

2.3.1 Capteurs de gaz de type MQ

Les capteurs de marque MQ (MQ2, MQ6, MQ7, MQ131, MQ135) sont des capteurs physico-chimiques (semi-conducteurs à oxyde métallique). Ils mesurent le CO , CO_2 , NH_3 , les hydrocarbures et l'ozone. Ils ont pour matériau sensible le dioxyde d'étain (S_nO_2) et sont composés d'un tube en céramique, d'une électrode de mesure du signal de sortie et d'un élément chauffant (R_S). Ce dernier fournit les conditions de travail nécessaires pour le bon fonctionnement des composants sensibles. La résistance chauffante varie en fonction de la concentration du polluant à mesurer dans l'air. Cette résistance dépend également de la

température et du taux d'humidité dans l'atmosphère. R_S est branchée en série avec une résistance de charge R_L à la sortie du capteur. Les capteurs MQ sont simples à utiliser, ils

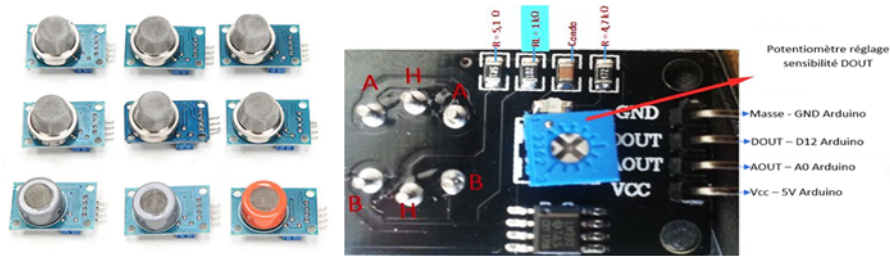


Figure 32 – Image des capteurs MQ (MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, MQ8, MQ9 et MQ135) [104]

ont une sensibilité élevée et un temps de réponse rapide. Il faut par ailleurs attendre 24 heures de préchauffage pour améliorer la précision de mesure de ces capteurs. Pour calibrer les capteurs MQ, on utilise le circuit simplifié de la Figure 33, où R_S est la résistance du capteur et R_L la charge ($R_L = 1K\Omega$) [105]. En appliquant le diviseur de tension sur la

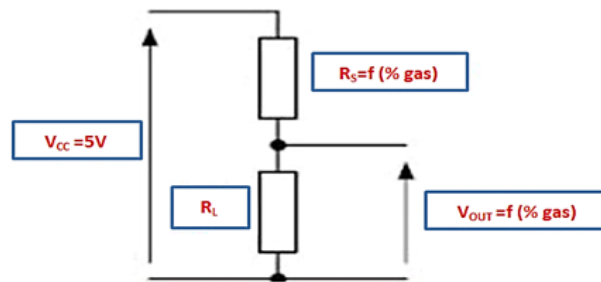


Figure 33 – Schéma symbolique des capteurs MQ

Figure 35, on obtient la valeur de R_S :

$$R_S = R_L \times \frac{(V_{CC} - V_{OUT})}{V_{OUT}} \quad (29)$$

On programme l'équation (29) sous IDE Arduino pour observer les variations de la résistance R_S . Les différentes courbes des gaz présentés sur la fiche technique de chaque capteur MQ, expriment le rapport R_S/R_0 en fonction de la concentration en *ppm* «part per million» ou *ppb* «part per billion» du gaz (voir Annexe B.1). A partir de ce rapport, on peut exprimer la valeur de R_0 qui est une constante en l'absence de gaz. Cette constante varie d'un capteur à l'autre; MQ2 ($R_S/R_0 \approx 9.8$), MQ6 ($R_S/R_0 \approx 10$), MQ7 ($R_S/R_0 \approx 28$), MQ131 ($R_S/R_0 \approx 20$) et MQ135 ($R_S/R_0 \approx 1$). Pour mesurer la concentration d'un gaz cible, on choisit deux points $(x_1; F_1)$ et $(x_0; F_0)$ appartenant à la courbe de ce gaz (fiche technique), on calcule

la pente m de la droite passant par ces points. Puis on utilise la fonction log-log plot de l'équation (30) [106] pour exprimer l'évolution en temps réel de la concentration du gaz cible dans l'air :

$$\frac{F_1}{F_0} = \left(\frac{x_1}{x_0}\right)^m \quad \text{Avec} \quad m = \frac{\log\left(\frac{F_1}{F_0}\right)}{\log\left(\frac{x_1}{x_0}\right)} \quad (30)$$

De l'équation (30) nous obtenons :

$$F(x) = k \times x^m \quad \text{Avec} \quad k = \frac{F_0}{x_0^m} \quad (31)$$

Comme les courbes sur les fiches techniques des capteurs MQ ont pour ordonnée $F(x) = \frac{R_S}{R_0}$ et pour abscisse $x = ppm$ (ou ppb), l'équation précédente nous donne :

$$\frac{R_S}{R_0} = k \times ppm^m \quad (32)$$

On obtient finalement l'équation (33) qui est utilisée dans le programme Arduino IDE afin de mesurer en temps réel la concentration du gaz choisi (en ppm ou ppb).

$$ppm = \left(\frac{1}{k} \times \frac{R_S}{R_0}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (33)$$

Les capteurs MQ ont tous le même schéma électronique (Figure 34) et produisent :

- Un signal numérique à la sortie D_{OUT} qui varie entre 0 et 1 à partir d'un certain pourcentage de gaz détecté ;
- Un signal analogique à la sortie V_{OUT} permettant de déterminer la concentration du gaz en utilisant les formules de calibration.

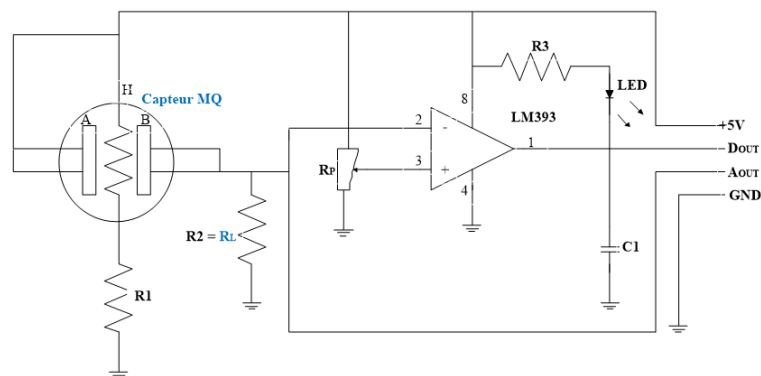


Figure 34 – Circuit électronique des capteurs MQ [106]

La surface de l'oxyde métallique des capteurs MQ est une fine pellicule d'un métal de transition lourd. Ces capteurs utilisent généralement du dioxyde d'étain (S_nO_2) qui recouvre une couche de silicium et est chauffé à une température comprise entre 200 et 400 °C. De cette façon, les processus chimiques du capteur sont accélérés et les effets des fluctuations de la température extérieure sont minimisés. Dans la plupart des capteurs MQ, le chauffage nécessite une tension de 5 V et a une résistance de 31 ohms, l'alimentation doit donc fournir 200 mA de courant pour le capteur. De plus, le capteur possède une sortie analogique et numérique, la sortie analogique (A0) est comprise entre 0 et 5V, la sortie numérique (D0) passe de High à Low lorsqu'un certain niveau est atteint (le niveau auquel la broche D0 commute est réglé à l'aide d'un petit potentiomètre situé à l'arrière de la carte du capteur). La sortie numérique des capteurs MQ est reliée à un convertisseur analogique-numérique tandis que la sortie analogique (A_{OUT}) est directement reliée à l'élément de transduction du capteur (Figure 34). Le signal A_{OUT} n'est pas conditionné et doit être traité et analysé par un système externe à microcontrôleur. Les capteurs MQ sont très anciens mais demeurent les plus vendus et les plus étudiés à travers le monde [56].

2.3.2 Capteur MG-811 de dioxyde de carbone (CO_2)

Le module de mesure du CO_2 présenté par la Figure 35 est constitué d'un capteur électrolytique solide MG-811 à sortie analogique, d'un système de traitement du signal et d'un circuit de chauffage du capteur (calibration). Il est utilisé dans les applications de surveillance de la qualité de l'air. L'amplitude du signal de sortie du capteur MG-811 est très faible alors

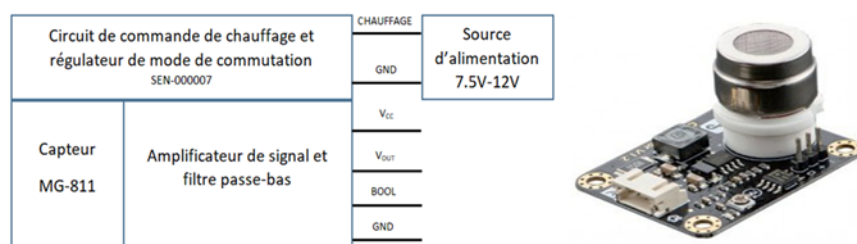


Figure 35 – Schéma synoptique et image du capteur électrochimique MG-811

que l'impédance de sortie de la cellule est très élevée qu'un circuit de conditionnement du signal est nécessaire. Sur la fiche technique du capteur MG-811 (voir Annexe B.2) la tension de sortie V_{MG811} dans un air pur est comprise entre 100 et 600 mV correspondant à 400 et 1000 ppm de concentration en CO_2 . Cette tension est définie comme tension de référence V_0 (tension point zéro) lorsque la concentration de CO_2 est égale à 400 ppm et V_c est la tension

seuil lorsque la concentration de CO_2 est égale à 1000 ppm. Elle diminue au fur à mesure que la concentration de CO_2 augmente ($V_0 > V_c$) dans l'environnement. Lorsque la concentration de CO_2 varie de manière croissante (>400 ppm), la tension de sortie V_s (V_{out}) du module de détection est linéaire et proportionnelle au logarithme de base 10 de la concentration de CO_2 . Cette tension s'exprime par :

$$V_S = V_0 + \frac{\Delta V_S}{(\log_{10}(400) - \log_{10}(1000)) \times (\log_{10}[CO_2] - \log_{10}(400))} \quad (34)$$

Avec $\Delta V_S = V_0 - V_C$, V_0 et V_S en volt. La valeur de la tension de référence V_0 varie d'un capteur à l'autre. La tension de réaction ΔV_S est la chute de tension entre la tension de sortie du capteur (V_0) lorsque la concentration de CO_2 est à 400 ppm et la tension de sortie du capteur (V_C) lorsque la concentration de CO_2 est à 1000 ppm. La valeur de ΔV_S diffère d'un capteur à l'autre mais reste toujours comprise entre 30 mV et 90 mV. Le conditionnement du signal de sortie V_s du module est assuré par le circuit électronique de la Figure 36. Le

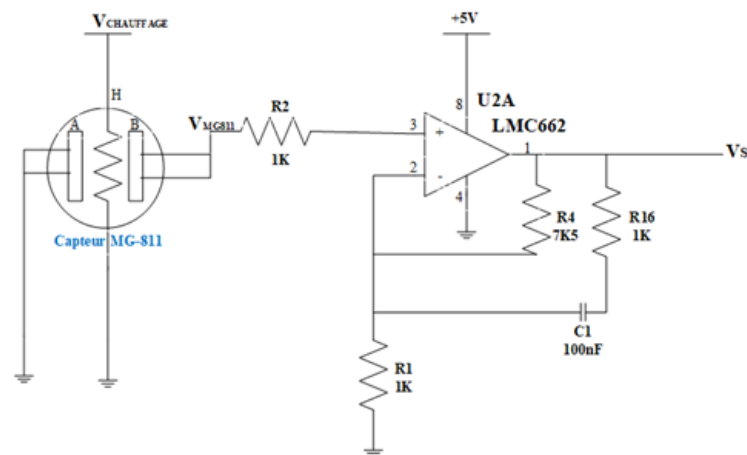


Figure 36 – Circuit de conditionnement du signal de sortie du capteur MG-811 [107]

gain en tension du circuit de conditionnement du signal est défini par R_4 et R_1 suivant la formule :

$$V_S = V_{MG811} \times \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \quad (35)$$

En utilisant les valeurs de R_4 et R_1 de la Figure 36, nous obtenons $V_S = 8,5 \times V_{MG811}$; le gain du circuit de conditionnement vaut alors 8,5. La plage des tensions de sortie V_s varie de 0,85 à 5,0 V (la tension du capteur V_{MG811} , étant entre 100 mV et 600 mV), ce qui est une plage raisonnable pour fonctionner sur un microcontrôleur 5V ou un convertisseur analogique numérique (CAN) autonome. La résistance R_{16} et le condensateur C_1 forment un

filtre passe-bas qui permet d'obtenir un bon signal de sortie en filtrant tout le bruit haute fréquence. En pratique, l'étalonnage du capteur MG-811 consiste à sa mise sous tension dans un environnement où l'air est propre. Après une mise sous tension de 48 h (environ), on mesure la tension de sortie V_S qui sera utilisée dans la programmation du fonctionnement du capteur. L'Amplificateur Opérationnel (AOP) LMC662 est utilisé dans ce capteur pour son impédance d'entrée ultra élevée. Le capteur MG-811 nécessite une impédance d'entrée comprise entre 100 et 1000 Gohm, le LMC662 possède une résistance d'entrée supérieure à 1Tohm ce qui répond à cette exigence. Le module de détection de CO_2 dispose également d'un circuit comparateur dont la sortie est la broche BOOL.

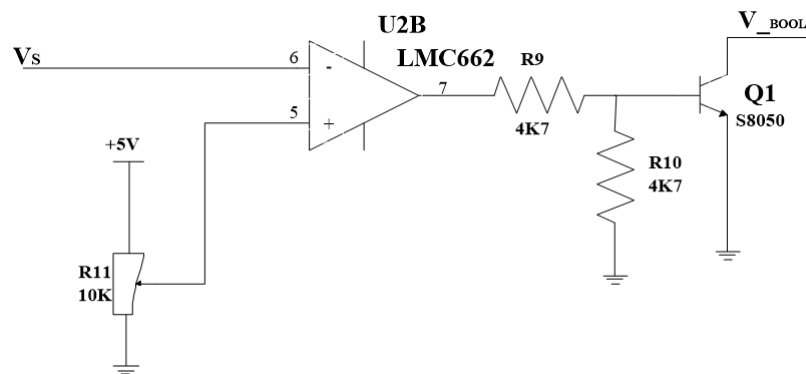


Figure 37 – Circuit de sortie numérique à collecteur ouvert [107]

L'AOP LMC662 est utilisé dans ce circuit comme comparateur et R_{11} permet de fixer le seuil de comparaison. Si V_S passe en dessous du seuil réglé, V_{BOOL} est au potentiel de la masse. Si V_S dépasse le seuil, V_{BOOL} est flottant. Une résistance pull-up (R_{10}) est nécessaire pour tirer la broche BOOL vers le haut afin d'avoir un état « haut » valide lorsque V_{BOOL} est flottant. Le circuit de chauffage du capteur MG-811 représenté par la Figure 38 est une alimentation à découpage ou SMPS « Switch Mode Power Supply » de type abaisseur dont la régulation est assurée par des composants électroniques utilisés en commutation .

La tension de retour du MP2359 est de 0,81 V et la relation entre V_{in} et V_{OUT} de ce circuit donne :

$$V_{OUT} = 0,81 \times \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{14}}\right) \quad (36)$$

Et sur la Figure 48, nous obtenons : $V_{OUT} = 0,81 \times \left(1 + \frac{10.2K}{1.58K}\right) = 6.0V$

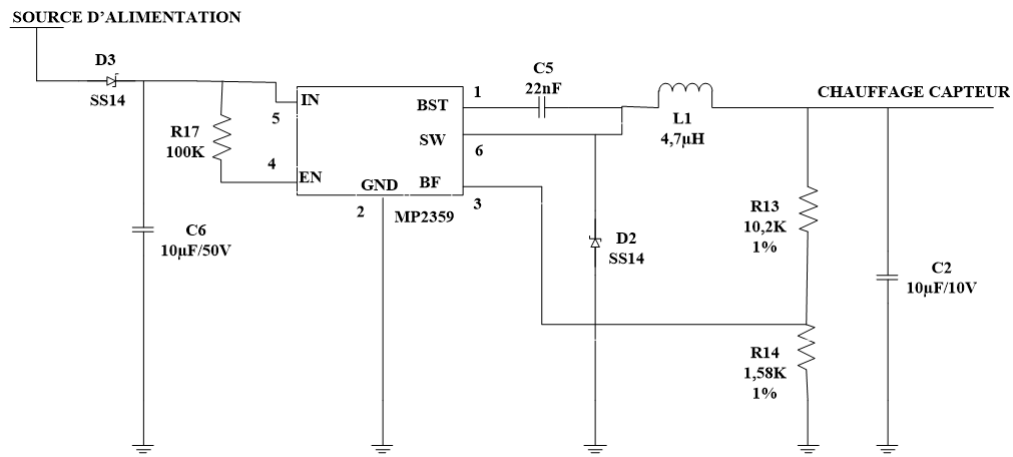


Figure 38 – Circuit de chauffage du capteur [107]

2.3.3 Capteur SPEC de dioxyde de soufre (SO_2)

Le capteur de SO_2 est un capteur électrochimique de type ampérométrique qui génère un courant proportionnel à la fraction volumétrique de gaz détecté. Ce capteur est constitué des électrodes en contact avec un électrolyte.

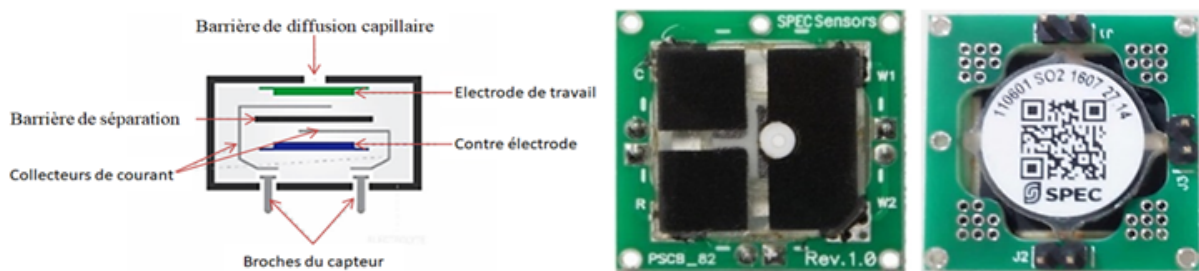


Figure 39 – Schéma descriptif et images du capteur SPEC [108]

Le SO_2 est mesuré à l'électrode de travail ou de détection et entre dans le capteur par la barrière de diffusion capillaire. Ce gaz réagit avec l'électrode de détection pour générer un courant proportionnel à la concentration du gaz mesuré qui constitue le signal de sortie du capteur. Une contre-électrode est prévue pour compléter le circuit de la cellule électrochimique. Cette contre-électrode fonctionne comme une seconde demi-cellule, permettant aux électrons d'entrer ou de sortir de l'électrolyte en nombre égal et dans le sens opposé de ceux de l'électrode de travail. L'ajout d'une troisième électrode appelée électrode de référence au capteur permet d'améliorer la stabilité, le rapport signal sur bruit, le temps de réponse des deux électrodes utilisées et de rendre stable le potentiel électrochimique dans l'électrolyte. Il est important qu'aucun courant ne circule à travers l'électrode de référence (ÉR) pour éviter

de changer son potentiel. Le circuit qui contrôle le potentiel de l'électrode de travail (ÉT) et convertit le courant de cette électrode en tension est le potentiostat. C'est ce circuit qui assure le conditionnement du signal de sortie du capteur (voir Figure 40).

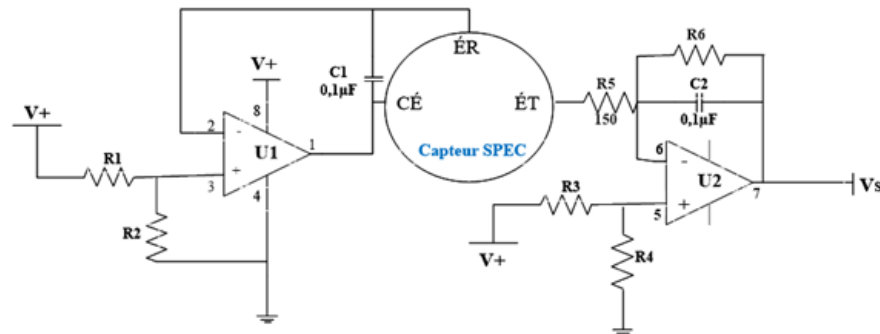


Figure 40 – Schéma simplifié du capteur de SO_2 à trois électrodes [108]

Le potentiel de l'électrode de référence (ÉR) est établi par une tension stable à l'AOP U1 (broche 2). Le potentiel de l'électrode de travail (ÉT) est établi par une tension stable à l'AOP U2 (broche 5). La tension à ÉT par rapport à ÉR est appelée potentiel de polarisation du capteur. A la sortie de l'électrode de travail, le courant est converti en tension par l'AOP U2. L'AOP U1 génère une tension à la contre-électrode (CÉ), lequel est suffisant pour fournir un courant exactement égal et opposé au courant de l'électrode de travail. Une polarisation positive de la cellule électrochimique peut s'établir en réglant la tension à U2 (broche 5) par rapport à U1 (broche 3). Le gain de l'amplificateur trans-impédance est réglé par R_6 . Les condensateurs C_1 , C_2 et la résistance R_5 peuvent être ajustés selon les caractéristiques de la cellule électrochimique. Un filtrage analogique ou numérique peut être mis en œuvre pour améliorer les caractéristiques du rapport signal sur bruit du circuit. Les capteurs SPEC sont étalonnés dans des conditions standards de température et d'humidité ($23 \pm 3^\circ C$ et 40-60%). Pour cela, on procède à la mise sous tension (24h environ) du capteur, placé dans un environnement où l'air contient moins de gaz possible (air pur). Au terme du chauffage, on mesure le signal de sortie $V_{air-pur}$ du capteur afin d'exprimer la concentration en temps réel de SO_2 :

$$C_{gaz} = \frac{1}{M} \times (V_{gaz} - V_{airpur}) \quad (37)$$

Où C_{gaz} est la concentration en ppm de SO_2 , V_{gaz} la tension de sortie du capteur en fonc-

tionnement et M le facteur d'étalonnage du capteur en (V/ppm) qui s'obtient par :

$$M = \text{code sensibilité}(nA/ppm) \times \text{GainTIA}(kV/A) \times 10^{-9}(A/nA) \times 10^3(V/kV) \quad (38)$$

Le code de sensibilité du capteur de SO_2 est 39,47 nA/ppm et son Gain TIA (Trans-Impedance Amplifier) est de 100 kV/A [55]. En fonctionnement normal, les capteurs de dioxyde de soufre peuvent faire face à des variations climatiques telles que l'humidité relative (<15 %) et/ou des températures élevées (> 40°C). Ces variations peuvent entraîner des pertes de sensibilité du capteur. Cette perte de sensibilité est temporaire et les capteurs peuvent surmonter ces difficultés. Par ailleurs, ces capteurs ont une réponse optimale au gaz mais doivent être protégés contre la poussière, des huiles et l'humidité condensée. Pour une bonne utilisation du capteur de SO_2 , il est recommandé d'utiliser sa carte d'évaluation ou Carte analogique (voir Figure 41) sur laquelle se monte le capteur. Cette carte est fournie avec le kit de développement du capteur [108, 109].

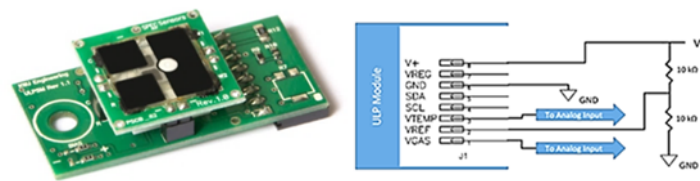


Figure 41 – Capteur SO_2 sur une carte d'évaluation [109]

2.3.4 Capteur CJMCU-6814 de dioxyde d'azote (NO_2) et du monoxyde de carbone (CO)

Les capteurs de gaz CJMCU-6814 ou MiCS-6814 sont des capteurs semi-conducteurs à oxyde métallique. Ils ont la structure classique d'un transistor MOS à effet de champs sauf que la grille est remplacée par un oxyde métallique sensible au gaz. L'interaction de l'oxyde métallique avec le gaz à détecter se traduit par une variation de la tension de seuil du transistor. Le MiCS-6814 de la Figure 42 est un capteur composé de trois différents blocs de détections avec des éléments chauffants sur un même emballage. La structure de chaque puce de détection au silicium est constituée d'un diaphragme micro-usiné avec précision. Ce capteur MEMS, robuste, intègre des éléments mécaniques couplés à des éléments électroniques pour la détection des polluants tels que le NO_2 , le CO et le NH_3 ou les rejets agricoles et industriels. La première puce détecte les gaz oxydants (OX), la deuxième capte les gaz

réducteurs (RED) et la troisième détecte le NH_3 .

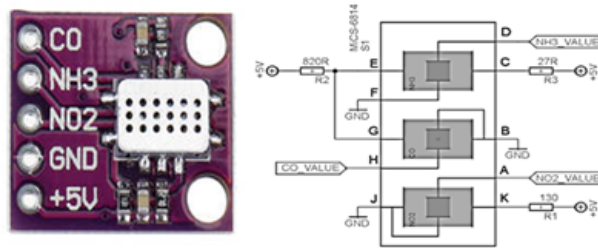


Figure 42 – Capteur MiCS-6814 et son schéma synoptique [110]

En fonctionnement normal, les résistances R_1 de $130\ \Omega$, R_2 de $820\ \Omega$ et R_3 de $27\ \Omega$ de la Figure 42 fournissent des températures optimales aux différents radiateurs. Elles ont une même source d'alimentation (5V) et les tensions résultantes par bloc de détection sont $V_{RED} = 2,4\ V$ (pour CO), $V_{OX} = 1,7\ V$ (pour NO_2) et $V_{NH_3} = 2,2\ V$ (pour NH_3) [110]. La calibration du capteur CJMCU-6814 consiste à exécuter un code d'étalonnage IDE Arduino donné par le constructeur. Le processus de recalibrage s'effectue dans une pièce climatisée (à $23 \pm 5^\circ C$ et $50 \pm 10\ %$ Humidité Relative) et peut parfois durer une demi-heure.

2.3.5 Capteurs CJMCU-811 de Composés Organiques Volatiles (COV_s)

Le capteur CJMCU-811 ou CCS811 de la Figure 43 est un capteur numérique à très faible puissance. Ce module intègre en son sein un capteur de gaz à oxyde métallique et un microcontrôleur CCS801-bits composé d'un convertisseur analogique-numérique et d'une interface I^2C . Ce capteur permet de détecter une large gamme de composés organiques volatiles (Aldéhydes et cétones, Hydrocarbures aromatiques et Hydrocarbures halogénés) et de dioxyde de carbone. Il est très utilisé pour la surveillance de la qualité de l'air intérieur. Le capteur utilise la technologie de microplaques chauffantes AMS (« Automated Manifest System ») qui est une solution fiable dans la réduction significative de la puissance moyenne de consommation du capteur. Le système prend en charge des algorithmes intelligents pour traiter les données mesurées par le capteur et produire une valeur de $TVOC$ et l'équivalent CO_2 (eCO_2) dans l'air.

Principalement utilisé pour la surveillance de la qualité de l'air intérieur, le capteur CCS811 a moins de composants et une durée de vie supérieure à cinq ans [109]. Il possède cinq différents modes de fonctionnement que l'on peut choisir lors de son utilisation :

- **Mode 0** : fonctionnement au ralenti, basse consommation ($0,034\ mW$) ;
- **Mode 1** : alimentation continue, mesure chaque seconde ($46\ mW$) ;

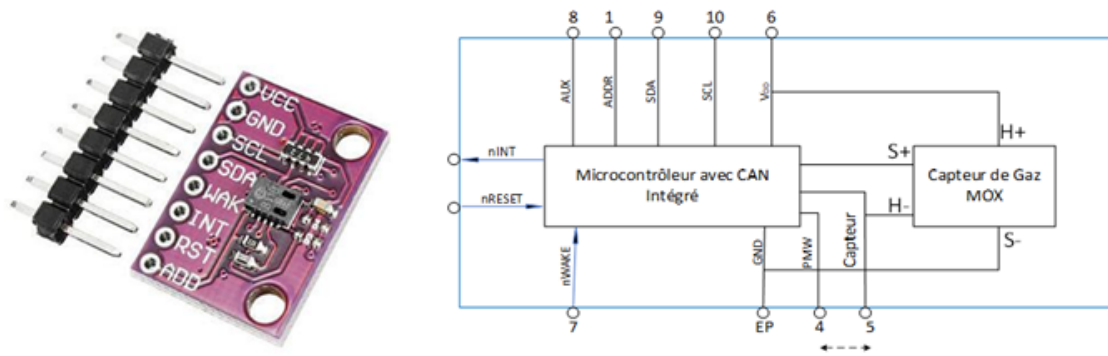


Figure 43 – Capteur *MiCS-811* et son schéma synoptique [109]

- **Mode 2** : alimentation pulsée, mesure toutes les 10s (7 mW);
- **Mode 3** : alimentation pulsée basse consommation, mesure toutes les 60s ($1,2\text{ W}$);
- **Mode 4** : alimentation permanente, mesure possible toutes les 250ms (46 mW) : Mode inadapté à un fonctionnement sur batterie.

Le capteur CCS811 nécessite un étalonnage (en présence d'une source) pour des mesures précises. On recommande de préchauffer le capteur pendant 48 heures lors de son acquisition et en fonctionnement normal, il faudra attendre environ 30 minutes pour obtenir une mesure fiable.

2.3.6 Capteurs DHT22 / DHT11 de température et humidité

Les capteurs DHT22 et DHT11 de la Figure 44 sont des capteurs numériques de température et d'humidité. Ils intègrent un capteur d'humidité capacitif et une thermistance pour mesurer la température ambiante et générer un signal numérique par la broche de données. Le capteur DHT22 (ou AM2302) est capable de mesurer des températures de -40 à $+125^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ et des taux d'humidité relative de 0 à 100% avec une précision de $\pm 2\%$. Une mesure peut être réalisée toutes les 500 millisecondes (deux fois par seconde). Le DHT22 et le DHT11 sont tous deux compatibles à 3,3 volts et 5 volts mais le constructeur recommande de toujours alimenter ces capteurs à 5 volts pour avoir des mesures précises. Ils ont le même brochage et le même protocole de communication sauf que le DHT22 est beaucoup plus précis et stable que le DHT11.

Quel que soit le choix du capteur DHT22 ou DHT11, le câblage de ces capteurs est le même et leur brochage est donné par :

- **La broche $n^{\circ}1$** est la broche d'alimentation (5 volts ou 3.3 volts);
- **La broche $n^{\circ}2$** est la broche de communication. Celle-ci doit impérativement être

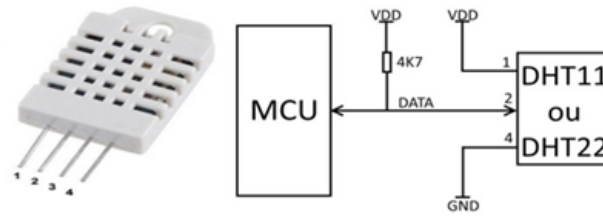


Figure 44 – Capteur DHT22 et son schéma de câblage sur un microcontrôleur [111]

reliée à l'alimentation via une résistance de tirage (Pull up) de $4.7K\Omega$ (il s'agit d'une sortie à collecteur ouvert) ;

- **La broche n°3** n'est pas utilisée et ne doit pas être câblée ;
- **La broche n°4** est la masse du capteur (*GND*).

Les capteurs DHTxx ont la particularité de communiquer avec un microcontrôleur via une broche d'entrée/sortie unique. Il s'agit du protocole de communication propriétaire, utilisant un seul fil et nécessitant des timings très précis. Cette communication se fait en 3 étapes :

- Le microcontrôleur maître (carte Arduino) réveille le capteur en plaçant la ligne de données à l'état "LOW", pendant au moins $800\ \mu s$. Durant ce temps, le capteur va se réveiller et préparer une mesure de température et d'humidité. Une fois le temps écoulé, le maître va libérer la ligne de données et passer en mode écoute ;
- Une fois la ligne de données libérée, le capteur répond au maître (pour montrer qu'il est bien réveillé) en maintenant la ligne de données à "LOW" pendant $80\ \mu s$ puis à "HIGH" pendant $80\ \mu s$;
- Le capteur va ensuite transmettre une série de 40 bits (5 octets). Les deux premiers octets contiennent la mesure de l'humidité. Les deux octets suivants contiennent la mesure de la température et le cinquième octet contient une somme de contrôle qui permet de vérifier que les données lues sont correctes.

La sortie du capteur ne génère pas de tension. Elle ne fait que commuter (via un transistor) la tension au niveau de la résistance de tirage sur la ligne de données. Dans ce contexte, "HIGH" est la tension de la résistance de tirage et "LOW" la tension à la masse (0 volt). Le capteur DHT22/DHT11 est un capteur numérique dont le code de programmation sur Arduino est donné par le constructeur et il n'a pas besoin d'être étalonné avant son utilisation. Il est recommandé de monter un condensateur de $100\ nF$ entre les broches n°1 et n°4 pour un bon fonctionnement du capteur.

2.4 Capteurs de particules en suspension

2.4.1 Description des capteurs de particules en suspension

Les capteurs de poussière Shinyei PPD42NS et Samyoung DSM501B utilisés dans le cadre de ce travail, détectent les particules de poussière et la fumée de cigarette de taille allant de 0 à $1\ \mu\text{m}$ (PM_1) et de 0 à $2,5\ \mu\text{m}$ ($PM_{2,5}$). Ces seuils définis par l'Organisation Mondiale de la santé, sont des seuils de particules les plus nocives pour la santé humaine. Ces capteurs de particules sont indispensables pour la réalisation de dispositifs électroniques de surveillance environnementale. Ils sont sensibles aux changements d'humidité car l'augmentation de celle-ci, accroît la masse des particules et ceci fausse la véracité de la détection des particules [77]. La température de fonctionnement des capteurs de particules est comprise entre 0 et 45°C , avec un taux d'humidité inférieur à 95 %.



Figure 45 – Capteurs de poussière utilisés

Le Tableau suivant donne les caractéristiques techniques des deux capteurs de particules matières.

Tableau 9 – Caractéristiques techniques des capteurs de poussière utilisés

Types de capteurs	Particules mesurées	Capacité de détection	Temps de réponse (s)	Tension (V_{CC})	Précision du capteur
Samyoung DSM501B	$1\ \mu\text{m}$ $2,5\ \mu\text{m}$	0 - $1,4\ \text{mg}/\text{m}^3$	5-30	4.5 - 5.5	$\pm 5\%$ $\pm 10\%$
Shinyei PPD42NS	$1\ \mu\text{m}$ $2,5\ \mu\text{m}$	0-28000 pcs/litre (Particules/litre)	5-30	4.5 - 5.5	$\pm 5\%$ $\pm 10\%$

Pour obtenir des résultats comparables entre les capteurs et appareils classiques, il faut convertir les concentrations obtenues en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [77]. Les capteurs *PPD42NS* et *DSM501B* sont constitués d'un élément de détection et d'un circuit électronique de conditionnement du signal. A l'intérieur du capteur, les particules sont entraînées en mouvement de convection par effet thermique fourni par une résistance de $100\ \Omega$ (de puissance $5\text{V} \times 50\ \text{mA} = 0,25\ \text{W}$: *PPD42NS*). Cette résistance se comporte comme une pompe intelligente à air dans une

chambre optique. Les deux types de capteurs utilisés ont le même principe de fonctionnement et de schéma synoptique décrit par la Figure 46 :

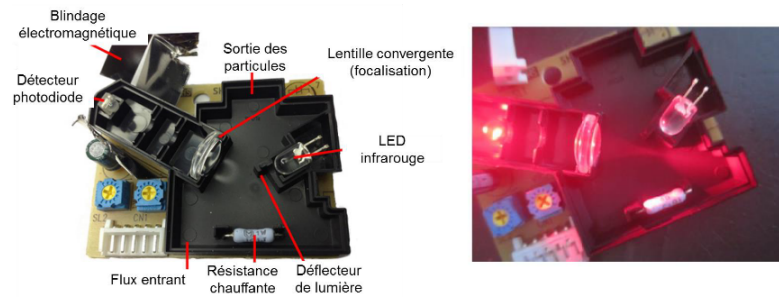


Figure 46 – *Chambre de détection du capteur PPD42NS [48, 112]*

Les particules circulent à travers un faisceau lumineux fourni par la LED infrarouge (LED_1 de la Figure 47 et 48). La lumière diffusée par les particules est captée par la photodiode PIC_1 (détecteur).

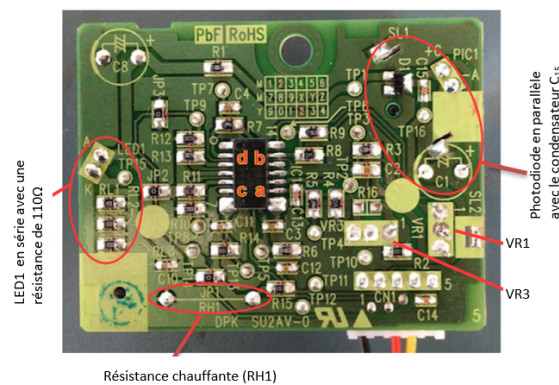


Figure 47 – *Circuit imprimé du capteur PPD42NS [48, 112]*

La LED_1 est en série avec l'alimentation de +5 V et une résistance de 110 Ω , fournie par 3 résistances de 330 Ω en parallèle. La tension directe de la diode est d'environ 1,41 V et son courant de 33 mA en continu. L'alimentation de +5 V appliquée à l'entrée est filtrée par les condensateurs C_8 (non installé sur le circuit imprimé) et C_{10} (céramique) pour que les fluctuations de la tension d'alimentation n'influencent pas la lumière de sortie de la LED_1 . La puissance de la photodiode est filtrée par la résistance R_1 , la diode D_1 et le condensateur C_1 (100 μF). La photodiode de tension directe 0,7 V est polarisée en inverse et montée en série avec une résistance variable composée de R_2 , R_{16} (non installé sur le circuit imprimé) et VR_3 (réglée à près de 50 k Ω). Les changements de lumière de la LED_1 provoquent des changements de courant de la photodiode et cela développe des changements de tension à travers la résistance combinée R_2 , R_{16} et VR_3 . Ajuster VR_3 à une valeur très

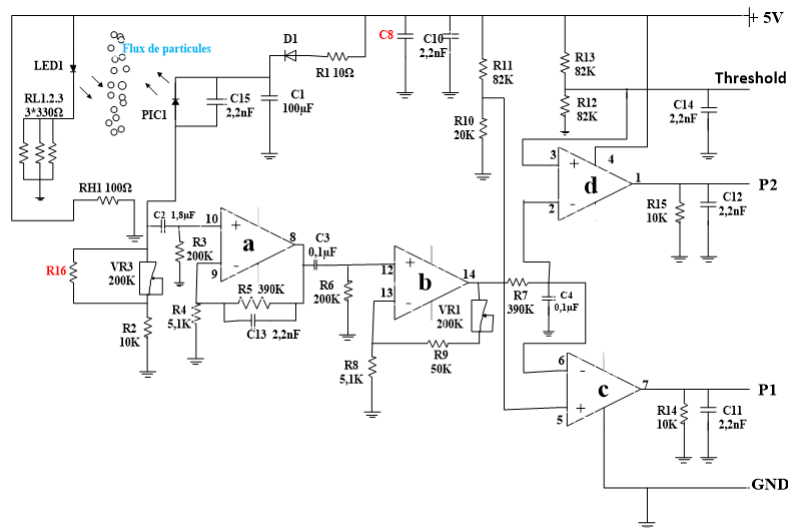


Figure 48 – Schéma électronique du capteur PPD42NS [48, 112]

élevée, augmente la sensibilité de la photodiode. Le condensateur C_{15} en parallèle avec la photodiode, ralentit et intègre la réponse de la photodiode sur une échelle de temps d'une milliseconde environ et cette constante de temps augmente avec le réglage de la sensibilité sur VR_3 . Au niveau de l'amplificateur opérationnel (AOP) non inverseur (a), Les fluctuations de tension sont effectuées par le condensateur C_2 et la résistance R_3 . Il fournit un gain de tension basse fréquence (BF) de 77,5 (BF au-dessus de 0,5 Hz). C_{13} est une rétroaction qui assure la stabilité du courant alternatif et permet de compenser le condensateur d'entrée C_{15} . A la sortie de l'AOP (a) et l'entrée de l'AOP (b), les fluctuations de tension sont effectuées par le condensateur C_3 et la résistance R_6 . Cette section (b) fournit un gain de tension réglable de 12 à 50 sur VR_1 en combinaison avec R_8 et R_9 . La combinaison de C_3 et R_6 à l'entrée de l'AOP(b), atténue les fréquences inférieures à 8Hz et sa sortie alimente un filtre passe-bas du premier ordre (R_7 et C_4) qui atténue les fréquences au-dessus de 4 Hz.

On constate que la combinaison passe-haut (C_3 ; R_6) et passe-bas (R_7 ; C_4), suggèrent que les fréquences autour de 6 Hz sont les moins atténuées et que les impulsions d'une certaine longueur et fréquence sont plus susceptibles de passer à la sortie. Les AOP(c) et AOP(d) sont configurées comme des comparateurs pour fournir des impulsions de sortie $P1$ et $P2$ liées au niveau du connecteur. Le diviseur de tension R_{10} et R_{11} , détermine un seuil de tension de 1,09 V pour $P1$, celui de R_{12} et R_{13} détermine un seuil de tension de 2,5 V pour $P2$. $P1$ et $P2$ auront des impulsions basses tant que la tension d'entrée dépasse leurs seuils respectifs. L'application d'une résistance supplémentaire ou d'une tension à l'entrée "threshold" peut ajuster le seuil $P2$ à la hausse ou à la baisse. L'amplificateur opérationnel utilisé est le NJM2902 générique qui est similaire au LM324. La plupart des pièces électroniques sont

montées en série et la consommation d'énergie dans le capteur PPD42NS est quasiment déterminée par la combinaison du système de réchauffage RH_1 , 50 mA et la LED_1 , 33 mA. La documentation technique du capteur Shinyei PPD42NS précise que les impulsions à la sortie P1 correspondent à des particules de taille $1\mu\text{m}$, et les impulsions à la sortie P2 correspondent à des particules de $2,5\mu\text{m}$. Cela semble se comparer avec les tensions seuils 1V et 2,5 V réglés sur les entrées des comparateurs AOP (c) et AOP (d). Il y a vraisemblablement un ajustement d'étalonnage effectué par le constructeur afin de fixer les sorties du capteur à un standard. Mais on peut néanmoins effectuer des tests d'étalonnage pour vérifier les variations des composants, observer la sortie de la LED_1 et la sensibilité de la photodiode PC_1 [113].

2.4.2 Principe de fonctionnement des capteurs de particules matières

Les capteurs de particules matières sont calibrés à l'usine et n'ont pas besoin d'être réétalonnés au fur et à mesure du temps d'utilisation comme c'est le cas des capteurs chimiques. Ils utilisent la photométrie de réflexion infrarouge comme principe de fonctionnement, couplée à la méthode LPO Time pour produire un signal de sortie PWM. Cette méthode consiste à l'élaboration d'une mesure moyenne sur une grande durée, typiquement une trentaine de secondes. La résistance chauffante (5 Watts) du capteur assure la convection continue d'un flux d'air à l'intérieur du capteur afin d'aspirer les particules environnantes. Sous l'action de cette aspiration les particules vont pénétrer dans la zone de détection et vont réfléchir une certaine fraction de lumière infrarouge émise. Ces réflexions auront pour effet de générer une tension aux bornes de la cellule photosensible. Le capteur de particules va continuellement basculer sa sortie digitale d'un signal haut (+5 V) vers un signal bas (0 V) en fonction du nombre de dépassements du seuil de détection de particules. Le nombre de bascules électriques (LPO Time) sera proportionnel à la présence de particules dans la zone de détection. Le couplage de ce capteur à un microcontrôleur est nécessaire pour compter le nombre de bascules vers le seuil électrique bas (0 V). Le nombre LPO Time permet de calculer la valeur en pourcentage (ratio) du temps total de dépassement du seuil de détection de particules, durant la période d'évaluation (confère paragraphe 1.3.5. Chapitre I). Les capteurs de particules matières mesurent le temps de toutes les faibles impulsions durant une période d'échantillonnage de 30

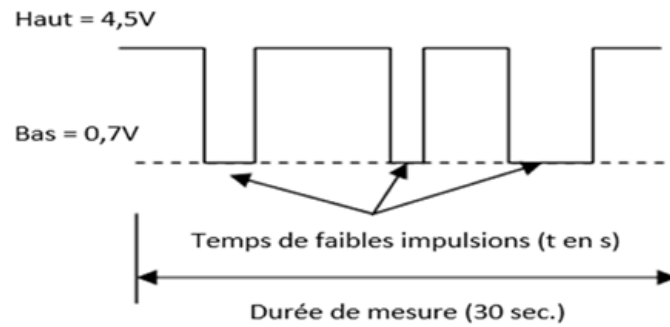


Figure 49 – *Evaluation du ratio des Low Pulse Occupancy Time des capteurs de poussières [48, 112]*

secondes afin d'exprimer le ratio :

$$Ratio[\%] = \frac{t(sec)}{30(sec) \times 100} \quad (39)$$

Le ratio permet de modéliser la concentration particulaire grâce à la loi polynomiale [85] de l'équation (40). Cette équation proposée par la société Shinyei est également développée par Yang Wang et al., [114–116].

$$Concentration_{PM} = 0,62 + 520 \times Ratio - 3,8 \times Ratio^2 + 1,1 \times Ratio^3 \quad (40)$$

A travers l'équation (41), on constate qu'une concentration égale à 0,62 correspond à une mesure nulle. Les concentrations obtenues sont converties en $\mu g/m^3$ [77, 117]. En fonctionnement, le capteur doit être positionné verticalement, la résistance chauffante vers le bas. Les capteurs de poussière sont influencés par les phénomènes météorologiques comme le brouillard ou les vents forts, etc., peuvent influencer négativement leur fonctionnement.

2.5 Détecteurs de rayonnements ionisants et Conditionnement du signal nucléaire

Les détecteurs de rayonnement délivrent tous une information qui est l'image de l'interaction de la particule avec ces derniers. Suivant la nature de l'information délivrée, il est possible de classer les détecteurs en deux grandes catégories. La première regroupe les détecteurs qui produisent une information lumineuse lorsqu'ils sont traversés par une particule. Ils sont suivis d'un dispositif (photomultiplicateur, photodiode) qui convertit cette lumière en un signal électrique. La deuxième regroupe ceux qui délivrent une charge (ou un courant) en

fonction de l'énergie cédée par la particule. Ces détecteurs sont suivis d'un préamplificateur de charge (ou de courant) qui assure la conversion de la charge ou du courant en une tension électrique. Le Tableau 10 présente les détecteurs utilisés dans le cadre de ce travail.

Tableau 10 – *Caractéristiques techniques des détecteurs de rayonnement utilisés*

Type de détecteur	Particules mesurées	Plage de détection ($\mu\text{Sv/h}$)	Sensibilité (cpm/ $\mu\text{Sv/h}$)	Temps de réponse (s)	Tension d'alimentation (V)
Geiger-Müller J305 $\beta\gamma$	β et γ	0 -1000	123,15	1	5- 12
Geiger-Müller ZP 1200	γ	0,01-100000	150	1	9
Pocket Geiger-Müller	γ	0,05 - 10	/	1	3-9

Le compteur à tube Geiger-Müller de type J305 $\beta\gamma$ de la Figure 50 est un compteur à cathode externe très utilisé dans de nombreuses applications [117, 118]. Il a un facteur de conversion de 0,00812 $\mu\text{Sv/h/cpm}$ et peut atteindre un nombre de compte maximal de 30000 cpm. Ces compteurs Geiger sont remplis de gaz inertes, hélium, néon, argon auxquels



Figure 50 – *Détecteurs Geiger-Müller*

un fort champ électrique est appliqué entre la paroi (cathode) et le fil d'anode situé le long de l'axe du détecteur. Le compteur DGM-1500 (γ) a la face d'entrée couverte d'un matériau léger (feuille de mica) perméable aux rayonnements.

Les fonctions principales de l'électronique dans les applications de physique nucléaire consistent à l'acquisition des impulsions électriques produites par le détecteur, l'extraction des quantités d'intérêt (énergie, comptage et dose) et la conversion de ces informations dans un format numérique qui puisse être acquis, sauvé et analysé par un ordinateur. En général, le signal fourni par certains détecteurs est suffisamment grand pour être analysé et numérisé. Dans d'autres cas ce signal est très faible et doit être amplifié à proximité du détecteur afin de minimiser les pertes ; c'est le travail du préamplificateur. Il joue également le rôle d'adaptateur d'impédance qui présente une grande impédance à l'entrée du détecteur afin de minimiser sa charge (l'appel de courant) et une faible impédance de sortie. Il permet :

- D'extraire le signal du détecteur sans dégrader le rapport signal sur bruit ;
- D'effectuer la mise en forme de l'impulsion en minimisant l'effet capacitif du câble de transmission ;
- L'amplification de l'impulsion en réduisant l'incidence des bruits de différentes origines sur l'impulsion.

L'amplificateur est le bloc électronique qui suit directement le préamplificateur. Son rôle est de convertir les impulsions issues du préamplificateur en impulsions d'amplitude (de 1 à 10V pour les spectromètres ou de 1 à 5V pour les radiamètres) et de forme (la gaussienne ou un signal carré) plus adaptées en vue de leur analyse temporelle ou d'amplitude. Ainsi, l'amplificateur regroupe des circuits :

- De mise en forme du signal par différentiation et intégration ;
- De compensation pôle-zéro du signal (ajustement manuel du signal sur une résistance variable) ;
- De rejet d'empilement d'impulsions etc.

L'amplificateur effectue la mise en forme de l'impulsion provenant du préamplificateur en utilisant un filtre passe-haut CR (circuits différenciateurs) suivi d'un filtre passe-bas RC (circuits intégrateurs) permettant d'obtenir un bon rapport signal sur bruit. Le premier filtre prend plus ou moins la dérivée du signal d'entrée et délivre un signal qui reproduit grossièrement le front de montée de l'impulsion initiale, le second filtre adoucit les défauts de l'impulsion en supprimant les harmoniques de rang élevé. Les impulsions engendrées peuvent être bipolaires, unipolaires, négatives ou positives. Une bonne mise en forme des signaux permet de minimiser les empilements (superpositions d'impulsions) à haut taux de comptage qui viennent perturber le dénombrement des impulsions et la mesure de l'amplitude. L'amplificateur a pour rôle de multiplier dans un rapport donné ajustable, le gain G de l'amplitude du signal qu'il reçoit. La Figure 51 représente le module "RadiationD-v1.1" qui assure le conditionnement du signal issu du détecteur. Ce module électronique est un circuit simplifié qui joue le rôle du préamplificateur et amplificateur réunis. Le module "RadiationD-v1.1" fournit à sa sortie un signal semi-gaussien négatif (voir Figure 53) qui est un signal standard nucléaire, mais non conforme au signal recommandé pour les radiamètres portatifs (signal carré positif) [118]. Pour obtenir un signal carré propre aux dispositifs portatifs de détection des rayonnements ionisants (radiamètre), un multivibrateur monostable jouant le rôle d'un discriminateur (générateur de signal carré 0-5V) a été ajouté au circuit "RadiationD-v1.1". Le multivibrateur monostable a un état stable et il passe à l'état instable pendant une durée T prédéterminée lorsqu'il est déclenché. La période de temps T est déterminée



Figure 51 – Module « RadiationD-v1.1 » (CAJOE)

par la constante de temps RC dans le circuit. Le mode monostable de la minuterie 555 est couramment utilisé pour générer des ondes modulées en largeur d'impulsion (PWM). La Figure 52 est le schéma électrique du 555 Timer câblé en mode monostable. Les broches 8 et 1 du temporisateur 555 sont utilisées pour donner respectivement la puissance V_{cc} et la masse. La broche 4 est la broche de réinitialisation de la minuterie 555, qui est active au niveau bas, elle est donc connectée à V_{cc} pour éviter les réinitialisations accidentelles. La broche 5 est la broche de tension de contrôle utilisée pour fournir une tension de référence externe aux comparateurs internes. Comme il n'est pas utilisé ici, il est mis à la terre via un condensateur C' ($0,01\mu F$) pour éviter les bruits de haute fréquence. Lorsqu'un déclencheur négatif est appliqué sur l'entrée de déclenchement du 555, la sortie passe au niveau haut et le condensateur commence à se charger via la résistance R . Lorsque la tension du condensateur devient supérieure à $2/3V_{cc}$, la sortie passe au niveau bas et le condensateur commence à se décharger via la broche de décharge du 555.

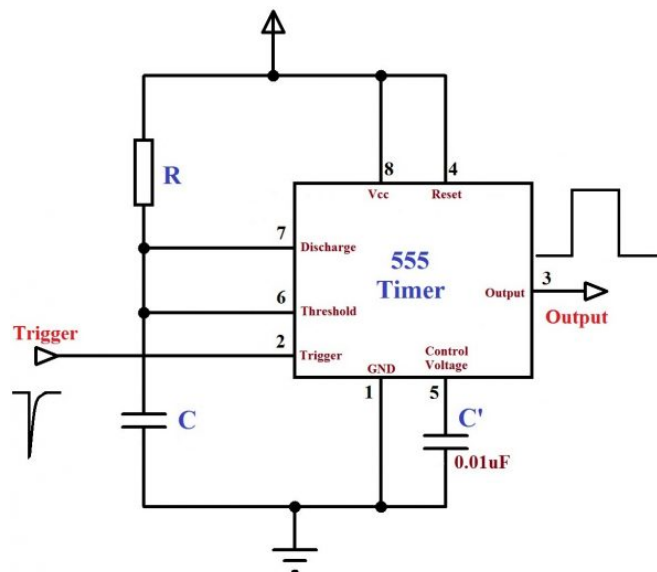


Figure 52 – Multivibrateur monostable

La durée du signal d'impulsion positive de sortie T est donnée par la formule suivante :

$$T = R \times C \times \ln 3 \quad (T = 1,1 \times R \times C) \quad (41)$$

La Figure 53, montre les travaux de mise en forme du signal effectués au laboratoire, en présence du Césium 137 et les signaux observés sur un oscilloscope numérique (Tektronix TDS 2012B, Bicanal, 100MHz, 1 GS/s). Le signal (a) est l'impulsion du détecteur, le (b) est le signal de sortie du module "RadiationD-v1.1" et le (c) est le signal final obtenu à la sortie du multivibrateur monostable. Ce signal carré est très utilisé dans les instruments portables

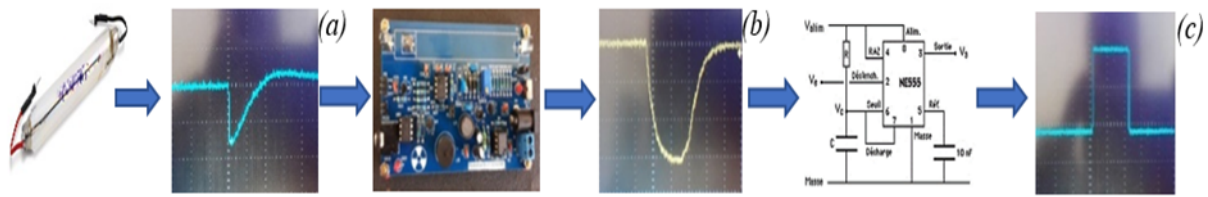


Figure 53 – Traitement et de mise en forme du signal du radiamètre proposé

de radioprotection. Il a un état stable (repos) dans lequel il restera définitivement du fait que l'impulsion négative à son entrée (signal (b)) est maintenue donc la sortie ne pourra pas revenir à son état initial.

2.6 Microcontrôleurs et cartes électroniques programmables

2.6.1 Microcontrôleur ATMEL ATmega 328

Le microcontrôleur ATMEL ATmega328, de la famille AVR (8bits), de processeur RISC à architecture Harvard, associé à la carte programmable Arduino Uno, est utilisé dans ce travail pour analyser les signaux issus des capteurs/détecteurs. Il possède 14 broches d'entrées/sorties numériques (D0 à D13) et 6 broches d'entrées analogiques (A0 à A5). Il stocke le programme de fonctionnement dans sa mémoire et exécute les tâches sollicitées.

Le microcontrôleur fonctionne sous une alimentation de +5V et possède une mémoire Flash (32 Ko), une mémoire RAM (2 Ko), une mémoire EEPROM (1Ko), les registres et la mémoire cache. Il contient au total 23 broches entrées-sorties regroupées en 3 ports (PortB, PortC, PortD), des Timers/Counters : Timer 0 et Timer 2 (comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16 bits). Chaque timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM (6 broches OCxA et OCxB). Ce microcontrôleur a un processeur de 16 MHz, une faible consomma-

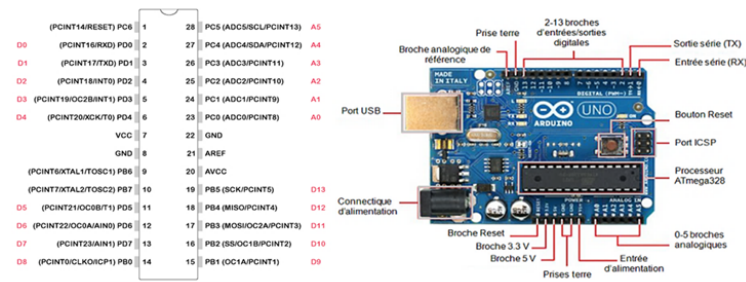


Figure 54 – Microcontrôleur ATmega328 et sa carte Arduino Uno [119]

tion d'énergie qui satisfait les exigences de la réalisation des systèmes embarqués. Certaines broches du microcontrôleur peuvent avoir plusieurs fonctionnalités différentes choisies par la programmation. Elles ont alors plusieurs noms sur le brochage à l'exemple des broches PB1, PB2, PB3, PD3, PD5, PD6 (ou OC0A(PD6), OC0B(PD5), OC1A(PB1), OC1B(PB2), OC2A(PB3), OC2B(PD3)) qui peuvent servir de sortie PWM c'est-à-dire des sorties analogiques. Elles correspondent aux broches 3, 5, 6, 9, 10 et 11 sur la carte Arduino. Les broches du port C peuvent être converties par un convertisseur analogique-numérique avec une résolution de 10 bits. Ces six entrées multiplexées vont du port ADC0(PC0) à ADC5(PC5) (A0 à A5). Le microcontrôleur possède le bus I²C (TWI) qui est exploité via les broches SDA(PC5) et SCL(PC4), un port série (UART) utilisé pour les émissions et réceptions séries via les broches TXD(PD1) / RXD(PD0) [119].

2.6.2 Microcontrôleur ATMEL ATmega 2560

Le microcontrôleur ATMEL ATmega2560, associé à la carte programmable Arduino Méga 2560, est également utilisé dans ce travail pour analyser les signaux issus des capteurs/détecteurs. La carte Arduino Mega 2560 est constituée de 54 broches d'entrées/sorties dont 15 sont utilisables en PWM, de 16 broches d'entrées analogiques, de 4 ports série hardware, d'une connectique USB, d'une connectique d'alimentation, d'un port ICSP et d'un bouton RESET [120, 121]. La programmation des microcontrôleurs ATMEL AVR de la carte Arduino Uno et Arduino Méga, se fait sous le logiciel IDE Arduino, qui fournit un environnement de développement avec un éditeur de source. La communication entre le PC et la carte programmable se fait via un port USB, moyennant l'installation d'un driver adapté. L'outil impose la structuration du programme de façon spécifique avec le compilateur AVR GCC (compilateur C/C++ pour processeur AVR). Le programme principal (fonction main) est imposé non modifiable et les seules parties que l'on développe spécifiquement sont :

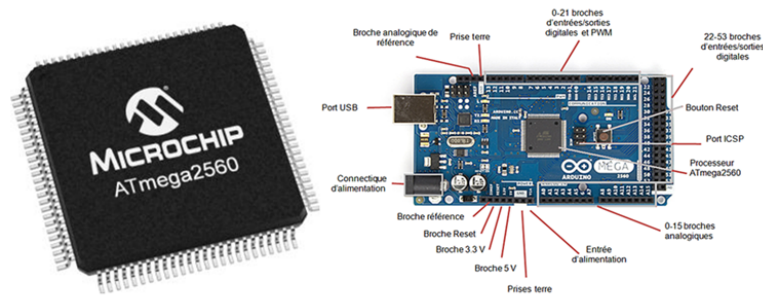


Figure 55 – Microcontrôleur ATMEGA 2560 et Carte Arduino Méga [120]

- La fonction `setup()` qui contient les initialisations (times, interrupts...);
- La fonction `loop()` qui est une fonction répétée indéfiniment.

2.7 Principe de réalisation des dispositifs de mesure des polluants atmosphériques

Les schémas de principe des dispositifs de mesure réalisés dans le cadre de ce travail de thèse comportent tous des organes d'entrée, de sortie, l'unité centrale et les blocs d'alimentation du système.

- Les organes d'entrée sont essentiellement constitués de capteurs qui peuvent être analogiques ou numériques. Chaque capteur dispose généralement d'un circuit électronique de conditionnement du signal qui permet d'éliminer le bruit et améliorer la réponse du capteur ;
- Les organes de sortie sont généralement constitués d'un système d'affichage (écrans ou moniteurs), d'un support de stockage de données numériques, des systèmes d'alertes ou d'appel d'urgence (buzzer, GSM ou GPRS) et des modules de transmissions de données à distance et d'interfaçage dispositif-homme ou dispositif-PC (GSM/GPRS, ZigBee, LoRa, RF 433Mhz, WI-FI...);
- Le bloc d'alimentation produit de l'énergie électrique suffisante pour le fonctionnement du dispositif. Ce bloc peut être une batterie avec une bonne autonomie, un secteur (220V) moyennant un adaptateur secteur ou un système solaire ;
- Le bloc de commande et unité centrale de traitement de données est le moteur du dispositif. Il est constitué d'un processeur informatique relié à des entrées/sorties numériques ou analogiques. Il est capable de mémoriser et d'exécuter des programmes visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties. Il se programme à l'aide d'or-

dinateur et peut fonctionner de manière autonome. Il est généralement associé à une carte électronique programmable qui peut être de la famille Arduino (Uno/Méga), Espressif (ESP32/ESP8266), Raspberry Pi ou FPGA.

Les méthodes de réalisation effectuées dans ce travail de thèse vont de la conception assistée par ordinateur à la simulation du fonctionnement (via les logiciels Fritzing, Proteus, etc.) et la réalisation du schéma bloc du prototype électronique. Enfin la programmation du fonctionnement général du prototype via un logiciel (Arduino, Python, etc.) et les tests de fonctionnement. Ainsi, le premier prototype réalisé dans ce travail de thèse est un dispositif de mesure des polluants atmosphériques. Le schéma synoptique de la Figure 56, montre les détails de l'assemblage des différents composants utilisés. Ce dispositif est composé d'une

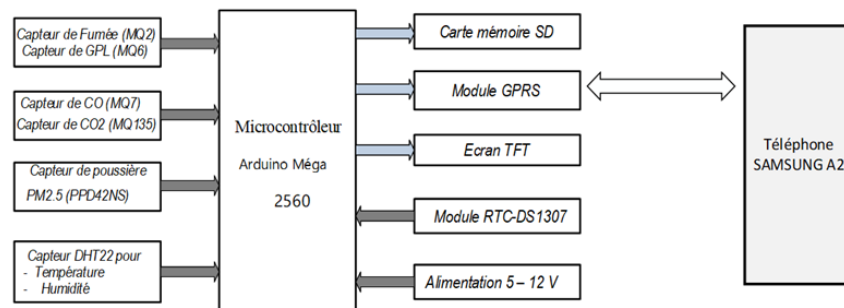


Figure 56 – Schéma synoptique du système de mesure des polluants atmosphériques

carte à microcontrôleur Arduino Méga 2560, d'un module GPRS comme système d'alerte SMS et d'appel d'urgence, d'une horloge temps réel RTC, d'un écran TFT et de plusieurs capteurs, parmi lesquels le capteur MQ2 de fumée, MQ6 de gaz de pétrole liquéfié (GPL), MQ135 de dioxyde de carbone (CO_2), MQ7 de monoxyde de carbone (CO), DHT22 de température et humidité et le capteur PPD42NS de particule matière ($PM_{2,5}$). Il dispose également d'un système de stockage automatique, sous fichier *CSV* (Excel), des données numériques issues des capteurs. De manière générale, la carte à microcontrôleur Atméga 2560 et la carte GPRS sont utilisées pour leur simplicité et leur haute performance dans le développement des systèmes embarqués. Ensemble, ils permettent d'établir un lien entre le dispositif et l'opérateur via les SMS d'alerte ou des appels d'urgence. L'interconnexion des différentes broches entre les capteurs et la carte à microcontrôleur est donnée par le Tableau 11 et la Figure 57 présente sa réalisation pratique.

Les travaux informatiques et expérimentaux ont été réalisés sur un PC COMPAQ Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU T7100 $1,8 \times 2$ GHz, 4 Go de mémoire avec un système d'exploitation Windows 10, 64 bits et simulés sous le logiciel de programmation Arduino IDE dont

Tableau 11 – Interconnexion entre les capteurs et la carte à microcontrôleur Atmega 2560

Composant connecté	MQ2	MQ6	MQ7	MQ135	PPD42NS	RTC	Carte SD
Brochage du composant	Sortie analogique	Sortie analogique	Sortie analogique	Sortie analogique	Sortie ($PM_{2,5}$)	Sorties SCL et SDA	Sorties : CS, SCK, MOSI et MISO
Brochage du microcontrôleur Atmega 2560	Entrée A8	Entrée A9	Entrée A10	Entrée A11	Entrée D22	Entrées SCL (21) et SDA (20)	Connectées respectivement aux entrées : D53, D52, D51, D50

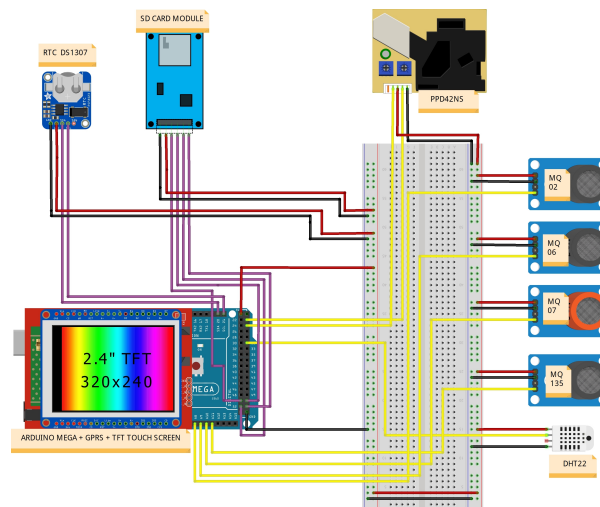


Figure 57 – Schéma d'interconnexion du prototype de mesure des polluants (Fitzing)

l'organigramme algorithmique (Figure 58) et l'algorithme de fonctionnement sont présentés.

Le second dispositif réalisé est un appareil qui permet de mesurer les polluants responsables de la qualité de l'air. Il est composé d'une carte à microcontrôleur Atméga 328P, d'un module XBee S2C de transmission sans fil de données, d'une source d'alimentation, d'un écran LCD, d'un support de carte mémoire et de plusieurs capteurs dont le capteur d'ozone (MQ131), de dioxyde de soufre (SPEC), de monoxyde de carbone, de dioxyde d'azote (CJMCU-6814), de température et d'humidité (DHT22) ainsi que le capteur de poussière (PPD42NS). La Figure 59 présente le schéma d'assemblage des différents modules du dispositif.

Parmi les différents modules de sortie de ce dispositif, se trouvent les modules de transmission sans fil Xbee émetteur et récepteur qui sont les principaux modules électroniques

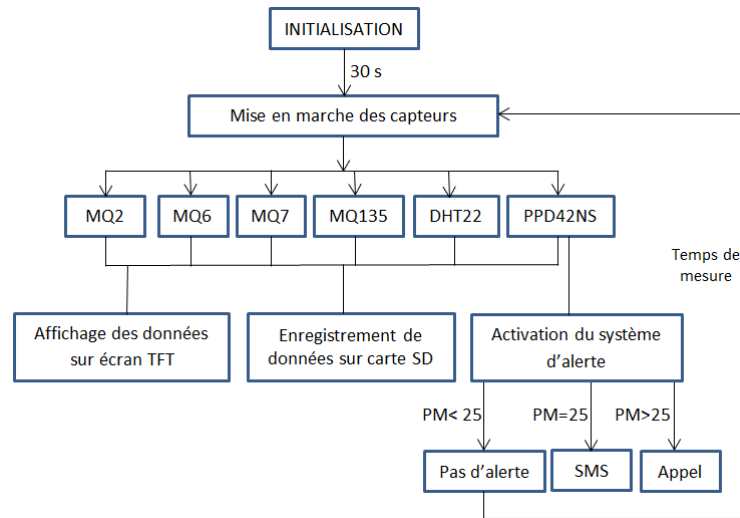


Figure 58 – Organigramme algorithmique du prototype de mesure des polluants

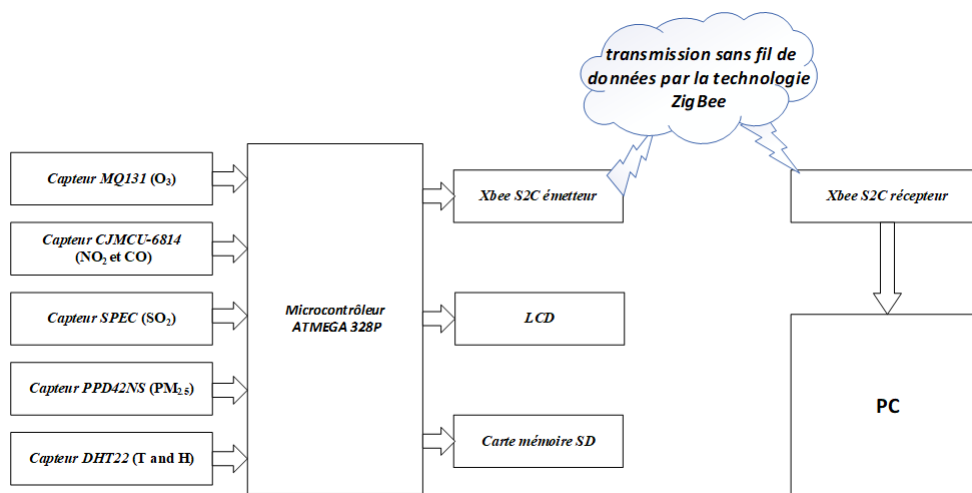


Figure 59 – Schéma synoptique du système de surveillance de la qualité de l'air

Algorithme du dispositif de mesure des polluants atmosphériques

Loop

// Capteurs de particules matières : PPD42NS //

SampleTime = 30 : Temps d'échantillonnage**If** *CurrentTime* > *SampleTime* **then***Duration* = *PulseIn*(*Pin*, *LOW*) // Initialisation du compteur de temps en μsec //*LPO* = *LPO* + *Duration* // Compteur //*Ratio* = *LPO* / (*SampleTime* × 10)*k1* = $1,1 \times \text{Ratio}^3$ *k2* = $-3,8 \times \text{Ratio}^2$ *k3* = $520 \times \text{Ratio}$ *ConcentrationPM_{2,5}* = $0,62 + k1 + k2 + k3$ **End if**

// Module GPRS //

If *ConcentrationPM_{2,5}* == 25 **then**

AT+CMGF = 1 \ r // Définir le modem GSM en mode SMS//

AT + CMGS = \ numero de téléphone \ //Envoyer un SMS au téléphone//

Message du GPRS au numéro de téléphone

Else if *ConcentrationPM_{2,5}* > 25

ATD ++ numero de téléphone // Composer et appeler le numéro de téléphone//

Appel du GPRS au numéro de téléphone

End if

// Capteurs de gaz : MQ2, MQ6, MQ7, MQ135 //

Begin*Volt* = *Valeur* / 1024 × 5.0 // Valeur = données analogiques détectées//*R_s* = $(5.0 - \text{volt}) / \text{volt}$ // *R_s* Résistance interne du capteur MQ//*ratio* = *R_s* / *R₀* // *R₀* Résistance interne du capteur à la calibration//*m* = $(\log(F1/F0)) / (\log(x1/x0))$ // *m* = Pente de la droite du gaz à mesurer//*k* = $F0/x_0^m$ // *k* = Constante//*x* = ratio/k ppm = x^m // Concentration du gaz en ppm//**End****End loop**

de la technologie ZigBee, ils sont utilisés dans ce travail pour assurer la fonction IoT. Ils effectuent la transmission en temps réel, des données de l'appareil de mesure vers un PC distant. La portée entre l'émetteur et le récepteur dépend de la capacité des modules (Xbee S1, S2, S2C...) et peut atteindre 1200 m (Xbee S2C). Le manque de librairie (Fritzing et Proteus) des capteurs d'ozone (MQ131), de dioxyde de soufre (SPEC), de monoxyde de carbone et de dioxyde d'azote (CJMCU-6814) ne permet pas la réalisation du schéma pratique d'interconnexion de cet appareil mais l'interfaçage entre les broches du capteur et celles de la carte programmable est présenté par le Tableau 12 et la Figure 60 est l'organigramme algorithmique du dispositif. Les travaux de programmation informatique et expérimentaux ont été réalisés sous l'IDE Arduino et l'algorithme du programme de fonctionnement du dispositif est présentés.

Tableau 12 – Interconnexion entre les capteurs et la carte à microcontrôleur Atmega 328P

Composant connecté	MQ131	CJMCU 6814	SPEC	PPD42NS	XBee	Carte SD	LCD
Brochage des composants connectés	Sortie analogique	Sorties analogiques	Sortie analogique	Sortie ($PM_{2.5}$)	Sortie TX	Sorties : CS, SCK, MOSI et MISO	Sorties SCL et SDA
Brochage du microcontrôleur Atmega 2560	Entrée A2	Entrée A0 et A1	Entrée A3	Entrée D5	Entrée D1 (TX)	Connectées respectivement aux entrées : D10, D13, D11, D12	Entrées SCL (ou A5) et SDA (ou A4)

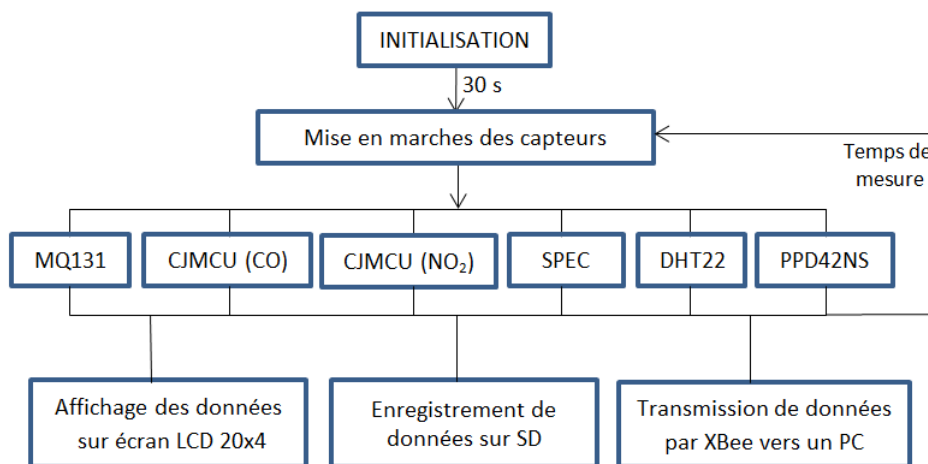


Figure 60 – Organigramme algorithmique du système de surveillance de la qualité de l'air

Algorithme du dispositif de mesure de la qualité de l'air

Loop

// Capteurs de particules matières : PPD42NS //

SampleTime = 30 : Temps d'échantillonnage**If** *CurrentTime* > *SampleTime* **then***Duration* = *PulseIn*(*Pin*, *LOW*) //Initialisation du compteur de temps en μsec //*LPO* = *LPO* + *Duration* // Compteur//*Ratio* = *LPO* / (*SampleTime* × 10) $k1 = 1,1 \times \text{Ratio}^3$ $k2 = -3,8 \times \text{Ratio}^2$ $k3 = 520 \times \text{Ratio}$ *Concentration* $PM_{2.5} = 0,62 + k1 + k2 + k3$ **End if**

// Capteurs de gaz : MQ131 //

Begin*Volt* = *Valeur* / 1024 × 5.0 // Valeur = données analogiques détectées// $R_s = (5.0 - \text{volt}) / \text{volt}$ // R_s Résistance interne du capteur MQ131// $\text{ratio} = R_s / R_0$ // R_0 Résistance interne du capteur à la calibration// $m = (\log(F1/F0)) / (\log(x1/X0))$ // m = pente de la droite du gaz à mesurer// $k = F0/x_0^m$ // k = constante// $x = \text{ratio} / K$ *ppm* = x^m // Concentration de gaz du capteur MQ131 en ppm//**End**// Capteurs de gaz : CJMCU 6814 de CO et NO₂ //**Inputs :***Lecture CO* = Valeur analogique de CO, *Lecture NO₂* = Valeur analogique de NO₂*Valeur max analogique* = 1023.0**Outputs :***CO*, *NO₂***Begin***CO* = 0.05 + *Lecture CO* × (10 - 0.05) / *Valeur max analogique*)*NO₂* = 1 + *Lecture NO₂* × (1000 - 1) / *Valeur max analogique*)**End**// Capteurs de gaz : SPEC de SO₂ //*sensorValue* = 0, *V_{air-pur}* = 0, *V_{gaz}* = 0, *M* = 0, *SO₂* = 0 // Initialisations//*Code sensibilit* = 39.47, *Gain* = 100 // Sensibilité et gain du capteur SO₂//**if** *M* == *code sensibilit* × *Gain* × 10⁽⁻⁹⁾ × 10⁽³⁾ **then** // Facteur d'étalonnage// $K = 1/M$ *SO₂* = $k \times (V_{\text{gaz}} - V_{\text{air-pur}})$ // Concentration de SO₂//**End if**

// Module XBEE émetteur //

If *Concentration* $PM_{2.5}$ == 0,62 + $k1 + k2 + k3$ *CO* == 0.05 + *Lecture CO* × (10 - 0.05) / *Valeur max analogique**NO₂* == 1 + *Lecture NO₂* × (1000 - 1) / *Valeur max analogique**ppm* == x^m // Concentration de gaz du capteur MQ131//*SO₂* == $k \times (V_{\text{gaz}} - V_{\text{air-pur}})$ *Tx* = Transmission de données vers un PC distant**End if****End loop**

2.8 Principe de réalisation des dispositifs de détection des rayonnements ionisants

Une chaîne de détection nucléaire est composée d'un détecteur, d'un préamplificateur, d'un amplificateur, d'un analyseur de signal (système à microcontrôleur) et d'un système d'affichage (de spectre ou données numériques). L'ensemble réunit deux domaines d'électronique à savoir l'électronique analogique (conditionnement du signal) qui traite le signal du détecteur tout en conservant l'information portée par l'impulsion (tension ou courant) et l'électronique numérique (analyseur) qui transforme cette information en une valeur numérique exploitable [122]. Dans le cadre de ce travail, l'assemblage des modules électroniques utilisés a donné naissance à la chaîne de détection nucléaire de la Figure 61. Le dispositif est constitué d'une carte à microcontrôleur Arduino Uno, d'un détecteur à tube Geiger-Müller, d'un circuit électronique de traitement et de mise en forme du signal, d'un afficheur, d'un support de carte mémoire et d'un module émetteur XBee. Le détecteur est le seul organe d'entrée qui communique avec le microcontrôleur alors qu'à la sortie du dispositif nous avons l'écran LCD, le support de stockage de données numériques et le composant IoT (émetteur XBee) de la technologie ZigBee. L'analyseur est un circuit composé uniquement de la carte

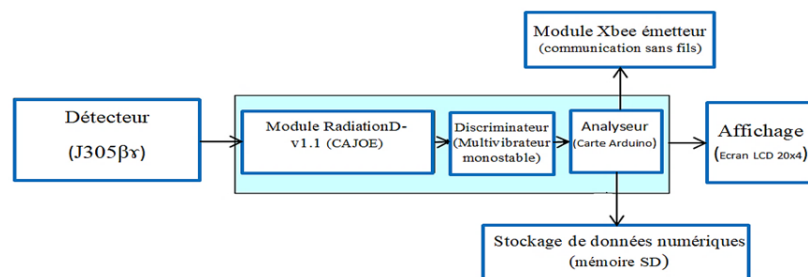


Figure 61 – Chaîne électronique du radiamètre développé

à microcontrôleur ATmega328P de la plate-forme Arduino Uno. La carte effectue un travail de conversion analogique-numérique du signal issu du discriminateur. Elle effectue l'analyse du signal, calcul la fréquence des particules détectées, convertie cette fréquence en nombre de comptes par minute (cpm) puis en débit de dose suivant l'équation :

$$\text{Débit de dose} = \text{Facteur de conversion}(FC) \times \text{Compte Par Minute (cpm)} \quad (42)$$

Le débit de dose des rayonnements ionisants en $\mu\text{Sv/h}$ et $FC = 0,00812 \mu\text{Sv/hr/cpm}$. Le module XBee de communication sans fil fabriqué par la société Digi International utilise la

technologie ZigBee basée sur la norme IEEE 802.15.4 de fréquence 2,4 GHz. Les modules XBee facilitent la transmission de données entre le dispositif électronique de mesure et un ordinateur distant via un émetteur, un récepteur et une application (XCTU, Téra-Term) installée sur PC. Ces modules sont utilisés ici pour des modalités de sécurité. Ils permettent de ne pas exposer l'utilisateur à des doses radioactives durant la mesure. Le système d'affichage peut être soit un écran LCD ou un ordinateur et à travers les informations affichées on peut déterminer la nature du dispositif réalisé :

- Un flux de particules : le dispositif réalisé est un compteur ;
- Une énergie des particules : le dispositif est un spectromètre ;
- Une dose absorbée ou un débit de dose absorbée : il s'agit d'un dosimètre, débitmètre ou d'un radiamètre (Figure 61).

Le Tableau 13 présente l'interfaçage entre les composants utilisés et le microcontrôleur Atmega 328P. Le circuit d'interconnexion des différents composants (Figure 62), l'organigramme algorithmique (Figure 63) et les travaux informatiques sous l'IDE Arduino ont été réalisés et présentés.

Tableau 13 – *Interconnexion entre les capteurs et la carte à microcontrôleur Atmega 328P*

Composant connecté	Module de détection	Module XBee	LCD	Carte SD
Brochage des composants connectés	Sortie du signal	Sortie TX	Sorties SCL et SDA	Sortie : CS, SCK, MOSI et MISO
Brochage du microcontrôleur Atmega 2560	Entrée D2	Entrée D1(ou TX)	Entrées SCL (ou A5) et SDA (ou A4)	Connectées respectivement aux entrées : D10, D13, D11, D12

Le dispositif réalisé est étalonné en présence d'une source radioactive gamma du Cs-137 de rayonnement électromagnétique 661,6 keV, dans le but de retrouver la nouvelle valeur du facteur de conversion (FC). En faisant varier la distance entre la source et le détecteur (voir Figure 64(a)), le nombre de comptage et le débit de dose sont relevés et représentés sur la Figure 64(b).

$$\text{Facteur de conversion (FC)} = \frac{\text{Débit de dose}}{\text{Compte Par Minute}(cpm)} \quad (43)$$

La droite de régression de la Figure 64(b) présente un bon coefficient de corrélation ($R^2=1$) et les valeurs de la dose absorbée varient de 0 à 350 $\mu\text{Sv/h}$. Le coefficient directeur de

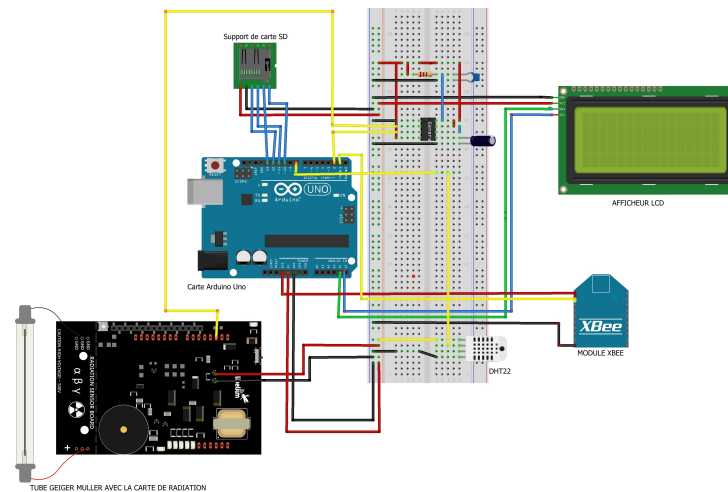


Figure 62 – Schéma d'interconnexion du radiamètre réalisé

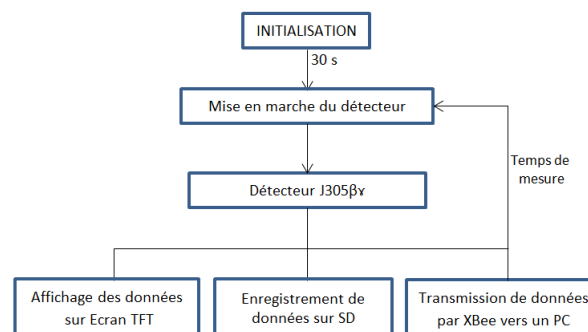


Figure 63 – Organigramme algorithmique du radiamètre réalisé

Algorithme de fonctionnement du radiamètre développé

Loop

Inputs :

$FC = 0.00667$ // Facteur de Conversion du détecteur //

$CNT = 0$ // Count//

$CPM = 0$ // Count Per Minute//

$t = 0$ // Temps de comptage en seconde//

For $t \geq 60$

$CPM = CNT \times 60$ // Nombre de comptages par minute//

$dose = CPM \times FC$ // Débit de dose ambiante//

End

// **Module XBEE émetteur** //

If $CPM == CNT \times 60$

$dose = CPM \times FC$

$Tx =$ transmission de données

End if

End loop

la droite de régression $FC = 0,0081 \mu\text{Sv/h/cpm}$, représente le nouveau Facteur de Conversion du détecteur $J305\beta\gamma$.

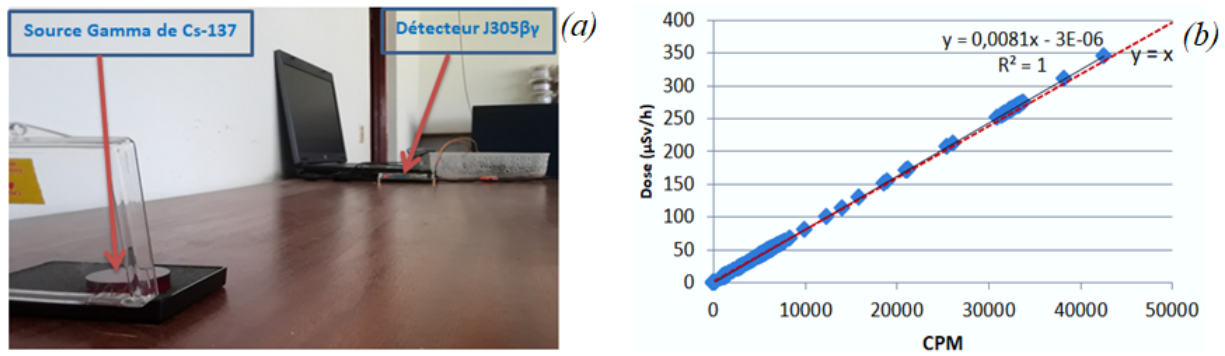


Figure 64 – Etalonnage du détecteur Geiger-Muller en présence de césium 137

2.9 Configuration des modules Xbee de transmission sans fil

Il faut configurer les modules Xbee pour effectuer la transmission sans fil de données. Pour cela, il convient de passer en mode « commande », de leur envoyer des ordres de configuration, puis de procéder à l'écriture de cette suite de paramètres dans leur mémoire. Il existe deux moyens pour effectuer cette opération : soit utiliser un logiciel émulateur de terminal tel que l'hyperterminal de Windows, soit utiliser le logiciel dédié appelé X-CTU (Figure 65 et 66). Ce dernier est fourni gratuitement par le fabricant des modules, il permet de lire et de configurer tous les modèles de Xbee. Le module Xbee se conforme à la spécification 802.15.4 et supporte aussi bien l'adressage court sur 16 bits que l'adressage long sur 64 bits [123]. Une adresse unique est assignée à chaque module lors de la fabrication et peut être lue aux moyens des commandes SL (Serial number Low) et SH (Serial number High). Un module utilisera son adresse unique sur 64 bits si la valeur de son adresse source sur 16 bits est configurée à 0xFFFF ou 0xFFFFE. Pour envoyer un paquet de données à un module, en utilisant son adresse sur 64 bits, il suffit de configurer l'adresse de destination du module émetteur (DL + DH, adresse basse + adresse haute) avec l'adresse source du module récepteur (SL + SH) [123]. Pour envoyer un paquet de données à un module en utilisant cette fois un adressage court sur 16 bits, il convient de paramétrer l'adresse de destination (DL, adresse basse) du module émetteur avec la valeur du paramètre MY (sur X-CTU) du destinataire et de configurer l'adresse haute (DH) à 0 [124].

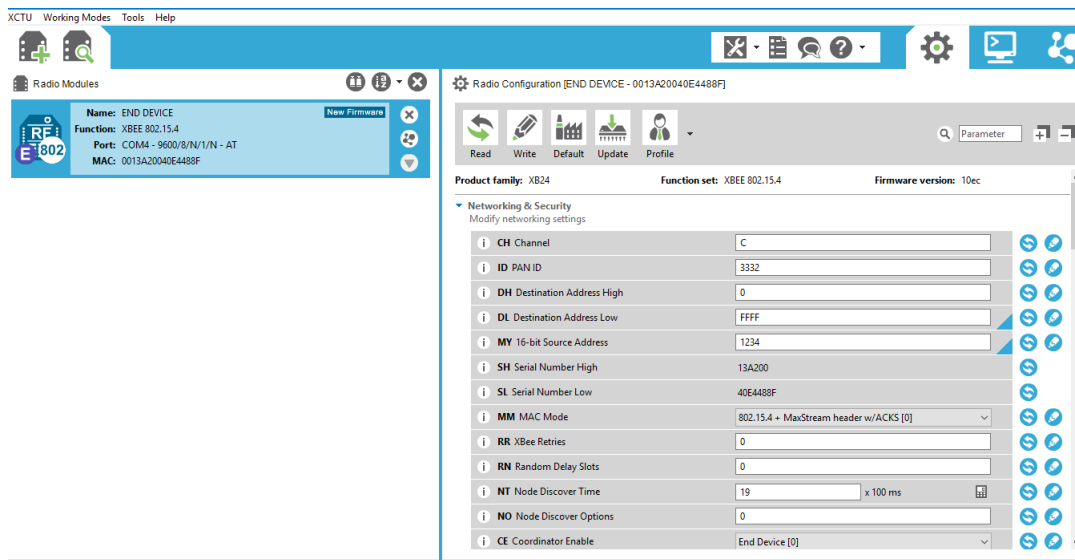


Figure 65 – Configuration du module Xbee émetteur (End device)

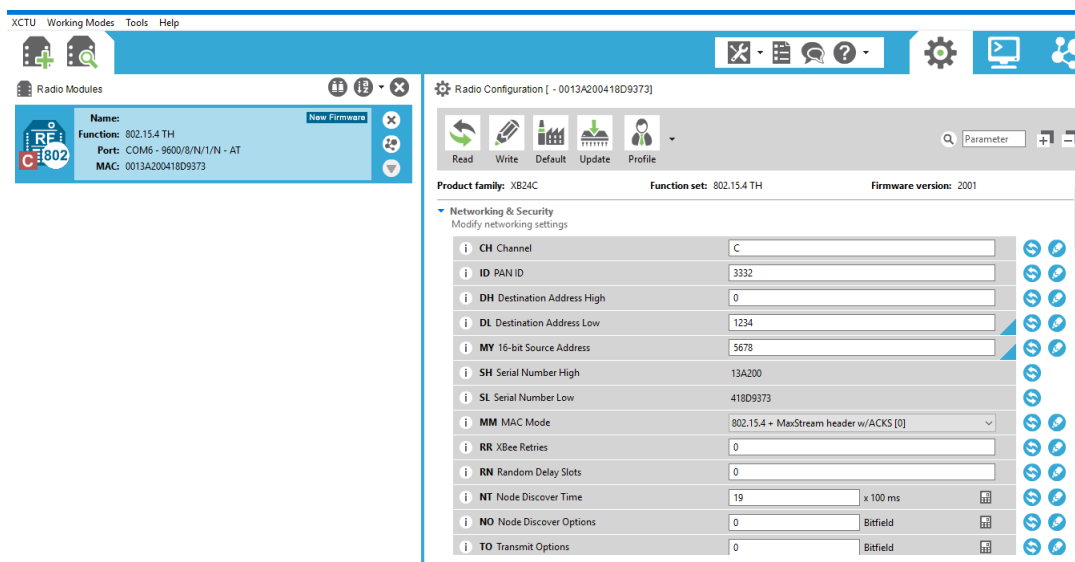


Figure 66 – Configuration du module Xbee récepteur (Coordonnator)

2.10 Méthodes d'analyse et d'interprétation des résultats de la surveillance environnementale

La surveillance environnementale prend en compte la pollution atmosphérique et la radioactivité environnementale. Ainsi, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini les particules fines ($PM_{2,5}$) / particules grosses (PM_{10}), le dioxyde d'azote (NO_2), l'ozone troposphérique (O_3), le dioxyde de soufre (SO_2) et le monoxyde de carbone (CO) comme polluants dangereux et responsables de la qualité de l'air [125, 126]. Le Tableau 14 donne les concentrations de référence (OMS) à partir desquelles, la qualité de l'air est considérée

comme "mauvaise".

Tableau 14 – Valeurs de référence de l’OMS pour la qualité de l’air (intérieur et extérieur)

Polluant	Type de mesure	Valeur de référence OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Particules fines ($PM_{2,5}$)	Moyenne journalière (24h)	25
Particule grosses (PM_{10})	Moyenne journalière (24h)	50
Ozone (O_3)	Moyenne sur horaire (8h)	100
Dioxyde de soufre (SO_2)	Moyenne journalière (24h)	20
Dioxyde d’azote (NO_2)	Moyenne annuelle	40
Monoxyde de carbone (CO)	Moyenne journalière (24h)	7000

Dans la radioactivité environnementale par contre, le seuil annuel d’exposition au débit de dose ambiante, inscrit dans la réglementation nationale en matière de radioprotection est de 1 mSv/an.

2.10.1 Indice de la qualité de l’air (IQA)

L’indice de la qualité de l’air est un indicateur quotidien destiné à fournir des informations synthétiques sur la qualité de l’air d’une localité. Il s’obtient en utilisant l’équation 51 sur les cinq polluants recommandés par l’OMS.

$$IQA_{\text{sous-indice}} = \left(\frac{\text{Mesure}_{\text{moyenne-journalière}}}{\text{Valeur de référence}} \right) \times 50 \quad (44)$$

La mesure du polluant et la valeur de référence doivent avoir la même unité ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou partie par million (ppm)). La valeur la plus élevée des cinq sous-indices obtenus représente automatiquement l’indice de la qualité de l’air de la localité. Pour faciliter l’appréciation du niveau de la qualité de l’air, les pays comme la Chine, les Etats-Unis et le Canada ont défini 6 niveaux d’indice de la qualité de l’air à savoir ; Très Bon, Bon, Modérer, Mauvais pour les personnes sensibles, Mauvais pour la santé et Très Mauvais, avec des seuils qui varient de 0 à 500 (ou plus).

Tableau 15 – Indice et appréciation de la qualité de l’air [127]

Valeurs de l’IQA	Appréciation
De 0 à 50	Très Bon
De 51 à 100	Bon
De 101 à 150	Modérer
De 151 à 200	Mauvais pour les personnes sensibles
De 201 à 300	Mauvais pour la santé
De 301 à 500	Très Mauvais

2.10.2 Indice de l'air santé ou «Air Quality Health Index (AQHI)»

L'indice de l'air santé développée par Dias et al., [25, 127] représente l'impact des effets nocifs de la pollution sur la santé après une longue exposition aux polluants atmosphériques. Il prend en compte les polluants tels que l'ozone (O_3), les particules $PM_{2,5}$ ($AQHI_{2,5}$) ou PM_{10} ($AQHI_{10}$) et le dioxyde d'azote (NO_2). Il s'évalue suivant l'équation 45 :

$$AQHI_{2,5} = \frac{10}{10,4} \times [100 \times ((e^{0,000871 \times NO_2} - 1) + (e^{0,000537 \times O_3} - 1) + (e^{0,000487 \times PM_{2,5}} - 1))] \quad (45)$$

Avec O_3 et NO_2 en ppb, $PM_{2,5}$ en $\mu g/m^3$ et $AQHI_{2,5}$ sans unité. L'indice de l'air santé varie de 0 à 10+ (voir Tableau 16) avec les degrés de risque sanitaire correspondant.

Tableau 16 – *Indice de l'air santé [127]*

Catégorie de Risque Sanitaire	FAIBLE	MODERE	ELEVE	TRES ELEVE	GRAVE
$AQHI_{2,5}$ ou 10	0 - 3	4 - 6	7	8 - 10	10+

2.11 Conclusion

En somme, il était question de présenter dans ce chapitre les modules électroniques utilisés pour la réalisation des dispositifs de mesure, les méthodes de développement de ces dispositifs. Il en ressort que les capteurs électroniques suscitent de nos jours un véritable engouement lié à l'émergence des cartes à microcontrôleur, facilitant le développement de dispositifs électroniques portables. Ces dispositifs développés permettent de connaître en temps réel la qualité de l'air et le débit de dose ambiante.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

L'objectif principal de cette thèse est la conception et le développement des dispositifs électroniques à faible coût dédiés à la surveillance environnementale (rayonnements ionisants et qualité de l'air). Ce chapitre présente les dispositifs réalisés et leur application dans la mesure des polluants atmosphériques, l'évaluation de la qualité de l'air et la détection des rayonnements ionisants afin d'observer l'apport des nouvelles technologies à faible coût dans le domaine de la surveillance environnementale. Car ce domaine connaît de nos jours une forte exploration grâce à l'émergence des capteurs et cartes programmables, qui facilitent la réalisation des dispositifs de mesure moyennant une bonne maîtrise de l'électronique et de l'informatique.

3.2 Appareils électroniques de surveillance environnementale réalisés et applications

3.2.1 Dispositifs de mesure des polluants atmosphériques avec système d'alerte SMS et appel d'urgence

a) Présentation du dispositif réalisé

Le dispositif de mesure des polluants atmosphériques développé est un appareil qui possède en entrée différents capteurs parmi lesquels le capteur de monoxyde de carbone qui est un gaz toxique dont le seuil acceptable selon l'OSHA est de 9 ppm (seuil maximal de *CO* intérieur recommandé) et 50 ppm (exposition maximale autorisée sur les lieux de travail) [128–130]. La carte Arduino Méga 2560 est l'unité centrale du dispositif, dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL ATMega 2560 qui assure le traitement, l'analyse et l'échantillonnage des signaux provenant des différents capteurs. L'appareil présente à sa sortie un écran TFT qui affiche les données en temps réel, la carte mémoire SD et le module GPRS qui assure l'interfaçage homme-dispositif en cas de nécessité.

Le prototype final du dispositif est présenté par la Figure 67.

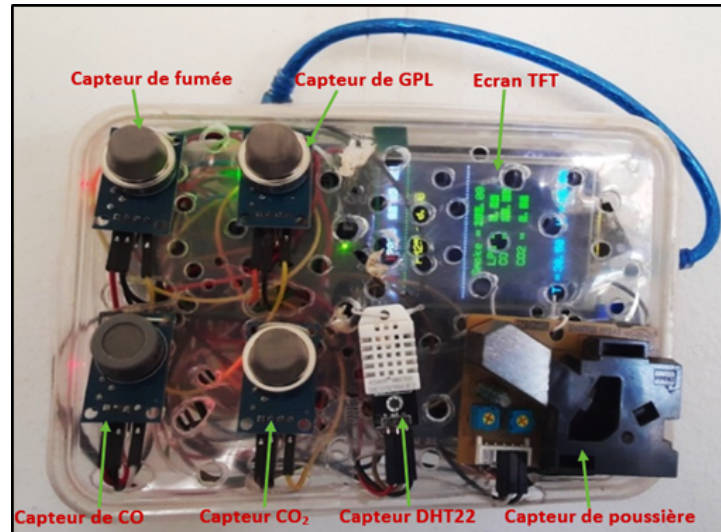


Figure 67 – Dispositif de mesure des polluants atmosphériques réalisé

Pour vérifier la fonctionnalité du GPRS plusieurs tests ont été réalisés en prenant comme élément de contrôle la concentration des $PM_{2,5}$ dans l'air, avec un seuil expérimental fixé à $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Un SMS d'alerte est alors envoyé à l'utilisateur via son téléphone portable lorsque la concentration des $PM_{2,5}$ au point de mesure atteint le seuil défini. La Figure 68(a) présente les messages d'alerte envoyés à l'opérateur quand le $PM_{2,5}$ atteint $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lorsque cette valeur seuil persiste ou augmente, le GPRS émet un appel d'urgence (Figure 68(b)). La concentration seuil utilisée dans le dispositif final est la valeur de référence OMS ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [131].

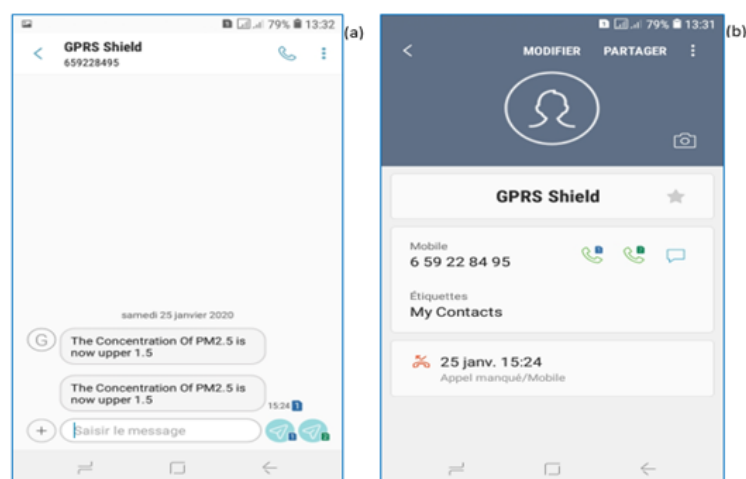


Figure 68 – Réception des SMS d'alerte et appel d'urgence du GPRS

Les résultats obtenus durant ce test de fonctionnement et enregistrés dans la carte mémoire du dispositif sont présentés dans le Tableau 17. Nous pouvons observer que

c'est à partir de la quatrième valeur $1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la colonne des $PM_{2,5}$ que le GPRS réagit vers l'opérateur. Et cette communication unidirectionnelle s'arrête à la septième concentration $0,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du $PM_{2,5}$. Les concentrations des autres gaz et paramètres sont également enregistrées.

Tableau 17 – Extrait du fichier enregistré dans la carte SD du dispositif

Date et heure	$PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SMOKE (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	LPG (ppm)	Température (°C)	Humidité %
25/01/2020 15 :18	0,77	300	90,5	3,99	6	28,1	45
25/01/2020 15 :20	0,76	230	89	3,89	7	28,1	45
25/01/2020 15 :22	1,02	298	91,26	3,87	7	28,1	45
25/01/2020 15 :24	1,8	303	91,26	4,11	4	28,1	45
25/01/2020 15 :26	2,03	303	50	4,11	5	28,1	45
25/01/2020 15 :28	1,5	303	91,26	2,07	5	28,1	45
25/01/2020 15 :30	0,72	303	73	1,97	6	29,9	43
25/01/2020 15 :32	0,89	260	73	2,17	5	29,9	43
25/01/2020 15 :34	1	297	73	2,34	9	29,9	43

Cet appareil électronique portable présente plusieurs avantages à savoir la faible consommation énergétique, le faible coût par rapport à l'appareil de référence utilisé et la mesure de plusieurs polluants en temps réel (voir Tableau 23). Il comporte un système d'alerte GPRS, qui permet au dispositif d'assurer la fonction Internet des Objets en interagissant avec l'opérateur via des SMS et appel d'urgence. Il est très utile pour la surveillance environnementale des polluants atmosphériques.

b) Utilisation du dispositif pour la surveillance des polluants atmosphériques

Le dispositif de surveillance réalisé est utilisé pendant deux mois, du 04 Décembre 2019 au 30 Janvier 2020 dans la localité de Nkolbisson à Yaoundé, pour la mesure des gaz toxiques (GPL , CO , CO_2 et la Fumée), des paramètres atmosphériques (Température et Humidité) et les Particules Matières ($PM_{2,5}$). Les conditions atmosphériques durant la période de mesure étaient constituées de vent, de poussière, de brouillard et de journées ensoleillées. Les mesures se sont effectuées en utilisant au même moment et même endroit le dispositif électronique développé et l'appareil de référence des $PM_{2,5}$; l'échantillonneur d'air Gent Sampler (voir chapitre I paragraphe 1.8.2 a) afin de procéder à une étude comparative des deux appareils. Ces appareils tels qu'illustrés par la Figure 69 ont fonctionné durant toute la période des mesures et ont permis d'obtenir les concentrations de $PM_{2,5}$ de deux manières différentes. Les différentes concentrations des gaz toxiques et paramètres atmosphériques issus du dispositif réalisé sont traitées et représentées par les Figures 70, 71, 72, 73, 74 et 75. Les paramètres at-



Figure 69 – Systèmes de mesure installés sur le terrain et Zoom du dispositif proposé

mosphériques étudiés sont certes des paramètres de confort (température et humidité) mais peuvent être nuisibles pour la santé à une certaine concentration. Les différentes concentrations moyennes, maximales et minimales des polluants obtenues quotidiennement permettent d'apprécier non seulement le fonctionnement du dispositif réalisé mais aussi de connaître le comportement de chaque gaz mesuré dans la localité durant la période d'échantillonnage. Ainsi, pour les éléments représentés à savoir la fumée (Figure 70), le GPL (Figure 71), le CO (Figure 72), le CO_2 (Figure 73), la Température (Figure 74) et l'humidité (Figure 75), les courbes en rouge représentent les concentrations maximales du gaz atteintes par jour, les courbes en bleu sont les concentrations moyennes journalières et les courbes en vert sont les concentrations minimales du gaz obtenues quotidiennement.

Durant la période d'échantillonnage, nous observons à travers ces différentes Figures que les concentrations de la fumée (Figure 70) sont comprises entre 200 et 350 ppm excepté le dernier jour où la concentration maximale atteint la valeur de 500 ppm . Pour le GPL (Figure 71) à l'exception du 06/12/2019 où nous observons un pic de concentration maximale de 120 ppm , toutes les concentrations sont restées inférieures à 20 ppm . Les concentrations de CO (Figure 72) restent continuellement croissantes de 15,98 ppm le 08/12/2019 à 285,55 ppm le 30/01/2020. Ceci est un danger car le CO est un gaz très toxique. Les concentrations de CO_2 (Figure 73) restent inférieures à 20 ppm et présentent deux pics de concentrations maximales de 60,94 ppm (06/12/2019)

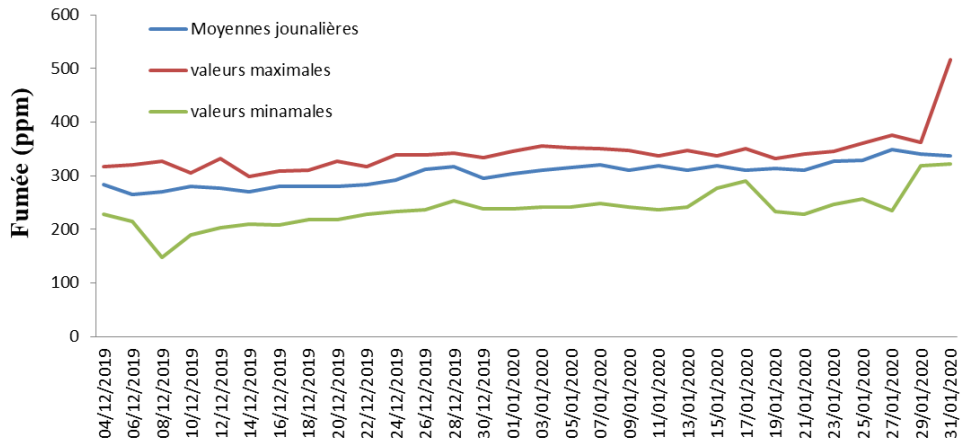


Figure 70 – Variations temporelles des concentrations de la fumée

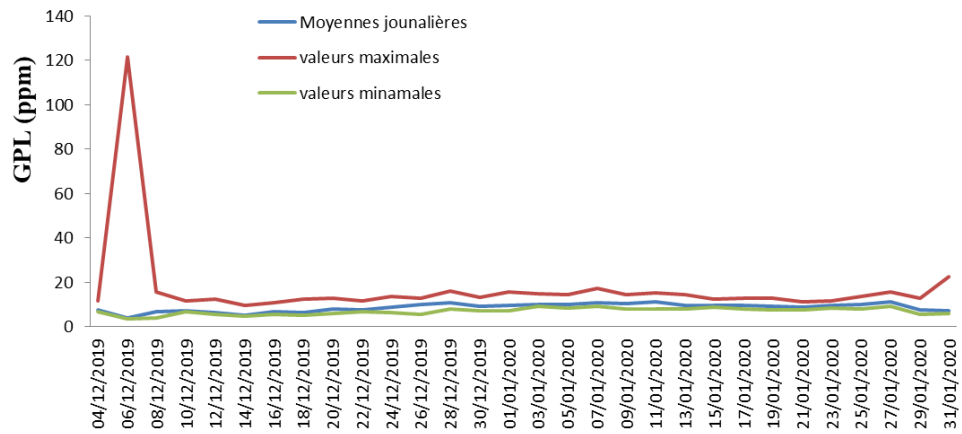


Figure 71 – Variations temporelles des concentrations de GPL

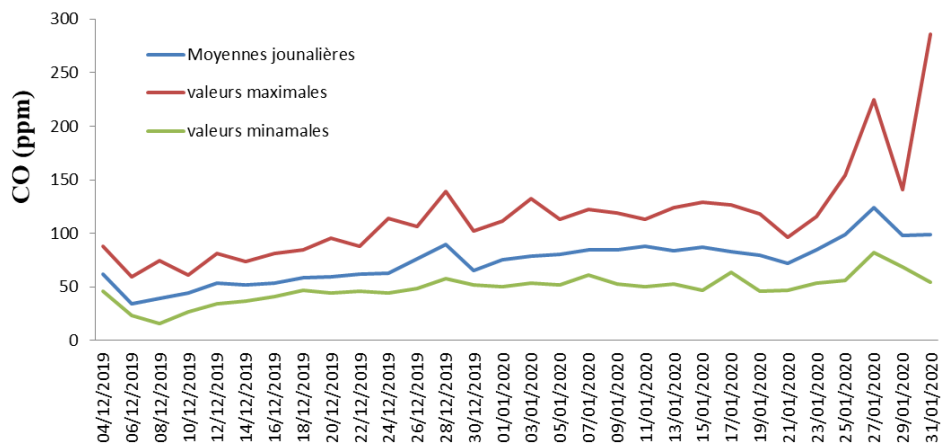


Figure 72 – Variations temporelles des concentrations de CO

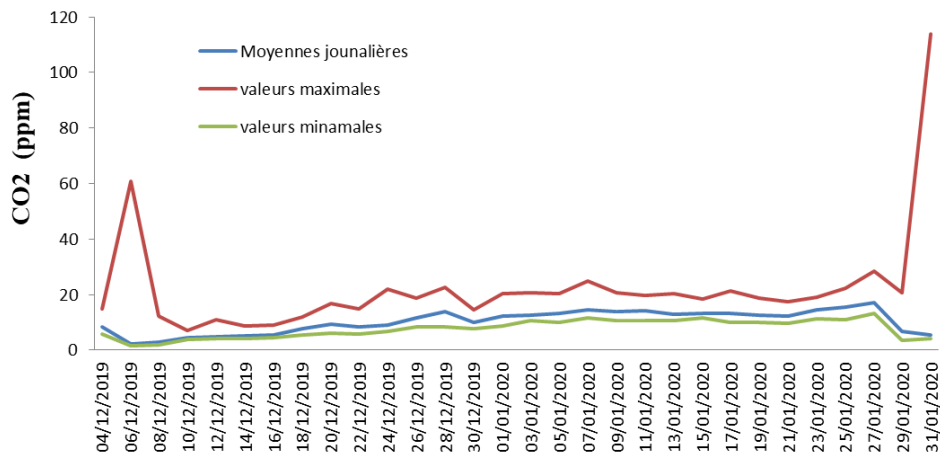


Figure 73 – Variations temporelles des concentrations de CO_2

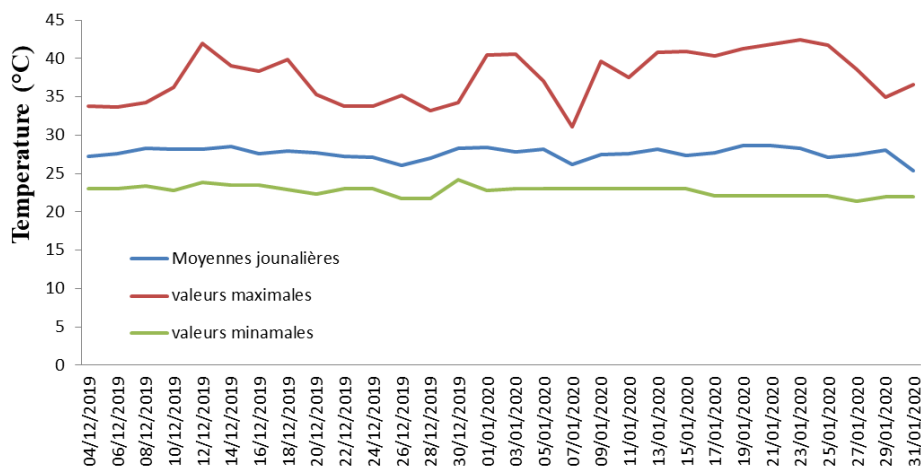


Figure 74 – Variations temporelles de la température

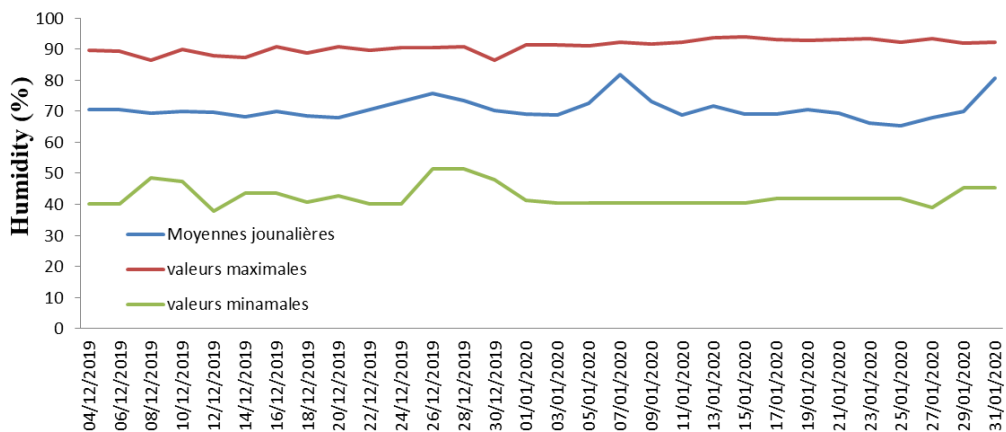


Figure 75 – Variations temporelles de l'humidité

au début de l'échantillonnage et 113,88 ppm (30/01/2020) au dernier jour de l'échantillonnage.

En somme, des quatre gaz mesurés le CO_2 , le GPL et la fumée présentent des concen-

trations acceptables selon les recommandations de l’OMS [132], tandis que le *CO* présente des concentrations à risques car le seuil maximal de *CO* recommandé dans les espaces intérieurs est de 9 ppm et l’exposition maximale autorisée d’une personne sur les lieux de travail est de 50 ppm (OSHA) [132–135, 135]. Il est également à noter que la température moyenne (Figure 74) reste inférieure à 30°C avec une humidité (Figure 75) comprise entre 40 à 90%. Ces paramètres de confort sont dans une plage acceptable selon l’OMS. En outre, les valeurs moyennes, maximales et minimales périodiques des différents gaz mesurés sont représentés par la Figure 76.

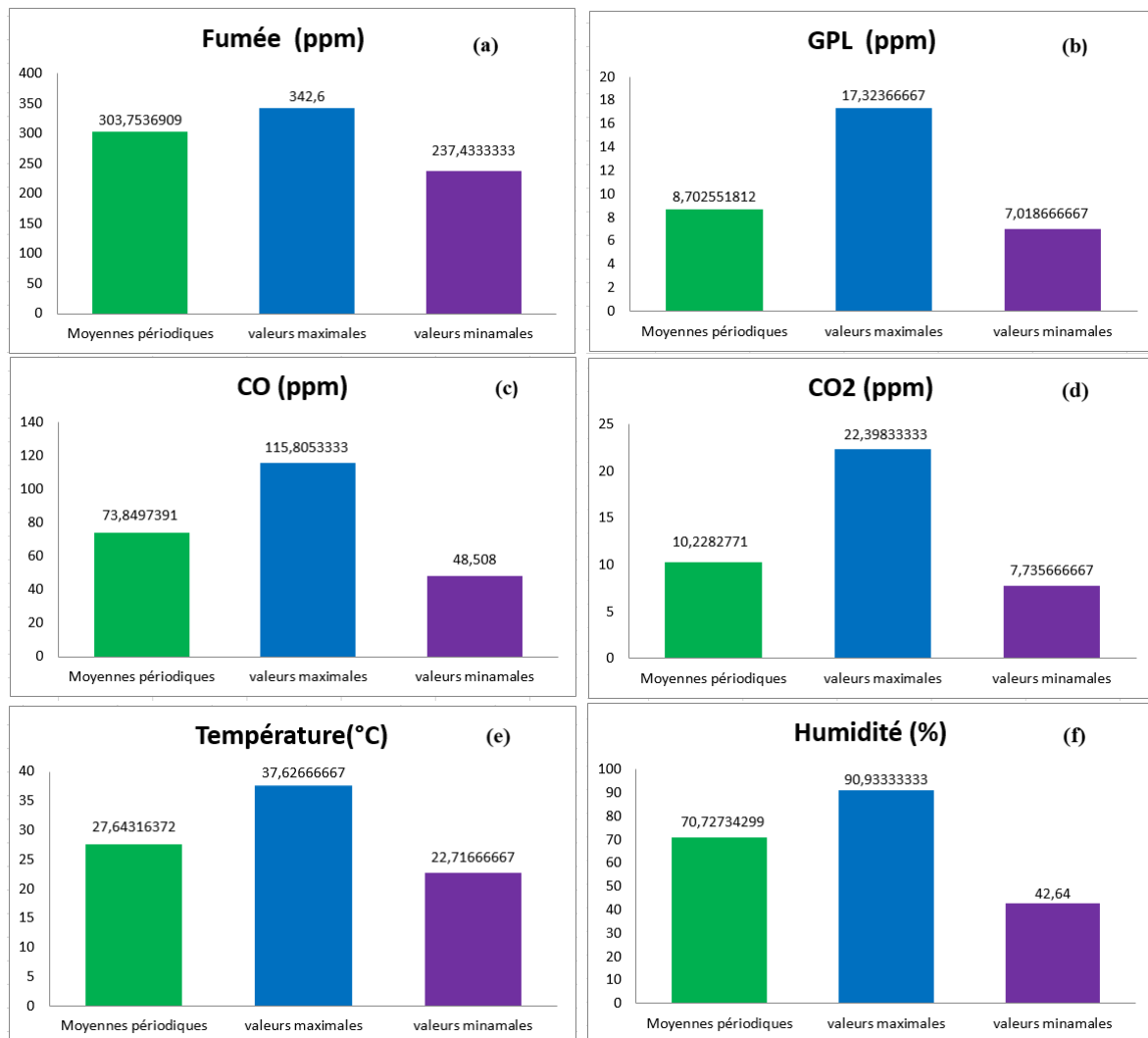


Figure 76 – Evaluation périodique des gaz et paramètres mesurés

N’ayant pas d’appareils de référence de mesure des gaz toxiques, les différentes concentrations de gaz obtenues dans le cadre de ce travail de thèse ne seront pas confrontées à d’autres résultats de référence. Seules les concentrations des particules matières $PM_{2.5}$ qui seront comparées à celles obtenues par un appareil de référence ; le Gent Sampler afin d’observer la fiabilité du prototype électronique développé. De plus les gaz

tels que le CO_2 , le GPL et la fumée sont généralement mesurés pour connaître leur concentration dans l'air et en cas de forte concentration, il faut appliquer les gestes qui permettent de les réduire : la ventilation (environnement intérieur) ou la réduction de leur émission. Car ces gaz sont toxiques et néfastes pour la santé. Il ne sont pas recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'analyse et l'évaluation de la qualité de l'air. Par contre, le CO qui est un gaz très toxique et mortel, fait partie des gaz prioritaire à surveiller en temps réel. Sa concentration dans l'air est connue et doit être contrôlée à tout moment. L'Organisation Mondiale de la Santé a défini, pour l'ensemble de la population, y compris les femmes enceintes et les personnes âgées atteintes de problèmes cardiaques ou respiratoires (connues ou non), des valeurs de référence de CO considérées comme inoffensives en fonction de la durée de l'exposition :

- 10 mg/m^3 (9 ppm) pendant 8 heures ;
- 30 mg/m^3 (26 ppm) pendant 1 heure ;
- 60 mg/m^3 (52 ppm) pendant 30 min ;
- 100 mg/m^3 (90 ppm) pendant 15 min.

La gravité d'une intoxication est fonction de la concentration de CO dans l'air et de la durée de l'exposition :

Tableau 18 – Exposition à une concentration de CO et Symptômes associés

CO (ppm)	Symptômes
0 à 200	Maux de tête, vertiges, nausées, fatigue.
200 à 400	Maux de tête intenses, danger de mort après 3 heures.
400 à 800	Maux de tête, vertiges, nausées. Perte de connaissance en 45 min, décès après 2-3 heures.
800 à 1600	Symptômes sévères après 20 min, décès dans l'heure.
1600 à 3200	Maux de tête, vertiges, nausées après 5 min, perte de connaissance après 30 min.
3200 à 6400	Céphalées et vertiges après 1 à 2 min, perte de connaissance après 10-15 min.
6400 à 12800	Perte de connaissance immédiate, décès en 1 à 3 minutes.

En France, la réglementation du travail définit des valeurs maximales de concentration auxquelles les travailleurs peuvent être exposés sans risques. Elles ne sont valables qu'en milieu de travail. Il faut garder à l'esprit qu'une quantité de CO tolérable pour un travailleur en bonne santé peut déjà représenter un certain danger pour une personne âgée ou pour un enfant.

- La TLV-TWA (Threshold Limit Value - Time Weighted Average) représente la concentration moyenne considérée comme inoffensive pour un travailleur qui y est

- exposé 40 heures par semaine pendant toute sa carrière. Elle est de 20 *ppm* ;
- La TLV-C (Threshold Limit Value - Ceiling) représente la valeur plafond qui ne peut jamais être dépassée. Dans le cas du CO, la TLV-C est de 100 *ppm* ;
 - La TLV-IDHL (Threshold Limit Value - Immediately dangerous for life and health) représente la concentration à partir de laquelle l'évacuation immédiate s'impose. Elle est de 1.500 *ppm* dans le cas du CO.

c) **Analyse comparative des résultats de $PM_{2,5}$ issus du GENT Sampler et du dispositif de surveillance atmosphérique réalisé**

Dans le but d'évaluer la fiabilité et la précision des résultats du dispositif réalisé, une analyse comparative des données de $PM_{2,5}$ issues des deux appareils (réalisé et référence) de la Figure 69 a été effectuée. Après calcul des valeurs moyennes journalières des $PM_{2,5}$ obtenues de chaque appareil une analyse statistique basée sur la régression linéaire, considérant la valeur du coefficient de corrélation R a été appliquée pour déterminer le degré de rapprochement entre les deux méthodes dites électronique et GENT Sampler. Il est à noter qu'un bon coefficient de corrélation ne signifie pas nécessairement qu'il existe un bon accord entre les méthodes comparées. Car lorsque le résultat d'une méthode est le double de l'autre, on obtient un parfait coefficient de corrélation ($R^2=1$), malgré la grande différence entre ces deux méthodes. Par conséquent, nous allons aussi effectuer une comparaison des droites d'équation $y = x$ et $y = 2x$ avec la droite de régression obtenue afin de fournir une meilleure conclusion sur les deux dispositifs. Étant donné que le Gent Sampler fonctionne de manière alternative (2 heures de marche 2 heures d'arrêt) durant la journée (24h) alors que le dispositif électronique fonctionne en continu, sans interruption pendant la journée (24h). Nous avons procédé de deux manières distinctes pour comparer les résultats obtenus à partir de ces dispositifs. Dans le premier schéma de comparaison, seules les données du dispositif électronique collectées pendant les périodes de fonctionnement du Gent Sampler (12/24 heures) sont prises en compte et celles collectées pendant les périodes d'arrêt du GENT Sampler ne sont pas considérées. Dans le deuxième schéma de comparaison, toutes les données de l'appareil électronique sont prises en compte y compris les données collectées pendant la période d'arrêt de l'échantillonneur Gent. Sur les résultats du premier schéma illustrés par la Figure 77 où la courbe en rouge représente les concentrations moyennes journalières de $PM_{2,5}$ collectées par la méthode électronique et celle en bleu, les concentrations issues du Gent Sampler. Nous constatons que les

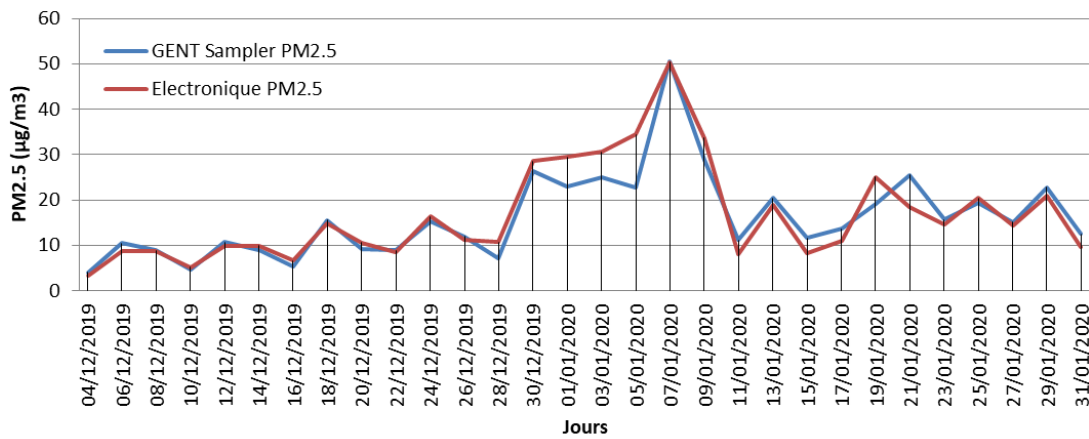


Figure 77 – Concentrations de $PM_{2,5}$ issues des deux appareils fonctionnant simultanément

deux courbes décrivent la même trajectoire avec un léger décalage exceptés les intervalles du 30 décembre 2019 au 5 janvier 2020 et du 19 au 21 janvier 2020, où les différences sont observées. Ces différences sont probablement causées par des erreurs de manipulation (collecte et traitement des données) du Gent Sampler ou l'influence des paramètres environnementaux (température, humidité, vent, etc.) sur les capteurs électroniques. Dans la plupart des cas, les concentrations en $PM_{2,5}$ des deux appareils restent inférieures à $25 \mu g/m^3$ ce qui est acceptable dans un environnement de travail selon les recommandations de l'OMS.

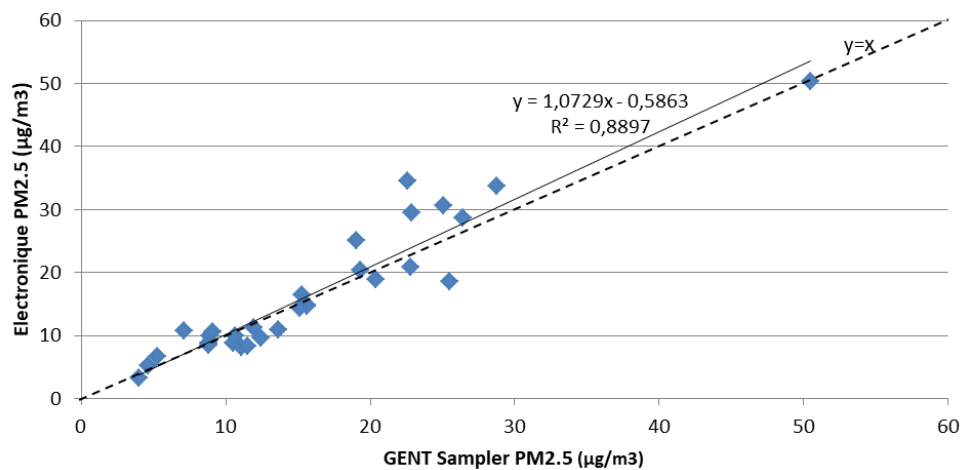


Figure 78 – Corrélation des $PM_{2,5}$ des deux appareils fonctionnant simultanément

La Figure 78 présente la corrélation entre les concentrations issues des deux appareils. Elle présente un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,8897$. A partir de cette Figure, nous pouvons remarquer la proximité de la droite d'équation $y = x$ à la droite de régression $y = 1,0729x - 0,5863$ (toutes deux étant dans le nuage des points). La

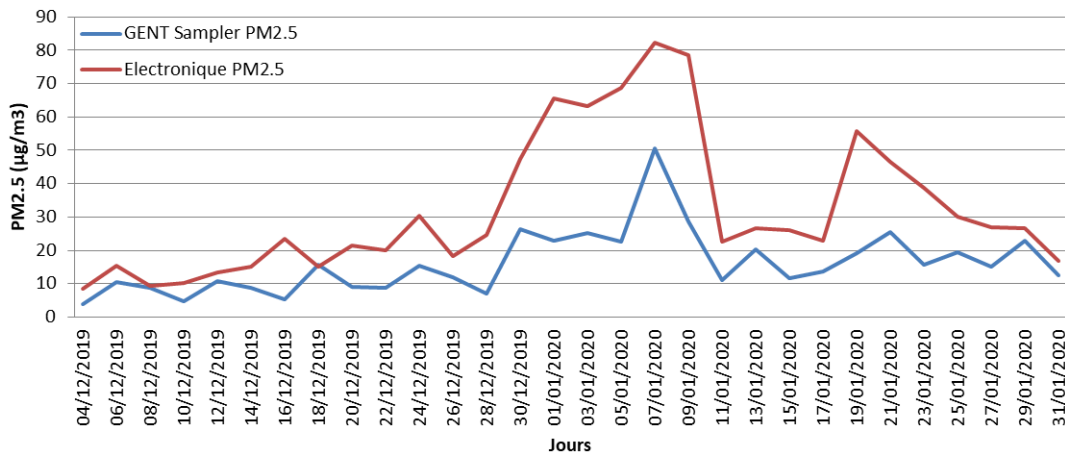


Figure 79 – Concentration de $PM_{2.5}$ issues des deux appareils fonctionnant à plein temps

proximité entre ces deux droites montre un bon accord de fonctionnement entre les deux dispositifs utilisés. De plus, une valeur du $RMSE = 3,64\mu g/m^3$ des données issues des deux appareils explique davantage le rapprochement entre les deux méthodes utilisées. Malgré les résultats obtenus, ce schéma de comparaison n’est pas recommandé du fait de la non-considération dans les calculs d’une bonne partie des données du dispositif électronique (données collectées pendant les périodes d’arrêt du Gent Sampler).

Le deuxième schéma de comparaison illustré par la Figure 79, prend en compte toutes les données issues de l’appareil électronique (y compris les données collectées pendant les périodes d’arrêt du Gent Sampler). La courbe en rouge représente l’évolution temporelle des concentrations moyennes de $PM_{2.5}$ de la méthode électronique et celle en bleu les concentrations issues du Gent Sampler. Nous pouvons constater sur la Figure 79 une évolution similaire entre les deux courbes malgré leur grand décalage. Par conséquent, un facteur de correction est nécessaire pour corriger ce décalage et obtenir un bon accord entre les deux courbes.

La Figure 80 donne la corrélation entre les concentrations de $PM_{2.5}$ des deux dispositifs avec $R^2 = 0,7094$. En plus d’avoir un coefficient de corrélation acceptable, la droite de régression $y = 1,8779x + 2,0995$ devient $y \approx 2x$. Ceci nous permet de corréler les données du dispositif électronique avec celles du Gent Sampler (pour tout $PM_{GENT} > 0$) suivant l’équation :

$$PM_{\text{électronique}} = 1,8779 \star PM_{GENT} + 2,0995 \approx 2 \star PM_{GENT} \quad (46)$$

Un test de la pente de cette droite de régression est nécessaire pour connaître les

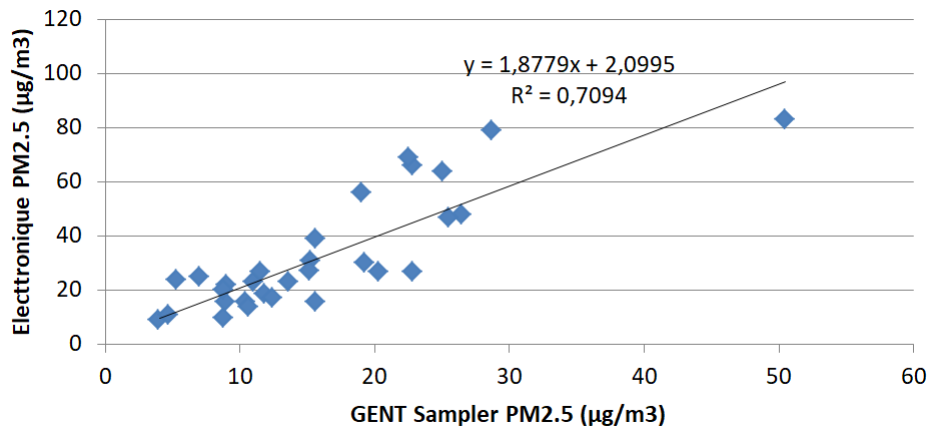


Figure 80 – Corrélation des $PM_{2,5}$ des deux appareils fonctionnant à plein temps

erreurs sur les valeurs de la pente a et de l'ordonnée à l'origine b . Pour cela, nous allons effectuer le test de Student pour déterminer les erreurs Δa et Δb . Soit r le résidu tel que $r = y_i - \hat{y}$ avec y_i la valeur observée et \hat{y} la valeur estimée, on calcul les différents écart-types σ suivants :

Pour les résidus, avec $n = 30$ (le nombre de mesures effectuées) :

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n - 2}} = 0,74 \quad (47)$$

Pour la pente :

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sigma_r}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} = 0,015 \quad (48)$$

Pour l'ordonnée à l'origine :

$$\sigma_b = \sigma_r \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum_i (x_i - \bar{x})^2}} = 0,48 \quad (49)$$

Les erreurs sur les valeurs de la pente a et de l'ordonnée à l'origine b sont obtenues par :

$$\Delta a = t_{n-2} \cdot \sigma_a = 0,038 \quad (50)$$

D'où $a = 2 \pm 0,04$

$$\Delta b = t_{n-2} \cdot \sigma_b = 1,326 \quad (51)$$

D'où $b = 2,1 \pm 1,33$

Avec $t_{n-2} = 2,76$, le coefficient de Student pour $n - 2 = 28$ degrés de liberté, un quantile d'ordre 0,995 et une probabilité $P=0,005$ (voir Annexe B.3).

Les deux appareils sont en accord si la relation suivante déduite de l'équation (46) est respectée.

$$\frac{(PM_{\text{électronique}} - PM_{\text{GENT}})}{PM_{\text{GENT}}} \approx 1 \quad (52)$$

Pour cela, nous avons calculé dans le Tableau 19 les concentrations moyennes périodiques des $PM_{2,5}$ issues des deux équipements afin d'utiliser l'équation 47 pour observer le niveau d'accord entre les deux résultats.

Tableau 19 – Concentrations moyennes périodiques de $PM_{2,5}$ des deux appareils

Période d'échantillonnage du 04 Décembre 2019 au 30 Janvier 2020		
Dispositif	GENT Sampler	Electronique
Concentration moyenne de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16.1±0.1	32.4±0.4

En appliquant l'équation (47) sur les concentrations du Tableau 19 nous obtenons un coefficient de $1,00 \pm 0,01$ proche de 1 qui indique un excellent accord entre les deux méthodes. Il nous permet de valider la fiabilité, l'efficacité et la précision du dispositif électronique réalisé par rapport à l'appareil de référence. Parallèlement, Castanho et al., [37] ont démontré que le Gent Sampler détermine une concentration journalière estimée à 50% de la pollution normale. Le dispositif électronique réalisé fonctionne de manière instantanée et donne une évaluation complète de la pollution journalière. Autrement dit, la concentration journalière obtenue par l'équipement électronique, doit être le double de celle du Gent Sampler tous deux étant utilisés dans les mêmes conditions. Ceci vient davantage justifier les résultats obtenus dans ce deuxième schéma de comparaison. Il en ressort également une valeur du RMSE de $11,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qui permet de confirmer l'efficacité du dispositif électronique réalisé. Ce deuxième schéma de comparaison est recommandé car, contrairement au premier il est proche de la réalité et prend en compte toutes les données provenant du dispositif électronique.

3.2.2 Appareil électronique de surveillance de la qualité de l'air basé sur une technique de l'Internet des Objets (IoT)

Respirer un air de bonne qualité de nos jours est l'un des défis majeurs de santé publique auquel le monde est confronté. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), plus de 30 % de bâtiments présentent des problèmes importants d'indice de la qualité de l'air. De plus, les personnes passent 90% de leur temps dans des espaces clos. Elles co-existent généralement dans ces espaces avec des matériaux et/ou des produits qui libèrent une grande variété

de polluants dans l'air. Les contaminants de l'air intérieur ou extérieur comprennent les contaminants chimiques, biologiques et physiques provenant de diverses sources telles que les rejets des véhicules, les déchets industriels, les matériaux de construction, les peintures, les colles, les vernis, les produits de nettoyage, les combustions de bois et de charbon de bois, les gaz émis par les imprimantes et les photocopieuses, etc. Parmi ces polluants figurent les particules matières, les composés organiques volatiles (*COV*), l'ozone troposphérique (O_3), le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), la fumée noire, le gaz de pétrole liquéfié (*GPL*), etc. La surveillance de la qualité de l'air consiste à connaître en temps réel la concentration de ces différents polluants dans un milieu donné.

a) Présentation du dispositif électronique réalisé

Le dispositif électronique de surveillance de la qualité de l'air présenté sur la figure 81, est un appareil qui mesure essentiellement les polluants responsables de la qualité de l'air tels que recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé et les agences internationales de surveillance de la qualité de l'air ; ATMO (en France), US EPA (aux USA), en CHINE et au Canada [132–134].

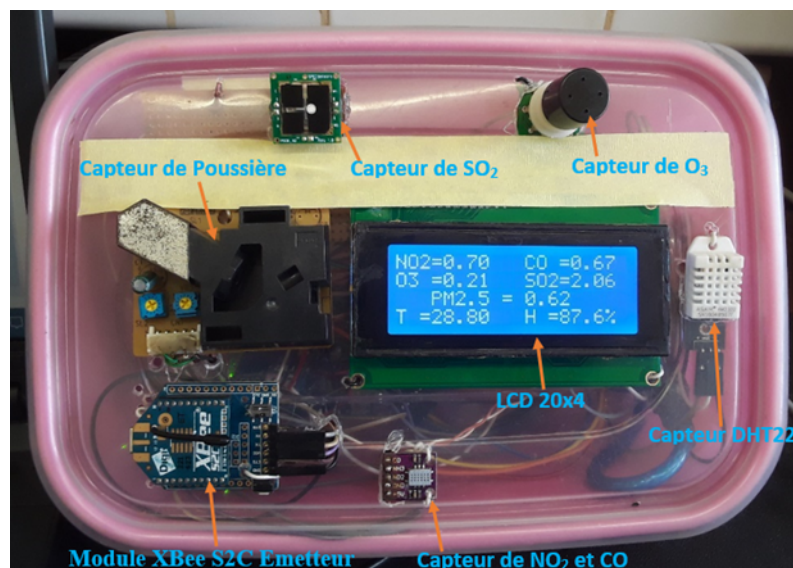


Figure 81 – Dispositif de mesure et de transmission de données du système de surveillance

La figure 82 présente le test de transmission sans fil de données vers un PC ainsi que le zoom des valeurs affichées sur l'application XCTU installée dans l'ordinateur

b) Mesure et traitement des polluants responsables de la qualité de l'air intérieur

Deux appareils identiques basés sur des modules de transmission sans fil ZigBee ont



Figure 82 – Transmission de données dispositif vers le PC

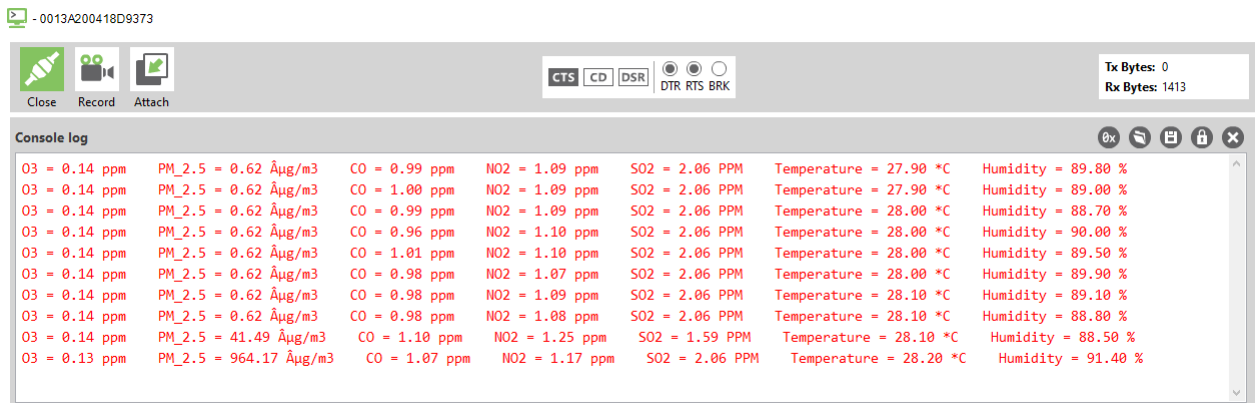


Figure 83 – Affichage de données sur l'application XCTU

été réalisés et utilisés pour collecter des données dans la ville de Yaoundé ; l'un installé dans un bureau au siège de l'IRGM et l'autre dans une résidence au camp SIC de la Cité-verte. Ces appareils installés à l'intérieur des bâtiments ont été placés sur une hauteur de 1,6 m du sol (OMS). Les espaces confinés sélectionnés disposent également des appareils de bureau et de ménage qui sont parfois des potentielles sources de pollution de l'air intérieur. Les données collectées à l'aide de ces deux appareils ont été obtenues au même moment sur une période de un mois, du 21 Septembre 2020 au 22 Octobre 2020. Ces données ont permis d'évaluer et de présenter en fonction du temps les concentrations moyennes journalières des particules en suspension (Figure 84), de O_3 (Figure 85), de CO (Figure 86), de NO_2 (Figure 87) et de SO_2 (Figure 88) afin d'observer l'évolution journalière de la pollution intérieure dans les deux environnements. Sur ces différentes Figures, les courbes en rouge représentent la concentration moyenne journalière des polluants mesurés dans la maison familiale et les courbes en bleu la

concentration moyenne des polluants obtenues quotidiennement au bureau.

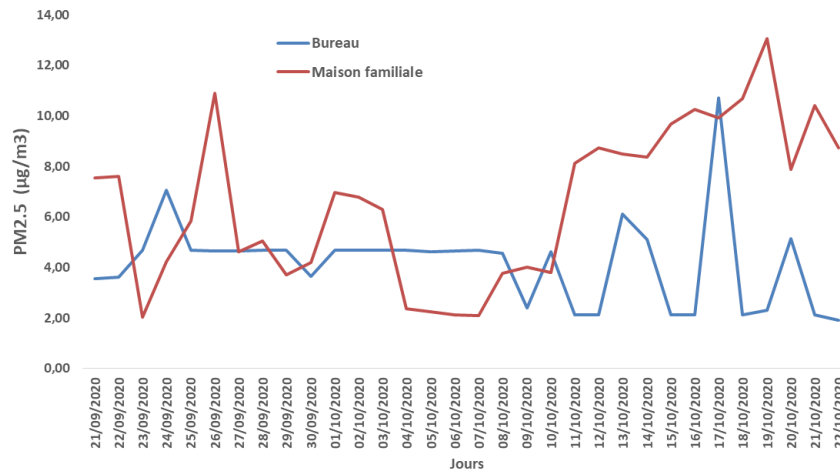


Figure 84 – Evolution temporelles des $PM_{2,5}$ dans deux espaces différents

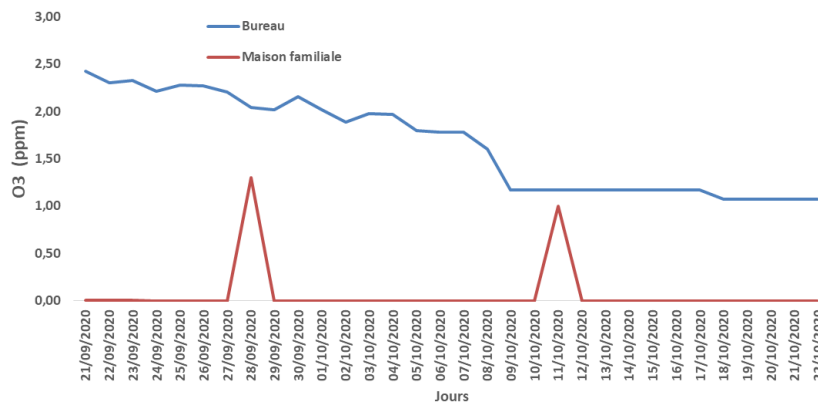


Figure 85 – Evolution temporelles des O_3 dans deux espaces différents

On observe à travers les courbes que les concentrations moyennes de $PM_{2,5}$ (Figure 84) dans les deux espaces confinés sont inférieures à $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ malgré l’obtention des concentrations élevées de $PM_{2,5}$ dans la maison familiale par rapport à celles du bureau. Les variations temporelles de concentrations d’ozone (Figure 85) sont certes inférieures à 2,5 ppm dans les deux milieux mais très élevées au bureau par rapport à la maison familiale. Ceci est similaire avec les variations de concentrations de CO (Figure 86). D’autre part, on observe une forte concentration de NO_2 (Figure 87) et de SO_2 (Figure 88) dans la maison familiale par rapport au bureau. Cette élévation de concentration est causée par l’utilisation des détergents et certains produits de beauté (huile et parfum) très toxiques et les fumées de cuisine. Ainsi, une évaluation de l’exposition des habitants des deux espaces confinés aux polluants atmosphériques durant la période de mesure a été effectuée et présentée dans le Tableau 20.

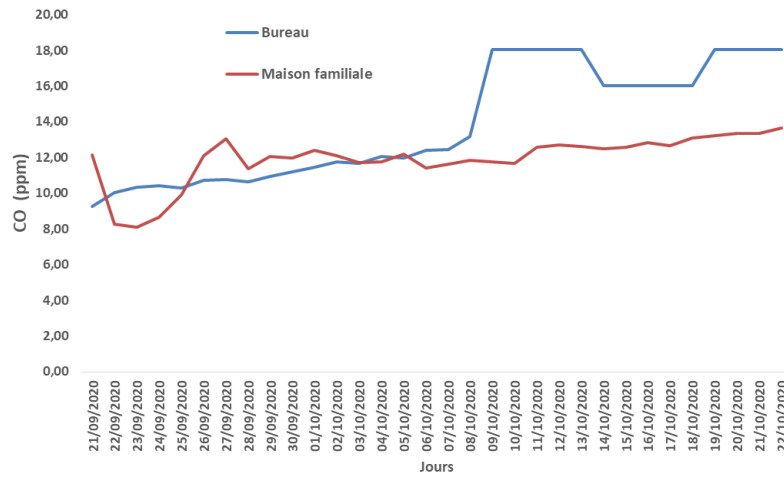


Figure 86 – Evolution temporelles des CO dans deux espaces différents

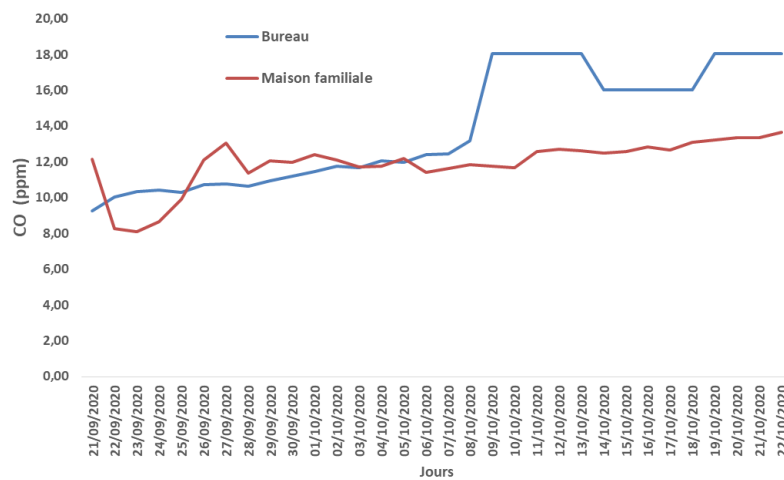


Figure 87 – Evolution temporelles des NO₂ dans deux espaces différents

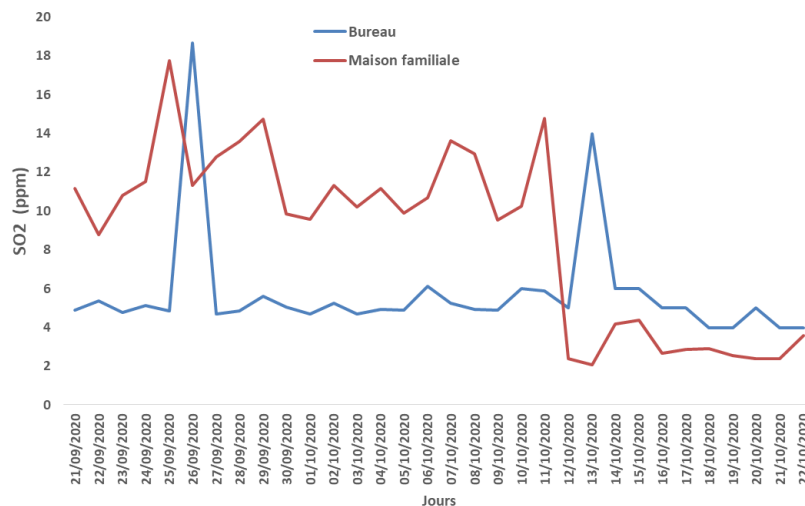


Figure 88 – Evolution temporelles des SO₂ dans deux espaces différents

Les concentrations des polluants du Tableau 20 varient d'un milieu à l'autre et présentent pour la plupart des valeurs acceptables aussi bien au bureau que dans la maison

Tableau 20 – Evaluation de l'exposition des deux environnements de mesure

Du 21/09/2020 au 22/10/2020		
Polluants	Bureau	Maison familiale
Concentration moyenne périodique de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [<i>Min</i> – <i>Max</i>]	$4,7 \pm 1,8$ [2,1-10,7]	$6,6 \pm 3,1$ [2,1-13,1]
Concentration moyenne périodique de O_3 (ppm) [<i>Min</i> – <i>Max</i>]	$1,7 \pm 0,5$ [1,1-2,4]	$0,7 \pm 0,2$ [00-1,3]
Concentration moyenne périodique de CO (ppm) [<i>Min</i> – <i>Max</i>]	$14,1 \pm 3,2$ [9,3-18,3]	$12,1 \pm 1,4$ [8,1-13,7]
Concentration moyenne périodique de NO_2 (ppm) [<i>Min</i> – <i>Max</i>]	$2,1 \pm 0,8$ [1,1 - 5,1]	$6,5 \pm 0,8$ [4,2-7,5]
Concentration moyenne périodique de SO_2 (ppm) [<i>Min</i> – <i>Max</i>]	$5,7 \pm 2,9$ [3,9-18,6]	$8,7 \pm 4,6$ [2,4-17,7]

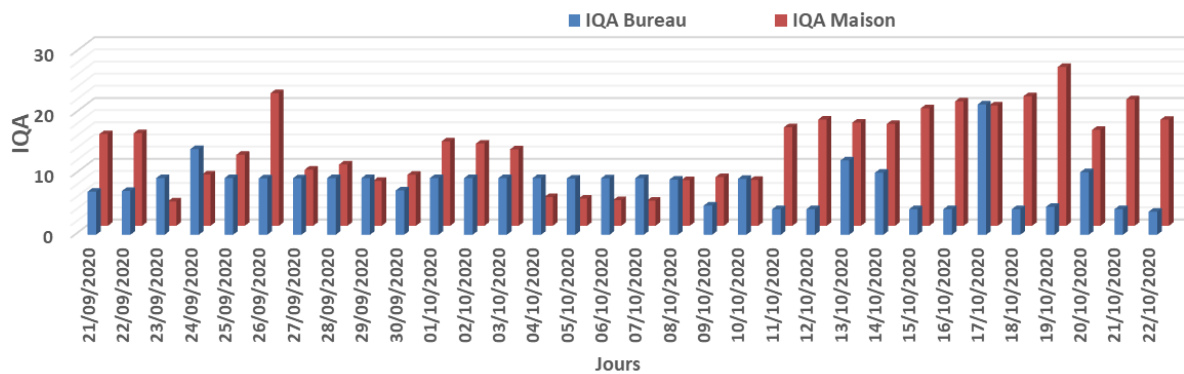


Figure 89 – IQA des deux milieux

familiale. Exception faite du CO dont le seuil intérieur recommandé par l’OSHA est de 9 à 10 ppm [131,135–137].

c) **Qualité de l’air et risques sanitaires associés**

Les mesures réalisées ont pour but d’évaluer la qualité de l’air et les risques sanitaires associés. Cette évaluation se fait à travers les éléments essentiels que sont l’indice de la qualité de l’air (IQA) et l’indice de l’air santé ($AQHI_{2,5}$). Ces deux termes donnent respectivement le niveau de pollution de l’air dans une localité et le degré de risque sanitaire que cette pollution peut causer à une personne exposée à long terme. Les Figures 89 et 90 représentent les évolutions quotidiennes de l’IQA et de l’ $AQHI_{2,5}$ obtenues dans les deux espaces confinés au cours de la période d’étude. Les histogrammes en rouge représentent les valeurs de l’IQA et de l’ $AQHI_{2,5}$ au domicile familial tandis que les histogrammes en bleu représentent les valeurs de l’IQA et de l’ $AQHI_{2,5}$ au bureau.

Sur ces Figures 89 et 90, nous observons une forte élévation des concentrations obtenues

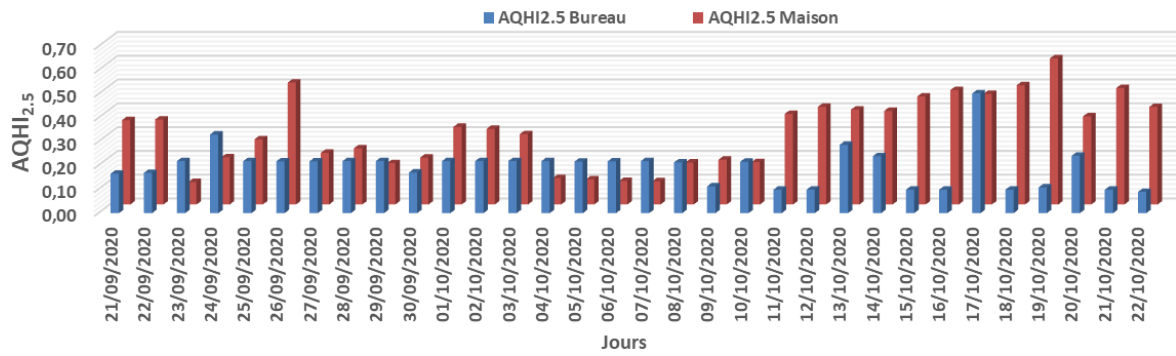


Figure 90 – AQHI_{2.5} des deux milieux

au sein de la maison familiale. Ce qui signifie que l’environnement intérieur de la maison a un air relativement plus pollué que celui du bureau pendant la période de mesure. Puisque la pollution de l’air va de pair avec son impact sur la santé, une augmentation de l’IQA induit nécessairement une augmentation de l’AQHI_{2,5}. Le Tableau 21 présente l’évaluation de l’indice de qualité de l’air et l’indice de l’air santé des deux espaces confinés.

Tableau 21 – Evaluation de l’exposition des deux environnements de mesure

Du 21/09/2020 au 22/10/2020					
Indice de la qualité de l’air (IQA)			Indice air santé (AQHI _{2,5})		
Moyenne de l’IQA du bureau [Min – Max]	Moyenne de l’IQA de la maison familiale [Min – Max]	Appreciation de l’IQA	Moyenne de AQHI _{2,5} du Bureau [Min – Max]	Moyenne de AQHI _{2,5} de la maison familiale [Min – Max]	Niveau d’impact sanitaire
8,4 ± 3,5 [3,8-21,4]	13,1 ± 6,1 [4,1-26,1]	Bon	0,2 ± 0,1 [0,1-0,5]	0,3 ± 0,1 [0,1-0,6]	Faible risque

Le Tableau 21 présente de bonnes valeurs sur l’IQA : 8,4 ± 3,5 au bureau et 13,1 ± 6,1 dans la maison familiale avec des impacts sanitaires à faible risque de 0,2 ± 0,1 au bureau et 0,3 ± 0,1 dans la maison familiale. Toutes ces valeurs sont acceptables et montrent que l’air était moins pollué dans les deux environnements, durant la période de mesure. À la lumière des résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse, force est de constater que l’IQA moyen au bureau est inférieur à l’IQA moyen à la maison. De même, les moyennes de l’AQHI_{2,5} des bureaux sont inférieures aux moyennes de l’AQHI_{2,5} de la maison familiale. Ceci permet de dire avec certitude que la qualité de l’air intérieur dans le bureau est bonne par rapport à la qualité de l’air intérieur dans la maison familiale pendant la période d’étude.

3.2.3 Dispositif intelligent de surveillance de la radioactivité environnementale

a) Présentation du dispositif réalisé : radiamètre

Le radiamètre également réalisé dans le cadre de ce travail, permet de détecter les rayonnements ionisants tels que les photons gamma et les particules bêta. Le dispositif est constitué d'une chaîne de mesure nucléaire composée respectivement du détecteur $J305\beta\gamma$, d'un système électronique de mise en forme du signal nucléaire, d'un microcontrôleur et d'un écran d'affichage de données. La Figure 91 montre le dispositif réalisé.



Figure 91 – *Radiamètre réalisé*

Les impulsions provenant du détecteur sont traitées et mises en forme par un circuit analogique approprié avant d'être envoyées au système à microcontrôleur qui assure l'analyse et la numérisation de ce signal. Le microcontrôleur Atmega 328P effectue cette conversion analogique-numérique du signal afin d'afficher à la sortie le nombre de comptages des particules détectées et le débit de dose correspondante. La transmission de données à distance envisagée dans ce dispositif a pour but de protéger l'opérateur contre l'exposition aux rayonnements pendant les mesures. Le test de cette fonctionnalité IoT est présenté par la Figure 92 et 93 avec une capture d'écran de l'application

XCTU installée dans le PC.

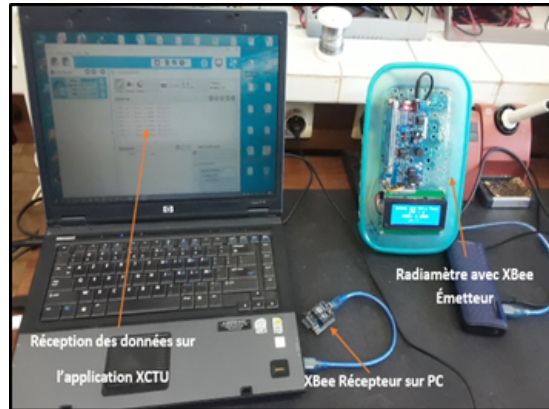


Figure 92 – Communication IoT entre le dispositif et un PC



Figure 93 – Données affichées sur l'application XCTU

b) Utilisation du dispositif réalisé en radioprotection et en sécurité nucléaire

Après une séance de plusieurs tests de fonctionnement dans l'air ambiant favorisant une bonne interaction détecteur-rayonnements présents dans son environnement, le temps d'exposition du dispositif à chaque point de mesure a été fixé à 20 minutes. Les mesures se sont ainsi déroulées dans deux localités différentes à savoir l'Université de Yaoundé I dans l'arrondissement de Yaoundé III et la zone de recherches située dans l'arrondissement de Yaoundé VII. Ces sites ont été choisis dans le but de suivre les mêmes itinéraires de travaux effectués avec l'appareil de référence Gamma-RAD5 pour faciliter la comparaison des résultats obtenus aux mêmes endroits par les deux équipements. De plus, les coordonnées géographiques de chaque point de mesure sont repérées par le GPS GARMIN 76 CSx. Les Figures 94 et 95 indique la position sur le terrain du radiamètre réalisé (1m au-dessus du sol) et la cartographie des points de mesure dans la ville de Yaoundé.



Figure 94 – *Position de mesure du radiamètre sur le terrain*

Les étoiles en vert sur la carte (Yaoundé III et Yaoundé VII) indiquent les points de mesure du débit de dose ambiante. Le nombre de désintégrations par minute (*cpm*) et le débit de dose ambiante sont automatiquement enregistrés dans un support numérique et la dose ambiante mesurée en $\mu\text{Sv/h}$ est convertie en nano Gray par heure (*nGy/h*) pour faciliter la comparaison avec la méthode de référence. Les résultats obtenus avec le radiamètre réalisé ainsi que les débits de dose ambiante du spectromètre de référence sont traités et présentés dans le Tableau 22.

Les différentes valeurs du débit de dose ambiante obtenues sont analysées à travers plusieurs méthodes parmi lesquelles la carte de distribution du débit de dose ambiante de la Figure 96. Elle est uniquement générée à base des résultats du radiamètre réalisé. Elle permet de ressortir les zones à forte concentrations radioactives et les zones à faible radioactivité.

La carte de distribution du débit de dose ambiante de la Figure 96 présente cinq différentes zones de radioactivité identifiables par des couleurs à savoir la zone en bleu dont le débit de dose ambiante varie de 7 à 47 *nGy/h*, la zone en vert avec un débit de dose ambiante allant de 47 à 87 *nGy/h*, la zone en jaune varie de 87 et 127 *nGy/h*, la zone en marron de valeur comprise entre 127 à 167 *nGy/h* et la zone en rouge dont le débit de dose ambiante va de 167 à 207 *nGy/h*. Toutes ces valeurs apparaissent dans les deux localités d'étude, excepté la zone en rouge qui n'apparaît que dans la localité de Yaoundé VII. Les zones en vert et jaune sont prédominantes dans la localité de

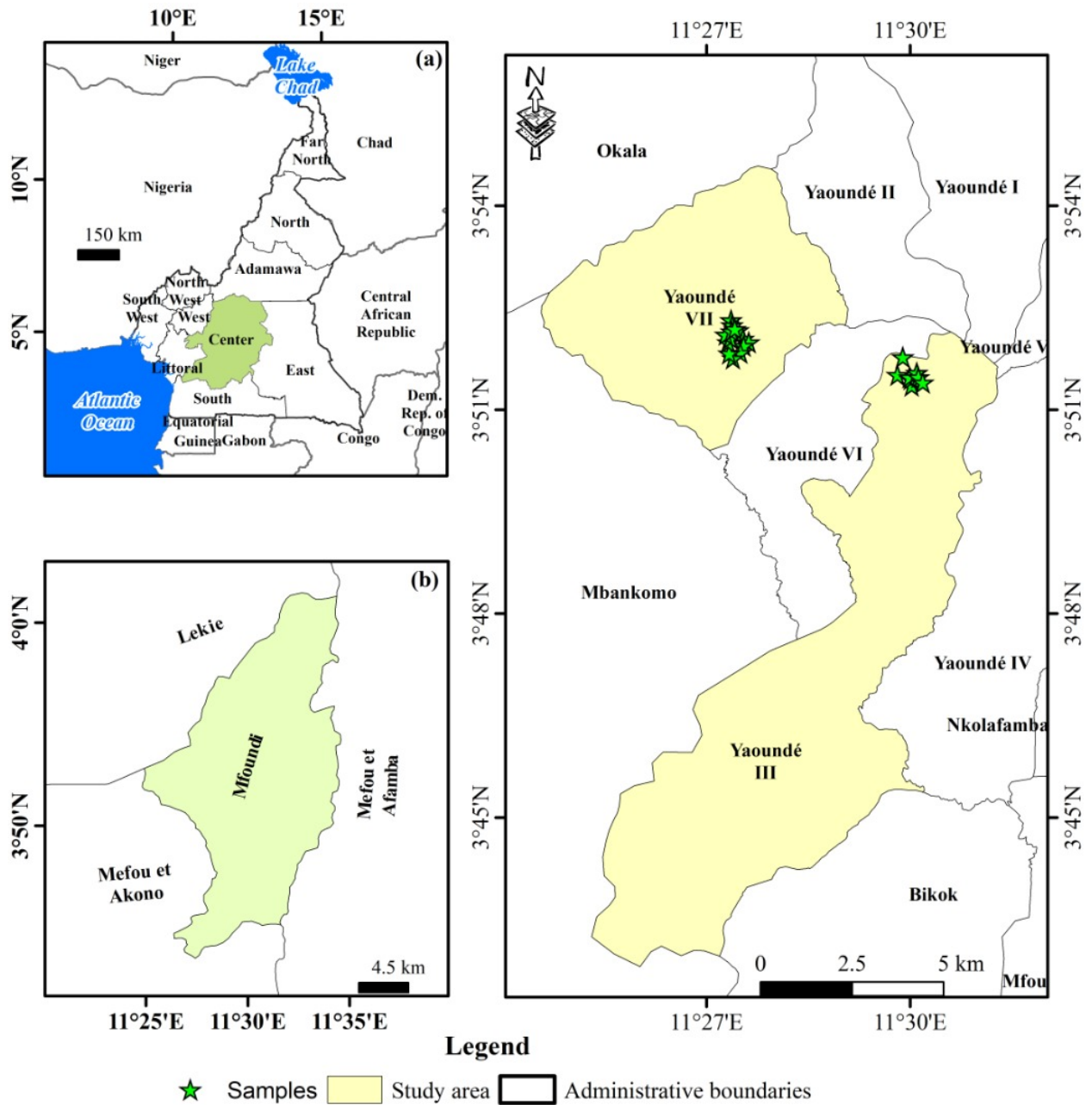


Figure 95 – Cartographie des mesures effectuées dans la ville de Yaoundé, région du centre - Cameroun

Yaoundé III tandis que la localité de Yaoundé VII est dominée par des zones en vert et bleu.

La deuxième méthode d’analyses des résultats obtenus est la distribution log-normale du débit de dose ambiante et du nombre de comptages (cpm) présentée sur la Figure 97. La Figure 97(a) montre qu’à partir des 22 points de mesure réalisés, 7 points de mesure ont une concentration moyenne de débit de dose comprise entre 40 et 60 nGy/h, 4 points de mesure ont des valeurs comprises entre 20 et 40 nGy/h, 2 sont dans l’intervalle 0-20 nGy/h et les autres points de mesure ont des valeurs supérieures

Tableau 22 – Débits de dose ambiante obtenue dans la ville de Yaoundé à base du radiamètre développé et du spectromètre de référence

N°	Lieu de mesure	Longitude E	Latitude N	Nombre de comptage (CPM) (appareil développé)	Débit de dose ambiante (nGy/h) (appareil développé)	Écart-type (nGy/h) (appareil développé)	Débit de dose ambiante (nGy/h) (appareil de référence)
1	Université YI	11°29'53.6"	3°51'46.6"	13928	147,45	± 5,82	48,2
2	Université YI	11°29'48.8"	3°51'30.8"	9592	102,21	± 8,24	45,9
3	Université YI	11°30'01.3"	3°51'21.5"	3633	46,24	± 4,41	45,6
4	Université YI	11°30'00.6"	3°51'27.1"	5770	64,44	± 5,94	49,9
5	Université YI	11°29'59.5"	3°51'28.9"	6320	70,3	± 6,68	68,5
6	Université YI	11°30'05.9"	3°51'28.9"	4742	56,05	± 5,18	52,2
7	Université YI	11°30'07.3"	3°51'32.7"	2124	36,08	± 3,39	60,3
8	Université YI	11°30'11.3"	3°51'24.2"	3981	49,2	± 4,72	47
9	Nkolbisson	11°27'21.9"	3°52'19.3"	13855	170,57	± 8,80	49,80
10	Nkolbisson	11°27'22.6"	3°52'14.7"	5850	87,64	± 7,89	49,94
11	Nkolbisson	11°27'27.9"	3°52'10.3"	8010	120	± 6,13	61,97
12	Nkolbisson	11°27'32.5"	3°52'02.8"	2328	34,87	± 4,58	58,72
13	Nkolbisson	11°27'37.4"	3°51'59.7"	961	14,37	± 3,07	56,38
14	Nkolbisson	11°27'33.0"	3°51'56.5"	7025	105,25	± 8,82	42,83
15	Nkolbisson	11°27'30.1"	3°51'50.4"	3169	47,47	± 6,21	47,78
16	Nkolbisson	11°27'23.4"	3°51'45.6"	2774	41,56	± 5,26	44,53
17	Nkolbisson	11°27'20.2"	3°51'49.9"	3826	57,32	± 6,87	49,58
18	Nkolbisson	11°27'19.1"	3°51'59.6"	5380	53,63	± 6,68	55,26
19	Nkolbisson	11°27'21.2"	3°52'03.1"	1590	23,82	± 4,09	53,29
20	Nkolbisson	11°27'17.1"	3°52'06.5"	3323	49,78	± 5,76	53,63
21	Nkolbisson	11°27'22.3"	3°52'09.4"	1965	29,44	± 4,72	23,82
22	Nkolbisson	11°27'25.2"	3°52'11.5"	463	6,97	± 1,99	49,78

à 60 nGy/h. La Figure 97(b) est la distribution log-normale du nombre de comptages obtenu durant la campagne de mesures. Il en ressort ici que 9 points de mesure ont un nombre de comptage total compris entre 2000 et 4000 CPM, 4 ont un nombre de comptage compris entre 0 et 2000 cpm, 3 points sont entre 4000 et 6000 cpm, et les autres points de mesure ont des nombres de comptage supérieurs à 6000 cpm.

c) **Analyse comparative des données du radiamètre réalisé et celles du spectromètre gamma NaI (Tl)**

Une analyse comparative des résultats des deux appareils (référence et réalisé) a été effectuée et présentée sur la Figure 98. Cependant, les mesures n'ont pas été effectuées

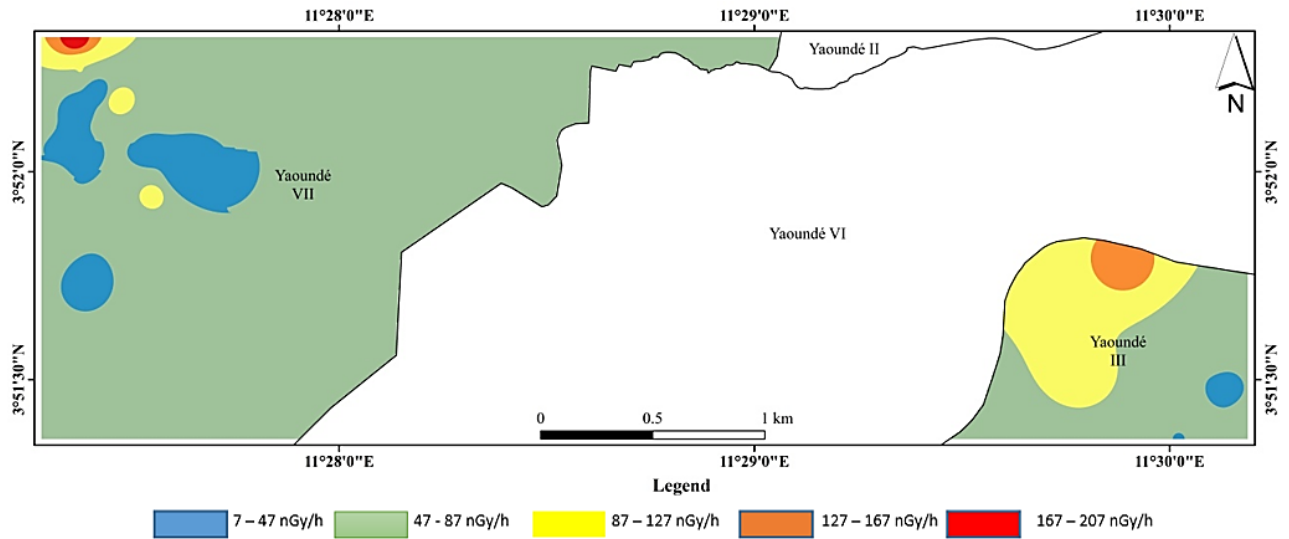


Figure 96 – Distribution du débit de dose ambiante des localités de mesure

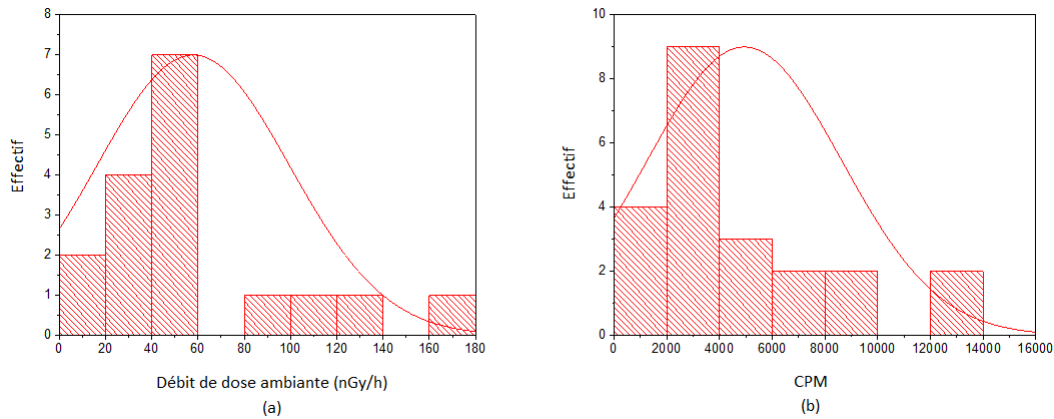


Figure 97 – Distribution log-normale du débit de dose ambiante et du nombre de comptages

au même moment mais aux mêmes endroits en se servant des coordonnées GPS. Les conditions atmosphériques durant la période de mesure étaient constituées de vent, de poussière et de journées ensoleillées.

La courbe en bleu de la Figure 98 est celle du débit de dose ambiante détecté par le radiamètre réalisé, tandis que la courbe en rouge est celle obtenue par les données issues de la chaîne de spectrométrie gamma in-situ à scintillation NaI (Tl). Les 22 points de mesures (voir Tableau 22) effectués par les deux appareils ont pour la plupart des débits de dose ambiante inférieurs à 70 nGy/h à l'exception de 6 points où les débits de dose ambiante fournies par le radiamètre réalisé sont largement élevés par rapport au dispositif de référence. Cette différence peut certes s'expliquer par le fait que les deux appareils n'ont pas été utilisés au même moment mais aussi parce que le radiamètre réalisé détecte au même moment les photons gamma et les particules bêta tandis que

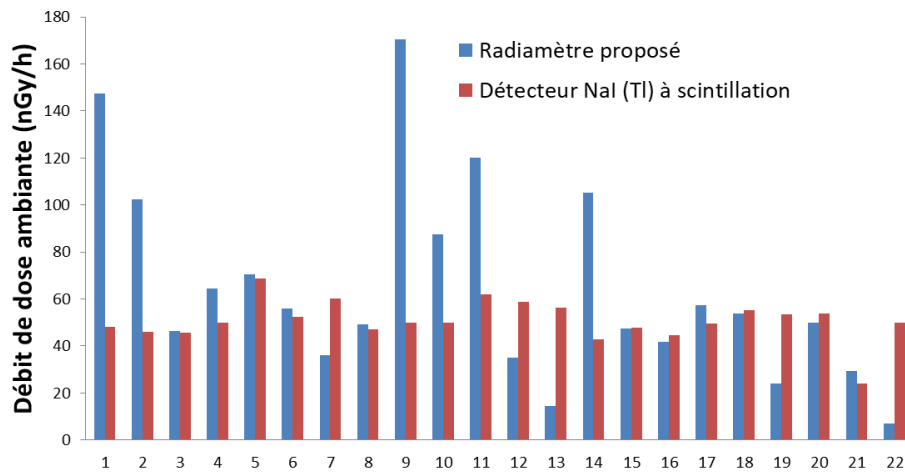


Figure 98 – Evolution temporelle des données des deux dispositifs utilisés

l'appareil de référence ne détecte que les photons gamma. Il n'est pas également exclu que ces mesures soient influencées par des erreurs de manipulation, le mouvement du vent et d'autres paramètres atmosphériques. Une analyse statistique du débit de dose ambiante détecté par le radiamètre réalisé a permis d'obtenir une valeur moyenne de $64,30 \text{ nGy/h}$, alors que celle du spectromètre de référence gamma NaI est de $50,67 \text{ nGy/h}$. Malgré ces écarts et multiples influences notés sur les mesures effectuées avec le radiamètre développé, une corrélation appréciable est observée entre les nombres de comptages obtenus et les concentrations moyennes du débit de dose ambiante mesurées. Cette corrélation est présentée sur la Figure 99.

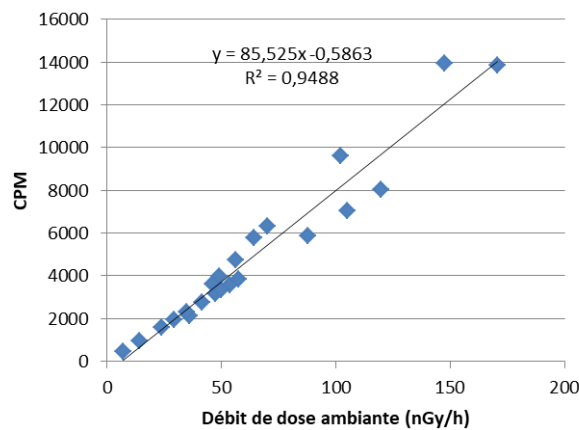


Figure 99 – Corrélation entre le cpm et le débit de dose obtenus avec le dispositifs réalisé

d) Niveau de dose ambiante de radioactivité dangereuse pour la santé

Il faudrait, pendant une année entière, avoir un débit de dose de 114 nSv/h pour atteindre la limite d'exposition du public qui est de 1 mSv/an en dehors des expositions médicales et naturelles.

- A partir de 10 mSv , on préconise une mise à l’abri des populations ;
- Au-delà de 50 mSv , l’évacuation est recommandée ;
- Pour un niveau inférieur à 100 mSv , aucun effet à long terme sur la santé n’a été démontré ;
- Au-delà de 100 mSv , des effets à long terme des rayonnements ionisants ont été démontrés par des études épidémiologiques (étude des populations d’Hiroshima et de Nagasaki) [138]. Pour la population, on parle de fortes doses au-delà de 100 mSv et pour les travailleurs du nucléaire, la limite réglementaire d’exposition en France par exemple est de 20 mSv/an [139]. Une exposition à une dose de 100 mSv/an peut être autorisée pour des interventions techniques d’urgence et de 300 mSv/an pour une intervention de secours à victimes. 1000 mSv est une dose très élevée qui correspond à 1 Gray . Ce niveau d’exposition à la radioactivité a un effet direct sur la santé et implique un risque pour la vie de la personne exposée dans les semaines et les mois qui suivent. A partir de ce niveau de dose, les rayonnements ionisants commencent à détruire la moelle osseuse. Ils atteignent les cellules souches et entraînent une diminution des plaquettes sanguines et des globules blancs [140].

Il faut alors prévoir des mesures de radioprotection exceptionnelles pour la population en cas d’accident ou d’urgence radiologique. Des actions et des contre-mesures sont mises en œuvre en fonction de la nature et de l’importance de l’exposition. Dans le cas d’accidents nucléaires, des niveaux d’intervention exprimés en termes de doses servent de repères aux pouvoirs publics pour décider, au cas par cas, des actions à déclencher, à savoir :

- La mise à l’abri, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 10 mSv/an ;
- L’évacuation, si la dose efficace prévisionnelle dépasse 50 mSv/an ;
- L’administration d’iode stable, lorsque la dose à la thyroïde risque de dépasser 100 mSv/an [140].

La réduction des doses et ces mesures doivent être mises en balance avec les effets adverses.

3.3 Comparaison de fonctionnalités des capteurs et appareils utilisés

3.3.1 Comparaison des capteurs électroniques utilisés

La structure interne d'un capteur ou détecteur est constituée d'un corps d'épreuve, d'un transducteur et d'un circuit de conditionnement du signal. Ce circuit est la partie idéale qui produit le signal utile à la sortie du capteur. Les capteurs MG811 (CO_2), SPEC(SO_2), CJMCU811 (COV), DHT22 (T, H), Samyoung DSM501B (PM), Shinyei PPD42NS (PM), Geiger-Müller J305 $\beta\gamma$, Geiger-Müller ZP-1200, Pocket Geiger-Müller utilisés dans le cadre de ce travail possèdent des circuits de conditionnement du signal et produisent chacun un signal traité et filtré. Tandis que les capteurs MQ (CO_2 , CO , GPL , O_3 et $laFume$) et CJMCU6814 (NO_2 et CO) ne possèdent pas de circuit de traitement du signal analogique. Les signaux de ces capteurs sont traités et analysés directement par un système à microcontrôleur associé.

3.3.2 Comparaison des dispositifs électroniques développés aux appareils de référence

La quasi-totalité des systèmes classiques de surveillance sont des instruments de haute qualité qui garantissent la qualité et la précision des données acquises [96]. Ces appareils très complexes sont par conséquent volumineux, coûteux et consomment beaucoup d'énergie [132–137, 141, 142]. Grâce à l'évolution technologique, à l'émergence des capteurs électroniques et cartes à microcontrôleur moins coûteux qui consomment moins d'énergie avec un temps de réponse très rapides on peut facilement réaliser des appareils de surveillance environnementale qui peuvent révolutionner le domaine de la surveillance et faciliter la prise de décisions sur la pollution. Le Tableau 23 présente une comparaison sommaire entre les appareils réalisés et les méthodes de référence utilisées.

3.3.3 Comparaison des dispositifs développés avec ceux existant dans la littérature

Certains appareils électroniques de surveillance de la qualité de l'air intérieur sur le marché, tels que présentés dans [103], sont certes portables et performants. Mais tous mesurent un nombre réduit de gaz (1 à 2) et de paramètres atmosphériques. Certains intègrent des capteurs de particules ($PM_{2,5}$), d'indice de qualité de l'air, de température, d'humidité et

Tableau 23 – Comparaison entre les appareils développés et les appareils de référence utilisées

Dispositifs développés	Gent Sampler [143]	Spectromètre gamma-RAD5 [144]
Dispositifs moins Coûteux : Radiamètre : 200000FCFA Dispositif des polluants atmosphériques : 250000FCFA Dispositif de la qualité de l'air : 350000FCFA	Appareil Coûteux (plus d'un million)	Appareil coûteux (plus d'un million)
Dispositifs moins énergivores : Dispositif des polluants atmosphériques : $P_{utile} = 2,25W$ Dispositif de la qualité de l'air : $P_{utile} = 1,75W$ Radiamètre : $P_{utile} = 1,25W$	Appareil énergivore : $P = 352W$	Appareil moins énergivore : $P = 1,5W$
Appareils légers et portables : Dispositif des polluants atmosphériques : 300g Dispositif de la qualité de l'air : 400g Radiamètre : 200g	Appareil très lourd : 25kg	Appareil lourd et portable : 3,35kg
Appareils à fonctionnement temps réel	Appareil à longue période d'analyse (24h)	Appareil à fonctionnement temps réel
Dispositifs de collecte automatique de données	Appareil de collecte manuelle de données	Appareil de collecte automatique de données
Mesure d'un grand nombre de gaz atmosphériques (8) et de rayonnements ionisants (gamma et bêta)	Mesure de deux types de particules matières ($PM_{2,5}$ et PM_{10})	Appareil de mesure des rayonnements ionisants (gamma)
Appareils intégrant les composants <i>IoT</i> (Xbee) avec une portée de transmission des données de 1,2 km	Appareil sans composants <i>IoT</i>	Appareil sans composants <i>IoT</i>

utilisent des applications disponibles basées sur le Wi-Fi qui offre une portée de 250 mètres à l'extérieur et 35 mètres à l'intérieur. D'autres appareils sont utilisés pour mesurer les composés organiques volatiles totaux (*TVOC*) ou filtrer le dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air. Cependant, selon les recommandations de l'OMS, on note que la notion de la qualité de l'air, qu'elle soit interne ou externe, nécessite une étude sur les particules ($PM_{2,5}$ ou PM_{10}) et les gaz toxiques tels que l'ozone troposphérique O_3 , le monoxyde de carbone CO , le dioxyde de soufre SO_2 et dioxyde d'azote NO_2 [91]. Les appareils développés dans le cadre de ce travail de thèse, mesurent tous ces polluants et les paramètres atmosphériques tels que la température et l'humidité. Ils servent à déterminer l'indice de la qualité de l'air et l'indice

air santé. Ils utilisent les modules de communication radio fréquence XBee S2C bande 2,4 GHz permettant la transmission sans fil de données vers un PC via l'application XCTU. Ces modules, idéaux pour les développeurs, offrent des possibilités de transmission de données sur une longue portée avec une visibilité jusqu'à 1200 m. Les modules XBee S2C offrent également une solution adaptée à la construction de réseaux d'équipements denses ou maillés. Ce qui est une alternative économique et efficace au déploiement des câbles de transmission [93, 96–99].

D'autre part, les appareils électroniques de mesure de la radioactivité existants, tels que présentés dans [36, 99], sont également portables et performants. Mais tous mesurent un seul rayonnement ionisant qui est soit un rayonnement gamma, bêta, alpha ou encore un rayonnement UV. Certains utilisent les technologies IoT avec des cartes Raspberry Pi, ce qui rend ces appareils parfois complexes et coûteux. Le radiamètre développé dans le cadre de ce travail de thèse, mesure les rayons gamma et bêta. Il permet de déterminer le débit de dose ambiante et la concentration radioactive du radon dans les espaces confinés. Il utilise aussi les modules de transmission radio fréquence XBee S2C de fréquence 2,4 GHz permettant la transmission sans fil de données vers un PC distant.

3.4 Conclusion

En somme, il était question dans ce chapitre de présenter l'ensemble des dispositifs réalisés et leurs applications dans la mesure des polluants atmosphériques et des rayonnements ionisants afin d'observer l'apport des capteurs et microcontrôleurs dans le domaine de la surveillance environnementale. Il en ressort que le dispositif de mesure des polluants atmosphériques avec système d'alerte SMS et appel d'urgence, l'appareil électronique de surveillance de la qualité de l'air basé sur la technique IoT et le radiamètre portables réalisés dans ce chapitre sont moins coûteux, effectuent en temps réel la mesure d'un grand nombre de polluants atmosphériques ou rayonnements ionisants et peuvent interagir avec un PC distant ou un opérateur via le téléphone portable. Ces appareils ont été utilisés dans la ville de Yaoundé pour la mesure de la concentration des polluants atmosphériques, l'évaluation de la qualité de l'air et de la radioactivité environnementale. Au demeurant, les appareils réalisés permettront non seulement de connaître la qualité de l'air dans les grandes villes mais aussi d'aider les pouvoirs publics à la prise de décision en matière de pollution atmosphérique et de radioprotection.

Conclusion générale et perspectives

Le travail de cette thèse est basé sur la conception, la réalisation et l'expérimentation des dispositifs électroniques à faible coût pour la surveillance environnementale. Ainsi, un radiamètre et deux dispositifs de surveillance des polluants atmosphériques ont été réalisés. Ces appareils portables et autonomes ont été utilisés dans la mesure des polluants de l'air à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments. Ils sont conçus à base des composants électroniques tels que les microcontrôleurs et capteurs qui mesurent en temps réel les polluants atmosphériques et le débit de dose ambiante issue des rayonnements ionisants. Les équipements réalisés effectuent également une transmission sans fil d'information à base de la carte GPRS et des modules Xbee de la technologie ZigBee, permettant ainsi de constituer un réseau Internet des Objets (IoT) entre le dispositif de mesure et un PC distant (via les modules Xbee et une application XCTU préalablement installée dans l'ordinateur) ou entre le dispositif de mesure et un opérateur (via la carte GPRS et un téléphone portable).

Bien que l'efficacité et la précision des capteurs électroniques ne sont pas encore suffisantes en comparaison avec les instruments de référence tels que les analyseurs (Gent Sampler et spectromètre gamma), il demeure que leur capacité en général est en perpétuelle amélioration et sont les seuls, capables de mesurer en temps réel un grand nombre de polluants et de générer un grand volume de données en très peu de temps. La complexité des analyseurs utilisés et les bons résultats des capteurs électroniques dans la littérature nous ont motivé dans ce travail de thèse pour la détection des rayonnements ionisants et de certains polluants atmosphériques.

Dans le premier chapitre de ce travail, les différents capteurs électroniques de surveillance environnementale, les cartes à microcontrôleur ainsi qu'un état de l'art sur les polluants atmosphériques, les techniques de surveillance environnementale et les appareils de référence utilisés ont été présentés. Tandis que le deuxième chapitre a été consacré à la description du fonctionnement des différents capteurs et cartes à microcontrôleurs utilisées ainsi que la réalisation des différents dispositifs de mesure. Quelques méthodes d'analyse des données

atmosphériques issues des capteurs ont également été abordées dans ce même chapitre.

Dans le troisième chapitre, il a été présenté les différents appareils de mesure réalisés ainsi que leurs diverses applications dans la surveillance de la qualité de l'air et la radioactivité environnementale. Une analyse comparative des données du $PM_{2,5}$ du dispositif électronique réalisé et celles de la méthode de référence basée sur l'échantillonneur Gent Sampler a été effectuée. Elle a permis d'obtenir un coefficient de régression de 0,8897 et un coefficient de fiabilité du dispositif électronique par rapport au Gent Sampler de 1,00. Une autre analyse comparative des données issues du radiamètre réalisé et celles du spectromètre gamma RAD5 (méthode de référence) a été effectuée. Cette analyse a donné une valeur moyenne de $64,30nGy/h$ des données du radiamètre réalisé, comparé à $50,67nGy/h$ obtenue par le spectromètre gamma RAD5. Des mesures de la qualité de l'air intérieur ont été effectuées dans deux environnements différents de la ville de Yaoundé afin d'évaluer les risques d'exposition des habitants à travers l'indice de la qualité de l'air (IQA) et l'indice de l'air santé ($AQHI_{2,5}$). La qualité de l'air était bonne dans ces environnements durant la période de mesure.

En somme, les différents résultats obtenus tout au long de ce travail montrent le bon fonctionnement des dispositifs réalisés et justifient par la même occasion la nécessité de proposer des appareils électroniques dédiés à la surveillance environnementale. Bien qu'étant encore des prototypes moins performants que les analyseurs de référence, les micro-capteurs électroniques sont moins coûteux, moins volumineux et sont indispensables pour la réalisation des appareils de surveillance environnementale. Ces dispositifs peuvent être optimisés et reproduits sur des circuits imprimés afin d'être commercialisés.

En perspective nous comptons mener des études visant à réduire davantage la consommation énergétique en utilisant des microcontrôleurs basse consommation (tels que MSP430, ARM, ...), des capteurs PM (tels que Sharp GP2Y) et des systèmes solaires. Car les dispositifs électroniques développés présentent plusieurs avantages certes mais ils sont composés de capteurs de gaz semi-conducteur à oxyde métallique (MQ), des capteurs de poussière Shinyei (qui possèdent une résistance chauffante) et des microcontrôleurs Arduino, qui ont encore une consommation énergétique élevée. Nous comptons reproduire les prototypes réalisés sur des circuits imprimés commercialisables et implémenter des chaînes de spectrométrie (alpha, bêta ou gamma) plus efficaces et robustes.

Bibliographie

- [1] Organisation mondiale de la Santé. Pollution de l'air et santé de l'enfant : prescrire un air sain : résumé. Technical report, Organisation mondiale de la Santé, 2018.
- [2] Qiang Zhang, Zheng Wan, Bill Hemmings, and Faig Abbasov. Reducing black carbon emissions from arctic shipping : Solutions and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 241 :118261, 2019.
- [3] AA Ruprecht, C De Marco, A Saffari, P Pozzi, R Mazza, C Veronese, G Angellotti, E Munarini, AC Ogliari, D Westerdahl, et al. Environmental pollution and emission factors of electronic cigarettes, heat-not-burn tobacco products, and conventional cigarettes. *Aerosol science and technology*, 51(6) :674–684, 2017.
- [4] Nezha Alaoui M'Hammdi, Larabi Jaïdi, and Iván Martín. Le partenariat afrique-europe : Quel renouveau dans l'après-covid-19 ?/the africa-europe partnership : What renewal in the post-covid-19 era ? 2020.
- [5] Robin Degron. Les objectifs de développement durable 2015-2030 : Un cadre international d'actions sous forte contrainte financière. *Gestion & Finances Publiques*, (3) :72–82, 2020.
- [6] Mehzabeen Mannan and Sami G Al-Ghamdi. Indoor air quality in buildings : a comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6) :3276, 2021.
- [7] Cecily M Grzywacz. *Monitoring for gaseous pollutants in museum environments*. Getty Publications, 2006.
- [8] Mateusz Kozicki, Michał Piasecki, Anna Goljan, Halina Deptuła, and Adam Niesłochowski. Emission of volatile organic compounds (vocs) from dispersion and cementitious waterproofing products. *Sustainability*, 10(7) :2178, 2018.
- [9] Mehmet Taştan and Hayrettin Gökozan. Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose. *Applied Sciences*, 9(16) :3435, 2019.

- [10] Christine Murray. *Impacts environnementaux et mesures d'atténuation reliés à l'exploration et à l'exploitation de mines d'uranium*. PhD thesis, Université du Québec, Canada, 2014.
- [11] Remus Prävălie. Nuclear weapons tests and environmental consequences : a global perspective. *Ambio*, 43(6) :729–744, 2014.
- [12] Nations Unies. *Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants*. Nations Unies, 1969.
- [13] G Failla. Biological effects of ionizing radiations. *Journal of Applied Physics*, 12(4) :279–295, 1941.
- [14] CM Larsson. The fasset framework for assessment of environmental impact of ionising radiation in european ecosystems—an overview. *Journal of Radiological Protection*, 24(4A) :A1, 2004.
- [15] David Bodansky. *Nuclear energy : principles, practices, and prospects*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [16] Ian B Wall, John J Haugh, and David H Worlege. Recent applications of psa for managing nuclear power plant safety. *Progress in nuclear Energy*, 39(3-4) :367–425, 2001.
- [17] DL Bailey, JL Humm, A Todd-Pokropek, and A van Aswegen. Nuclear medicine physics : A handbook for teachers and students. endorsed by : American association of physicists in medicine (aapm), asia–oceania federation of organizations for medical physics (afomp), australasian college of physical scientists and engineers in medicine (acpsem), european federation of organisations for medical physics (efomp), federation of african medical physics organisations (fampo), world federation of nuclear medicine and biology (wfnmb). 2014.
- [18] Lynn R Anspaugh. Doses to members of the general public and observed effects on biota : Chernobyl forum update. *Journal of environmental radioactivity*, 96(1-3) :13–19, 2007.
- [19] Keith Baverstock and Dillwyn Williams. The chernobyl accident 20 years on : an assessment of the health consequences and the international response. *Environmental Health Perspectives*, 114(9) :1312–1317, 2006.
- [20] Assemblée mondiale de la Santé. Effets des armes nucléaires sur la santé et l'environnement : rapport du directeur général. Technical report, Organisation mondiale de la Santé, 1993.

- [21] Larisa N Soldatova, Philippe Rocca-Serra, Michel Dumontier, and Nigam H Shah. Selected papers from the 16th annual bio-ontologies special interest group meeting, 2014.
- [22] Christine Wamsler and Ebba Brink. Interfacing citizens' and institutions' practice and responsibilities for climate change adaptation. *Urban climate*, 7 :64–91, 2014.
- [23] Jagriti Saini, Maitreyee Dutta, and Gonçalo Marques. A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health. *Sustainable Environment Research*, 30(1) :1–12, 2020.
- [24] TM Rachovski, IM Ivanov, EN Hadzhikolev, and SI Hadzhikoleva. Air pollution monitoring system. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, 8 :2275–2279, 2019.
- [25] A Ravishankar and R Pandian. Embedded system based sensor failiure detection and industrial environment controll over wireless network. *Int. J. Eng. Res.*, 3 :716–715, 2014.
- [26] Chalasani Srinivas and Mohan Kumar Ch. Toxic gas detection and monitoring utilizing internet of things. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(12) :614–622, 2017.
- [27] V Naren, P Indrajith, R Prabhu, and C Ganesh. Intelligent gas leakage detection system with iot using esp 8266 module. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 7(12), 2018.
- [28] Navreetinder Kaur, Rita Mahajan, Deepak Bagai, and PG Student. Air quality monitoring system based on arduino microcontroller. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5(6) :9635–9646, 2016.
- [29] P Purwanto, S Suryono, and S Sunarno. Design of air quality monitoring system based on web using wireless sensor network. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1295, page 012043. IOP Publishing, 2019.
- [30] JunHo Jo, ByungWan Jo, JungHoon Kim, SungJun Kim, and WoonYong Han. Development of an iot-based indoor air quality monitoring platform. *Journal of Sensors*, 2020.
- [31] Canh Viet Nguyen and Tuan La Minh. Design and fabrication of a dosimeter for measuring ionizing radiation. *VNU Journal of Science : Mathematics-Physics*, 31(1), 2015.
- [32] Nur Aira Abd Rahman, Lojius Lombigit, Nor Arymaswati Abdullah, Azraf Azman, Taufik Dolah, Amir Muzakkir, Zainudin Jaafar, Glam Hadzir Patai Mohamad, Abd

- Aziz Mhd Ramli, Rasif Mohd Zain, et al. Arduino based radiation survey meter. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1704, page 030012. AIP Publishing LLC, 2016.
- [33] Vinu Philip, Vishnu K Suman, Varun G Menon, and KA Dhanya. A review on latest internet of things based healthcare applications. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 15(1) :248, 2017.
- [34] Koyippilly S Keerthi, Bandana Mahapatra, and Varun Girijan Menon. Into the world of underwater swarm robotics : Architecture, communication, applications and challenges. *Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly : Recent Patents on Computer Science)*, 13(2) :110–119, 2020.
- [35] G Prasanna and J Jayapandian. An embedded read-out for gm counter. *International Journal of Instrumentation Technology*, 1(3) :228–240, 2014.
- [36] Francis Cottet and Emmanuel Grolleau. *Systèmes temps réel de contrôle-commande : conception et implémentation*. Dunod, 2005.
- [37] Andréa Dde Almeida Castanho, Paulo Artaxo, J Vanderlei Martins, Peter V Hobbs, Lorraine Remer, Marcia Yamasoe, and Peter R Colarco. Chemical characterization of aerosols on the east coast of the united states using aircraft and ground-based stations during the clams experiment. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(4) :934–946, 2005.
- [38] Mohamed Diao Ahmadou. *Contribution au développement d'un dispositif robuste de détection-diffusion d'huiles essentielles à concentration contrôlée*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2015.
- [39] Viviane Cadenat. *Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2011.
- [40] Véronique Debuy and Sébastien Bouchet. Les détecteurs de gaz inflammables à long chemin optique à l'essai. *Travail et Sécurité*, (646) :12–14, 2004.
- [41] Hassen Rapporteur Maaref, Michel Labeau, Christophe Pijolat, Jean Louis Hazemann, and Bernard Chenevier. de l'institut national polytechnique de grenoble.
- [42] Martyna Kuske and Jacques Nicolas. Les pollutions dans l'air intérieur des bâtiments-diagnostic-incidences sur la santé. 2000.
- [43] Kieu Ngo. *Etude d'un système multicapteur pour la détection sélective des gaz*. PhD thesis, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III, 2006.

- [44] C Pijolat. Utilisation des oxydes métalliques comme matériaux semi-conducteurs pour la détection des gaz.
- [45] F Chaabouni, M Abaab, and B Rezig. Metrological characteristics of zno oxygen sensor at room temperature. *Sensors and Actuators B : chemical*, 100(1-2) :200–204, 2004.
- [46] Xianghua Kong and Yadong Li. High sensitivity of cuo modified sno2 nanoribbons to h2s at room temperature. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 105(2) :449–453, 2005.
- [47] M Parthibavarman, B Renganathan, and D Sastikumar. Development of high sensitivity ethanol gas sensor based on co-doped sno2 nanoparticles by microwave irradiation technique. *Current Applied Physics*, 13(7) :1537–1544, 2013.
- [48] Isolde Simon, Nicolae Bârsan, Michael Bauer, and Udo Weimar. Micromachined metal oxide gas sensors : opportunities to improve sensor performance. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 73(1) :1–26, 2001.
- [49] Philippe Menini. Technologie des microcapteurs de gaz, 2012.
- [50] P Feng, Q Wan, and TH Wang. Contact-controlled sensing properties of flowerlike zno h. mexiner, metal oxide sensor. *Sensors and Actuators B*, 33 :198–202, 1996.
- [51] Patrick Mielle. Managing dynamic thermal exchanges in commercial semiconducting gas sensors. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 34(1-3) :533–538, 1996.
- [52] F Parret, Ph Ménini, A Martinez, K Soulantica, André Maisonnat, and Bruno Chaudret. Improvement of micromachined sno2 gas sensors selectivity by optimised dynamic temperature operating mode. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 118(1-2) :276–282, 2006.
- [53] Alexander Vergara, Eduard Llobet, Jesús Brezmes, P Ivanov, C Cané, Isabel Gràcia, X Vilanova, and X Correig. Quantitative gas mixture analysis using temperature-modulated micro-hotplate gas sensors : Selection and validation of the optimal modulating frequencies. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 123(2) :1002–1016, 2007.
- [54] Alexander Vergara, Xavier Vilanova, and Eduard Llobet. Dynamic methods for improving the performance of semiconductor gas sensors. *Intelligent Systems : Techniques and Applications (Shaker)*, pages 133–169, 2009.
- [55] Alexander Vergara, Eugenio Martinelli, Eduard Llobet, Arnaldo D’Amico, and Corrado Di Natale. Optimized feature extraction for temperature-modulated gas sensors. *Journal of Sensors*, 2009, 2009.

- [56] Philippe Menini. *Du capteur de gaz à oxydes métalliques vers les nez électroniques sans fil*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2011.
- [57] Pascal Nicolay. *Les capteurs à ondes élastiques de surface : applications pour la mesure des basses pressions et des hautes températures*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2007.
- [58] SébastienVE Février, Isabelle Chartier, and Bertrand Demotes-Mainard. Chapitre 14 : Micro-capteurs à semiconducteurs pour la détection du co2 par lionel presmanes. In *Chimie et technologies de l'information*, pages 217–234. EDP Sciences, 2021.
- [59] Isabelle Zdanevitch. Veille technologique : Capteurs de gaz. *Rapport technique, INERIS*, 2000.
- [60] Anne-Claude Romain. Microcapteurs gaz et capteurs électrochimiques. 2018.
- [61] Laurent Bouilloux. Badoris-synthesis document related to a safety technical barrier (bts). very-high-efficiency (the) filters. version 0-june 2006. document elaborated by the irsn. 2006.
- [62] Jacques Curie and Pierre Curie. Phénomènes électriques des cristaux hémiedres à faces inclinées. *Journal de Physique theorique et appliquee*, 1(1) :245–251, 1882.
- [63] Sybille Hellebrand, Steffen Tarnick, Bernard Courtois, and Janusz Rajski. Generation of vector patterns through reseeding of multiple-polynomial linear feedback shift registers. In *ITC*, pages 120–129, 1992.
- [64] Riko Yudistira. Aes (advanced encryption standard) and rsa (rivest–shamir–adleman) encryption on digital signature document : A literature review. *International Journal of Information Technology and Business*, 2(2) :26–29, 2020.
- [65] J Kengne, H Abdolmohammadi, V Folifack Signing, S Jafari, and GH Kom. Chaos and coexisting bifurcations in a novel 3d autonomous system with a non-hyperbolic fixed point : Theoretical analysis and electronic circuit implementation. *Brazilian Journal of Physics*, 50(4) :442–453, 2020.
- [66] Apostolos Gerodimos, Leandros Maglaras, Ioanna Kantzavelou, and Nick Ayres. Iot : Communication protocols and security threats. 2022.
- [67] Vachirapol Mayalarp, Narisorn Limpaswadpaisarn, Thanachai Poombansao, and Somsak Kittipiyakul. Wireless mesh networking with xbee. In *2nd ECTI-Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010), Pattaya, Chonburi, Thailand*, pages 10–12, 2010.

- [68] Hongyan Mao. Research of wireless monitoring system in power distribution transformer station based on gprs. In *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, volume 5, pages 386–389. IEEE, 2010.
- [69] Omar Mefdaoui. *Conception et Réalisation Hardware d'un Système de Monitoring des transformateurs de distribution*. PhD thesis, Université Virtuelle de Tunis, 2016.
- [70] Zouai Meftah. *Une approche cloud computing basée IoT pour le smart House*. PhD thesis, Université de mohamed kheider biskra, 2021.
- [71] Patrick Vandermeersch. *Passie en beschouwing : de christelijke invloed op het westerse mensbeeld*. Peeters, 1988.
- [72] Normes de sûreté. Publications de l'aiea concernant la surete. 2001.
- [73] F Testud and G Abadia-Benoist. Risques professionnels chez la femme enceinte. Technical report, EMC 16-660-A-10, 2010.
- [74] Pierre Auger. Sur l'effet photoélectrique composé. *Journal de Physique et le Radium*, 6(6) :205–208, 1925.
- [75] Sadika Sadouki. Entraînement d'un contrôleur pid par les algorithmes génétiques.
- [76] Daniel Blanc and Jacques Bourrieau. Réalisation et étude de compteurs de geiger-müller remplis de vapeur pure de mercure, fonctionnant à températures élevées. In *Annales de la Faculté des sciences de Toulouse : Mathématiques*, volume 26, pages 83–97, 1962.
- [77] Université de Toulouse. Faculté des sciences. *Annales de la Faculté des sciences de l'Université de Toulouse : pour les sciences mathématiques et les sciences physiques...*, volume 2. E. Privat, 1888.
- [78] Saim Asma. Détection et détecteurs de rayonnements. 2019.
- [79] Jean-Pierre Morucci. *Nouveau compteur proportionnel destiné à la détection "in vivo" de traces de plutonium dans les poumons*. Impr. L. Jean, 1966.
- [80] Charlène Bisch. *Etude de la forme des spectres β* . PhD thesis, Université de Strasbourg, 2014.
- [81] Abdel-Ghani Daba. *Mesure de l'ionisation en fonction du champ électrique dans le tétraméthylsilane (TMS)*. PhD thesis, Grenoble 1, 1992.
- [82] Yannick Lecompte. *Intérêt de la scintillation liquide à triples coïncidences dans la surveillance de l'exposition interne des travailleurs exposés au tritium*. PhD thesis, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, 2018.

- [83] Till Sohler. *Nouvelle approche de la dosimétrie des rayonnements ionisants par mesure de fluorescence, selon la technique du comptage de photon unique, corrélé en temps, à l'échelle nanoseconde*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2011.
- [84] Ragheb Hijazi. *Intégration sur silicium des capteurs et des fonctions de traitement de signal généré par des rayonnements nucléaires : application à la mesure du radon*. PhD thesis, Université de Limoges, France, 2012.
- [85] Eric Monmasson and Marcian N Cirstea. FPGA design methodology for industrial control systems—a review. *IEEE transactions on industrial electronics*, 54(4) :1824–1842, 2007.
- [86] Tim Vanevenhoven. High-level implementation of bit-and cycle-accurate floating-point dsp algorithms with xilinx fpgas. *White paper, Xilinx*, 2011.
- [87] Simon Noirot. *Commande par FPGA : de la modélisation à l'implémentation*. PhD thesis, École doctorale de Mathématiques, sciences et technologies de l'information et de la communication (Rennes), France, 2012.
- [88] Gabriel Gallin. *Unités arithmétiques et cryptoprocresseurs matériels pour la cryptographie sur courbe hyperelliptique*. PhD thesis, Rennes 1, 2018.
- [89] Mamadou Saliou II Diallo, M Mazoughou Goépogui, and Youssouf Balde. République de guinée. *Échanges et réseaux marchands en Afrique*, 7 :139, 2010.
- [90] Zaher Al Barakeh. *Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs—méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution..* PhD thesis, Saint-Etienne, EMSE, 2012.
- [91] Gbenga Oladoyin Salako, Philip K Hopke, David D Cohen, Bilkis A Begum, Swapan K Biswas, Gauri Girish Pandit, Yong-Sam Chung, Shamsiah Abd Rahman, Mohd Suhaimi Hamzah, Perry Davy, et al. Exploring the variation between ec and bc in a variety of locations. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1) :1–7, 2012.
- [92] Cécile Nolot. Traitement de la thématique «qualité de l'air intérieur» à l'agence régionale de santé du nord pas-de-calais : état des lieux et propositions d'évolution.
- [93] Henrik Olstrup, Christer Johansson, and Bertil Forsberg. The use of carbonaceous particle exposure metrics in health impact calculations. *International journal of environmental research and public health*, 13(3) :249, 2016.
- [94] Karoline K Johnson. *Evaluating air pollutant exposure and the impacts of indoor air filtration using low-cost monitors*. PhD thesis, Duke University, 2020.

- [95] Arouna Ndam Njoya, Wahabou Abdou, Albert Dipanda, and Emmanuel Tonye. Optimization of sensor deployment using multi-objective evolutionary algorithms. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2(4) :209–220, 2016.
- [96] Nasser Nducol, Yvette Flore Tchuenta Siaka, Susan Younui Yakum-Ntaw, Joseph Dika Manga, Juliette Cathérine Vardamides, et al. Preliminary study of black carbon content in airborne particulate matters from an open site in the city of yaoundé, cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(3) :1–11, 2021.
- [97] Shinji Tokonami, Masahiro Hosoda, Ndjana Nkoulou II Joseph Emmanuel, Naofumi Akata, Tchuenta Siaka Yvette Flore, Oumar Bobbo Modibo, Bineng Guillaume Samuel, and Takoukam Soh Serge Didier. Natural radiation exposure to the public in mining and ore bearing regions of cameroon. *Radiation Protection Dosimetry*, 184(3-4) :391–396, 2019.
- [98] Soh Takoukam, M Hosoda, Nkoulou II Ndjana, N Akata, O Bouba, S Tokonami, et al. Natural radioactivity measurements and external dose estimation by car-borne survey in douala city, cameroon. *Radioprotection*, 53(4) :255–263, 2018.
- [99] Flammable Gas Sensor. Zhengzhou winsen electronics technology co. Ltd, *User Manual, version*, 1.
- [100] Nom du polluant Symbole. Pollution de l’air et maladie coronaire.
- [101] Jean-Marie Cariolet, Marc Vuillet, and Youssef Diab. Systèmes urbains et pollution de l’air extérieur : Application du concept de résilience. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2019.
- [102] Zahia Alima Lamri, Ibtissem Bougoudjil, and Salah Azzedine Redouane. Contribution à l’étude de l’accouchement prématuré et impact sur la santé de la mère et le nouveau-né dans la région d’oum el bouaghi. 2018.
- [103] André Aurengo, Dietrich Averbeck, André Bonnin, Bernard Le Guen, R Masse, R Monier, M Tubiana, J Valleron, and F de Vathaire. La relation dose-effet et l’estimation des effets cancérigènes des faibles doses de rayonnements ionisants. *Académie des Sciences-Académie nationale de Médecine*, 2005.
- [104] Khaled Ziane. Implémentation d’un système de détection d’alcool au volant basé sur une instrumentation virtuelle.
- [105] Zeba Idrees, Zhuo Zou, and Lirong Zheng. Edge computing based iot architecture for low cost air pollution monitoring systems : a comprehensive system analysis, design considerations & development. *Sensors*, 18(9) :3021, 2018.

- [106] Oussama Euldji, Sid-Ahmed Lachenani, et al. Réalisation et conception d'un détecteur de gaz d'une maison intelligente. 2021.
- [107] Taeg Jin Lee, Oong Lee, Jongwoo Kim, and Leon Shterengas. Co2 sensor with data logger system. In *2012 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [108] Electrochemical Gas Sensor. Spec sensortm operation and performance considerations. 2016.
- [109] Chao-Linag Hsieh, Zheng-Wei Ye, Chen-Kang Huang, Yeun-Chung Lee, Chih-Hong Sun, Tzai-Hung Wen, Jehn-Yih Juang, and Joe-Air Jiang. A vehicle monitoring system based on the lora technique. *International Journal of Transport and Vehicle Engineering*, 11(5) :1100–1106, 2017.
- [110] E Massera, L Barretta, B Alfano, T Polichetti, ML Miglietta, and P Delli Veneri. Laboratory characterization for indoor scenario of the micro gas sensor sgx sensortech mics6814. In *AISEM Annual Conference on Sensors and Microsystems*, pages 249–256. Springer, 2020.
- [111] Ichrak Maamri. *Etude et réalisation d'un système de comtrôle à distance pour une serre expérimentale*. PhD thesis, ENSA, 2019.
- [112] Tracy Allen. De-construction of the shinyei ppd42ns dust sensor. *Fifth St, May*, 30, 2013.
- [113] Joel Kuula, Timo Mäkelä, Minna Aurela, Kimmo Teinilä, Samu Varjonen, Óscar González, and Hilka Timonen. Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(5) :2413–2423, 2020.
- [114] Yang Wang, Jiayu Li, He Jing, Qiang Zhang, Jingkun Jiang, and Pratim Biswas. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol science and technology*, 49(11) :1063–1077, 2015.
- [115] Mahmudul Alam, MD Khan, Md Khairulalam, Anas Syed, Rajprasad Rajkumar, and Tareq Bin Azam. Industrial level analysis of air quality and sound limits monitoring in bangladesh using real time control system. *Vibroengineering Procedia*, 16 :81–86, 2017.
- [116] Daniel Blanc. Le fonctionnement des compteurs de geiger-muller à autocoupure. *J. Phys. Radium*, 14(4) :260–269, 1953.

- [117] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [118] Oliver D King and Philippe Gaborit. Binary templates for comma-free dna codes. *Discrete Applied Mathematics*, 155(6-7) :831–839, 2007.
- [119] Solène Kojtych. *Mesures d'accélération et système d'acquisition par microcontrôleur Arduino Uno*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2019.
- [120] Khelifi Djamel Eddine and Ouirrou Hadj Yahia Djaber. *Conception et réalisation d'un mini stabilisateur de caméra*. PhD thesis, Faculté des Sciences et Technologies, 2021.
- [121] Patrick Mulder and Kelsey Breseman. *Node.js for embedded systems : using web technologies to build connected devices*. " O'Reilly Media, Inc.", 2016.
- [122] Bing Xu, Naiyan Wang, Tianqi Chen, and Mu Li. Empirical evaluation of rectified activations in convolutional network. *arXiv preprint arXiv :1505.00853*, 2015.
- [123] Ouaked Jugurtha. *Commande à distance d'un robot rigide à deux axes à base de la carte Arduino*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [124] Ramampandra José Patrick. Contribution a l'étude des systemes embarques sans fils integres pour l'internet des objets.
- [125] World Health Organization. *Air quality guidelines : global update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. World Health Organization, 2006.
- [126] Tze Wai Wong, Wilson Wai San Tam, Ignatius Tak Sun Yu, Alexis Kai Hon Lau, Sik Wing Pang, and Andromeda HS Wong. Developing a risk-based air quality health index. *Atmospheric environment*, 76 :52–58, 2013.
- [127] M Dias, H Bernardo, J Ramos, and M Egido. Indoor environment and energy efficiency in school buildings-part 1 : Indoor air quality. In *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- [128] Karolien Bloemen, Sandra Verstraelen, Rosette Van Den Heuvel, Hilda Witters, Inge Nelissen, and Greet Schoeters. The allergic cascade : review of the most important molecules in the asthmatic lung. *Immunology letters*, 113(1) :6–18, 2007.
- [129] Carlos Cruchaga, Celeste M Karch, Sheng Chih Jin, Bruno A Benitez, Yefei Cai, Rita Guerreiro, Oscar Harari, Joanne Norton, John Budde, Sarah Bertelsen, et al. Rare coding variants in the phospholipase d3 gene confer risk for alzheimer's disease. *Nature*, 505(7484) :550–554, 2014.
- [130] M Blanchard, D Borrelli, B Chardon, É Chatignoux, C Declercq, P Fabre, S Host, JF Jusot, S Larrieu, A Lefranc, et al. Programme de surveillance air et santé : Analyse

- des liens à court terme entre pollution atmosphérique urbaine et mortalité dans neuf villes françaises. *Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire*, page 41, 2008.
- [131] Timothée Bailloeuil. *Contours actifs et information a priori pour l'analyse de changements : application à la mise à jour de cartes numériques du bâti urbain à partir d'images optiques de télédétection haute résolution*. PhD thesis, 2005.
- [132] Caroline Van Renterghem. Les innovations technologiques sont-elles vraiment au service de la qualité de l'air et de la santé des citoyens? In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, number 4, pages 90–93. FFE, 2019.
- [133] Assemblée mondiale de la Santé. Santé, environnement et changements climatiques : projet de plan d'action sur les changements climatiques et la santé dans les petits états insulaires en développement : rapport du directeur général. Technical report, Organisation mondiale de la Santé, 2019.
- [134] Kun Zhou and Tat Leung Chan. Simulation of homogeneous particle nucleation in a free turbulent jet. *Aerosol Science and Technology*, 45(8) :973–987, 2011.
- [135] YM Han, JJ Cao, JC Chow, JG Watson, ZS An, and SX Liu. Elemental carbon in urban soils and road dusts in xi'an, china and its implication for air pollution. *Atmospheric Environment*, 43(15) :2464–2470, 2009.
- [136] Miles E Smid and Dennis K Branstad. Data encryption standard : past and future. *Proceedings of the IEEE*, 76(5) :550–559, 1988.
- [137] Ameer Sardar Kwekha-Rashid, Heamn N Abduljabbar, and Bilal Alhayani. Coronavirus disease (covid-19) cases analysis using machine-learning applications. *Applied Nanoscience*, pages 1–13, 2021.
- [138] Bernard Le Guen. Effet des faibles doses des rayonnements ionisants sur l'homme. *Hydroécologie Appliquée*, 15 :107–122, 2006.
- [139] G Bonardel. Radioprotection en médecine nucléaire : pourquoi et comment faire mieux? *Médecine nucléaire*, 38(3) :188–199, 2014.
- [140] Martin Schlumberger and Bernard Le Guen. Accident de centrale nucléaire et risque de cancer de la thyroïde-les conséquences sanitaires de tchernobyl. *médecine/sciences*, 28(8-9) :746–756, 2012.
- [141] S Maria Celestin Vigila and K Muneeswaran. Implementation of text based cryptosystem using elliptic curve cryptography. In *2009 First International Conference on Advanced Computing*, pages 82–85. IEEE, 2009.

-
- [142] Santokh Singh. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey. Technical report, 2015.
- [143] Willy Maenhaut, F Francois, and J Cafmeyer. The "gent" stacked filter unit (sfu) sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions : Description and instructions for installation and use. Technical report, 1994.
- [144] Roberto Koga and Luis Defilippi. Utilización del espectrofotómetro portátil gamma-rad5 amptek para la medición in vivo : Análisis comparativos de cálculos utilizando excel 2010 y genie 2000 canberra. *Informe Científico Tecnológico*, 17(1) :10–10, 2021.

Annexes

Annexe A : Approches de traitement et d'analyse des données issues des capteurs par la méthode de régression linéaire : Régression linéaire multiple (MLR)

La régression linéaire multiple est basée sur la modélisation des concentrations étudiées. Cette concentration représentée par la variable y , est fonction des paramètres extraits des réponses temporelles des capteurs de gaz que l'on note : x_1, x_2, \dots, x_k (k : nombre total de paramètres choisis). Le modèle de régression linéaire multiple s'écrit alors :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (53)$$

Où $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_k$ sont les coefficients de régression, et ε le terme d'erreur ou résidu. Il consiste alors à approcher au sens des moindres carrés la valeur de la concentration y , par une valeur (\hat{y}) grâce aux valeurs de $b_0, b_1, b_2 \dots b_k$ correspondant aux coefficients de régression $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_k$. La prédiction de la concentration (\hat{y}) sera donnée par l'équation suivante :

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + \dots + b_k x_k \quad (54)$$

Cette équation (49), qui permet de prédire une seule concentration, peut être formulée de manière plus générale pour un ensemble de concentrations $[\hat{y}_i]$ sous forme matricielle :

$$\hat{Y} = XB \quad (55)$$

avec $B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix}$

Le vecteur contenant les $k+1$ coefficients de régression et X la matrice contenant les données prédictives

$$x_{ij} X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{l1} & \cdots & x_{lk} \end{pmatrix}$$

X est une matrice à l lignes et k colonnes avec l le nombre de cycles de mesure effectuées aux diverses concentrations et k le nombre de paramètres extraits des réponses temporelles des capteurs à chaque mesure. Les paramètres contenus dans X sont généralement appelés des variables explicatives. En pratique, la matrice X contient une première colonne supplémentaire constituée uniquement de 1 (cette colonne est associée au coefficient b_0). La matrice B est un vecteur contenant les $k+1$ coefficients de régression MLR et \hat{Y} est le vecteur contenant les l estimations des concentrations à partir du modèle de régression. La méthode des moindres carrés consiste à calculer les coefficients $b_0, b_1, b_2 \dots b_k$ de façon à minimiser la somme des carrés des résidus e_i , notée SCR et définie par l'équation :

$$SCR = \sum_{i=1}^l e_i^2 \quad (56)$$

Avec $e_i = y_i - \hat{y}_i$ et l le nombre total d'observations ou de mesures effectuées. La valeur de SCR est utilisée pour juger la qualité du modèle. Si elle est nulle, l'estimation est sans aucune erreur, par contre une grande valeur de SCR montre que l'erreur d'estimation est forte, et que la régression n'est pas appropriée. Plusieurs indicateurs de la qualité de la régression peuvent être définis à partir de cette somme des carrés des résidus (SCR) :

a) **Coefficient de détermination R^2**

L'analyse de la variance de la régression utilise la somme des carrés des résidus (SCR) pour tester la validité du modèle en définissant le coefficient de détermination R^2 comme indicateur de la qualité du modèle de régression. Cette valeur R^2 ne peut être comprise qu'entre 0 (pas de relation linéaire entre X et Y) et 1 (proportionnalité exacte). Par conséquent, plus la valeur de R^2 tend vers 1, plus le modèle est intéressant. En pratique, si ce coefficient est inférieur à 0,9, le modèle de régression n'est sans doute pas applicable à la prédiction de nouvelles concentrations, et pour obtenir une certaine précision, ce coefficient doit dépasser un seuil de 0,96. Cependant, plus le nombre de variables explicatives augmente, plus la valeur de R^2 tend vers 1, quelle que soit la pertinence des variables utilisées.

b) **Rapport de Fisher F**

L'analyse de la variance de la régression permet de calculer le rapport de Fisher, noté

F comme indicateur de la qualité de la régression. Il est inversement proportionnel à la somme des carrés des résidus (*SCR*). Une valeur élevée de *F* est un indicateur de la qualité du modèle. Le test statistique, basé sur le résultat de ce rapport *F*, analyse la variabilité du modèle, en donnant une probabilité d'avoir tous les coefficients de régression égaux à 0 ($b_0 = b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$). Lorsque cette probabilité dépasse 5%, le modèle de régression linéaire multiple est à rejeter, car les coefficients de régression ne permettent pas d'expliquer la variabilité du modèle.

c) **Racine carrée de la moyenne des écarts RMSE**

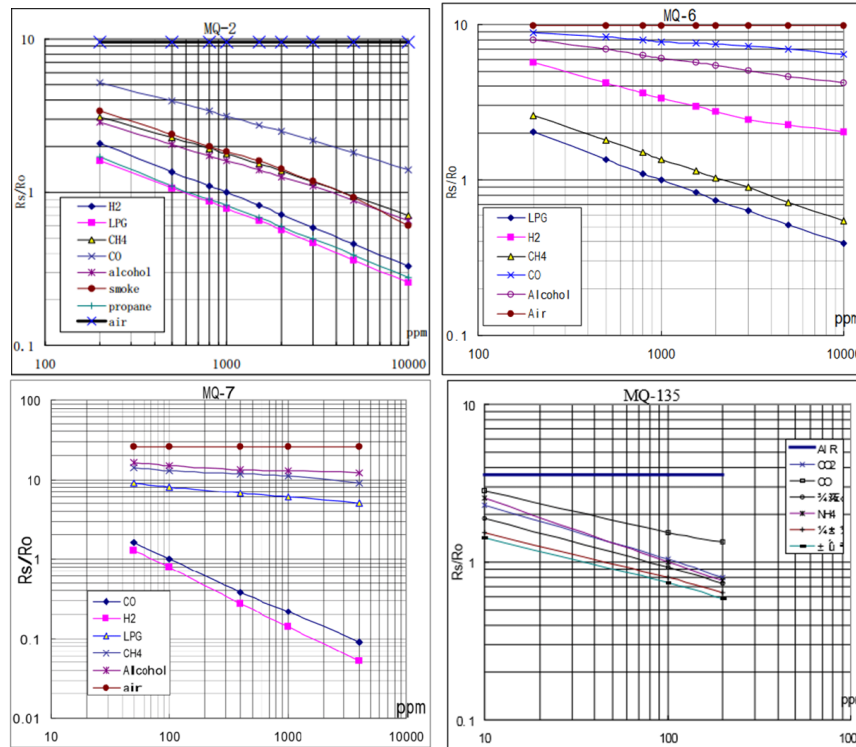
Un autre indicateur de la qualité du modèle est donné par la racine carrée de la moyenne des écarts ou résidus e_i . Cet indicateur est désigné en anglais par « Root Mean Square Error » (RMSE) et peut être défini par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{l} SCR} \quad (57)$$

Le RMSE donne une mesure moyenne de l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées. Cette valeur permet surtout de comparer différents modèles entre eux, et peut aussi être utilisée dans une phase de validation pour tester la robustesse du modèle avec d'autres données que celles utilisées pour l'étalonnage. La régression est meilleure lorsque la valeur du RMSE est petite.

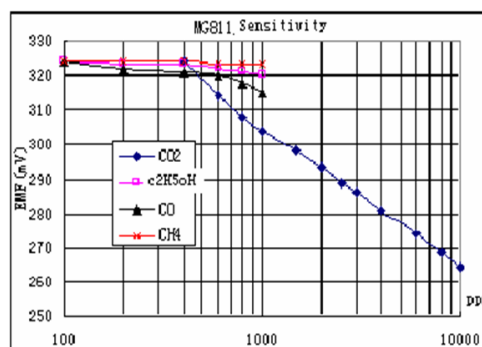
Annexe B : Courbes de sensibilité des capteurs (MQ et MG-811) et la table de la loi de Student

B.1. Capteurs MQ



Courbes de sensibilité des capteurs MQ2, MQ6, MQ7 et MQ135

B.2. Capteur MG-811



Courbes de sensibilité du capteur MG-811

B.3. Table de la loi de Student

k	γ										
	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.010	0.005	0.0025	0.0010	0.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

Liste des publications

1. **Mbarndouka Taamté Jacob**, Saïdou, Bodo Bertrand, Kountchou Noubé Michaux, Folifack Signing Vitrice Ruben, Younui Susan Yakum-Ntaw, Hamadou Yerima Abba, Chonlagarn Iamsurang, Charles Massey “Low-cost wireless smart device design for radiation protection and nuclear security”, *Journal of Instrumentation*, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/06/T06011> (**IOP**) 2021.
2. **Mbarndouka Taamté Jacob**, Kountchou Noubé Michaux, Bodo Bertrand, Tchunte Siaka Yvette Flore, Nducol Nasser, Folifack Signing Vitrice Ruben, Tagne Mogue Ruth Line, Saïdou “Low-cost air quality monitoring system design and comparative analysis with a conventional method”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00415-y>, (**Springer**)2021.