



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département : sécurité industrielle et environnement**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : hygiène et sécurité industrielle**  
**Spécialité : sécurité prévention intervention**

### **Thème**

**Les nouvelles techniques pour l'identification de  
la pollution dans une zone industrielle**

Présenté et soutenu publiquement par :

Boutibi Boutlelis

et

kelkoul Hasséne Hichem

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Établissement</b>	<b>Qualité</b>
Mr Bouhadiba Brahim	MCA	IMSI	<b>Président</b>
Mr Chennoufi Mohammed	MCA	IMSI	<b>Encadreur</b>
Mr Laloui Mohamed El amine	MAA	IMSI	<b>Examineur</b>

**Année 2020/2021**

## **REMERCIEMENTS**

*Tout et de nous avoir guidés vers le bon chemin tout le long de nos études.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à **Mr. CHENNOUFI Mohammed** qui a fait preuve d'une gentillesse, d'une compréhension et d'une patience infinies envers nous en vue de surmonter nos difficultés, Et aussi pour ces conseils, disponibilité et son suivi pendant la préparation de ce mémoire pendant toute la durée de l'encadrement*

*Nous tenons à remercier également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

*Aussi nous voudrions remercier **Mr. MIR Abdeljalil** et **Mr. KELKOUL Abdelkader** pour tous ces conseils et son encouragement ainsi que tout le personnel du département de sécurité au sein du complexe SPE BOUTLELIS et surtout **Mr. ZEKRI Abdelhafid**.*

*Un grand merci à l'ensemble des enseignants de l'I.M.S.I qui ont contribué à notre formation, nos camarades qui étaient à nos côtés, aux liens fraternels et amicaux qui ont germé dans nos esprits, surtout **TIARTI Sid Ahmed Ryad**.*

*Sans oublier nos remerciements à nos parents et à ceux qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin.*

*Boutlelis/ Hichem*

## **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à :*

*A mes chers parents*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.*

*A tous les membres de ma famille et mes amis*

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.*

**BOUTIBI BOUTLELIS**

## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la fleur de ma vie... ma très **chère mère** en témoignage de ma  
profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa  
patience, ses sacrifices tout au long de ma vie,*

*A Mon honorable et très **cher père** qui a sacrifié sa vie pour que  
je puisse me retrouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite,*

*Merci à tous **ceux qui m'ont soutenu** et m'ont encouragé à aller  
jusqu'à ce jour, qui est avec moi à ce moment et qui les a perdus,*

*Merci à tous **mes proches et amis** qui seront toujours dans mon  
cœur,*

**KELKOUL HASSENE HICHEM**

## Résumé

La pollution est toute dégradation d'un écosystème, Elle est généralement introduite par l'homme par la diffusion directe ou indirecte d'entités (physiques, chimiques ou biologiques) potentiellement toxiques pour les organismes et interférant plus ou moins avec les fonctions naturelles. Bien qu'elle puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines. Les niveaux de pollution ont augmenté de façon spectaculaire en raison de l'augmentation de la population humaine et du développement de l'industrie. On distingue trois types de la pollution « air, eau, sol », chaque type à son propre effet sur la santé et l'environnement.

L'objectif de notre travail, est axé d'une part sur les connaissances des sources de la pollution et leurs effets sur la santé et l'environnement, d'autre part sur les techniques pour l'identification de pollution dans une zone industrielle afin de protéger la santé humaine et l'environnement.

**Mot clés :** techniques-méthodes-identification-détection-analyse-prélèvement-echantillonnage-extraction-test.

## **Abstract**

Pollution is any degradation of an ecosystem. It is generally introduced by humans through the direct or indirect diffusion of entities (physical, chemical or biological) potentially toxic to organisms and interfering to a greater or lesser extent with natural functions. Although it may have an entirely natural origin (volcanic eruption, for example), it is mainly linked to human activities. Pollution levels have increased dramatically due to the increase in human population and the development of industry. There are three types of pollution "air, water, soil", each type has its own effect on health and the environment.

The objective of our work is focused on the one hand on knowledge of the sources of pollution and their effects on health and the environment, on the other hand on techniques for the identification of pollution in an industrial area in order to protect human health and the environment.

Keywords: techniques-methods-identification-detection-analysis-sampling-extraction-test.

## المخلص

التلوث هو أي تدهور في نظام بيئي، وعادة ما يتم إدخاله من قبل البشر من خلال الانتشار المباشر أو غير المباشر للكائنات (الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية) التي يحتمل أن تكون سامة للكائنات وتتدخل بدرجة أكبر أو أقل في الوظائف الطبيعية. على الرغم من أنه قد يكون له أصل طبيعي تمامًا (ثوران بركاني، على سبيل المثال)، إلا أنه مرتبط بشكل أساسي بالأنشطة البشرية. زادت مستويات التلوث بشكل كبير بسبب الزيادة في عدد السكان وتطور الصناعة. هناك ثلاثة أنواع من التلوث "الهواء والماء والتربة"، ولكل نوع تأثيره الخاص على الصحة والبيئة.

يتركز هدف عملنا من جهة على معرفة مصادر التلوث وآثارها على الصحة والبيئة، ومن جهة أخرى على تقنيات تحديد التلوث في منطقة صناعية من أجل حماية صحة الإنسان والبيئة. بيئة

الكلمات المفتاحية: تقنيات - طرق - تحديد - كشف - تحليل - أخذ عينات - أخذ عينات - استخراج - اختبار

## Glossaire

### **Environnement :**

Est l'ensemble des conditions naturelles, sociales et culturelles qui influencent la vie d'un individu ou d'une communauté.

L'environnement représente, l'ensemble des agents physiques (chaleur, rayonnement), chimiques (polluants) et biologiques (microscopiques), et des facteurs sociaux susceptibles d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou à terme, sur les êtres vivants et les activités anthropiques.

### **Pollution industriel :**

La pollution peut se définir comme étant la dégradation d'un milieu naturel à cause de substances chimiques et de déchets industriels. La pollution industrielle est la plus connue et la plus dangereuse de toutes les formes de pollution. En effet, ses conséquences peuvent toucher les régions qui ne sont pas industrialisées. Cette pollution s'intensifie au fur et à mesure des années. C'est pourquoi, il est important de trouver des solutions afin de limiter au maximum l'impact négatif que cela peut avoir sur la planète.

### **L'air :**

Le terme « air » désigne mélange gazeux parfait, incolore, inodore et invisible qui constitue l'atmosphère terrestre. On l'associe plus généralement à la troposphère, la couche de l'atmosphère de la Terre la plus proche de la surface du globe. En contact direct avec cette dernière, l'air est donc sensible à l'évaporation des océans, à la photosynthèse ou encore aux activités humaines.

Il est constitué de 78 % de diazote (N<sub>2</sub>), de 21 % d'oxygène (O<sub>2</sub>) mais également d'autres gaz (dioxyde de carbone, vapeur d'eau, hélium...) sans lesquels n'existeraient pas les conditions nécessaires à la protection et au maintien de la vie.

### **Polluants :**

Désigne un agent physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans le milieu liquide ou gazeux. Au sens large, le terme désigne des agents qui sont à l'origine d'une altération des qualités du milieu, même s'ils y sont présents à des niveaux inférieurs au seuil de nocivité. Pour les polluants qui ont un effet nocif sur les organismes vivants, on réserve le terme de contaminants. Des conventions internationales réglementent le rejet des polluants

selon leur toxicité. Un polluant est dit altéragène. On peut désigner sous le terme de polluant toute substance artificielle produite par l'homme et dispersée dans l'environnement, mais aussi toute modification d'origine anthropogène affectant le taux ou (et) les critères de répartition dans la biosphère d'une substance naturelle propre à tel ou tel milieu.

### **Poussière :**

La poussière est constituée de matériaux divers — notamment fibres et débris fins — assez légers pour être mis en suspension dans l'air, ou plus généralement, de matériaux particulaires d'un diamètre inférieur à 500 micromètres. Particules très fines qui se détachent de matériaux divers sous l'effet de chocs ou de déflagrations : Poussières industrielles. (Central électrique, industrie de cimenterie)

Les poussières peuvent poser des problèmes graves pour la santé des humains, des animaux et des plantes, mais aussi pour le fonctionnement des machines.

### **Odeurs :**

Une odeur est le résultat, perçu par le sens de l'odorat, de l'émanation des corps volatils contenus dans certaines substances comme les molécules souvent qualifiées de molécules odorantes ou de parfum, ou de fragrance dans le cas des fleurs.

### **Danger :**

Est une propriété intrinsèque du produit, pouvant compromettre l'existence, l'intégrité physique ou la santé des personnes, la préservation de l'environnement ou menaçant la sécurité des installations.

### **Risque :**

Est la probabilité de voir un danger causer un dommage lorsqu'il y a exposition à ce danger.

### **Les rejets industriels :**

Les effluents industriels sont par définition des eaux provenant d'une industrie, étant susceptibles de contenir des substances polluantes, souvent issues des procédés industriels. Bien évidemment l'ensemble des activités industrielles est soumise à réglementation environnementale et surveillance périodique. AZUR Fluides s'est spécialisé dans les effluents industriels issus de l'industrie agroalimentaire et alimentaire, de l'industrie pétrochimique,

chimie fine et pharmaceutique, des industries du secteur primaire, des industries papetières et manufacturiers.

**Laboratoire :**

Local disposé pour faire des recherches scientifiques, des analyses biologiques, des travaux photographiques, des essais industriels, etc. (Abréviation familière : labo).

**Technique :**

Ensemble des procédés employés pour produire une œuvre ou obtenir un résultat déterminé.

**Anticorps :**

Un anticorps est une glycoprotéine complexe utilisée par le système immunitaire adaptatif pour détecter et neutraliser les agents pathogènes de manière spécifique.

**Plasma :**

Un plasma est une phase de la matière constituée de particules chargées, d'ions et d'électrons.

**Ecosystème :**

Est un ensemble formé par une communauté d'êtres vivants en interaction (biocénose) avec son environnement (biotope). Les composants de l'écosystème développent un dense réseau de dépendances, d'échanges d'énergie, d'information et de matière permettant le maintien et le développement de la vie.

**Nappe phréatique :**

Est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable. C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface.

**Géogénique :**

un sol dans lequel a été confirmée la présence, due à des sources géogéniques comme la roche mère et l'activité volcanique, de substances dans des concentrations telles que les États membres considèrent qu'il peut en résulter un risque important pour la santé humaine ou pour l'environnement, compte tenu de l'utilisation effective du sol et de son utilisation future autorisée.

**Prélèvement :**

Action de prélever une matière, une somme d'argent, etc. ; somme prélevée.

**Échantillon :**

Est une quantité limitée d'un ensemble qui est utilisée pour représenter et étudier les propriétés de cet ensemble.

**Identification :**

Désigne l'action consistant à identifier (donner, attribuer un nom ou un code en propre à la chose ou la personne ainsi reconnue) un objet ou un individu.

**Eau :**

L'eau est une substance chimique constituée de molécules H<sub>2</sub>O. Ce composé est très stable et néanmoins très réactif, et l'eau liquide est aussi un excellent solvant. Dans de nombreux contextes, le terme *eau* est employé au sens restreint d'eau à l'état liquide, ou pour désigner une solution aqueuse diluée (eau douce, eau potable, eau de mer, eau de chaux, etc.).

**Effet :**

Ce qui est produit par une cause.

**Analyse :**

Opération intellectuelle consistant à décomposer un tout en ses éléments constituants et d'en établir les relations.

**Sol :**

Couche supérieure de la croûte terrestre composée des particules minérale, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes

## Liste des abréviations

**AFNOR** : association française de normalisation

**ONU** : organisation des nations unies

**FID** : Détecteur à ionisation de flamme

**ECD** : détecteur a capture d'électrons

**PID** : détecteur a photo ionisation

**UV** : ultra-violet

**IR** : rayonnement infrarouge

**PPM** : partie par million

**LD** : limite de détection

**TCD** : détecteur de conductibilité thermique

**COV** : composés organiques volatils

**GES** : gaz a effet de serre

**CFC** : Chlorofluocarbure

**CLD** : détecteur de chimiluminescence

**PM** : photo-multiplication

**PM10** : les particules dont le diamètre inférieur à 10 micromètres

**ANSEN** : agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail

**ELISA** : enzyme-linked immuno sorbent assay/ essai immuno-sorbant enzymatique

**PCB** : polychlorobiphényles

**IFPEN** : institut français du pétrole et l'énergie nouvelle

**TLSE** : thin-layer sorptive extraction/ Extraction sorptive en couche mince

**ATR** : Attenuated Total Reflectance/ réflectance totale atténuée

**FTIR** : Fourier transform infrared / infrarouge avec transformation de Fourier

**COT** : carbone organique totale

**LIBS** : laser-induced breakdown spectroscopy/ spectroscopie sur plasma induit par laser

**VIS** : visible

**PXRF** : portable x-ray fluorescence spectroscopy/ spectroscopie de fluorescence X portable

**K** : potassium

**Pb** : Plomb.

**Th** : Thorium

**Mg : Magnésium**

**Al : Aluminium**

**Si : silicium**

**P : phosphore**

**S : soufre**

**Cl : chlore**

**U : uranium**

**Li : lithium**

**Cu : cuivre**

**Cd : cadmium**

**Zn : zinc**

**Mn : manganèse**

**Fe : fer**

**ETM : éléments traces métalliques.**

**WD-XRF : Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry/ les spectromètres à dispersion en longueur d'onde.**

**ED-XRF : Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry/ les spectromètres à dispersion en énergie.**

**WDS : Wavelength Dispersive Spectrometry / Spectrométrie dispersive en longueur d'onde**

**EDS : Energy Dispersive Spectrometry / Spectrométrie à dispersion d'énergie**

**SDD : Silicon Drift Detector / Détecteur de dérive de silicium**

**ATB : antibiotique**

**GESAMP : Groupe Mixte d'Experts des Aspects Scientifiques de la Pollution des Mers**

**AA : anime aromatique.**

**DDT : dichloro-diphényle-trichloro-éthane**

**ICP : Inductively Coupled Plasma/ Plasma à couplage inductif**

**OES : Optical Emission Spectrometry/ Spectrométrie d'émission optique**

**MS : Mass Spectrometry/ Spectrométrie de masse**

**LIBD : Laser Induced Breakdown Detection/ Détection de panne induite par laser**

**2D : deuxième dimension**

**CDD : charge coupled device/ dispositif à couplage de charge**

**TEM : transverse électromagnétique**

**RIU : Refractive Index Unit / Unité d'indice de réfraction**

**SPR : résonance des plasmons de surface**

**H<sub>2</sub>S : hydrogène et de soufre**

**MIR : moyen-infrarouge**

**LC : liquid chromatography / chromatographie liquide**

**LCHP : high performance liquid chromatography / Chromatographie en phase liquide à haute performance**

**IUPAC : Union internationale de chimie pure et appliquée**

**ADN : Acide désoxyribonucléique**

**BTEX : Benzène, Toluène, Ethyle-benzène, Xylènes**

**CHEMINI : CHEmical MINIaturized Analyzer / Analyseur CHémiqUE MINIaturisé**

**COV : Composés Organiques Volatils**

**MEB : Microscopie Electronique à Balayage**

**MET : Microscopie Electronique à Transmission**

**EDX : Energy Dispersive X-ray / Rayon X à dispersion d'énergie**

**PCS : Spectroscopie par corrélation de photons**

**PH : caractère acide ou alcalin des eaux.**

**MES : matières en suspension.**

**MeST : matières totales en suspension.**

**DBO<sub>5</sub> : demande biochimique en oxygène.**

**DCO : demande chimique en oxygène.**

**MatO : matières oxydables.**

**N<sub>GI</sub> : azote global.**

**N<sub>TK</sub> : azote Kjeldahl.**

**N-NH<sub>4</sub> : azote ammoniacal.**

**N-NO<sub>2</sub> et N-NO<sub>3</sub> : l'azote sous forme de nitrites, respectivement nitrates.**

**P<sub>T</sub> : phosphore total.**

**EH : équivalent habitant.**

**XRF : X fluorescence spectrometry / La spectrométrie de fluorescence X**

## Liste des figures

Figure 1 1: les types de pollution et leur chemin de contamination.....	7
Figure 1 2:les sources et les impacts de pollution de l'air .....	8
Figure 1 3: feux de forêt .....	9
Figure 1 4:éruption volcanique.....	10
Figure 1 5:effet de serre .....	10
Figure 1 6:pollution due au transport.....	11
Figure 1 7:pollution industriel .....	12
Figure 1 8:pollution agricole air.....	12
Figure 1 9:les conséquences de pluie d'acide.....	15
Figure 1 10:eutrophisation .....	16
Figure 1 11: les effets de la pollution atmosphérique.....	17
Figure 1 12: les principaux polluants dans les milieux aquatiques .....	17
Figure 1 13 : pollution de l'eau à cause des rejets industriels .....	19
Figure 1 14:pollution de l'eau à cause des activités agricole.....	20
Figure 1 15 : pollution marine engendrer par les rejets domestiques.....	21
Figure 1 16 : le flux de matière transitant par le sol.....	23
Figure 1 17: Des déchets industriels banals.....	26
Figure 1 18: Des déchets inertes .....	26
Figure 1 19: Déchets industriels spéciaux dangereux .....	27
Figure 1 20 : déchet ultime radioactif.....	27
Figure 1 21 : synoptique des flux de gestion des déchets .....	28
Figure 2 1: schéma d'un chromatographe.....	35
Figure 2 2:principe d'un Catharomètre.....	36
Figure 2 3:un détecteur de fid .....	36
Figure 2 4:spectre électromagnétique.....	37
Figure 2 5: schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau.....	39
Figure 2 6:principe de fonctionnement d'un analyseur automatique .....	46
Figure 2 7:principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA AC 32e.....	48
Figure 2 8: principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA CO 12e .....	49
Figure 2 9: principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA AF22e.....	49
Figure 2 10:le schéma de fonctionnement ENVEA O3 42e.....	50
Figure 2 11:détecteur fixe de gaz.....	52
Figure 2 12:détecteur portables de gaz.....	52
Figure 2 13:détecteur fixe de poussière .....	52
Figure 2 14:détecteur portables de poussière .....	52
Figure 3 1:Schéma de principe de l'ellipsométrie .....	65
Figure 3 2: Schéma de principe d'un interféromètre de Mach Zehnder .....	66
Figure 3 3:Schéma de principe d'un capteur SPR.....	67
Figure 3 4:L'ALCHIMIST développé par l'Ifremer .....	69
Figure 3 5: analyseur CHEMINI d'azote ammoniacal par fluorométrie.....	69
Figure 3 6: émission d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de sa température .....	70
Figure 3 7:Représentation schématique d'un biocapteur .....	73

Figure 3 8:Schéma d'une architecture de système de biocapteur typique .....	73
Figure 3 9:Représentation des différents types de bio-récepteurs .....	74
Figure 3 10:Cheminé surface et grand fond .....	77
Figure 4 1: Plan générale d'une analyse de sol .....	81
Figure 4 2:schéma d'application du teste immune-enzymatique .....	85
Figure 4 3: Kit de Dosage ummino-enzymatique (ELISA).....	87
Figure 4 4: kit de la méthode ROCK-EVAL 7S .....	89
Figure 4 5: le spectromètre infrarouge .....	91
Figure 4 6:schéma d'un montage standard LIBS.....	92
Figure 4 7 : Principes de la fluorescence X .....	93
Figure 4 8:PXRF (field portable X-ray fluorescence).....	94
Figure 4 9:Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en longueur d'onde.....	96
Figure 4 10: Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en énergie .....	97
Figure 5 1 : carte ARDUINO Méga.....	100
Figure 5 2: capteur de fumée .....	102
Figure 5 3 : détecteur de monoxyde de carbone MQ7 .....	103
Figure 5 4 : capteur de temperature LM35 .....	105
Figure 5 5:les câbles de connexions.....	105
Figure 5 6:La platine d'expérimentation .....	106
Figure 5 7:les diodes électroluminescentes .....	106
Figure 5 8 : le Buzzer.....	107
Figure 5 9 : interface de logiciel.....	107
Figure 5 10:interface de logiciel.....	108
Figure 5 11:interface de logiciel.....	108
Figure 5 12: schéma de câblage de système .....	112
Figure 5 13 : réalisation de câblage de système .....	113
Figure 5 14 : les résultats du test 1 .....	115
Figure 5 15: les résultats analogiques de test 2 .....	116
Figure 5 16 : les blocs dans arduino IO .....	123
Figure 5 17: schéma de simulation de système de détection.....	124
Figure 5 18:les courbes des résultats des tests par la simulation Matlab .....	125

## Liste des tableaux

Tableau 1 1: les sources majeurs des certains polluants.....	13
Tableau 1 2: Problèmes engendrée par l’abandon et l’épandage incontrôlés des déchets dans la nature .....	30
Tableau 2 1:les types d'analyseur par rapport aux techniques d'identification.....	46
Tableau 2 2:quelques exemples d'analyseurs : .....	47
Tableau 2 3:cracteristique d'anlyseurs MIR 9000e :.....	51
Tableau 2 4:les types des détecteurs automatique : .....	53
Tableau 3 1: valeurs limites des rejets des effluents industriels.....	61
Tableau 4 1:seuil de toxicité pour certains polluants minéraux rencontrés sur les sites pollués .....	82
Tableau 4 2 : La concentration moyenne des ETM dans le sol non polluée.....	94
Tableau 4 3:Comparaison des spectromètres EDS et WDS .....	97
Tableau 5 1: les caractéristiques et les différents pins du capteur MQ2.....	102
Tableau 5 2 : les caractéristiques et les différents pins du capteur MQ7 .....	104
Tableau 5 3 : les résultats digitaux de deux test.....	118

## Table des matières

REMERCIEMENTS

DEDICACES

Résumé

Abstract

الملخص

Glossaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général..... 1

### Chapitre 1 : généralité sur la pollution

1. Introduction de la pollution :..... 3

2. Histoire de pollution :..... 4

3. Définition de pollution :..... 5

3.1 Définition de la rousse :..... 6

3.2 Définition de la pollution donnée par la Directive européenne :..... 6

3.3 Le Dictionnaire de l'environnement, Les termes normalisés de l'AFNOR :..... 6

3.4 La pollution considérée par l'ONU :..... 7

4. Les types de pollution :..... 7

4.1 Pollution de l'air :..... 7

4.1.1 Définition du journal officiel de la république algérienne :..... 8

4.1.2 Principales sources de pollution de l'air :..... 8

4.1.2.1 Les sources naturelles :..... 8

4.1.2.1.1 Combustion naturelle: Feux de forêts (CO, CO<sub>2</sub>) :..... 8

4.1.2.1.2 L'éruption volcanique: (poussières, SO<sub>2</sub>, F) :..... 9

4.1.2.1.3 Processus de fermentation de la matière organique (gaz à effet de serre : CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>) :..... 10

4.1.2.2 Les sources anthropogéniques :..... 10

4.1.2.2.1 Les moyens de transport (routier, aérien, maritime, ferroviaire.) :..... 11

4.1.2.2.2 Industrie (centrales électriques, Incinérateurs...) :..... 11

4.1.2.2.3 Agriculture (engrais, élevage...) :..... 12

4.1.2.2.4 Secteurs résidentiels (chauffages, produits sanitaires...) :..... 12

4.1.3 Impacts écologiques de la pollution de l'air :..... 14

4.1.3.1 Pluies acides :..... 14

4.1.3.2	Le Brouillard Photochimique Oxydant :.....	15
4.1.3.3	Exacerbation de l'effet de serre « effet de serre additionnel » :.....	15
4.1.3.4	Destruction de la couche d'Ozone :.....	15
4.1.3.5	Eutrophisation : .....	16
4.1.4	Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé de l'homme :.....	16
4.2	Pollution de l'eau :.....	17
4.2.1	Définition de pollution de l'eau :.....	17
4.2.2	Principales sources de la pollution de l'eau :.....	17
4.2.2.1	La pollution industrielle :.....	17
4.2.2.2	La pollution domestique :.....	19
4.2.2.3	La pollution agricole :.....	19
4.2.3	Impacts écologiques de la pollution de l'eau :.....	20
4.2.4	Pollution marine :.....	21
4.2.5	Les effets de la pollution de l'eau sur la santé humaine : .....	22
4.3	Pollution de sol :.....	22
4.3.1	Définition :.....	22
4.3.2	D'origine et source : .....	23
4.3.2.1	Pollution d'origine non humaine:.....	23
4.3.2.2	Pollution d'origine humaine:.....	23
4.3.2.2.1	Pollution d'origine agricole :.....	24
4.3.2.2.2	Pollution d'origine industrielle :.....	25
4.3.3	Effets sur la santé humaine :.....	28
4.3.4	Impact sur l'environnement et l'écosystème : .....	29

## **Chapitre 2 : techniques d'identification de la pollution de l'air**

1.	Introduction : .....	32
2.	Les techniques et les méthodes d'identification des polluants au laboratoire : .....	32
2.1	Echantillonnage et technique de séparation :.....	32
2.2	Les techniques et les méthodes analytiques :.....	34
2.2.1	Les techniques physiques :.....	34
2.2.1.1	La technique de Chromatographie en phase gazeuse(GC) :.....	34
2.2.1.1.1	Catharomètre : .....	35
2.2.1.1.2	Détecteur à ionisation de flamme FID : .....	36
2.2.1.1.3	Détecteur à capture d'électrons (ECD) :.....	36
2.2.1.1.4	Détecteur à photo ionisation(PID) : .....	37
2.2.1.2	La technique Spectrométrie :.....	37

2.2.1.2.1	Absorption du rayonnement IR :.....	37
2.2.1.2.2	Absorption dans le visible et l'ultraviolet :.....	38
2.2.1.2.3	Chimiluminescence :.....	39
2.2.1.2.4	Fluorescence UV :.....	39
2.2.1.2.5	Spectrométrie d'absorption atomique : .....	40
2.2.1.3	Spectrométrie de masse :.....	40
2.2.2	Techniques chimiques (classiques) : .....	41
2.2.2.1	La technique gravimétrique : .....	41
2.2.2.2	La technique volumétrique :.....	41
2.2.3	Techniques et Méthodes pour poussière :.....	41
2.3	Exemple de dosage des polluants :.....	42
2.3.1	Méthodes pour gaz inorganiques :.....	42
2.3.2	Méthodes pour Gaz organiques : .....	43
2.4	Les Odeurs:.....	44
3.	Les techniques et les méthodes dynamiques « des mesures en temps réel » :.....	45
3.1	Les analyseurs industriels automatiques « sur site » :.....	45
3.1.1	Présentation des analyseurs automatiques :.....	45
3.1.2	Les types d'analyseur automatique :.....	46
3.1.3	Le domaine d'application des analyseurs automatiques : .....	47
3.1.4	Objectif d'utilisation des analyseurs :.....	47
3.1.5	Exemple de quelque analyseur automatique : .....	47
3.1.5.1	L'analyseur ENVEA AC 32e pour identification de polluant NOx-NO2-NO par technique Chimiluminescence :.....	48
3.1.5.2	L'analyseur ENVEA CO 12e pour identification de polluant CO par la technique d'Absorption IR :.....	48
3.1.5.3	L'analyseur ENVEA AF 22e pour identification de polluant SO2 par la technique de Fluorescence UV : .....	49
3.1.5.4	L'analyseur ENVEA O3 42e pour identification de polluant d'O3 par la techniques Absorption UV :.....	50
3.1.5.5	Analyseur ENVEA MIR 9000e multi gaz par la techniques NIDR : .....	50
3.2	Les Détecteurs des polluants automatiques « fixe /portable » :.....	51
3.2.1	Détection en temps réel des gaz ou des vapeurs :.....	53
3.2.1.1	Interférences lors de l'utilisation : .....	54
3.2.1.2	Positionnement :.....	54
3.2.1.3	Vérifications et maintenance : .....	54
3.2.1.4	Formation :.....	55

3.2.2	Détection de poussières .....	55
3.2.2.1	Pour quelles utilisations ?.....	55
3.2.2.2	Comment fonctionnent-ils ?.....	56
3.2.2.2.1	Photomètres : .....	56
3.2.2.2.2	Compteurs de particules :.....	56
3.2.2.3	Précautions et maintenance : .....	57

### **Chapitre 3 : techniques d'identification de la pollution de l'eau**

1.	Introduction : .....	59
2.	Paramètres de définition de la pollution de l'eau : .....	59
3.	La détection par UV-Vis ou par fluorescence pour l'identification de pollution d'eau : .....	61
4.	Techniques de mesure de la composition chimique par spectroscopie L'ICP/OES et l'ICP/MS : .....	62
5.	La techniques LIBD/LIBS : .....	62
6.	Les capteurs optiques : .....	64
6.1	Technique réfractométries : .....	64
6.1.1	L'Ellipso-métrie : .....	65
6.1.2	L'Interférométrie : .....	66
6.1.3	La résonance plasmonique de surface : .....	66
6.2	Stratégie de mesure de l'eau polluée par des micro-capteurs optiques : .....	67
6.2.1	Mesure sur site : .....	67
6.2.1.1	Les capteurs électrochimiques : .....	68
6.2.1.2	Capteurs spectrophotométries UV-Visible : .....	68
6.3	La spectroscopie par les capteurs MIR : .....	69
7.	Chromatographie : .....	70
7.1	La chromatographie en phase liquide (LC) ou à haute performance (CLHP) : .....	71
7.2	La chromatographie ionique : .....	72
8.	Les systèmes des biocapteurs : .....	72
8.1	Définition : .....	72
8.2	Principe général : .....	72
8.3	Description du biocapteur : .....	73
8.3.1	Plates -formes de détection du biocapteur.....	73
8.3.2	Transducteur : .....	73
8.3.3	Bio-récepteur : .....	74
8.4	Les performances des biocapteurs : .....	74
8.5	Biocapteurs électrochimiques : .....	75

8.6	Biocapteurs électrochimiques et le Monitoring : .....	75
9.	Capteurs in situ pour la détection de pollution des eaux : .....	75
10.	Techniques de caractérisation physico-chimique des particules dans les liquides : .....	77
10.1	Centrifugation et ultracentrifugation : .....	77
10.2	Techniques de mesure de la taille : .....	77
10.3	Microscopie électronique MEB / MET / AFM : .....	78
10.4	Techniques de mesure de la masse et du nombre : .....	79

## **Chapitre 4 : techniques d'identification de la pollution du sol**

1.	Introduction : .....	81
2.	Démarche générale suivie pour les analyses des polluants dans le sol : .....	81
2.1	Plan générale d'une analyse de sol : .....	81
3.	Les tests éco-toxicologiques : .....	81
4.	Les méthodes rapides de terrain : .....	83
4.1	Principe et objectifs : .....	83
4.2	Limitations et contraintes d'utilisation : .....	83
4.3	Les méthodes les plus commercialisé : .....	84
4.3.1	Teste immune-enzymatique (ELISA) : .....	84
4.3.1.1	Principes du teste immune-enzymatique (ELISA) : .....	84
4.3.1.2	Spécificité : .....	85
4.3.1.3	Application à l'analyse des sols : .....	86
4.3.2	La méthode ROCK-EVAL 7 S : .....	88
4.3.2.1	Définition : .....	88
4.3.2.2	La performance : .....	89
4.4	Techniques de laboratoire adapté au terrain : .....	90
4.4.1	La spectroscopie infrarouge : .....	90
4.4.2	La spectroscopie de plasma induit par laser : .....	91
4.4.3	La spectroscopie par des kits à fluorescence X : .....	92
4.4.3.1	Définition : .....	92
4.4.4	La spectroscopie par PXRf (field portable X-ray fluorescence) : .....	94
4.4.4.1	Définition : .....	94
4.4.5	Types d'appareillage du spectromètre : .....	95
4.4.5.1	Les spectromètres à dispersion en longueur d'onde : .....	95
4.4.5.2	Les spectromètres à dispersion en énergie (EDS) : .....	96
4.4.5.3	Comparaison des spectromètres EDS et WDS : .....	97
4.4.5.4	Applications potentielles : .....	98

4.4.5.5 Technologies a développées : .....	98
--	----

## **Chapitre 5 : réalisation d'un système de détection du monoxyde de carbone et du fumé dans l'air**

1. Objectif de ce travail : .....	100
2. Le principe de ce système : .....	100
3. Description des différents composants utilisés pour la réalisation : .....	100
3.1 ARDUINO MEGA 2560 : .....	100
3.1.1 La constitution de la carte Arduino Mega : .....	100
3.1.2 Les sources de l'alimentation de la carte : .....	101
3.1.3 Entrées et sorties numériques : .....	101
3.1.4 Entrées et sorties analogiques : .....	101
3.2 DETECTEUR de fumée « MQ2 » : .....	102
3.3 Capteur de monoxyde de carbone « MQ7 » : .....	103
3.4 Capteur de température LM35 : .....	104
3.5 Les câbles : .....	105
3.6 La platine d'expérimentation : .....	106
3.7 Diode électroluminescente (LED) : .....	106
3.8 Buzzer : .....	107
3.9 Logiciel arduino : .....	107
3.9.1 Prise en main de logiciel : .....	107
3.9.2 L'interface du logiciel : .....	108
3.9.3 Langage de logiciel : .....	109
3.9.3.1 Les fonctions de programme : .....	109
3.9.3.2 Les instructions : .....	110
3.9.3.3 Les points virgulent : .....	111
3.9.3.4 Les accolades : .....	111
3.9.3.5 Les commentaires : .....	111
3.9.3.6 Les accents : .....	112
4. Application de pratique : .....	112
4.1 Le principe de Câblage: .....	112
4.2 Le programme arduino : .....	113
4.3 Les tests de ce système de détection : .....	115
4.3.1 Les résultats digitaux de ces 2 tests : .....	116
4.3.1.1 Les LEDS : .....	116
4.3.1.2 Le Buzzer : .....	117

5. Simulation de système de détection interfacé à la carte arduino avec logiciel MATLAB :...	123
5.1 Les étapes à suivre :.....	123
5.2 Exploitation de la bibliothèque ArduinoIO sous Simulink : .....	124
5.2.1 Les résultats obtenues :.....	124
Conclusion général .....	127
Bibliographie.....	129
Les annexes.....	134

# Introduction général

## **Introduction général**

La pollution industrielle est un problème environnemental majeur. La production et la fabrication industrielles ont augmenté de façon spectaculaire au cours du siècle dernier, ce qui a entraîné une augmentation de la quantité de polluants rejetés dans l'environnement. La pollution industrielle ne se limite pas aux polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote et les particules ; elle inclut les polluants de l'eau et du sol tels que les métaux lourds, les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau et les pesticides agricoles.

La pollution nuit non seulement à l'environnement mais aussi à la santé humaine. Des études ont montré qu'il existe une corrélation entre la pollution industrielle et diverses maladies humaines, telles que le cancer et les maladies cardiaques. D'autres pollutions sont d'origine naturelle. Par exemple, les volcans produisent du dioxyde de soufre qui contribue aux pluies acides et à l'érosion des sols. Certaines matières végétales comme les feuilles sur le sol produisent du méthane qui contribue à la pollution de l'air.

L'identification de la pollution est une question importante qui doit être abordée. La pollution est l'un des problèmes les plus importants auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui et il doit être résolu le plus rapidement possible.

L'objectif de cette mémoire est de déterminer les nouvelles techniques pour l'identification de pollution dans une zone industrielle.

Pour atteindre notre objectif, nous avons réparti notre travail en cinq chapitres. Les premiers constituent la partie théorique:

- Le premier chapitre : aborde la pollution en générale (définition, les types, les sources de chaque types, leur impacts sur l'environnement, les effets sur la santé).
- Le deuxième chapitre : les techniques d'identification de pollution de l'air
- Le troisième chapitre : les techniques d'identification de pollution de l'eau
- Le quatrième chapitre : les techniques d'identification de pollution de sol
- Le cinquième : représente la partie pratique de notre mémoire dans lequel nous réalisons un système d'identification ou détection et de mesure les concentrations de fumée et de monoxyde de carbone.

Enfin, le présent mémoire sera achevé par une conclusion générale, résumant le travail accompli.

# Chapitre 1 : généralité sur la pollution

## **1. Introduction de la pollution :**

La pollution est un mot dont nous sommes tous conscients ces jours-ci. Qu'est-ce que cela signifie exactement? Si vous recherchez "pollution" dans le dictionnaire, vous trouverez quelque chose comme - "pour détruire la pureté de; pour contaminer, en particulier avec des déchets artificiels." L'environnement, c'est-à-dire notre environnement, l'endroit où nous vivons, est rendu impur par les activités humaines. Les polluants que nous produisons affectent non seulement nos propres vies, mais aussi celles des autres êtres vivants, les plantes et les animaux avec lesquels nous partageons notre environnement. Tous les êtres vivants dépendent des parties non vivantes de l'environnement pour survivre- la terre, l'air et l'eau, et ce sont ces 3 parties qui sont affectées par la pollution que l'on souille par des ordures, des fumées, des produits chimiques, etc. Par extension, d'autres domaines de la vie sociale sont également atteints par ce qu'il est convenu d'appeler des pollutions.

Polluer c'est rendre malsain ou dangereux un milieu en répandant des matières toxiques. La pollution c'est un changement brusque ou à long terme des taux de composantes de l'air, de l'eau ou du sol, par une activité humaine (industrie, agriculture, etc.) qui provoque la dégradation de l'environnement humain, celui-ci étant souvent construit et ressenti. Phénomène planétaire, la pollution est surtout liée aux complexes industriels et urbains et touche donc principalement les habitants des villes, mais pas seulement. En effet, si les problèmes de pollution en site urbain se caractérisent par la diversité des polluants rejetés, la dispersion des polluants est régie par les conditions d'émission (température, vitesse, structure de l'écoulement à la sortie des cheminées),

Le phénomène dangereux de pollution est certain car le risque porte sur les effets subis par les éléments exposés (dégradation d'un milieu naturel, morbidité, mortalité). Ces effets sont la toxicité pour les êtres vivants (dont l'homme) par inhalation, ingestion ou contact, chocs, brûlures, etc., ou le sentiment de malaise. Avec la multiplication des sources de pollution, avec son augmentation et la mise en évidence de sa dangerosité, la prise en compte institutionnelle des problèmes de pollution est devenue évidente depuis les années 20.

La pollution a des incidences importantes sur la santé humaine, l'environnement et même sur le fonctionnement de certains des systèmes terrestres, comme le climat. La pollution touche toutes les parties de la planète. Il affecte notre santé à travers la nourriture que nous mangeons, l'eau que nous buvons et l'air que nous respirons. On estime qu'environ 19 millions de décès prématurés surviennent chaque année en raison de la façon dont nous utilisons les ressources naturelles pour soutenir la production et la consommation mondiales et qui ont un impact sur l'environnement.

Le Programme de développement durable à l'horizon 2030 adopté par les Nations Unies en 2015 s'engage à «faire en sorte que tous les êtres humains puissent vivre une vie prospère et épanouissante et que le progrès économique, social et technologique se fasse en harmonie avec la nature».

## **2. Histoire de pollution :**

La pollution vient du latin *polluere* (luo, « baigner », avec le préfixe *por-*) qui signifie «souiller en mouillant », « salir » et surtout « profaner ».

Historiquement, la pollution est la profanation ou la souillure d'un objet ou d'une demeure sacrée par des substances impures. Le mot a donc une origine clairement culturelle. Selon les universitaires François Jarrige et Thomas Le Roux, c'est en Grande-Bretagne que « le mot pollution apparaît dans le sens contemporain que nous lui connaissons : dans la sphère juridique, il est employé, semble-t-il pour la première fois en 1804, dans une cour de justice écossaise pour condamner des tanneurs ayant altéré une rivière par leurs rejets, par les expressions *pollution of the stream* et *pollution of water* ».

La pollution commence dès la préhistoire, avec la maîtrise du feu : « la suie trouvée sur le plafond des grottes préhistoriques est une preuve évidente de ce que les foyers entraînaient un niveau élevé de pollution du fait d'une ventilation insuffisante ».

La métallurgie de l'âge du bronze, puis de l'âge du fer, a marqué un tournant dans la pollution de l'environnement extérieur. Les carottages des glaciers du Groenland ont révélé un accroissement de la pollution associée à la métallurgie des Grecs, des Romains et des Chinois. Mais à cette époque, la pollution était comparativement faible, et n'avait pas d'impact environnemental significatif.

Les concentrations urbaines ont constitué la source majeure de pollution tout au long de notre histoire. Les villes concentraient la présence et les déjections de nombreux hommes et de chevaux, conduisant à des pollutions de l'air et de l'eau. La nécessité de les évacuer (dans l'eau courante du fleuve) a conduit aux premiers systèmes d'égouts comme le *Cloaca Maxima*. C'est à cause de la puanteur qu'elles dégagent que les tanneries ont de tout temps été excentrées et placées en aval des villes. La combustion massive de bois et de charbon conduit également à des pollutions de l'air. Ainsi, en Angleterre, Édouard Ier édicta en 1272 une proclamation interdisant l'usage de la houille bitumineuse à Londres, alors d'usage très courant, après que la fumée que produisait son usage massif soit devenue insupportable.

Le développement des métropoles aggrava le problème. Londres connu ainsi l'un des pires cas de pollution de l'eau avec la Grande Puanteur de 1858, qui entraîna la construction d'égouts à grande échelle et une nouvelle politique appelée « révolution sanitaire », et le mouvement hygiéniste. Berlin était dans une situation similaire en 1870, comme en témoigne August Bebel :

« Les eaux usées sortent des maisons pour couler dans les caniveaux, dégageant une puanteur épouvantable. Il n'y a pas de toilettes publiques dans les rues ; les gens de passages, et particulièrement les femmes, sont souvent sans ressource quand la nature rappelle ses exigences. Dans les bâtiments publics, les installations sanitaires étaient incroyablement primitives. En tant que métropole, ce n'est qu'après 1870 que Berlin est passée de la barbarie à la civilisation ».

C'est la révolution industrielle qui a conduit la pollution aux niveaux connus de nos jours. La combustion massive de charbon amena la pollution de l'air à des niveaux sans précédents, les industries déchargèrent leurs effluents chimiques et leurs déchets sans traitements particuliers, polluant les cours d'eau, les nappes phréatiques et les sources d'eau potable.

En Amérique, Chicago et Cincinnati furent les deux premières villes à passer des réglementations pour lutter contre la pollution de l'air. Vers le milieu du XXème siècle, le smog provoqué par les échappements automobiles était devenu un problème majeur dans des villes comme Los Angeles, ou Donora.

Londres connut son pire épisode de pollution atmosphérique avec le Grand Smog de 1952, dont on estime qu'il a pu faire 12 000 morts.

D'autres catastrophes environnementales dues à de la pollution chimique massive conduisirent à une sensibilisation croissante de l'opinion : Scandale de Love Canal, intoxications massives au mercure de Minamata au Japon, etc...

C'est à la suite de tels événements que la préoccupation environnementaliste se développa, et que des lois et conventions internationales furent développées pour lutter contre la pollution.  
(Latifa)

### **3. Définition de pollution :**

Etymologie : de la latine pollution, souillure, tache.

On appelle pollution toute dégradation d'un écosystème ou de la biosphère par l'introduction généralement humaine par diffusion directe ou indirecte d'entités (physiques, chimiques ou biologiques), qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent

de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Outre ses effets sur la santé humaine et animale, elle peut avoir pour conséquences la migration ou l'extinction de certaines espèces qui sont incapables de s'adapter à l'évolution de leur milieu naturel. (définition de pollution, s.d.)

### **3.1 Définition de la rousse :**

Dégradation de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques, etc.). Bien qu'elle puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines.

Synonymes : altération, contamination, souillure. (la rousse)

### **3.2 Définition de la pollution donnée par la Directive européenne :**

( 2000/60/CE du 23 octobre 2000) : Introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier».

La pollution est en général un sous-produit de l'activité humaine qui peut toucher l'atmosphère, le sol ou les eaux. Elle peut affecter la santé humaine, l'eau de consommation, l'eau de baignade, la production agricole, les espèces animales ou végétales, la beauté des paysages, etc...

Par extension, pour les êtres humains, la pollution peut être la conséquence de toute perturbation de l'environnement qui, outre les effets sur la santé, en gêne une utilisation légitime. Synonyme : Nuisances. (Latifa)

### **3.3 Le Dictionnaire de l'environnement, Les termes normalisés de l'AFNOR :**

Définit le polluant comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Il est question de « pollution diffuse » lorsque les sources polluantes sont multiples (pots d'échappement, épandage de pesticides...), et de « pollution chronique » lors d'émissions répétées ou constantes de polluant, et parfois lorsqu'un polluant est très rémanent.

La notion de pollution appelle donc celle de contamination d'un ou plusieurs composants des écosystèmes (air, eau, sol), d'un organisme (qui peut être l'être humain) ou d'un groupe d'organismes, ou ayant une incidence sur l'écosystème, au-delà d'un seuil ou norme. La contamination peut notamment s'étendre ou se modifier via le réseau trophique (chaîne alimentaire) (bioconcentration, bioturbation). (Latifa)

### 3.4 La pollution considérée par l'ONU :

Comme la neuvième limite planétaire, « d'une part, en raison de ses effets néfastes sur le développement physiologique de l'homme et sur le fonctionnement des écosystèmes ; d'autre part, car elle agit comme une variable lente qui affecte d'autres limites planétaires.

## 4. Les types de pollution :

La pollution nuit à l'environnement de la Terre et de ses habitants à bien des égards. Les trois principaux types de pollution sont les suivants :

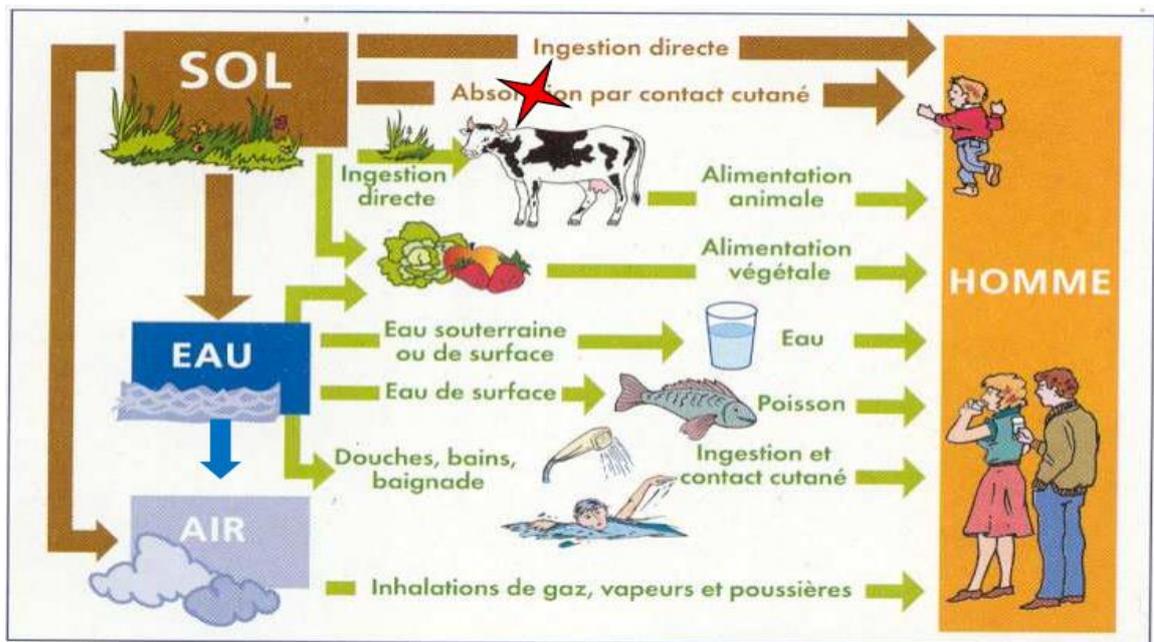


Figure 1 1: les types de pollution et leur chemin de contamination

### 4.1 Pollution de l'air :

C'est le changement de la qualité de l'air, qui peut être caractérisé en mesurant les polluants chimiques, biologiques ou physiques (appelés «polluants atmosphériques»). Il peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine, la biologie, le climat ou les propriétés matérielles. Les polluants peuvent être d'origine naturelle ou artificielle, impliquant l'atmosphère ou l'air des espaces clos (véhicules, maisons, usines, bureaux). Ils constituent généralement un mélange de

polluants, tels que des particules en suspension ou d'autres substances dont la concentration et la durée sont suffisantes pour produire des effets toxiques ou écotoxiques. Ils peuvent interagir avec la lumière (pollution photochimique).

Dans le monde pour la période 1990-2016, la pollution de l'air est le cinquième facteur de risque pour la santé (après la malnutrition, les risques alimentaires, l'hypertension artérielle et le tabagisme). Elle provoque la mort prématurée de sept millions de personnes chaque année. (pollution de l'air, s.d.)

#### 4.1.1 Définition du journal officiel de la république algérienne :

« On entend par pollution atmosphérique, l'émission dans l'atmosphère de gaz, de fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorants, de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites » . (DJELAD-KADDOUR).

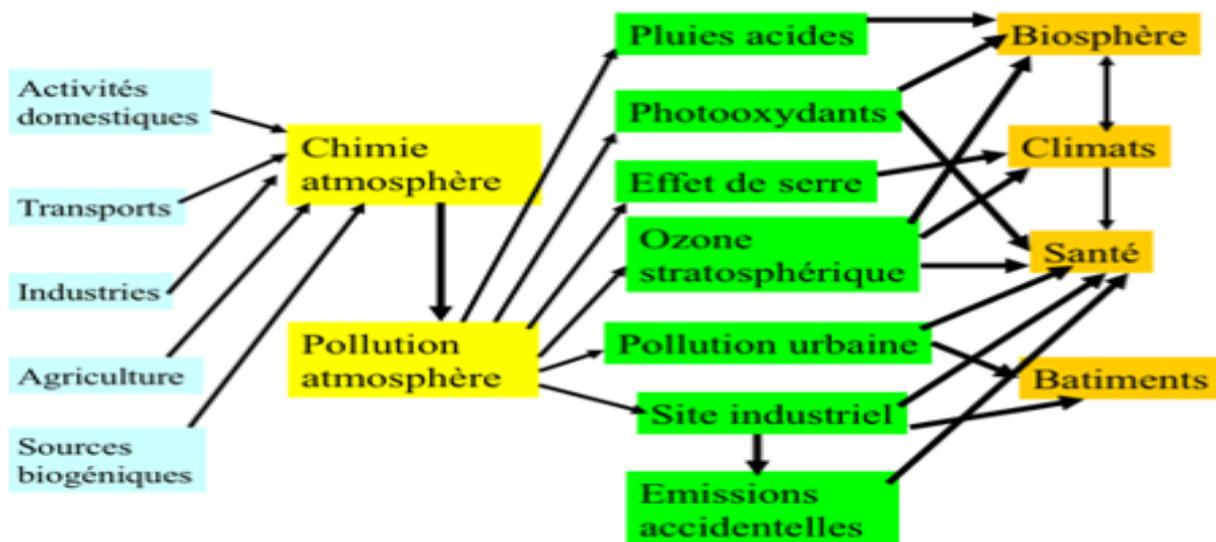


Figure 1 2:les sources et les impacts de pollution de l'air

#### 4.1.2 Principales sources de pollution de l'air :

##### 4.1.2.1 Les sources naturelles :

##### 4.1.2.1.1 Combustion naturelle: Feux de forêts (CO, CO2) :

Les incendies de forêt, tels que ceux qui ont fait rage dans le sud-est, ont de nombreuses incidences sur l'environnement et notamment sur la qualité de l'air.

Dans une étude réalisée en 2012, l'ANSES a répertorié les principales classes de composés chimiques détectés dans la fumée résultant des incendies de végétation (Particules fines et monoxyde de carbone, en tête de liste des polluants) .Cette étude précise tout d'abord que

la composition des fumées varie selon la nature exacte du combustible, sa densité, l'humidité, les conditions de combustion et l'éloignement de la source.

On recense quoi qu'il en soit dans ces fumées de très nombreuses substances chimiques incluant le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils et semi-volatils, des particules, des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), et bien d'autres.

Les particules en suspension représentent le polluant de l'air le plus "invariablement élevé" par rapport aux seuils réglementaires dans les zones impactées par les fumées. Environ 80% de la masse particulaire sont des particules fines (diamètre < 2,5 µm) dont une majorité est des particules submicroniques. Ces caractéristiques les rendent facilement transportables sur de longues distances pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Les niveaux atteints dans l'air ambiant à court terme (quelques heures à quelques jours) peuvent être particulièrement élevés (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de µg/m<sup>3</sup>) et avoir un impact à l'échelle régionale. (DJELAD-KADDOUR)



Figure 1 3: feux de forêt

#### 4.1.2.1.2 L'éruption volcanique: (poussières, SO<sub>2</sub>, F) :

Les éruptions volcaniques émettent des quantités importantes de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), un gaz qui se transforme par oxydation au contact de l'atmosphère en fines particules appelées aérosols sulfatés (SO<sub>4</sub>). Ces particules fines sont étroitement surveillées car elles détériorent la qualité de l'air et peuvent avoir des conséquences néfastes sur la santé. En raison de leur petite taille, elles peuvent en effet pénétrer profondément dans les poumons, exacerbant les symptômes d'asthme et les maladies cardio-respiratoires.

Exemple :

L'éruption Holuhraun du volcan islandais Bárðarbunga en 2014-2015 a généré, de la France jusqu'au nord de la Scandinavie, une vaste pollution de l'air au dioxyde de soufre gazeux mais également aux particules fines et persistantes que sont les aérosols sulfatés. (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 4: éruption volcanique

#### 4.1.2.1.3 Processus de fermentation de la matière organique (gaz à effet de serre : CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) :

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent ainsi à l'effet de serre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs à l'origine du réchauffement climatique. Un gaz ne peut absorber les rayonnements infrarouges qu'à partir de trois atomes par molécule, ou à partir de deux si ce sont deux atomes différents.

L'agriculture émet les trois gaz à effet de serre mentionnés, soit le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O). Ces gaz diffèrent cependant par leur capacité d'emprisonner la chaleur. Tonne pour tonne, le CH<sub>4</sub> est plus de 20 fois plus efficace sur ce plan que le CO<sub>2</sub>; dans le cas du N<sub>2</sub>O, cette supériorité est d'environ 300 fois.

Pour comparer les émissions de ces gaz en toute égalité, nous parlons couramment d'équivalents de CO<sub>2</sub> (ainsi, le N<sub>2</sub>O correspond à 298 équivalents de CO<sub>2</sub>).

L'agriculture retire aussi du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, puisque les champs cultivés et les pâturages peuvent être gérés de sorte que soient extraites et stockées de grandes quantités de cette substance sous forme de carbone du sol à l'état organique. (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 5: effet de serre

#### 4.1.2.2 Les sources anthropogéniques :

Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les sources fixes, émises par des installations ne se déplaçant pas, et des sources mobiles liées aux transports.

#### 4.1.2.2.1 Les moyens de transport (routier, aérien, maritime, ferroviaire.) :

Dans ce secteur, on prend en considération les émissions de polluants inhérentes non seulement au transport routier, mais également aux transports aérien, ferroviaire, maritime ou fluvial.

Ces émissions de polluants sont le fait de la combustion des énergies fossiles, mais aussi de l'abrasion des pièces mécaniques, entre elles ou avec les supports avec lesquelles elles sont en contact, comme la route.

Le **transport** est le principal responsable de la dégradation de la qualité de l'air. Il est à l'origine de 91% des émissions de monoxyde de carbone (CO), de 89% des émissions d'hydrocarbures (HAP), de 57% des émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), de 44% des émissions de composés organiques volatils (COV) et de 19% de celles de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Certains de ces polluants sont notamment à la base des pics d'ozone troposphérique (NO<sub>x</sub> et COV) et du renforcement de l'effet de serre (CO<sub>2</sub>). (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 6: pollution due au transport

#### 4.1.2.2.2 Industrie (centrales électriques, Incinérateurs...) :

Historiquement, l'industrie a été l'un des grands émetteurs de polluants atmosphériques. Toutefois, les contraintes législatives qui ont vu le jour depuis une quarantaine d'années ont incité les industriels à accomplir des efforts considérables pour limiter leurs émissions.

Certaines activités, telles que les cimenteries, la métallurgie, les usines d'incinération ou les centrales à charbon, sont d'ailleurs soumises à autorisation et à déclaration annuelle de leurs émissions.

L'industrie est un secteur à l'origine d'une grande partie des émissions atmosphériques. L'usage de l'électricité n'émet pas de polluants sur le lieu de consommation, mais il génère très souvent des émissions à l'endroit où cette électricité est produite. Exemples de polluants émis par ce secteur : dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), poussières, métaux, composés organiques volatils (COV). (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 7:pollution industriel

#### 4.1.2.2.3 Agriculture (engrais, élevage...) :

Le secteur agricole est responsable d'une partie de la pollution atmosphérique.

Car elle participe aux émissions vers l'atmosphère de composés azotés, notamment l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), de méthane, de particules et de pesticides. Ces émissions sont liées aux l'utilisation de machines notamment, pratiques d'élevage (bâtiments, stockage, épandage, etc.) et aux pratiques culturales (préparation du sol, fertilisation, récolte, etc.).

Dans le Grand Est, l'agriculture contribue à 96 % des émissions d'ammoniac, 7 % des émissions d'oxydes d'azote liées à l'utilisation d'engins agricoles, 32 % des émissions de particules  $\text{PM}_{10}$  et 17 % des émissions de particules  $\text{PM}_{2.5}$  (de diamètre inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$ ).

À l'échelle nationale, les émissions de pesticides ne sont pas quantifiées. Néanmoins, leur présence dans l'atmosphère est avérée, tant dans les zones rurales que dans les espaces urbains.



Figure 1 8:pollution agricole air

#### 4.1.2.2.4 Secteurs résidentiels (chauffages, produits sanitaires...) :

##### 4.1.2.2.4.1 Les secteurs résidentiels :

Les lieux où nous vivons et où nous travaillons sont également d'importants émetteurs de polluants. En effet. Or il existe un lien immédiat entre la production, la consommation d'énergie et les émissions de polluants atmosphériques.

Activités domestiques

En utilisant des produits phytosanitaires, des peintures, des produits ménagers, en cuisinant... nous émettons tous des polluants atmosphériques. Exemples de polluants émis : composés organiques volatils. (Latifa)

#### 4.1.2.2.4.2 Chauffage individuel et collectif :

Ce secteur est à l'origine d'une grande partie des émissions dans les régions tempérées.

Les polluants concernés sont généralement le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote ou encore les particules fine.

La climatisation génère indirectement des émissions du fait de sa grande consommation d'électricité mais également si le gaz réfrigérant n'est pas récupéré. (Latifa)

Tableau 1 1: les sources majeurs des certains polluants

Polluant/classe de polluant	exemples	Etat physique	Source majeurs
Oxydants photochimiques	Ozone	gaz	Polluant dans la troposphère, générée à partir de NO <sub>x</sub> , composés organique volatiles (VOCs), dont méthane, CO, origine stratosphérique.  Dans la stratosphère protège du rayonnement UV mais détruit par des composés chlorés, bromés, etc. (trou d'ozone).
Dioxyde de soufre(SO <sub>2</sub> )	SO <sub>2</sub>	gaz	Combustion combustibles fossiles, volcans, transformation de composés soufrés d'origines naturelles.
Monoxyde de Carbone (CO)	CO	Gaz	Combustion incomplète de composés carbonés, oxydation de composés organiques volatiles (VOCs).
Oxyde d'azote (NO <sub>x</sub> )	NO, NO <sub>2</sub>	Gaz	Oxydation de l'azote lors de combustions, orages.

Hydrocarbure aromatiques Polycycliques(HAPs)	Benzène, 1,3-butadiène, formaldéhyde, acides	Gaz	Combustion incomplète, processus chimiques dans l'atmosphère, utilisation de solvants.
Mercure (Hg)	Hg0, méthyl mercure	Gaz et particulaire	Combustion du charbon, Raffinage de minerais, incinérateurs, naturel.
Plomb(Pb)	Pb	particulaire	Combustion essence avec plomb, (a été éliminé des essences), incinérateurs, fonderies et manipulations du plomb.
PM, comprenant PM2, 5, PM10, PM inhalables, particules en suspension carbone suie (black carbone)	ions inorganiques (ex. sulfate), oxydes métalliques, matériels carbonés, y compris carbone inorganique & carbone élémentaire	particulaire	Erosion éolienne, embruns marins, Combustion de combustibles fossiles ou provenant de biomasse, agriculture, pollens, spores, virus, bactéries, conversions gaz-particules.
Carbone organique	Hopanes, stéranes, hydrocarbures aromatiques polycycliques, lévoglucosanes, terpènes, isoprène.	Gaz et particulaire	Combustion incomplète de combustibles fossiles ou provenant de biomasse, émissions de la végétation. oxydation de composés organiques gazeux.

#### 4.1.3 Impacts écologiques de la pollution de l'air :

##### 4.1.3.1 Pluies acides :

Par la formation d'acides forts à partir de la réaction des polluants primaire au contact de l'humidité : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HNO<sub>3</sub>. Elles sont responsables de l'empoisonnement des arbres et la perturbation de la photosynthèse ; la mort des micro-organismes du sol ; l'érosion des roches ; et des monuments. (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 9:les conséquences de pluie d'acide

#### 4.1.3.2 Le Brouillard Photochimique Oxydant :

(SMOG= mix de smoke et de fog) : C'est la conséquence d'une pollution typiquement urbaine liée au transport, caractérisée par une accumulation d'Ozone, d'aldéhydes, et de nitrate de peroxyacétyle à pouvoir oxydant élevé.

Ceci est favorisé par l'introduction de polluants primaires dans l'atmosphère (NO, Composés Organiques Volatils) ainsi que par des conditions météorologiques défavorables (Vent très faible, inversion de température, forte insolation)

Ce qui a pour conséquence l'accumulation des polluants dans l'atmosphère. (DJELAD-KADDOUR).

#### 4.1.3.3 Exacerbation de l'effet de serre « effet de serre additionnel » :

L'effet de serre est un phénomène naturel contribuant à retenir une partie de la chaleur solaire à la surface de la terre, par le biais du pouvoir absorbant de certains gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CFC...). Des concentrations atmosphériques élevées de ces derniers induisent une exacerbation de l'effet de serre avec élévation de température.

Comme conséquences, on assiste à un réchauffement global, avec fonte des glaciers, augmentation mécanique du volume d'eau de mer, une augmentation de la pluviométrie. (DJELAD-KADDOUR).

#### 4.1.3.4 Destruction de la couche d'Ozone :

L'ozone stratosphérique (10 à 50Km d'altitude) est qualifié de bon ozone, car il absorbe les rayonnements UV solaires. Cependant, de nombreux composés peuvent causer une destruction catalytique (OH•, H•, NO•, Cl•, Br•, HO<sub>2</sub>•) de l'ozone stratosphérique. Ceci augmente les radiations UV atteignant le sol, ce qui a pour conséquence l'accroissement des cas de cancers de peau et la mise en péril de la survie sur terre. (DJELAD-KADDOUR)

#### 4.1.3.5 Eutrophisation :

Perturbation de l'équilibre biologique des sols et des eaux par excès d'azote et de carbone ou de phosphore issus de l'atmosphère. (DJELAD-KADDOUR).



Figure 1 10:eutrophisation

#### 4.1.4 Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé de l'homme :

Ces effets dépendent de la quantité de polluant avec lequel l'organisme est en contact ; on parle de "dose". Cette dose varie en fonction de 3 facteurs :

La concentration des polluants dans l'atmosphère,

La durée de l'exposition,

L'intensité de l'activité physique,

Les troubles se manifestent principalement chez les personnes sensibles représentés par :

Les enfants et les personnes âgées,

Les asthmatiques, les insuffisants respiratoires, les cardiaques, les bronchitiques chroniques, les fumeurs,

Les femmes enceintes, et les professionnels en contact avec des produits chimiques (garagistes, métiers du bâtiment, agents de l'industrie).

Les effets peuvent être :

- à court terme, pour lesquels l'effet sanitaire se produit dans les jours suivant l'exposition : troubles de la fonction pulmonaire, symptômes respiratoires (la toux), asthme, pathologies cardiovasculaires (l'angine de poitrine), mortalité cardiovasculaire.
- à long terme, qui font suite à une exposition chronique.
- augmentation de la mortalité chez des personnes souffrant d'insuffisance respiratoire ou infarctus
- apparition de maladies chroniques ou de cancers. (HEBBAR, 2019)

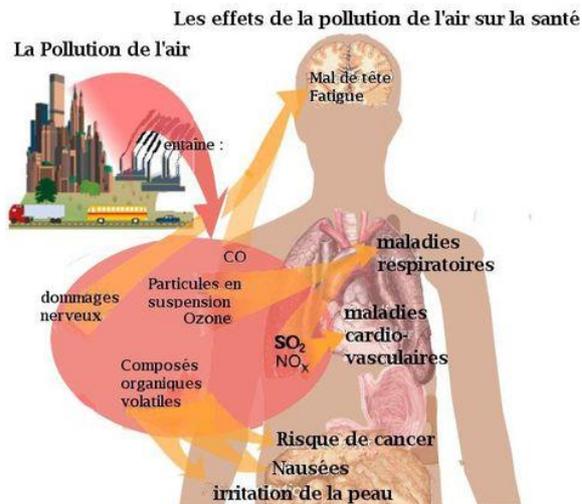


Figure 1 11: les effets de la pollution atmosphérique

## 4.2 Pollution de l'eau :

### 4.2.1 Définition de pollution de l'eau :

Selon l'agence de l'eau : « la pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et/ou perturbe l'écosystème aquatique »

C'est une dégradation liée aux écosystèmes dont le principal élément est l'eau. Cela est dû à des facteurs multiples et spécifiques: les rejets d'activités industrielles et agricoles et les activités humaines habituelles qui se produisent dans les rivières, les lacs et les mers. La pollution d'un milieu aquatique a systématiquement de graves conséquences. (pollution d'eau)

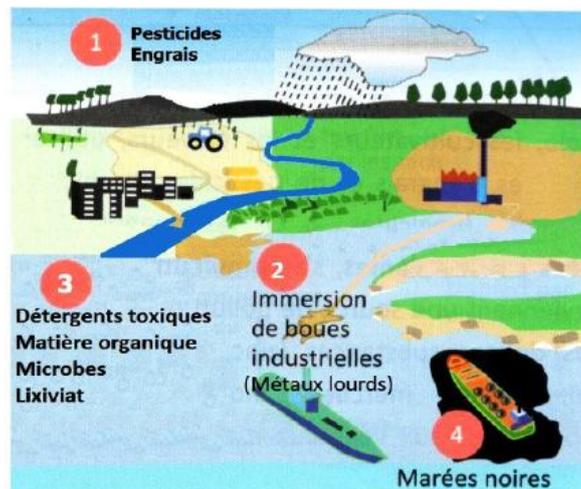


Figure 1 12: les principaux polluants dans les milieux aquatiques

### 4.2.2 Principales sources de la pollution de l'eau :

#### 4.2.2.1 La pollution industrielle :

L'eau est impliquée dans toutes les grandes activités industrielles. Elle entre en contact avec des matières premières minérales ou organiques, qu'elle dissout ou

entraîne avec elle. Ce sont les raisons pour lesquelles chaque activité industrielle engendre des rejets polluants, reversés très souvent directement dans l'eau (usines implantées au bord de rivières pour faciliter les transports et pour d'autres commodités).

L'histoire du développement industriel s'est construite en partenariat avec l'eau. Les usines sont toujours implantées au bord de l'eau (rivière, canal ou mer) pour des raisons diverses :

- les commodités de transport de matières premières et de produits finis ;
- la possibilité de faire accomplir à l'eau des tâches industrielles multiples et variées
- tels commodités de rejet de sous-produits ou de déchets générés au cours des opérations de fabrication.

Pour la plupart des techniques et opérations de fabrication, l'eau entre en contact avec des matières premières minérales ou organiques. Elle les dissout partiellement, voire totalement ou les entraîne à l'état de suspensions colloïdales. (DJELAD-KADDOUR)

Les principaux polluants industriels :

**a. Polluants physiques :**

Pollution mécanique, due aux décharges des déchets et des particules solides (boues, ordures ménagères) apportées par les eaux de ruissellement et les eaux d'égouts.

**b. Pollution thermique :**

engendrée par les usines, utilisant un circuit d'eau de mer pour le refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries). Les eaux rejetées des usines ont une température de l'ordre de 70-80°C qui s'abaisse à 40-45°C en contact avec les eaux de rivière en entraînant un réchauffement de l'eau à conséquences très néfastes.

**c. Pollution nucléaire:**

A un impact direct sur les organismes marins, qui se traduit par un dérèglement de leur comportement.

**d. Polluants chimiques :**

Engendrée par des rejets de produits chimiques d'origine industrielle tels que :

Les micropolluants chimiques organiques (hydrocarbures, les organochlorés et les détergents) et micropolluants inorganiques (métaux lourds : As, Cd, Pb, Hg et Zn).

#### e. Matières organiques :

Engendrée par :

Les microorganismes provenant des égouts ; ou par l'introduction d'une espèce marine dans une zone où elle est normalement absente par exemple (*Caulerpa taxifolia* à développement anarchique). (HEBBAR, 2019).



Figure 1 13 : pollution de l'eau à cause des rejets industriels

#### 4.2.2.2 La pollution domestique :

Elle est généralement liée aux rejets d'eaux usées, qui peuvent être de deux types :

- Les eaux usées issues de l'utilisation d'eau au quotidien (toilettes, cuisine, douche...) contiennent des déchets organiques ou de la matière fécale. Les habitations mal ou non raccordées au réseau d'assainissement collectif, peuvent engendrer une pollution bactériologique de l'eau.
- Les produits ménagers les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures et médicaments que nous utilisons sont chargés de polluants chimiques nocifs pour l'environnement. Mélangés à l'eau, ils terminent dans nos canalisations ou dans la nature et engendrent une pollution chimique. Difficilement traités par les réseaux d'assainissement, les résidus de ces produits viennent enrichir les cours d'eau en substances chimiques. (DJELAD-KADDOUR).

#### 4.2.2.3 La pollution agricole :

Les pesticides et les engrais engendrent une pollution chimique. L'utilisation massive d'engrais d'origine naturelle, tel que le fumier, peut constituer une source de pollution bactériologique. Ces substances, par le biais du cycle de l'eau, s'infiltrent ou ruissellent polluant les milieux aquatiques. Avec les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines. Les rejets agricoles (Nitrates, phosphore, pesticides...) (Clémentine Des femmes, 2012).



Figure 1 14:pollution de l'eau à cause des activités agricole

#### 4.2.3 Impacts écologiques de la pollution de l'eau :

##### **1. Impact de l'augmentation de la température :**

Modification de la densité et la viscosité et de la tension de vapeur : impact sur l'évaporation

##### **2. Turbidité :**

C'est-à-dire le non transparence de l'eau par la présence de matières en suspension (argiles ou matières organiques) : impact sur pénétration de la lumière, donc sur photosynthèse.

##### **3. Impact de la pollution chimique à l'azote :**

L'excès de produits azotés diminue la qualité de l'eau et provoque la prolifération du plancton végétal. Il entraîne des toxicités après transformation de l'azote en nitrate puis en nitrites : risque de méthémoglobinémie pour la femme enceinte et le nourrisson et risque de cancer de l'estomac par transformation en nitrosamines.

##### **4. Impacts de la pollution organique :**

(Hydrocarbures, composés organiques persistants comme les HAP, PCB, dioxines) : persistent dans l'environnement, s'accumulent dans les tissus des organismes vivants. Ils entraînent la pollution des nappes phréatiques.

##### **5. Les détergents :**

Forment un résidu de non-biodégradabilité, et la mousse forme un écran imperméable à l'oxygène au-dessus de l'eau

##### **6. Les médicaments rejetés :**

Après absorption et métabolisation ou à l'état brut chargent l'eau en résidus d'antibiotiques(ATB), d'hormones avec développement de résistances multiples aux ATB et de perturbations endocriniennes chez l'homme.

##### **7. L'eutrophisation :**

C'est un déséquilibre qui résulte d'un apport excessif de nutriments (azote, carbone, phosphore). Un lac reçoit des quantités de matières nutritives apportées par les torrents et les eaux de

ruissellement. Certaines algues croissent et se multiplient de manière excessive dans les couches d'eaux superficielles par besoin de lumière. Ces algues en excès augmentent les matières organiques biodégradables au fond du lac. Les bactéries aérobies qui se nourrissent de ces matières prolifèrent à leur tour, consommant de plus en plus d'oxygène jusqu'à épuisement d'O<sub>2</sub>. Ces dernières ne peuvent plus dégrader alors toute la matière organique morte et celle-ci s'accumule dans les sédiments. On dit alors que le lac vieillit. (DJELAD-KADDOUR).

#### 4.2.4 Pollution marine :

Pollution marine (du milieu marin): L'introduction directe ou indirecte... de substances ou d'énergie dans le milieu marin...lorsqu'elle a ou peut avoir des effets nuisibles tels que dommages aux ressources biologiques et à la faune et la flore marines entrave aux activités maritimes, y compris la pêche et les autres utilisations légitimes de la mer, altération de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation et dégradation des valeurs d'agrément (GESAMP: Groupe Mixte d'Experts des Aspects Scientifiques de la Pollution des Mers , 1983).

Cette définition est largement acceptée; elle indique tout d'abord que :

la pollution marine provient de substances ajoutées (les éléments nutritifs , les eaux usées , le pétrole, les métaux lourds , les déchets et le plastique) à la mer essentiellement par l'Homme.

Elle a des effets néfastes sur l'environnement qui touchent aussi bien la santé publique que les organismes aquatiques tels que la mortalité des poissons, la prolifération anarchique d'algues, la multiplication de certaines espèces bactériennes contaminant aussi bien l'eau et les espèces comestibles. (pollution marine , s.d.)



Figure 1 15 : pollution marine engendrer par les rejets domestiques

#### 4.2.5 Les effets de la pollution de l'eau sur la santé humaine :

Les polluants chimiques présents dans l'eau peuvent engendrer des malformations congénitales et sont sources de maladies telles que des cancers. La pollution des eaux souterraines provoque la pollution des nappes phréatiques. Ceci est particulièrement le cas dans les bases militaires. Sous les champs de tir, les eaux souterraines sont polluées, des teneurs importantes de métaux lourds sont retrouvées (cuivre, zinc, plomb).

Les polluants chimiques présents dans l'eau peuvent aussi être des perturbateurs endocriniens. La pilule contraceptive est accusée de libérer des quantités importantes d'œstrogènes (hormone naturellement présente chez la femme) dans l'urine des femmes. Cette hormone se retrouve alors dans l'eau car elle n'est pas éliminée lors du traitement dans les stations d'épuration. Des constats de bioaccumulation de l'œstrogène ont été faits chez les poissons. Cela signifie que des taux très élevés peuvent être retrouvés chez les prédateurs supérieurs et chez les humains. À travers le monde, la pollution des eaux tue tous les jours plus de 6 000 personnes. Cette pollution est principalement liée à des maladies causées par une eau impropre à la consommation et l'absence de sanitaires. (Eau et société/Santé humaine et pollution de l'eau)

### **4.3 Pollution de sol :**

#### 4.3.1 Définition :

La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol, peut-être diffuse ou locale, d'origine industrielle ou agricole et qui touche le sol proprement dit ou l'eau souterraine. La distribution horizontale et verticale des polluants (métaux et métalloïdes notamment) n'est pas stable, elle varie dans l'espace et le temps selon les conditions de sol et de température, et selon le type et la forme chimique du polluant, et selon le degré de bioturbation du sol. De même un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières, émanations gazeuses ou via une concentration et transfert de polluants par des organismes vivants. La pollution agricole peut toucher les nappes phréatiques d'une part et en contaminer par bioaccumulation les cultures poussant sur ces sols d'autre part. (HDR) (Pollution des sols, 2021)

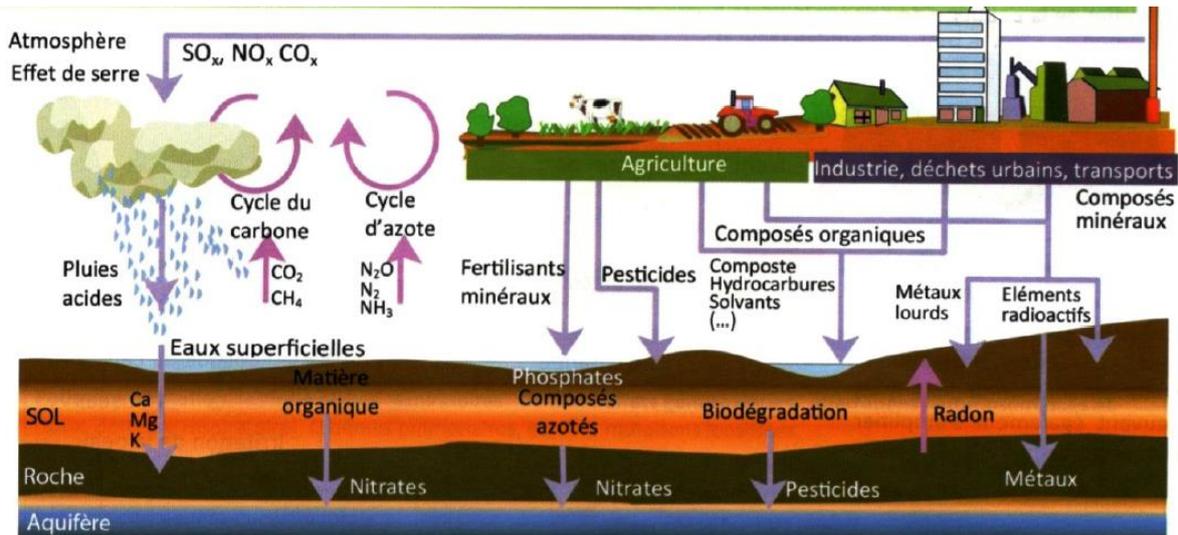


Figure 1 16 : le flux de matière transitant par le sol

#### 4.3.2 D'origine et source :

##### 4.3.2.1 Pollution d'origine non humaine:

La pollution géogénique (c'est-à-dire d'origine naturelle) des sols constitue aujourd'hui un enjeu majeur. Les roches des chaînes montagneuses sont en effets riches en polluants naturels, cette pollution peut être :

- les conséquences directes ou indirectes de catastrophes naturelles, tels que le volcanisme.
- une pollution liée à des phénomènes naturels, tels que les éruptions solaires.
- érosion des roches.

##### 4.3.2.2 Pollution d'origine humaine:

La contamination des sols ou la pollution des sols dans le cadre de la dégradation des sols est causée par la présence de produits chimiques xéno-biotiques (fabriqués par l'homme) ou par d'autres altérations de la naturel du sol. Elle est généralement causée par une activité industrielle, des produits chimiques agricoles ou une élimination inappropriée des déchets. Les produits chimiques les plus couramment impliqués sont les hydrocarbures pétroliers, les hydrocarbures aromatiques polynucléaires comme le naphtalène, les solvants, les pesticides, le plomb et d'autres métaux lourds. La contamination est corrélée au degré d'industrialisation et à l'intensité de la substance chimique. La préoccupation concernant la contamination du sol découle principalement des risques pour la santé, du contact direct avec le sol contaminé, de la vapeur provenant des contaminants ou de la contamination secondaire des approvisionnements en eau à l'intérieur et sous-jacent du sol.

Les pollutions d'origine humaine, dites aussi anthropiques, ont de nombreuses formes : locales, ponctuelles, accidentelles, diffuses, chroniques, génétiques, volontaires, involontaires, etc.

On parle de :

- **Pollution diffuse** : lorsque les sources d'un polluant sont multiples (pots d'échappement, épandage de pesticides..).
- **Pollution chronique** : lors d'émissions répétées ou constantes. (Fabrégat, 09 juillet 2010)

#### 4.3.2.2.1 Pollution d'origine agricole :

Cette pollution s'intensifie avec le développement de l'agriculture moderne. Elle est difficile à quantifier car elle est souvent diffuse.

##### a. Les pesticides :

Les pesticides, appelés encore biocides, sont des substances toxiques minérales ou organiques de synthèse ou naturelles destinées à protéger les végétaux contre les ravageurs qui sont des animaux qui diminuent considérablement la production des plantes cultivées.

Ils sont utilisés en quantité considérable depuis + de 50 ans. On les trouve partout parce qu'ils sont appliqués directement sur le sol ou par traitement préalable des semences.

Ils sont généralement composés d'une ou plusieurs substances actives auxquelles sont associées des adjuvants (additifs) qui peuvent être toxiques. On peut classer les pesticides de diverses manières.

La toxicité dépend à la fois de la dose, des modalités de l'exposition, de degré d'absorption, de la nature des effets de la matière active et de ses métabolites.

L'utilisation des pesticides n'est pas sans danger pour la santé de l'homme, la sécurité alimentaire et même le revenu des paysans. Ces problèmes sont particulièrement graves dans les pays en train du développement.

##### b. Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :

En fin d'hiver, la décomposition des plantes libère de l'azote qui sera disponible sous forme des sels azotés pour la prochaine culture. Les nitrates en excès, sont entraînés par le lessivage des sols en période pluvieuse. Ils ruissèlent vers les cours d'eau où s'infiltrent dans les nappes phréatiques. Ces engrais chimiques employés massivement pour augmenter les rendements altèrent la qualité des eaux souterraines. Ainsi, l'excès de nitrate peut provoquer une anémie (manque de globules rouges) mortelle.

##### c. Les déchets agricoles :

Produits des activités agricoles correspondantes aux déchets de l'élevage, des cultures et de l'industrie agroalimentaire. (HDR)

#### 4.3.2.2.2 Pollution d'origine industrielle :

Les activités industrielles constituent une source importante de contamination des sols. Les rejets atmosphériques, les déversements et l'entreposage associés à ces activités ont contaminé les terrains industriels ainsi que les sols environnants. La nature des substances chimiques en cause, l'absence de normes, de contrôle et de préoccupations environnementales jusqu'à une époque récente peuvent expliquer l'ampleur actuelle de la contamination des sols. La dispersion des déchets industriels dans des lieux d'enfouissement non contrôlés pendant plusieurs années a également eu pour conséquence de contaminer les sols. (Zmirou D, 2003)

##### 4.3.2.2.2.1 Les actions et les substances causer la pollution :

La pollution des sols peut être causée par les éléments suivants :

- Micro-plastiques.
- Les déversements d'hydrocarbures.
- Industrie extractives et autre industrie lourds.
- Des déversements accidentels peuvent survenir pendant les activités, etc.
- Corrosion des réservoirs de stockage souterrains.
- Pluies acides.
- Pétrochimie.
- Accidents industriels.
- Débris de la route.
- Drainage des eaux de surface contaminées dans le sol.
- Munitions, agents chimiques et autres agents de guerre. (Zmirou D, 2003)

##### 4.3.2.2.2.2 Types et classification des polluants industriels :

Les polluants sont classés en polluants physiques (radiations ionisantes, pollution thermique), polluants chimiques (hydrocarbures, matières plastiques, pesticides, dérivés du soufre, nitrates, phosphates, métaux lourds, fluorures, particules minérales et polluants biologiques (matière organique morte, microorganismes pathogènes). On peut encore diviser les micropolluants en :

- Micropolluants organiques non pesticides :

Il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques et hétéro-aromatiques (HAP), des paraffines chlorées, des aromatiques halogénés, des aromatiques halogénés avec oxygène (dioxines, furannes, poly-chlore-phénols), des aromatiques volatils (benzène, toluène, xylène), des amines aromatiques (AA), des esters, des colorants, des pigments, des produits pharmaceutiques...

- Pesticides et Biocides :

On y trouve les organe-halogénés aliphatiques, les acides phénoxy-acétiques, les diphényles (DDT), les carbamates, les organophosphorés et les organe-mercuriels.

Micropolluants minéraux : ce sont les métaux traces, la silice et silicates, l'amiante et les fluors carbonés. (Lecomte, s.d.)

#### 4.3.2.2.2.1 Types et classification des déchets industriels :

Produits par des activités industrielles, il s'agit quatre grandes catégories de déchets :

- a. **Des déchets industriels banals** : Regroupent les ordures ménagères (OM) ainsi que cette part volumineuse des déchets d'origine industrielle et commerciale qualifiés «d'assimilables aux OM»: emballages, textiles, bois, cartons, métaux, déchets de bureau.



Figure 1 17: Des déchets industriels banals

- b. **Des déchets inertes**: regroupent certains résidus minéraux des activités extractives (carrières, mines), les déblais et gravats, certains déchets de démolition et de sidérurgie sans odeurs, non fermentescibles, non toxiques (gravas, bois)



Figure 1 18: Des déchets inertes

- c. **Déchets industriels spéciaux dangereux** : éléments nocifs à grands risques pour l'environnement (toxiques, dangereux) font l'objet de contrôle spécifique pour leur élimination (déchets de PCB, déchets d'huiles usagées).



Figure 1 19: Déchets industriels spéciaux dangereux

- d. **Un déchet ultime et radioactif** : est tout déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. (Economopoulos)



Figure 1 20 : déchet ultime radioactif

#### 4.3.2.2.2.2 Traitement et recyclage des déchets :

Bon nombre des déchets sont recyclables (vieux papiers, plastiques, pièces métalliques). D'autres sont valorisables sous certaines conditions (matières putrescibles, boues d'épuration). Certains déchets, de par leur composition, ne représentent pas comme tel de danger pour la santé humaine. Ils sont surtout encombrants et le problème en est un de gestion étant donné leur volume. D'autres peuvent porter préjudice à la santé humaine s'ils sont mal gérés (déchets infectieux, déchets radioactifs, déchets toxiques) et ce, même en petite quantité. Ils peuvent être qualifiés de déchets dangereux. Pour cette raison, des réglementations distinctes s'appliquent pour la gestion des différents types de déchets. Elles prennent en considération les divers niveaux de dangerosité des déchets. (Zmirou D, 2003)

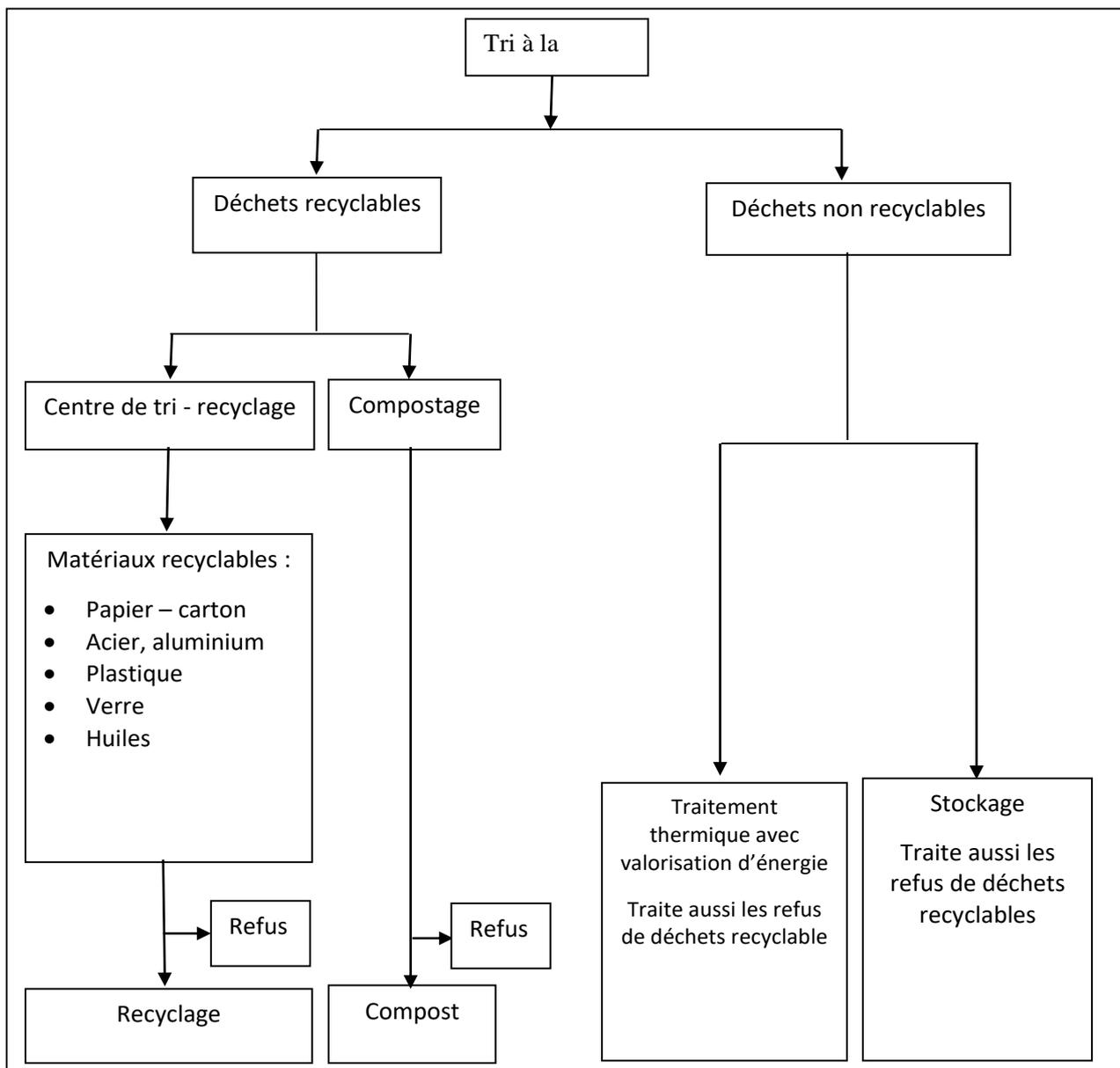


Figure 1 21 : synoptique des flux de gestion des déchets

#### 4.3.3 Effets sur la santé humaine :

Selon leurs propriétés, les déchets solides industriels présentent un risque pour la santé. Ils sont qualifiés de dangereux quand ils peuvent porter une atteinte directe à la santé de l'homme du fait qu'ils possèdent une ou plusieurs des caractéristiques énumérées ci-dessous :

- Irritants : Ils peuvent provoquer une réaction inflammatoire par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau ou les muqueuses.
- Nocif : Ils peuvent entraîner des risques de gravité limitée par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.

- Toxique : Ils peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- Cancérogènes : ils peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- Infectieux : Ils contiennent des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons, de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
- Tératogène : Ils peuvent produire des malformations congénitales non héréditaires ou en augmenter la fréquence par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- Mutagène : Ils peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.

La toxicité d'une substance est généralement évaluée par leur conséquence :

1. la toxicité aiguë : qui provoque la mort ou de très graves troubles physiologiques après un court délai suivant la voie d'absorption, en une fois, d'une dose de la substance, La toxicité aiguë s'évalue au moyen des doses létales ou des concentrations efficaces exprimées généralement en quantité de toxiques par unité de poids de l'individu mg/kg.
2. La toxicité chronique : induite par l'exposition répétée à de plus faibles concentrations de substances qui provoquent des troubles physiologiques, les matières cancérogènes appartiennent généralement à cette dernière catégorie. la dose journalière admissible sans risques. (Cours Pollution & Nuisances – LFSNA3, s.d.) (Le Pôle de compétence sites et sédiments pollués, s.d.)

#### 4.3.4 Impact sur l'environnement et l'écosystème :

Tout l'équilibre qui existe sous nos pieds est bouleversé. La matière organique essentielle aux organismes se raréfie, les réserves de carbone diminuent, l'eau peine à s'infiltrer provoquant l'étouffement des sols et une véritable réaction en chaîne se met en place.

Qui dit moins de matière organique dit moins de nutriments pour les êtres vivants et moins de protection contre le transfert des polluants dans la chaîne alimentaire. Alors les substances toxiques s'infiltrent dans les eaux souterraines puis pénètrent dans les végétaux.

Pire encore, la pollution des sols entraîne une véritable extinction des différents maillons des écosystèmes souterrains. Sans eux pourtant, impossible de maintenir une terre en bonne santé. Finie l'absorption du carbone, la richesse de la biodiversité et les différents services rendus par la nature.

Comme toujours, il ne faut pas oublier que tout est lié. Le sol entretient des liens étroits avec la vaste majorité des écosystèmes de la planète, et constitue l'une des conditions fondamentales au maintien de la vie. (Pollution des sols : définition, causes et conséquences, s.d.)

Tableau 1 2: Problèmes engendrée par l'abandon et l'épandage incontrôlés des déchets dans la nature

Aspect sanitaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence de germes pathogène susceptibles d'être propagés par les insectes, oiseaux et rongeurs, ou atteindre les nappes aquifères par les eaux de percolation s'infiltrant dans le sol.</li> <li>• Prolifération des insectes et rongeurs dans les climats chauds surtout grâce à l'existence dans les déchets, d'une nourriture abondante et de nombreux gîtes larvaires (boîtes de conserve, pneus...)</li> </ul>
Pollution de l'aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'incendies spontanés.</li> <li>• Production d'odeurs nauséabondes (fermentation).</li> </ul>
Pollution de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'infiltration vers les: nappes aquifères, de germes pathogènes ou de matières nocives, organiques ou minérales, extraites des déchets ménagers.</li> </ul>
Pollution du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• À proximité des terrains d'épandage, le sol devient acide (pH 1 à 3) et présente des mauvaises caractéristiques mécaniques, le sol peut également contenir des produits toxiques ou des germes pathogènes extraits des déchets ménagers par les eaux de pluie.</li> </ul>
Atteinte à la faune et à la flore	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En cas de rejets en mer (rejets industriels surtout) : introduction possible d'éléments toxiques (métaux lourds...) dans le plancton, puis les poissons. La plupart de ces métaux toxiques s'accumulent dans les organismes, ils peuvent donc atteindre l'Homme, maillon final de la chaîne alimentaire.</li> <li>• En cas de rejets aux abords de mares et étangs : risque grave pour la faune et la flore de ces plans d'eau.</li> </ul>
Aspect social	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlaidissement des sites.</li> <li>• Troubles psychologiques possibles chez les personnes habitant au voisinage des terrains d'épandage</li> </ul>
Aspect économique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gaspillage de matière.</li> <li>• Gaspillage de terrain : un terrain d'épandage ne peut plus être utilisé pour l'habitation, les loisirs, l'industrie ou l'agriculture. De longues années après sa fermeture, ses mauvaises caractéristiques physiques et chimiques le rendent encore impropre à la construction et à l'agriculture. En général, un terrain d'épandage épuisé est égalisé, remblayé et rendu aux loisirs, sous forme de parc, terrain de sport ou terrain de boisement.</li> <li>• La dépollution d'un site coûte très cher.</li> </ul>

Chapitre 2 : techniques  
d'identification de la  
pollution de l'air

## **1. Introduction :**

Le contrôle des polluants et de leur teneur (niveau de pollution) dans l'environnement et les sites industriels dépend principalement de la capacité à détecter, identifier et mesurer ces polluants, généralement très peu concentrés. De manière générale, plus un composé n'est toxique, mieux l'analyste le détectera à une concentration plus faible. Les résultats obtenus grâce à l'analyse doivent pouvoir faire un diagnostic complet de la source de la pollution et de l'impact possible sur l'écosystème. Le processus en plusieurs étapes permet de comprendre si le site est pollué, et de comprendre le degré et le degré de pollution. Types de pollution, nettoyer la pollution ou évaluer les risques pour la santé humaine et l'environnement le cas échéant, et les gérer si nécessaire. La plupart des inspections sont effectuées en laboratoire après échantillonnage. Bien que les méthodes utilisées soient fiables et sensibles, l'équipement est coûteux, les résultats ne peuvent pas être obtenus immédiatement et il existe toujours un risque de dégradation et/ou de contamination des échantillons pendant la collecte et le stockage. Afin de mettre en œuvre efficacement ces mesures de surveillance obligatoires, il semble nécessaire de développer des outils techniques capables de mesures in-situ rapides. La tendance moderne est de remplacer les technologies et méthodes manuelles par des technologies et méthodes d'équipement automatique, car dans certains cas, des analyses répétées ou continues sont nécessaires pour déterminer le comportement de la source de pollution et étudier son impact. Fonction du temps Un dispositif d'enregistrement automatique en continu, associé à des fonctions d'échantillonnage et d'analyse, fournit de précieux services.

## **2. Les techniques et les méthodes d'identification des polluants au laboratoire :**

### **2.1 Echantillonnage et technique de séparation :**

La première opération d'identification est l'échantillonnage. C'est une opération importante, et elle peut parfois être difficile lorsque le mélange n'est pas homogène. Étant donné que les matériaux à inspecter sont généralement des mélanges (gazeux), il est d'abord nécessaire de séparer, isoler et purifier divers composés, puis de caractériser chaque composé. Le but est de prélever un échantillon des petites dimensions pour analyse afin de représenter les polluants dont la composition est recherchée.

En pratique, pour cette situation, l'analyse est répétée sur plusieurs échantillons prélevés dans les mêmes conditions et l'on fait les moyennes statistiques des différents résultats.

Habituellement, le résultat de l'analyse quantitative est calculé à l'aide de deux mesures. L'un est la masse ou le volume de l'échantillon à analyser, et le second est généralement qui clôture normalement l'analyse, qui est la mesure de la quantité proportionnelle à la quantité d'analyse (composé) présente dans l'échantillon.

Les méthodes et techniques d'échantillonnage utilisées dans la recherche sur la pollution atmosphérique peuvent se classer en trois groupes.

1. prélèvements d'impuretés de toutes natures, de l'état particulaire à l'état gazeux.
2. prélèvements effectués dans diverses conditions : à l'intérieur de conduites, d'enceintes, dans l'atmosphère ; dans le cas d'une atmosphère accessible, il est préférable, chaque fois que cela est possible, de procéder à l'analyse en faisant passer par aspiration le gaz dans l'analyseur ; Place
3. prélèvements intermittents, manuels.

Dans une conduite ou une enceinte fermée, pour le prélèvement manuel, on introduit une sonde à travers un orifice que l'on met en contact avec l'ampoule de prélèvement. Éviter la prise dans les zones mortes où les gaz se renouvellent peu.

Enfin, suivant l'importance de l'échantillon mis en jeu, on classe les analyses en :

1. macroanalyse : échantillon de 0,05 à 10 g ; volume de solution de 10 à 100 ml.
2. semi-microanalyse : échantillon de 0,05 à 1 g ; volume de solution de 1 ml.
3. microanalyse : échantillon d'environ 10<sup>-7</sup> g ; volume de solution de 0,1 ml.
4. ultra-microanalyse : échantillon de 10<sup>-6</sup> g ; volume de solution de 10<sup>-4</sup> ml.

Dans presque tous les cas, les techniques de séparation sont basées sur le partage des corps entre deux phases. On distingue principalement la séparation :

1. Par précipitation, l'ajout de réactifs inorganiques ou organiques appropriés à la solution avec des conditions de fonctionnement définies et fixées entraînera la formation d'un composé peu soluble du corps à séparer. Ce précipité est ensuite séparé par filtration ou centrifugation, puis le laver complètement avec une solution appropriée.
2. Par adsorption, certains corps, ions ou molécules polaires se fixent sur la surface d'un solide adsorbant convenable par adsorption : gel de silice, alumine ou charbon actif. Cette technique permet principalement de séparer les traces d'ions minéraux en solution aqueuse et les molécules organiques dans divers solvants.
3. Par échange d'ions, des résines synthétiques (corps insolubles) possèdent des groupements susceptibles d'échanger soit des anions soit des cations avec ceux de la solution. La séparation

est réalisée dans une colonne contenant l'échangeur, dans laquelle la solution coule lentement par gravité.

4. Par extraction, ces séparations sont basées sur les phénomènes de partage des corps entre deux solvants. Habituellement, l'un des solvants est l'eau et l'autre est un solvant non miscible à l'eau, dans lequel de très nombreuses combinaisons sont solubles.

5. par chromatographie ; dans ses formes multiples, la chromatographie en phase A use (CPG) est une des techniques qui se prêtent le mieux à la séparation de mélanges, même très complexes. Le principe, commun aux différents types de chromatographie, consiste à laisser le mélange à examiner, dissous dans un solvant, s'absorber sur différents substrats, habituellement finement divisés afin de présenter une grande surface active. Ces substrats agissent en retenant de manières différentes ou, plus précisément, avec une force différente, les divers composants de la substance. (Koller, juin 2009)

## **2.2 Les techniques et les méthodes analytiques :**

Quelles sont les techniques de laboratoire permettant d'identifier la pollution ? Les analyses de laboratoire peuvent être utilisées pour identifier la pollution. Des techniques telles que les techniques physiques « la chromatographie en phase gazeuse, la spectrométrie de masse et la spectroscopie », les techniques chimiques « la volumétrie et la gravimétrie » sont autant de moyens d'identifier les polluants.

### **2.2.1 Les techniques physiques :**

L'identification et l'analyse, pour être spécifique, sélective et sensible, exige l'application de techniques basées sur des principes physiques clairement définis et l'utilisation d'appareils conçus en fonction même de ces principes. La plupart de ces techniques nécessitent des appareils composés d'éléments électroniques d'amplification.

#### **2.2.1.1 La technique de Chromatographie en phase gazeuse(GC) :**

La chromatographie en phase gazeuse (GC) est une technique analytique utilisée pour séparer les composants présents dans un mélange afin de les identifier et de les quantifier. Il convient principalement aux composés gazeux ou vaporisables par chauffage (substances volatiles). Après préparation, l'échantillon est d'abord vaporisé à l'entrée de la colonne chromatographique (compartiment visible sur le côté droit de la photo), qui contient une substance active solide ou liquide appelée phase fixe ou phase stationnaire, puis il est transporté à travers la colonne à l'aide d'un gaz vecteur. Les différents constituants de l'échantillon vont alors se séparer et sortir

de la colonne les uns après les autres selon leur affinité avec la phase stationnaire et le gaz vecteur

En effet, une micro-seringue est utilisée pour introduire l'échantillon en tête de colonne chromatographique. La seringue traverse une petite pastille en caoutchouc appelée septum jusqu'à une chambre appelée injecteur située en amont de la colonne chromatographique. Le gaz vecteur traverse l'injecteur et l'amène à une température adaptée à la volatilité de l'échantillon. Ensuite, les différents composants présents dans l'échantillon seront véhiculés par le gaz vecteur à travers la colonne chromatographique et séparés un à un selon leur affinité avec la phase fixe. Plus un constituant a d'affinité avec la phase fixe, plus il va mettre du temps à sortir de la colonne. Un temps caractéristique appelé le temps de rétention est alors associé à chacun des constituants précédemment séparés. C'est le temps qui s'écoule entre l'injection de l'échantillon en tête de colonne et le moment où le composé séparé sort de la colonne.

Les constituants du mélange ainsi séparés par chromatographie peuvent ensuite être détectés à l'aide d'un détecteur spécifique afin d'être identifiés et quantifiés (détecteur à ionisation de flamme ou FID, spectromètre de masse, etc.). (Chromatographe en phase gazeuse - Laboratoire)

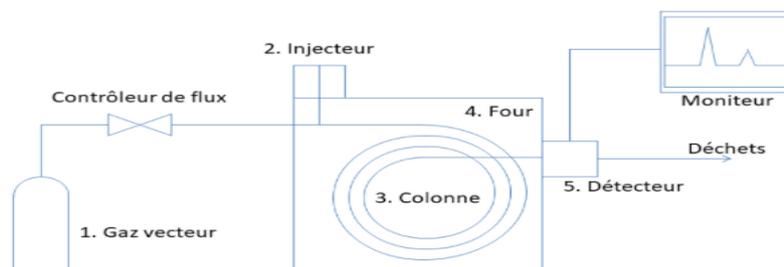


Figure 2 1: schéma d'un chromatographe

#### 2.2.1.1.1 Catharomètre :

Le Catharomètre est un appareil simple et robuste à réponse universelle mais relativement peu sensible. Il compare en permanence la conductivité thermique (la capacité de transférer de la chaleur par conduction) du gaz vecteur pur et du gaz vecteur chargé des molécules de soluté. La conductivité du gaz vecteur (hydrogène ou hélium) utilisé dans ce cas étant très élevée, la détection des composés, dont la conductivité thermique est environ 10 fois plus faible. Cependant, le seuil de détection est encore élevé : environ un pour cent.

L'élément sensible est intégré dans l'une des branches du pont de Wheatstone. Placer un fil absolument identique dans l'autre branche, mais il est toujours placé dans le gaz porteur pur, donc sa résistance sera constante ; cela formera deux cellules, une pour la mesure et l'autre pour

la référence. D'après la formule, la variation de résistance électrique R dépend de la température :  $R = R_0 (1 + aT)$  (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

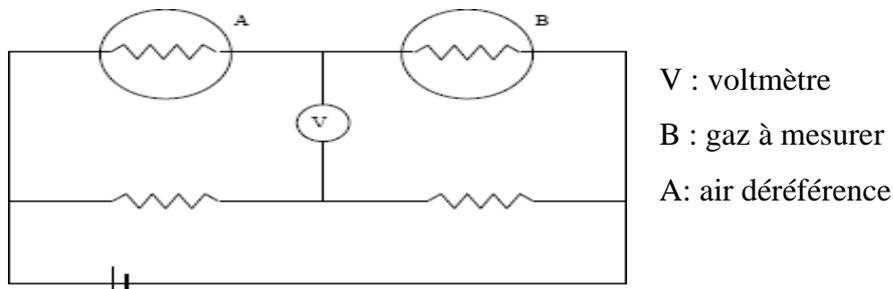


Figure 2 2:principe d'un Catharomètre

#### 2.2.1.1.2 Détecteur à ionisation de flamme FID :

Le détecteur à ionisation de flamme (FID) est beaucoup plus sensible que le précédent, mais il est moins universel car il ne donne pas de réponse aux composés inorganiques. Le principe est de brûler les composés élués apportés par le gaz vecteur dans une flamme d'hydrogène. Leur combustion conduit à la formation d'ions et de particules chargées, qui sont ensuite collectées par deux électrodes. Le courant très faible qui en résulte est fortement amplifié et converti en une tension qui peut être mesurée avec un électromètre. Le pic d'air reflète la quantité de composé élué. Le seuil de détection peut être d'environ 0,1 mg/m<sup>3</sup>, mais il dépend du composé identifié ou analysé (par exemple, le formaldéhyde est beaucoup plus élevé). (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

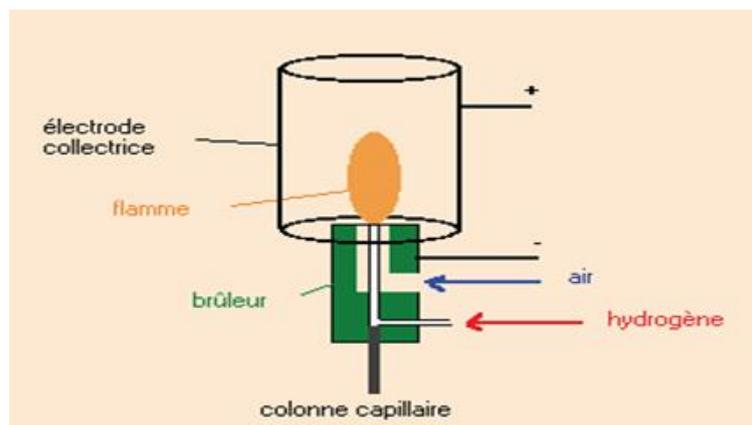


Figure 2 3:un détecteur de fid

#### 2.2.1.1.3 Détecteur à capture d'électrons (ECD) :

Un isotope radioactif, généralement <sup>63</sup>Ni, qui est utilisé comme source (rayons bêta). Les composés contenant des atomes électronégatifs absorbent fortement le flux d'électrons entre la source et le détecteur d'électrons, et ils peuvent être affichés comme ils éluent de la colonne

de chromatographie en phase gazeuse (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

#### 2.2.1.1.4 Détecteur à photo ionisation(PID) :

Le principe consiste à ioniser des composés organiques en absorbant l'énergie lumineuse. Les photons émis par la lampe ultraviolette ionisent les composés dont l'énergie requise est égale ou supérieurs à leur potentiel d'ionisation. Les ions produits sont dirigés sur une électrode réceptrice produisant ainsi une mesure de courant qui est comparé à une concentration de référence. Ces instruments non spécifiques peuvent être utilisés pour détecter des sources d'émission et comme outils d'exploration. (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

#### 2.2.1.2 La technique Spectrométrie :

La spectrophotométrie, basée sur l'absorption d'une certaine bande de radiations électromagnétiques dans les régions du visible, de l'ultraviolet et de l'infrarouge du spectre, est l'une des techniques instrumentales d'identification les plus importantes ; elle peut donc rendre service lorsqu'il s'agit d'identification et d'analyser les impuretés atmosphériques. L'absorption varie avec la longueur d'onde de la radiation incidente ; les mesures doivent donc être faites en lumière monochromatique ou de spectre limité, réalisable avec des filtres spéciaux. Le faisceau émergent de la source ayant été ainsi convenablement ajusté est envoyé dans la substance à étudier ; à sa sortie, on mesure par un dispositif de détection approprié l'intensité de la radiation non absorbée. (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

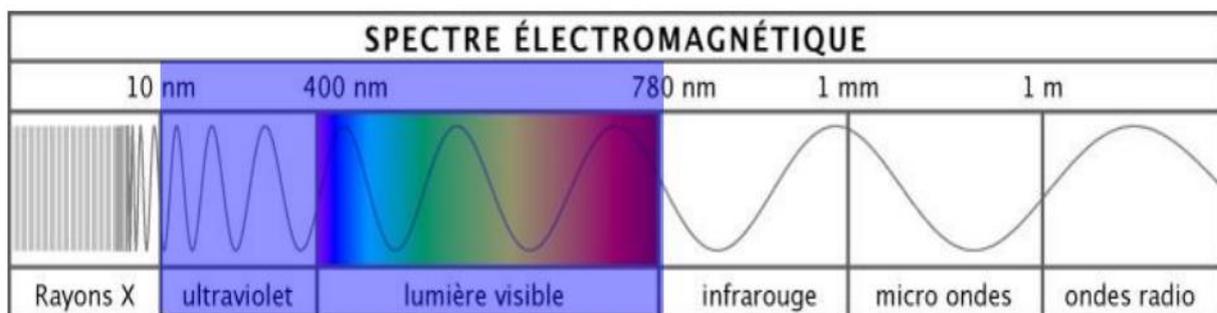


Figure 2 4:spectre électromagnétique

#### 2.2.1.2.1 Absorption du rayonnement IR :

La spectrométrie infrarouge, elle, s'utilise davantage sur le gaz polluant lui-même, en mettant en évidence des spectres d'absorption correspondant aux mouvements de vibration et de rotation

des molécules concernées. Elle est située dans domaine de longueur d'onde supérieure à 800 nm.

Le faisceau infrarouge traverse deux réservoirs en parallèle, dont l'un est rempli du mélange à analyser et l'autre est rempli du gaz de référence.

Les deux faisceaux lumineux inégalement absorbés sont reçus par le récepteur qui comporte deux compartiments dans lesquels est contenu le composé à identifier et à analyser, absorbant ainsi l'énergie infrarouge résiduelle. Cela provoque un échauffement différent du gaz dans chaque compartiment, créant ainsi une différence de pression, qui est prise en compte par l'amplificateur et convertie en concentration.

Cette méthode d'identification des gaz n'est généralement pas utilisée comme méthode absolue, mais comme méthode comparative. Pour cette raison, le concept de précision est difficile à obtenir. Elle varie considérablement car les bandes d'absorption se chevauchent souvent, ce qui provoque des interférences. La concentration maximale de tous les gaz est de 100 % et le seuil de détection est exprimé en parties par million en volume et varie d'un gaz à l'autre. (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

À l'exception des gaz constitués d'atomes identiques (hydrogène, oxygène, azote, etc.) tous les gaz absorbent les rayonnements infrarouges et les transforment en chaleur d'où le dosage et l'identification basée sur cette technique d'absorption. (2.- METHODES ET TECHNIQUES)

Composés détectables : essentiellement CO et CO<sub>2</sub>.

#### 2.2.1.2.2 Absorption dans le visible et l'ultraviolet :

La spectroscopie d'absorption dans l'UV et le visible est une méthode très commune dans les laboratoires, mettant en jeu les photons dont les longueurs d'onde sont dans le domaine de l'ultraviolet (100 nm - 400 nm), du visible (400 nm - 750 nm) ou du proche infrarouge (750 nm - 1 400 nm). Soumis à un rayonnement dans cette gamme de longueurs d'onde, les molécules, les ions ou les complexes sont susceptibles de subir une ou plusieurs transitions électroniques.

Sous l'action de faisceaux de lumière ultraviolette, certaines molécules vont vibrer et/ou subir des transitions électroniques, entraînant des spectres d'absorption ultraviolette. Ces applications sont très voisines de l'absorption IR, sauf que la vapeur d'eau n'interfère pas avec les UV, ce qui rend la reconnaissance du SO<sub>2</sub> et du NO plus spécifique. (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

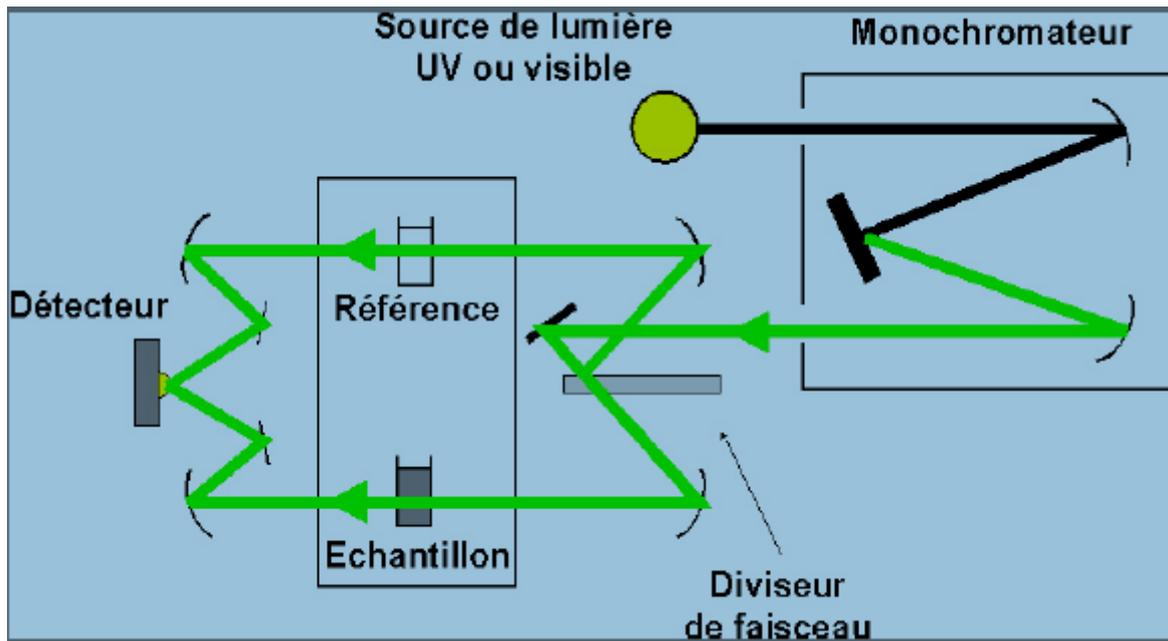
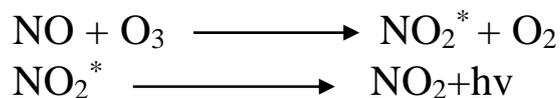


Figure 2 5: schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau

#### 2.2.1.2.3 Chimilunescence :

Il s'agit d'une technique basée sur la réaction en phase gazeuse de l'ozone et du NO sous pression (réductrice ou proche de la pression atmosphérique).

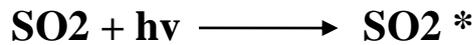


La concentration de dioxyde d'azote est déterminée indirectement par mesure photométrique de l'intensité lumineuse produite par la réaction de l'ozone sur NO. Avant Le dioxyde est quantitativement réduit en monoxyde au moyen d'un convertisseur avant sa réaction avec l'ozone, ce qui donne une mesure de NO + NO<sub>2</sub>. Il suffit alors de déduire la teneur en NO de ces derniers résultats pour obtenir la teneur en NO<sub>2</sub>. Les deux déterminations de NO et NO + NO<sub>2</sub> peuvent être effectuées simultanément avec deux appareils, ou peuvent être effectuées en continu avec un seul appareil, à condition que l'intervalle de temps entre les deux déterminations ne dépasse pas deux minutes.

#### 2.2.1.2.4 Fluorescence UV :

Cette technique est principalement utilisée pour l'identification du SO<sub>2</sub>. Sous l'action d'un fort rayonnement ultraviolet, le SO<sub>2</sub> est rapidement excité et désactivé en émettant un rayonnement ultraviolet de longueur d'onde supérieure à celle du rayonnement d'excitation. La molécule de SO<sub>2</sub> présente notamment cette caractéristique de fluorescence ultraviolette. Le phénomène de fluorescence ultraviolette signifie que sous l'énergie du rayonnement ultraviolet  $h\nu$  de la source

de longueur d'onde  $\lambda$ , les molécules sont excitées pour produire l'absorption ultraviolette précédente ; la réaction suivante se produit :



Puis lors du phénomène secondaire de fluorescence UV la molécule excitée  $\text{SO}_2^*$  dissipe, en revenant à son état initial, une énergie  $h\nu'$  par émission d'une radiation électromagnétique de longueur d'onde  $\lambda'$  :



#### 2.2.1.2.5 Spectrométrie d'absorption atomique :

Cette méthode ou technique d'analyse dite élémentaire permet de mesurer des traces (très faibles : quelques ppm) d'éléments chimiques contenus dans une solution et de déterminer la concentration des substances présentes. La spectroscopie d'absorption est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie atomique. En effet, un atome qui passe de son état de base (énergétique) fondamental à n'importe quel état excité absorbe un ou plusieurs photons. La fréquence  $\nu$  du photon dépend de l'énergie  $\Delta E$  obtenue par l'atome par la relation suivante :  $\Delta E = h\nu$  où  $h$  est la constante de Planck.

La méthode d'absorption permet de déterminer la concentration de l'élément à identifier ou mesurer, la spectrométrie d'absorption atomique permet de déterminer une trentaine d'éléments, et elle est également applicable au niveau des éléments majeurs (0,1...10 g/m<sup>3</sup>), plutôt que les éléments traces ou ultra-traces (0,0001...0,1 g/m<sup>3</sup>). (Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure)

#### 2.2.1.3 Spectrométrie de masse :

Un spectromètre de masse est un appareil qui mesure la masse de chaque élément d'un corps (atomes, molécules, fractions ou combinaisons moléculaires, radicaux libres, etc.) Après ionisation, sous vide élevé, il fournit des indications numériques d'informations d'existence et les quantités relatives des éléments constitutifs de ce corps. (2.- METHODES ET TECHNIQUES) C'est une technique et une méthode analytiques puissantes qui peuvent être appliquées à divers domaines, tels que l'analyse structurale de composés organiques, la détermination de la composition de mélanges et de substances pures, ou la détermination d'isotopes. Dans un spectromètre de masse, les ions produits par bombardement électronique de l'échantillon sont accélérés puis déviés dans un champ magnétique pour former un certain nombre de faisceaux,

qui dépend de la masse de l'ion (rapport charge/masse). Le résultat de l'analyse est appelé un spectre de masse (qui peut être dessiné comme un spectre continu ou un spectre en barres), qui représente la proportion statistique de chaque ion formé, classé par ordre croissant de masse. En opérant dans les mêmes conditions, les fragments (molécules ionisées) sont reproductibles, ils ont donc la structure et les caractéristiques de concentration des composants de l'échantillon. (Koller, juin 2009)

## 2.2.2 Techniques chimiques (classiques) :

Elles comprennent la gravimétrie et la volumétrie ; on fait réagir l'échantillon avec des substances adéquates et on mesure la quantité de réactif utilisé ou la quantité de produit obtenu.

### 2.2.2.1 La technique gravimétrique :

Dans les techniques gravimétriques, l'action de deux solutions antagonistes conduit à la formation d'un précipité. La pesée du précipité, préalablement lavée et séchée, permet de remonter à la concentration de la solution à doser. On titre ainsi une acidité par une solution alcaline, une réaction d'oxydation par un réducteur, etc. (Koller, juin 2009)

### 2.2.2.2 La technique volumétrique :

Dans les techniques volumétriques, on ajoute progressivement un certain réactif de concentration connue dans un volume déterminé de la solution à doser, jusqu'à ce que la réaction soit totale. La fin de la réaction est mise en évidence à l'aide d'un indicateur coloré, d'un potentiomètre ou d'un conductimètre, selon le paramètre qui évolue au cours de la réaction. Il est ainsi possible de déterminer le titre de la solution à doser à partir de la mesure du volume de réactif ajouté. (Koller, juin 2009)

## 2.2.3 Techniques et Méthodes pour poussière :

Les paramètres physiques ou chimiques qui caractérisent les polluants particuliers atmosphériques peuvent être qualitatifs, nature, forme, état (amorphe, cristallin), porosité, caractéristiques de surface ou quantitatifs : concentration en nombre ou en poids de particules, composition granulométrique, surface spécifique.

De plus, plusieurs sortes de nuisances sont à considérer. S'il est exact de dire que le problème des caractéristiques des polluants, alors la détermination sera principalement liée aux tranches de granulométrie la plus élevée : grosses particules et particules moyennes. D'un autre côté, si les gens s'intéressent aux problèmes de toxicité, seules les particules respirables d'une

dimension inférieure à 5 µm doivent être prises en considération. Ses différentes exigences ont conduit à la réalisation d'un grand nombre d'équipements de prélèvement et de mesure pour la caractérisation des poussières, et son fonctionnement nécessite deux groupes de techniques :

1. techniques directes : la caractérisation (taille, charge électrique, concentration) est faite par une analyse directe sans rupture de la suspension

2. techniques indirectes : prélèvement d'un échantillon des particules en suspension, que l'on analyse ensuite par différents procédés. On dispose ainsi des informations sur la forme et l'état d'agrégation des particules. Il est possible de procéder à des numérations ainsi qu'à des mesures de dimensions. Par ailleurs, en effectuant une pesée, on obtient la concentration pondérale de l'aérosol. (Koller, juin 2009)

## **2.3 Exemple de dosage des polluants :**

### **2.3.1 Méthodes pour gaz inorganiques :**

Elles ont pour but la détermination des éléments dits minéraux, C'est-à-dire essentiellement les métalloïdes, les métaux, les halogènes.

Pour déterminer les quantités de polluant qui se trouvent dans une ambiance ou dans un flux gazeux, on peut se servir de deux systèmes d'analyse :

- Continue : notamment en cas de grandes variations au cours de la journée.
- Par intermittence avec prélèvement soient des échantillons d'air, soit des filtres imprégnés de réactif que l'on a laissé séjourner un certain temps à l'endroit à surveiller.

Les déterminations analytiques sont essentiellement basées sur la photométrie l'électrochimie ou la chromatographie.

Dans l'analyse par réaction et photométrie, lorsqu'on met au contact d'un gaz qui circule à débit constant un réactif spécifique du constituant à doser, ce réactif s'écoulant également à débit constant, la réaction développe parfois une coloration :

On peut alors, par évaluation de cette coloration à l'aide d'une cellule photoélectrique, déterminer, après un étalonnage préalable, la teneur de ce constituant dans le mélange. (Koller, juin 2009)

### **Quelques exemples de dosage inorganiques :**

- SO<sub>2</sub> : absorption dans une solution aqueuse diluée de tétrachloromercurate sodium et formation d'un complexe coloré par addition de p-rosaniline et formaldéhyde ; le

changement de coloration (rouge-violet) est déterminé par photométrie ; la limite de détection LD = 0,2 1µg SO<sub>2</sub>/m.

- NO<sub>2</sub> : le réactif de Saltzmann (solution d'iode de potassium tamponnée par un mélange de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> et de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) en présence de NO<sub>2</sub> développe une réaction colorée bien au-dessous de 0,5 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> et qui n'est pratiquement pas troublée par la présence d'ozone ou d'autres gaz polluants ; détermination par photométrie ; LD = 3 ug/m<sup>3</sup>.
- O<sub>3</sub> : dosage par iodométrie ; le O<sub>3</sub> libère l'iode de la solution d'iode de potassium absorbante, en milieu neutre ou alcalin ; une réaction colorée est produite et l'absorption de lumière est mesurée ; LD = 20 ug/m.
- CO : réaction avec le pentoxyde d'iode qui libère de l'iode ; détermination par passage sur un tube absorbeur à gel de silice imprégné de molybdate d'ammonium et de sel de palladium ou par spectrométrie dans l'infrarouge.

### 2.3.2 Méthodes pour Gaz organiques :

C'est la recherche et caractérisation des corps contenant essentiellement du carbone et de l'hydrogène. ce qui n'exclut pas pour autant les éléments tels que l'oxygène, les halogènes, l'azote et même certains métaux formant des sels organiques, Étant donné le nombre et la complexité des composés du carbone, l'analyse et l'identification des composés organiques sont infiniment plus complexes.

Le problème posé par ce type de mesure est le nombre de substances appartenant à cette catégorie : plusieurs centaines, caractérisées par des propriétés physiques, chimiques et toxiques très différentes. Initialement, pour réduire le nombre de mesures, on a procédé à la détermination de la teneur en carbone lié (carbone total).

Un exemple de méthode manuelle est l'absorption sur silicagel. La désorption se fait dans un courant d'oxygène à température élevée suivie par une combustion afin d'obtenir du CO<sub>2</sub> qui est déterminé par coulométrie ou par titrimétrie.

La limite de détection est 17 mg C/m<sup>3</sup> (titrimétrie), respectivement 2 mg /Cm<sup>3</sup> (coulométrie). Les mesures en continu se réalisent au moyen d'un détecteur à ionisation de flamme (FID). Le carbone organique lié est ionisé dans une flamme à hydrogène. Le courant ionique produit dans le champ électrique est amplifié ; il est proportionnel au nombre d'atomes introduits dans la flamme par unité de temps. Les valeurs limites de surveillance pour le carbone total spécifiées dans les normes (10/20 mg C/m<sup>3</sup>) exigent une plage de mesure de 0 à 30 mg/m<sup>3</sup>.

Cependant, dans certains cas, étant donné les effets et les concentrations extrêmement variables, cette mesure n'est pas utilisable. Par exemple, pour le benzène une concentration de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans l'atmosphère représente un considérable risque de cancer ; la même concentration de n-hexane est considérée sans aucun danger.

Cette situation a conduit à l'application de la chromatographie dans l'analyse des polluants organiques, afin de détecter les contaminants dans une plage qui va de  $\text{mg}/\text{m}^3$  jusqu'à des concentrations de l'ordre du  $\text{fg}/\text{m}^3$  (dioxines et furannes). La chromatographie est donc la méthode de choix pour ces polluants, pour que les composés organiques soient stables thermiquement et chimiquement.

Que ce soit à partir d'un milieu aqueux ou à partir de l'air ambiant, les techniques et les méthodes d'analyse les plus courantes reposent sur une extraction/concentration préalable des échantillons notamment sur phase solide, technique qui connaît actuellement un développement considérable, suivie d'une analyse et identification des contaminants par une technique chromatographique associée à une détection appropriée. Détecteur à ionisation de flamme (FID), détecteur à conductibilité thermique ou Catharomètre (TCD), détecteur thermoïonique (NPD), détecteur à capture d'électrons et détecteur à photométrie de flamme ou photo-ionisation (PID). (Koller, juin 2009)

## **2.4 Les Odeurs:**

L'identification ou la mesure d'une odeur est uniquement rapportée à son intensité. Le seuil de détection (quelle que soit la composition réelle) est la seule valeur de l'odeur d'un constituant inconnu que l'on puisse identifier et mesurer. C'est la concentration à laquelle les gens ordinaires ne peuvent pas détecter l'odeur. Le seuil de détection de nombreux composés purs a été mesuré et identifié en fonction de leur concentration. Par exemple, la teneur en ammoniac est de 47 ppm. En revanche, du  $\text{SO}_2$  dilué cent fois était toujours détecté. La triméthylamine est une substance hautement toxique et peut être détectée à une concentration d'environ 0,00021 ppm. La limite de détection ne peut être déterminée que par la réaction moyenne d'un groupe d'individus. Pour l'industrie, la procédure d'estimation des odeurs suit les étapes suivantes :

1. Identifier les sources d'odeur
2. Prélever un échantillon avec la même concentration que la source
3. Déterminez le seuil de détection pour chaque odeur.

### **3. Les techniques et les méthodes dynamiques « des mesures en temps réel » :**

#### **3.1 Les analyseurs industriels automatiques « sur site » :**

Les analyseurs automatiques couplés à un système informatique permettant le stockage des données peuvent réaliser l'identification et des mesures en continu grâce à des dispositifs d'introduction automatique des échantillons, comme les vannes d'échantillonnage, rotatives ou à piston, à commande pneumatique ou électromagnétique. (2.- METHODES ET TECHNIQUES)

Souvent les contrôles peuvent avoir pour objet d'apprécier la pollution moyenne d'une atmosphère, ce qui implique des mesures intégrées sur des laps de temps de plusieurs heures ou de plusieurs jours. Ainsi un grand nombre d'appareils d'identification et de mesure en continu, reliés en réseau, surveillent des polluants tels que SO<sub>2</sub> NO/NO<sub>2</sub> CO et O<sub>3</sub>. Cette utilisation du réseau correspond à une centralisation des résultats acquis à temps réel, la gestion pouvant avantageusement en être confiée à un ordinateur. Ces techniques consistent soit à faire réagir sélectivement le constituant que l'on se propose d'identifier, de doser et à mesurer une grandeur physique en relation directe avec la réaction (variation de volume, dégagement de chaleur, changement de coloration) et susceptible d'enregistrement, soit à déterminer une caractéristique physique du mélange gazeux, spécifique du gaz que l'on veut doser, et dont la grandeur est proportionnelle à sa teneur dans le mélange et susceptible d'enregistrement. (Koller, juin 2009).

##### **3.1.1 Présentation des analyseurs automatiques :**

###### **Principes :**

Les analyseurs automatiques peuvent utiliser divers principes selon les polluants, parfois plusieurs techniques sont utilisées pour un même polluant.

Le principe commun à ces appareils est :

###### **1. une pompe à air :**

Raccordée à un dispositif permettant la programmation de la fréquence de l'échantillonnage.

###### **2. Filtre ou Barboteur :**

Suivant les systèmes d'analyses, l'air est filtré ou barbote à travers un réactif (adapté au composé à détecter) pour préparer l'échantillon à analyser.

###### **3. capteurs/Analyseurs :**

Système basé sur la techniques utiliser la chromatographie, la spectrométrie, la chimiluminescence, etc. suivant le polluant recherché.

#### 4. Système informatique :

Stocke les données, mais suivant le degré de perfectionnement peut également calculer les moyennes, réguler la température, envoyer automatiquement les données via un modem ou donner l'alerte en cas de dépassement des seuils limites, etc. (2.- METHODES ET TECHNIQUES)

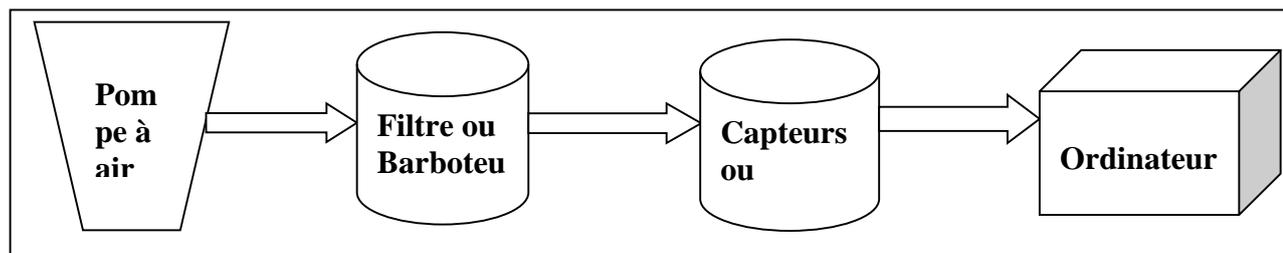


Figure 2 6:principe de fonctionnement d'un analyseur automatique

#### Remarque :

Ces analyseurs sont utilisables aussi au laboratoire mais les résultats sont en nombre limite, en diffèrent et n'ont pas au temps réel. (Manuels, semi-automatiques ou automatiques) dans lesquels on introduit des échantillons prélèvent au processus.

#### 3.1.2 Les types d'analyseur automatique :

- On différencie les analyseurs des gaz majeurs en fonction de leur principe de fonctionnement (technique d'identification et d'analyse, type de détecteur, propriété physique de l'analyse,...). Le tableau ci-après reprend ses différentes catégories suivant leurs dénominations usuelles :

Tableau 2 1:les types d'analyseur par rapport aux techniques d'identification

Les polluants Les techniques	NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	CH <sub>4</sub>
Chimiluminescence	X		X	X	
Fluorescence UV	X	X		X	
Absorption IR	X	X		X	X
Absorption UV	X	X	X	X	
Photométrie			X		
Catharomètre				X	

<b>NIDR</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Spectrométrie de masse</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
<b>Chromatographie en phase Gazeuse</b>	Tous les composés gazeux selon le détecteur				

### 3.1.3 Le domaine d'application des analyseurs automatiques :

- Surveillance de la concentration des gaz émis dans les installations de combustion pour tout type de combustible (fuels lourds, gaz et charbon) ainsi que dans les installations d'incinération d'ordures
- Surveillance de l'air ambiant dans des locaux
- Surveillance de l'air ambiant dans les entrepôts fruitiers, les serres, les caves de fermentation et les dépôts
- Surveillance du pilotage des procédés industriels
- Surveillance de l'atmosphère dans le traitement thermique des aciers
- Analyse des gaz de fumée
- Installations chimiques
- Industrie du ciment

### 3.1.4 Objectif d'utilisation des analyseurs :

- Pour la sécurité (personnes et environnement).
- Pour le contrôle et la régulation de certains procédés.

### 3.1.5 Exemple de quelque analyseur automatique :

Le tableau ci-dessous représente liste des analyseurs utilisés pour l'identification des polluants :

Tableau 2 2: quelques exemples d'analyseurs :

Le nom d'analyseur	Modèle d'appareil conforme au polluant identifié			
	NO <sub>x</sub> , NO, NO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO
ENVEA	AC 32e	O3 42e	AF 22e	CO 12e
TAPI	T 200	T 400	T 100	T 300
HORIBA	APNA-370	APOA-370	APSA-370	APMA-370
THERMO scientific	42i	49i	43i	48i
ULTRA MAT	Tous les polluants			

### 3.1.5.1 L'analyseur ENVEA AC 32e pour identification de polluant NO<sub>x</sub>-NO<sub>2</sub>-NO par technique Chimiluminescence :

AC32e est un analyseur d'air ambiant en continu. Son principe de fonctionnement repose sur la technologie de chimiluminescence, un standard d'identification et de mesure des concentrations des oxydes d'azote à faible teneur dans l'air ambiant (NF EN 14211).

Le principe de la chimiluminescence permet l'identification et l'analyse automatique des concentrations de NO, NO<sub>x</sub> et NO<sub>2</sub> dans les échantillons de gaz. Cela inclut la détection des photons (lumière) émis lors de la réaction du monoxyde d'azote (NO) et de l'ozone (O<sub>3</sub>). Cette réaction est à la base d'un détecteur à chimiluminescence (CLD), dans lequel les photons produits sont détectés par un tube photomultiplicateur (PM). (Tous les catalogues et fiches techniques (PDF) ENVEA)



Figure 2 7: principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA AC 32e

### 3.1.5.2 L'analyseur ENVEA CO 12e pour identification de polluant CO par la technique d'Absorption IR :

CO12e est un analyseur de référence pour identifier et mesurer en continu le monoxyde de carbone. C'est la cristallisation de plusieurs décennies d'expertise et de technologies brevetées, en utilisant cet appareil, vous obtiendrez les meilleurs résultats de mesure de monoxyde de carbone et de manière rapide, écologique et fiable. L'identification ou la mesure du monoxyde de carbone est basée sur le principe de l'absorption infrarouge. La concentration de CO dans l'échantillon est déterminée en mesurant la quantité de lumière infrarouge d'une longueur d'onde spécifique qui est absorbée par l'échantillon gazeux lorsque l'échantillon gazeux traverse trop la chambre de réflexion. (Tous les catalogues et fiches techniques (PDF) ENVEA)

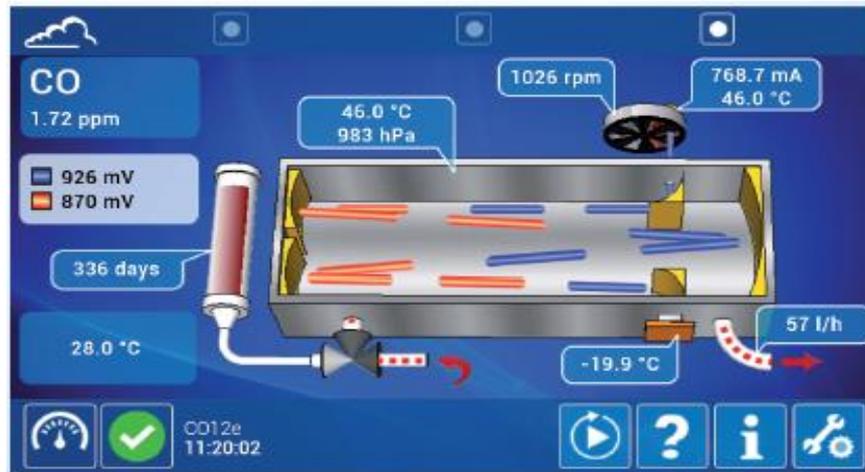


Figure 2 8: principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA CO 12e

### 3.1.5.3 L'analyseur ENVEA AF 22e pour identification de polluant SO<sub>2</sub> par la technique de Fluorescence UV :

L'analyseur AF22e utilise le principe universellement admis de la fluorescence ultraviolette (norme NF EN 14212). Appliqué à l'identification et à la mesure du dioxyde de soufre, le principe inclut la détection du rayonnement de fluorescence émis par les molécules de SO<sub>2</sub>. Sous l'influence du rayonnement ultraviolet, les molécules absorbant le rayonnement se transformeront temporairement en un état électronique excité. Ils retournent à l'état fondamental en émettant un rayonnement fluorescent, qui est mesuré par un tube photomultiplicateur (PM). À partir du signal PM, obtenez la concentration de SO<sub>2</sub> corrigée en fonction de la pression. Une excellente sensibilité de reconnaissance et de mesure est obtenue en ajoutant un obturateur et un filtre à hydrocarbure aromatique pour assurer l'élimination complète des interférences. (Tous les catalogues et fiches techniques (PDF) ENVEA)



Figure 2 9: principe de fonctionnement d'analyseur ENVEA AF22e

### 3.1.5.4 L'analyseur ENVEA O3 42e pour identification de polluant d'O3 par la techniques Absorption UV :

L'O342e est le résultat de plusieurs décennies d'expertise et d'une technique brevetée ; grâce à cet appareil vous réaliserez les meilleurs résultats de mesures d'ozone disponible sur le marché de manière rapide, écologique et fiable.

Appliqué à l'identification et la mesure d'ozone, le principe de la photométrie UV consiste à identifier et mesurer la lumière UV absorbée par les molécules d'ozone. La concentration d'ozone est déduite en appliquant un rapport entre deux signaux UV différents : le signal de référence et le signal de mesure. Le signal de référence est déterminé après le passage de l'échantillon dans un épurateur d'ozone rechargeable, de haute performance, utilisé comme convertisseur catalytique. Le signal de mesure passe quant à lui directement dans la chambre de mesure. Les deux signaux sont détectés par une photodiode possédant un seuil de détection très précis. La loi de Beer-Lambert est ensuite appliquée afin de déterminer la concentration d'ozone. (Tous les catalogues et fiches techniques (PDF) ENVEA)



Figure 2 10:le schéma de fonctionnement ENVEA O3 42e

### 3.1.5.5 Analyseur ENVEA MIR 9000e multi gaz par la techniques NIDR :

Les analyseurs NIDR permettent de mesurer vers gaz avec une grande précision. Cette technologie est utilisée et Constamment perfectionnée depuis de nombreuses années par ENVEA. avec sa célèbre génération d'analyseurs de 9az MIR 9000, Le MIR 9000e est une nouvelle génération d'analyseurs de gaz, qui bénéficie d'une expertise unique en matière de fiabilité, d'éco-conception, de connectivité et de convivialité.

Le MIR 9000e est capable de mesurer jusqu' à 8 composants. Selon votre sélection. Les NOx, SO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, et N<sub>2</sub>O sont mesurés par la méthode Infrarouge non-Dispersive à Corrélation par Filtres Gazeux (NDIR), tandis que l'O<sub>2</sub> est mesuré par un capteur en zircone intégré (ou une cellule paramagnétique sur demande). L'analyseur utilise les technologies optiques et

électroniques les plus récentes, offrant une précision et une robustesse accrues, tout en ne nécessitant qu'une maintenance limitée.

Tableau 2 3:cracteristique d'anlyseurs MIR 9000e :

<b>Objet de la mesure</b>	de dioxyde de carbone, de gaz de combustion, de monoxyde de carbone, CH <sub>4</sub> , de dioxyde de soufre, de dioxyde d'azote, de monoxyde d'azote, multigaz, d'eau, de gaz d'échappement, de protoxyde d'azote
<b>Mesure</b>	de concentration, de combustion, des émissions
<b>Domaine d'application</b>	pour chaudière, pour la vérification de conformité réglementaire, pour surveillance d'émissions de gaz, pour le contrôle qualité, de process, pour évaluations environnementales
<b>Configuration</b>	benchtop, à intégrer, compact, en ligne
<b>Technologie</b>	NDIR
<b>Autres caractéristiques</b>	en continu, à faible émission, écologique, haute performance, multi-paramètres, avec écran tactile, à extraction, d'acquisition de données

### 3.2 Les Détecteurs des polluants automatiques « fixe /portable » :

Les détecteurs en temps réel de polluants constituent une aide précieuse pour évaluer les niveaux d'exposition au poste de travail au cours du temps ou surveiller les atmosphères des lieux de travail. Ils peuvent être individuels, portables ou fixes et on distingue deux familles d'appareils en fonction de la nature du polluant ciblé : les détecteurs de gaz ou vapeurs et les détecteurs de poussières.

Les détecteurs de gaz en temps réel avertissent de la présence de certains gaz dangereux ou du manque d'oxygène. Pour que leur fonctionnement soit assuré pour des applications de sécurité, ils doivent être régulièrement testés à l'aide d'un gaz de référence ou gaz étalon. Même si leur utilisation semble simple, les utilisateurs doivent être formés à leur fonctionnement et à la conduite à tenir en cas de déclenchement d'une alarme de détection de gaz. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)



Figure 2 11:détecteur fixe de gaz



Figure 2 12:détecteur portables de gaz

Le détecteur en temps réel de poussières et aérosols ne peut pas être utilisé pour mesurer la concentration de poussière. Ils constituent malgré tout une aide précieuse en hygiène du travail, notamment pour mettre en place des stratégies de prélèvement et suivre des profils d'exposition. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)



Figure 2 13:détecteur fixe de poussière



Figure 2 14:détecteur portables de poussière

### 3.2.1 Détection en temps réel des gaz ou des vapeurs :

Un détecteur de gaz est un appareil qui fournit une indication en temps réel de la concentration d'un gaz ou d'une vapeur en un point donné de l'atmosphère. Cette solution doit être choisie pour permettre une surveillance ou de contrôle d'atmosphère.

Il existe des appareils permettant :

- l'évaluation de la concentration en gaz dangereux pour la santé (monoxyde de carbone, hydrogène sulfuré, ammoniac, chlore, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone, chlorure d'hydrogène, oxydes d'azote, composés organiques volatils ...),
- l'évaluation de la teneur en oxygène,
- l'évaluation de la concentration en gaz combustible par rapport à la limite inférieure d'explosivité (explosimètre). (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

Tableau 2 4:les types des détecteurs automatique :

Les types des détecteurs automatiques	L'usage de ces détecteurs
Détecteurs de gaz fixes	Ils sont utilisés pour la surveillance de l'atmosphère d'installations dans lesquelles la présence de gaz dangereux est possible et peuvent permettre le déclenchement d'alarmes ou la mise en sécurité d'un système. Ils peuvent, par exemple, être utilisés autour d'installations frigorifiques fonctionnant à l'ammoniac, de stockages de gaz dangereux pour la santé (chlore...) ou inflammables (gaz naturel...) ou d'installations thermiques (monoxyde de carbone).
Détecteurs individuels et portables	Ils assurent généralement une fonction de sécurité pour des personnes qui interviennent dans des zones où il existe un risque de formation d'atmosphères dangereuses pour la santé ou explosibles.  Certains peuvent également être utilisés lors de l'établissement d'une stratégie de prélèvement (pour pointer les postes ou les procédés les plus exposés), pour la cartographie des émissions de composés organiques

	volatils (détecteurs à photo-ionisation) sur des sites industriels ou pour la recherche de fuites de gaz.
--	---

### 3.2.1.1 Interférences lors de l'utilisation :

Le fonctionnement de la plupart des détecteurs de gaz peut être affecté par la présence d'autres gaz ou par des paramètres tels que température ou humidité.

Par conséquent, un détecteur électrochimique de monoxyde de carbone peut être sensible au sulfure d'hydrogène, à l'hydrogène ainsi qu'à des vapeurs organiques, et voir sa sensibilité réduite en présence du dioxyde d'azote. Un détecteur à photo-ionisation voit sa sensibilité diminuer avec la température et l'humidité de l'air.

Avant de choisir un appareil, il est donc important d'interroger les fournisseurs sur ce point en prenant en compte l'application envisagée. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

### 3.2.1.2 Positionnement :

Avant d'entrer dans la zone dangereuse, le positionnement du détecteur fixe ou la sélection du point de mesure doit être soigneusement effectué.

Dans la plupart des locaux industriels, les phénomènes de flux d'air et de convection peuvent interférer avec la stratification des gaz. Par conséquent, Le positionnement de détecteurs fixes destinés à avertir des fuites est compliqué et peut nécessiter l'utilisation de modélisation. Par exemple, dans le cas d'un opérateur entrant dans un réservoir de stockage ou un espace clos. La connaissance de la densité des gaz est une information utile. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

### 3.2.1.3 Vérifications et maintenance :

Comme tous les instruments de mesure, les détecteurs de gaz dérivent dans le temps et leur fonctionnement est sensible aux influences extérieures (température, humidité, gaz interférents...). Par conséquent, ils doivent donc être **vérifiés périodiquement** et si nécessaire, des opérations de maintenance doivent être effectuées par du personnel qualifié conformément aux recommandations du fabricant. Il est recommandé d'associer une **fiche de suivi ou la table de surveillance à chaque détecteur** (vérifications, calibrages, maintenances, incidents...).

Un gaz étalon doit être utilisé pour vérifier le bon fonctionnement du détecteur permettant de déclencher une alarme et s'assurer que la concentration lue sur l'appareil est bien la concentration attendue. Attention : les autotests effectués par de nombreux détecteurs ne

permettent pas de s'assurer de leur bon fonctionnement en présence du gaz. Si la vérification n'est pas concluante le détecteur ne doit pas être utilisé et doit être envoyé en maintenance. Pour les détecteurs individuels et portables, soumis à des contraintes diverses (chocs et risque de chute, variations de température et d'atmosphère, opérateurs multiples...), il est recommandé de vérifier leur fonctionnement à l'aide d'un gaz étalon avant chaque utilisation. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

#### 3.2.1.4 Formation :

Les utilisateurs de détecteurs de gaz doivent être formés à leur utilisation. La formation s'inscrit dans la formation générale à la sécurité et doit notamment porter sur :

- les dangers des gaz susceptibles d'être présents,
- le fonctionnement et le bon usage des détecteurs (vérification du bon fonctionnement),
- la conduite à tenir en cas de déclenchement d'une alarme. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

#### 3.2.2 Détection de poussières

Parallèlement aux dispositifs de prélèvements des poussières, il existe des appareils d'évaluation en continu de la concentration en poussières dans l'air. Ces appareils utilisent généralement la diffusion d'un faisceau lumineux pour mesurer la concentration des particules dans l'air. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

##### 3.2.2.1 Pour quelles utilisations ?

Ces appareils sont très utiles dans le domaine de l'hygiène industrielle pour :

- Détecter et localiser des émissions de poussières sur des installations qui dégradent la qualité de l'air ambiant.
- Déterminer des profils d'exposition pour l'identification des pics d'exposition, généralement indétectables par les méthodes traditionnelles de prélèvements et d'analyses a posteriori en laboratoire.
- Aider à la mise en place d'une stratégie de prélèvements en fournissant une estimation des niveaux de pollution en divers endroits et à différents moments.
- Aider à la validation d'un système de captage ou d'assainissement de l'air pollué.
- Sensibiliser les salariés en mettant en évidence, en temps réel, des expositions à des poussières qui ne se voient pas. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

### 3.2.2.2 Comment fonctionnent-ils ?

2 technologies sont présentes : les photomètres et les compteurs de particules.

#### 3.2.2.2.1 Photomètres :

Ils convertissent l'intensité lumineuse diffusée par les poussières en concentration par l'intermédiaire d'un calibrage. Celui-ci est sensible à la granulométrie des poussières et à leur propriété optique. Le calibrage standard effectué en usine n'est généralement pas adapté aux caractéristiques des poussières existant sur le site de l'utilisateur. Les diamètres des poussières qu'ils ont détectés variaient de 0,1 à 10 ou 20  $\mu\text{m}$ .

#### 3.2.2.2.2 Compteurs de particules :

Ils déterminent le nombre de particules par unité de volume dans l'air en comptant les impulsions lumineuses provoquées par les particules traversant la cellule de mesure. Le nombre de particules peut ensuite être converti en masse grâce à un étalonnage sensible aux propriétés optiques des particules et à leur densité. L'obtention d'informations sur la granulométrie des particules est possible, l'intensité des impulsions lumineuses dépendant de la taille des particules. Les résultats sont, là encore, influencés par les propriétés optiques des particules. Les compteurs de particules sont plus adaptés aux atmosphères assez peu empoussiérées. En effet au-delà d'un certain nombre de particules par unité de volume dans l'air, des erreurs de mesure sont causées par le passage simultané de plusieurs particules dans la cellule de mesure. Les diamètres des poussières qu'ils permettent de détecter vont de 0,1 à 10  $\mu\text{m}$  environ.

D'une manière générale, il est préférable de choisir un appareil doté d'un système de pompage de l'atmosphère à mesurer ou d'équiper les détecteurs passifs d'une pompe de prélèvement. Certains de ces appareils peuvent être équipés de sélecteurs de particules permettant de ne mesurer que la **fraction alvéolaire** par exemple. Certains d'entre eux permettent également de collecter les particules qui ont été mesurées sur un filtre. La pesée de celui-ci après une durée suffisante de mesure permet de déterminer un facteur corrigeant les mesures obtenues. Malgré cela, les appareils de mesure en continu des poussières ne sont pas considérés comme pouvant donner des mesures fiables de la concentration dans l'air de la fraction alvéolaire, notamment parce que l'efficacité de captage de cette fraction n'a généralement pas été caractérisée comme elle l'a été pour les dispositifs de prélèvement utilisés en hygiène industrielle. (Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS)

### 3.2.2.3 Précautions et maintenance :

Après une utilisation prolongée la cellule de mesure est susceptible de s'encrasser. Cela conduit à une perte de sensibilité de l'appareil et à un décalage de zéro. Il est donc conseillé de vérifier régulièrement le zéro de l'appareil en effectuant par exemple une mesure derrière un filtre. La majorité des appareils actuels ne peuvent être nettoyés par l'utilisateur. Ils doivent donc être dans ce cas renvoyés au distributeur du matériel.

Chapitre 3 : techniques  
d'identification de la  
pollution de l'eau

## **1. Introduction :**

L'activité humaine, par ses diverses activités, produit des polluants chimiques ou biologiques qui peuvent être notamment radioactifs, organiques ou encore acides. Ces polluants finissent majoritairement par atteindre les milieux aquatiques. De ce fait, pour certains besoins, l'eau doit être traitée, et la pollution croissante oblige l'homme à constamment innover dans ce domaine, mais d'abord faut identifier certaines particules qui menacent la qualité des eaux dans les secteurs industriels et pour réaliser cela on utilise des nouvelles techniques et moyens de détection. Des mesures ont dû être mises en place aux niveaux mondial, européen et national pour surveiller l'importance et la concentration des polluants dans les milieux aquatiques notamment sur les sites industriels.

## **2. Paramètres de définition de la pollution de l'eau :**

Toutes les eaux industrielles qui forment les effluents contiennent de nombreuses molécules différentes qu'il est impossible d'identifier et de quantifier individuellement et de manière exhaustive. On utilise donc des grandeurs qui servent à caractériser de manière globale et pertinente le niveau de pollution présent dans les effluents. Les volumes rejetés et la quantité de matière contenant principalement du carbone, de l'azote et du phosphore sont les caractéristiques les plus importantes à considérer. Cela n'exclut pas qu'une attention particulière soit portée ponctuellement sur d'autres éléments. Ils correspondent aux méthodes d'analyse normalisées permettant de caractériser une eau résiduaire et de connaître son niveau de contamination :

- pH : caractère acide ou alcalin des eaux.
- MES (matières en suspension).
- MeST (matières totales en suspension) : ce paramètre (exprimé en mg/l) correspond à la pollution insoluble particulaire, c'est-à-dire à la totalité des particules solides véhiculées par les eaux résiduaires représentant le poids, le volume et la nature des particules).
- DBO<sub>5</sub> (demande biochimique en oxygène): elle représente la quantité de pollution biodégradable. Cette méthode d'analyse de la pollution correspond à la quantité d'oxygène nécessaire, pendant 5 jours, aux MO (bactéries) contenus dans l'eau pour oxyder une partie des matières carbonées. Cette mesure permet une certaine évaluation des nuisances provoquées par le rejet de matières organiques biodégradables en mesurant une consommation d'oxygène. Le paramètre de base fondamental de dimensionnement des ouvrages d'épuration biologique a été et reste à ce jour la DBO<sub>5</sub> de l'eau brute, dans les

eaux d'égout des villes européennes, on évalue en moyenne à 190 g/hab. la quantité de matières dissoutes ou en suspension rejetée chaque jour dans les fleuves riverains. Sur ce total, on compte 50 g de matières organiques fermentescibles, qui nécessitent pour leur décomposition une DBO<sub>5</sub> par habitant de 54 g/j en moyenne.

- DCO (demande chimique en oxygène) : elle représente la quantité totale de pollution oxydable et correspond à la quantité d'oxygène qu'il faut fournir grâce à des réactifs chimiques puissants, pour oxyder les matières contenues dans l'effluent.

Remarque : Le rapport DBO<sub>5</sub>/DCO est un indicateur des possibilités d'autoépuration de l'eau. À mesure que les eaux usées contiennent davantage de matières peu biodégradables ou toxiques (le rapport DBO<sub>5</sub>/DCO devient inférieur à 0,3), les procédés physico-chimiques prennent le pas sur les méthodes biologiques. À la limite, il faut avoir recours à une détoxification.

- MatO (matières oxydables) : c'est un paramètre utilisé par les agences de l'eau pour caractériser la pollution organique de l'eau. Il se définit à partir de la DBO<sub>5</sub> et de la DCO, selon la formule :

$$\text{MatO} = (2 \text{ DBO}_5 + \text{ DCO}) / 3$$

- COT (carbone organique total).
- N<sub>GI</sub> (azote global) : quantité (exprimée en mg N/l qui correspond à l'azote organique et ammoniacal et aux formes oxydées de l'azote (nitrites et nitrates).
- N<sub>TK</sub> (azote Kjeldahl) : quantité d'azote (exprimée en mg N/l) correspondant aux formes réduites de l'azote (azote organique et azote ammoniacal).
- N-NH<sub>4</sub> (azote ammoniacal) : paramètre important pour l'eau potable et la vie piscicole.
- N-NO<sub>2</sub> et N-NO<sub>3</sub>, (l'azote sous forme de nitrites, respectivement nitrates) : paramètres évaluant la toxicité de l'eau potable et l'eutrophisation.
- P<sub>T</sub> (phosphore total) sous ses différentes formes organiques et phosphatés (MP pour matières phosphorées).
- Test « coliformes fécaux » pour l'évaluation de la pollution microbienne des eaux usées.
- équivalent habitant (EH) : il correspond à la pollution quotidienne que génère un individu. Chacun est censé utiliser 180 à 300 litres d'eau par jour. La quantité de pollution journalière produite par un individu est estimée à 57 g MatO, 90 g MeS, 15 g MA et 4 g MP. Enfin, la concentration en germes est généralement de l'ordre de 1 à 10 milliards de germes pour 100 ml. La directive européenne fixe l'EH à une production journalière de 60 g de DBO<sub>5</sub>, unité qui a le défaut de ne pas être suffisamment précise, ce qui implique que la notion d'EH doit

être souvent modulée par la prise en compte de divers paramètres. (techniques d'ingénieur )

Tableau 3 1: valeurs limites des rejets des effluents industriels

zone	Paramètre	flux de pollution autorisés (kg/j)	Valeurs limites de rejet (mg/l)	
			Moyenne /24 heures	Moyenne / mois
Zone normale	MeST	$\leq 15$	100	/
		$> 15$	35	/
	DBO <sub>5</sub>	$\leq 30$	100	/
		$> 30$	30	/
	DCO	$\leq 100$	300	/
		$> 100$	125	/
N <sub>GI</sub>	$\leq 50$	30	/	
P <sub>t</sub>	$\leq 15$	/	10	
Zone sensible à l'eutrophisation	N <sub>GI</sub>	$\geq 150$	/	15
		$\geq 200$	/	10
	P <sub>t</sub>	$\geq 40$	/	2
		$\geq 80$	/	1

### 3. La détection par UV-Vis ou par fluorescence pour l'identification de pollution d'eau :

La détection par UV-Visible (UV-Vis) comme la détection par fluorescence est basée sur les phénomènes d'absorption détectés par un spectromètre. Lorsqu'une molécule absorbe un photon de fréquence appartenant au domaine de l'UV-Vis, la molécule passe de son état fondamental à un état électronique excité. Cette technique mesure l'intensité lumineuse absorbée par la molécule en fonction de la longueur d'onde. Le plus souvent, un réactif est ajouté dans l'eau à analyser, il engendre un changement de couleur qui dépend de la concentration en molécules polluantes. Ainsi, l'intensité du signal mesurée varie en fonction de la concentration en polluants. Cette technique est souvent appelée colorimétrie. La spectroscopie par fluorescence est une technique complémentaire à la spectroscopie d'absorption UV-Vis. En effet, elle permet la mesure de l'intensité lumineuse émise par un échantillon éclairé à une certaine longueur d'onde. A l'inverse de la spectroscopie UV Vis, la fluorescence fait donc intervenir des transitions d'états excités vers l'état fondamental impliquant des phénomènes radiatifs (émission de photons). Du fait de sa grande sensibilité, la

détection par fluorescence a de nombreuses applications dans le domaine industriel. (Baillieul, 2019)

#### **4. Techniques de mesure de la composition chimique par spectroscopie**

##### **L'ICP/OES et l'ICP/MS :**

L'analyse multi-élémentaire de la composition chimique des particules peut être réalisée avec des méthodes de spectroscopie d'émission. Dans ces techniques, les éléments à analyser sont préparés à l'état liquide puis vaporisés à l'aide d'un nébuliseur et injectés dans un plasma où les éléments à analyser sont excités et ionisés. L'analyse ICP/OES est réalisée par spectroscopie d'émission. Elle permet essentiellement l'analyse des éléments majeurs avec une concentration de quelques  $\mu\text{g/L}$ . Dans l'ICP/MS, les éléments ionisés sont analysés par spectrométrie de masse. L'ICP/MS permet l'analyse de traces ou d'ultra-traces jusqu'à environ  $0.01 \text{ ng/L}$ . La composition chimique par classe de taille peut être déterminée pourvu qu'une méthode de séparation, la chromatographie, ait été utilisée en amont. (Directives concernant les limites de détection ICP-OES et ICP-MS)

##### **5. La techniques LIBD/LIBS :**

La méthode d'analyse laser dite LIBD, dont le principe est très proche de la technique LIBS, est souvent présentée en complément des analyses LIBS appliquées à la détection de particules dans les liquides. Tout comme en LIBS, la LIBD consiste à focaliser un faisceau laser dans le liquide où les particules sont en suspension. L'énergie laser est réglée de telle sorte qu'il n'y ait pas de claquage plasma dans ou sur le liquide. Comme les seuils de claquage pour les solides sont inférieurs à ceux des liquides, une particule interagissant avec le faisceau laser génère un plasma. L'imagerie de ce plasma permet de remonter à la taille des particules dans des gammes s'échelonnant de quelques nanomètres à plusieurs micromètres. Il est également possible de remonter à la concentration en nombre.

La technique LIBD mériterait une étude bibliographique à elle seule. Néanmoins, il est possible de se faire une idée de ses performances étant donné qu'elle a été associée à plusieurs études LIBS sur les particules dans les liquides. Cette technique permet de déterminer la taille de la particule qui est proportionnelle à l'image 2D du plasma généré dans le liquide et recueillie à l'aide d'une caméra CCD. La détermination des tailles des particules est établie comme suit.

Pour un faisceau gaussien en mode transverse électromagnétique fondamentale (TEM<sub>00</sub>), les contours d'irradiance peuvent être calculés et prennent la forme indiquée dans l'article de

Bundschuh et al. L'allumage d'un plasma dans le champ du faisceau laser dépend de la taille de la particule mais aussi de l'irradiance laser.

Ainsi, le claquage des particules les plus petites se produira préférentiellement au centre du volume focal où l'irradiance est plus élevée alors que pour les plus grosses, la probabilité de claquage augmente plus loin du centre du volume focal où l'irradiance diminue. Ainsi en utilisant un logiciel d'analyse d'image, Bundschuh et al. ont montré qu'il est possible de différencier correctement des tailles de particules telles que 19, 32, 41, 50, 73, 155, 304, 698 et 1072 nm. Le logiciel permet aussi de différencier les claquages simples ou multiples pour une impulsion laser.

Dans un autre article dédié à l'utilisation conjointe de la LIBS et LIBD, Bundschuh et al. présente des résultats obtenus avec la LIBD sur des particules d'euporium (Eu).

D'après les auteurs, cette technique permet de détecter des particules avec une taille limite de 2 nm pour des gammes de concentrations s'échelonnant du ng/L au mg/L. La technique LIBD disposerait d'une plus grande sensibilité et plus spécialement pour les particules de tailles inférieures à 100 nm. De plus Bundschuh et al. soulignent que la formation de bulles n'affecte pas le diagnostic.

Comparé à toutes les autres techniques de mesure de tailles de particules, la LIBD est bien adaptée à la problématique de l'analyse in-situ des particules dans les liquides car moins encline à modifier leur état que la plupart des autres techniques, notamment celles nécessitant un prélèvement. La LIBD peut également permettre de calculer la concentration en nombre des particules selon le principe et les équations présentées dans les articles de BUNDSCHUH et AL et WAGNER et AL non présentées dans ce travail.

Cependant, la technique LIBD ne permet pas à elle seule la détermination de la nature chimique d'une particule.

La technique LIBS est adaptée à ce type d'application. Elle consiste à focaliser un faisceau laser impulsif sur l'échantillon solide, liquide, gaz, ou aérosol. Il se forme alors un plasma dont le rayonnement émis contient la signature de tous les éléments chimiques présents dans le matériau sondé. Elle n'est pas intrusive et il n'y a pas de préparation de l'échantillon. Un système basé sur cette technique appliqué à l'analyse des particules dans les liquides, permettrait de déterminer la nature chimique élémentaire des polluants, notamment les métaux lourds (mais pas les composés organiques) et les concentrations massiques des éléments visés. Ainsi, il apparaît que le couplage LIBS/LIBD permettrait d'accéder à la composition chimique, aux concentrations en masse, en nombre et aux tailles des particules sondées dans le liquide, à

la fois in-situ et en temps réel. Ces deux techniques présentent donc un fort intérêt pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques des particules dans les liquides. (Faye, 2014)

## **6. Les capteurs optiques :**

Les capteurs optiques forment une catégorie de capteurs parmi la multitude existante basée sur des principes de détection optique. De manière générale, un capteur est un dispositif qui permet la conversion d'une grandeur physique observée en une grandeur normée qui peut être traitée et interprétée. Il est fréquent de confondre les termes capteur et transducteur, or, le transducteur est l'élément actif du capteur qui convertit l'information physique externe en donnée traitable. Ainsi, un capteur est constitué au minimum d'un transducteur. Les principales caractéristiques d'un capteur sont son étendue de mesure, sa sensibilité, sa résolution, sa précision, sa rapidité ou encore sa linéarité. La variété des types de capteurs est très importante : il existe des capteurs actifs, passifs, de contact ou de proximité, des capteurs logiques analogiques ou numériques, des biocapteurs, des capteurs de pression, de température ou encore de déplacement. Ainsi, les domaines d'application des capteurs sont également nombreux et divers, tels que la télécommunication, l'environnement, l'agroalimentaire et la défense par exemple. Dans le cadre l'identification des polluants dans l'eau, notre intérêt se portera sur les capteurs optiques qui font partis de la famille des capteurs physiques, au même titre que les capteurs thermiques ou électriques. Un capteur optique est un dispositif constitué d'une source lumineuse, d'éléments optiques tels que des lentilles ou des miroirs et d'un photo-détecteur. Vont être présentés maintenant quelques exemples de techniques de détection optique classées en deux catégories : les méthodes réfractométrie et les méthodes spectroscopiques. (Baillieul, 2019)

### **6.1 Technique réfractométries :**

En optique, le phénomène de réfraction se produit lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu de propagation homogène et transparent à un autre. La direction de propagation du rayon va être modifiée à l'interface entre les deux milieux, que l'on nomme alors plan d'incidence ou dioptre. Cette déviation du rayon est due au fait que les milieux transparents possèdent des réfringences différentes. Cette propriété se traduit par des indices de réfraction différents (valeurs numériques). L'indice de réfraction ( $n$ ) est défini par le rapport entre la vitesse de la lumière se propageant dans le vide et celle de la lumière dans le milieu considéré ( $n = c/v$ ). Ainsi, l'indice de réfraction est une valeur qui permet de décrire le comportement de la lumière dans un milieu homogène et transparent autre que le vide.

Les techniques de détection réfractométrique mesurent la variation de l'indice de réfraction d'un milieu produite par la mesurande. Nous allons à présent énumérer quelques-unes de ces méthodes. (Baillieul, 2019)

### 6.1.1 L'Ellipso-métrie :

L'ellipso-métrie est une technique optique non-destructive d'analyse de surface qui étudie le caractère vectoriel du champ électromagnétique. Ainsi, cette technique repose sur la mesure du changement de l'état de polarisation d'un faisceau lumineux après réflexion sur une surface plane. En effet, quand un faisceau lumineux polarisé arrive sur une surface, il est en partie réfracté et en partie réfléchi (Figure 3.1). La polarisation du faisceau réfléchi est modifiée en fonction des propriétés structurales et optique du milieu considéré.

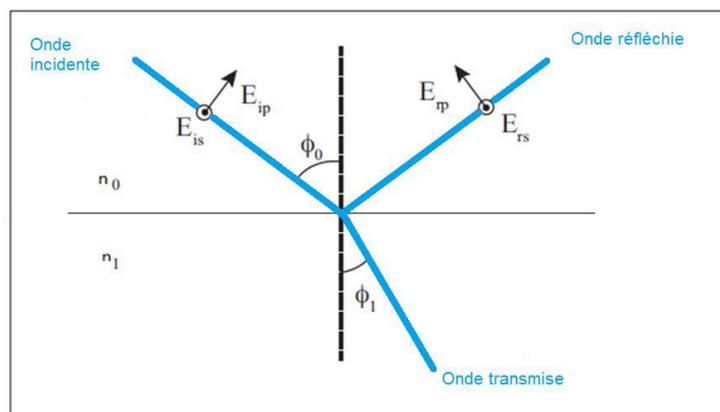


Figure 3 1:Schéma de principe de l'ellipsométrie

Cette technique est principalement utilisée pour déterminer l'épaisseur et les constantes optiques ( $n$ ,  $k$ ) des couches minces. Les domaines d'application de l'ellipso-métrie sont nombreux, nous pouvons citer notamment l'optoélectronique, les semi-conducteurs, le photovoltaïque, la chimie de surface, les biotechnologies ou encore les nanotechnologies. Cette technique, permettant de détecter des changements d'indice de réfraction de l'ordre de  $10^{-3}$  RIU (Refractive Index Unit), est employée pour la détection de gaz. En effet, lorsque les molécules d'un gaz s'absorbent sur un matériau poreux par exemple, l'indice de réfraction de ce matériau va varier. L'ellipso-métrie permet également de déterminer les variations d'épaisseur d'une couche mince sous l'effet de la chaleur par exemple. Elle permet aussi de mesurer les variations d'indice de réfraction et d'épaisseur d'une bio-couche à différents temps d'interaction entre un substrat fonctionnalisé et une solution contenant des biomolécules. Ainsi, une bio-détection in situ, rapide et sensible est possible. (N. Ghellai, 2011)

### 6.1.2 L'Interférométrie :

Comme son nom l'indique, l'interférométrie utilise le phénomène d'interférence des ondes lumineuses dans le cadre de l'optique mais, le phénomène est le même pour les ondes acoustiques. Ce phénomène résulte de la superposition en tout point de l'espace de deux ondes monochromatiques synchrones (de même fréquence) et cohérentes (présentant une différence de phase constante).

Les interféromètres sont utilisés dans de nombreux domaines allant de l'acoustique sous-marine à l'astronomie en passant par la mécanique. Ils peuvent être classés en deux catégories : les interféromètres à division de front d'onde ; comme les fentes d'Young et les miroirs de Fresnel par exemple, et les interféromètres à division d'amplitude tels que les interféromètres de Michelson, de Fizeau, de Fabry-Perot ou encore l'interféromètre de Mach-Zehnder. Ce dernier est d'ailleurs souvent utilisé actuellement pour le développement de capteurs optiques. En effet, ces interféromètres permettent la mesure de l'indice de réfraction avec une grande sensibilité ( $10^{-6} - 10^{-8}$  RIU). Ils sont constitués d'un guide d'onde dans lequel se propage la lumière avant d'être divisée par une jonction Y en deux faisceaux le long de deux bras parallèles : l'un servant pour la référence, l'autre pour la détection. Les deux bras, et donc les deux faisceaux, se rejoignent ensuite par le biais d'une nouvelle jonction Y (Figure 3.2). Lorsque le bras de détection est mis en présence d'un élément cible (molécule chimique par exemple) la variation de l'indice de réfraction du milieu induit un décalage de phase du faisceau parcourant ce bras par rapport à celui parcourant le bras de référence. (Baudet, 2015)

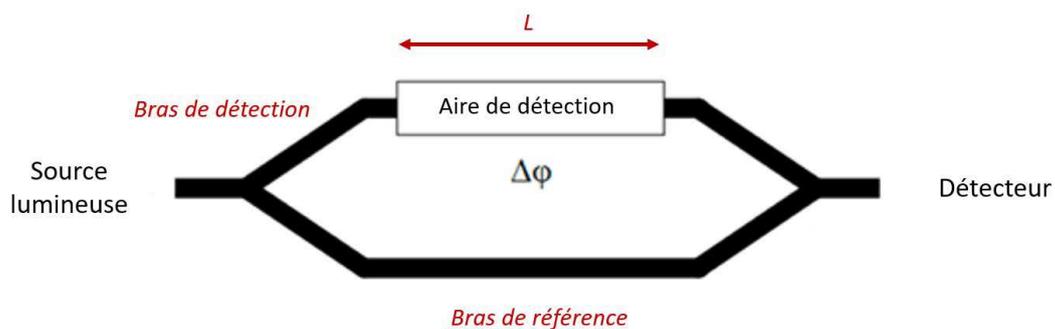


Figure 3 2: Schéma de principe d'un interféromètre de Mach Zehnder

### 6.1.3 La résonance plasmonique de surface :

Un faisceau lumineux irradiant une nanoparticule métallique peut faire osciller les électrons libres de conduction de la nanoparticule par rapport à leur état d'équilibre. Il se produit alors un transfert d'énergie de la lumière vers les électrons libres. La description de ce phénomène a nécessité la création du concept de plasmon qui a été défini comme suit par Pines : « un plasmon est une quasi-particule quantique représentant les excitations ou modes élémentaires des

oscillations de densité de charge dans un plasma ». Autrement dit, un plasmon de surface correspond à l'oscillation d'électrons libres à l'interface entre un métal et un diélectrique. Les plasmons peuvent être de surface localisés, délocalisés ou propagatifs suivant les dimensions des nanoparticules métalliques. Les plasmons sont générés sous certaines conditions qui font intervenir l'indice de réfraction du diélectrique, les permittivités relatives du métal et du diélectrique, l'angle d'incidence du faisceau lumineux, sa longueur d'onde et la direction de polarisation.

Les capteurs à SPR (Surface Plasmon Resonance) sont essentiellement utilisés pour la détection optique de molécules sur une surface métallique fonctionnalisée. En effet, la présence de molécules biochimiques à l'interface entre le métal et le milieu à analyser va induire une modification de l'indice de réfraction du milieu et provoquer un changement de la longueur d'onde de résonance des plasmons à angle d'incidence fixe ou d'angle de résonance à longueur d'onde fixe. Ainsi, les biocapteurs à SPR sont très fréquemment utilisés du fait de leur capacité à détecter des interactions biomoléculaires en temps réel. (Baudet, 2015)

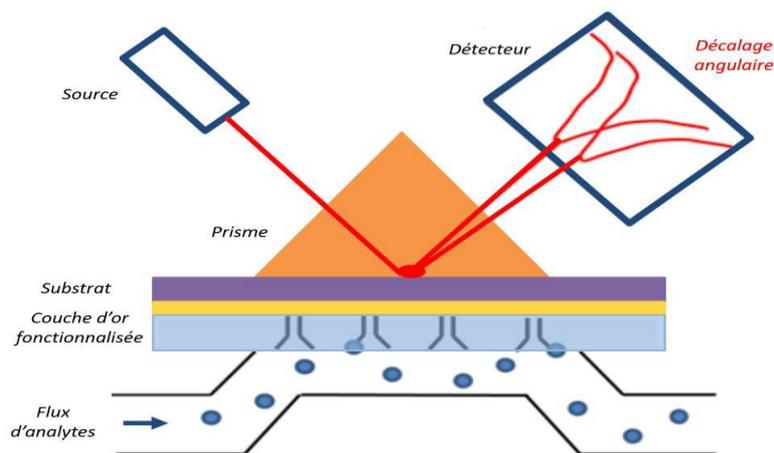


Figure 3 3:Schéma de principe d'un capteur SPR

## 6.2 Stratégie de mesure de l'eau polluée par des micro-capteurs optiques :

### 6.2.1 Mesure sur site :

Les mesures sur site désignent les mesures capables de donner une réponse « immédiate » sur la qualité de l'eau. Elles présentent de nombreux avantages ; une mesure au plus près du terrain, une limitation des artéfacts liés aux prélèvements et à la manipulation des échantillons et une meilleure compréhension du milieu grâce à la multiplication des mesures. ce sont à la fois des outils d'alerte permettant de gérer la surveillance des masses d'eau, et des outils d'orientation donnant accès à une meilleure connaissance du milieu. En fonction de la technique utilisée. La mesure sur site réalisée de différentes façons:

- la méthode in situ où le capteur est directement émergé dans l'eau
- la méthode en ligne où l'analyseur est placé sur le bord de la masse d'eau à analyser
- la méthode hors ligne où le système portatif est amené sur le bord de la masse d'eau et la mesure est réalisée à l'aide d'échantillons, elle nécessite donc une manipulation de l'échantillon de la part de l'utilisateur.

La qualité de l'eau, notamment concernant les faibles concentrations de polluants, peut représenter un verrou à l'utilisation de la mesure sur site. En effet les outils utilisés ne sont pas toujours suffisamment sensibles pour permettre la détection des polluants. L'efficacité d'un capteur sera évaluée en fonction de sa sensibilité et de sa sélectivité vis-à-vis des polluants chimiques. Il existe plusieurs types de capteurs qui se différencient par leur méthode de détection. On peut citer par exemple les capteurs électrochimiques et les capteurs spectrophotométriques UV-Vis. (Baudet, 2015)

#### 6.2.1.1 Les capteurs électrochimiques :

On diffère les mesures électrochimiques, la potentielle, l'ampère-métrie et la volt-métrie. Les capteurs potentiométriques sont basés sur une méthode simple et rapide de mesure de potentiel qui sera fonction de la concentration du polluant. Cette technique de mesure est utilisée par exemple pour la détection des ions sulfures. L'ampère-métrie est une technique de mesure reposant sur l'étude d'intensité de courant de la solution polluée, elle est facile à mettre en œuvre mais est fortement dépendante de la nature du milieu (pH, température, gamme de concentration). Elle est utilisée par exemple pour la mesure de H<sub>2</sub>S. La volt-métrie est une technique de mesure consistant à appliquer une différence de potentiel entre deux électrodes et à mesurer le flux de courant qui résulte de la réduction ou de l'oxydation d'une molécule présente en solution. Ce type de capteurs permet la détection et la quantification de polluants chimiques. Ils sont notamment utilisés pour la détection rapide sur site de nombreux ions métalliques tels que Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> et Cd<sup>2+</sup>. Leurs sensibilités de mesure atteignent des valeurs de l'ordre du ng/L (ppt ou 10<sup>-3</sup> ppb). (Baudet, 2015)

#### 6.2.1.2 Capteurs spectrophotométriques UV-Visible :

Ils sont basés sur le principe d'absorption UV-visible ou de la fluorescence UV. Ils permettent des mesures en temps réel. L'une des techniques les plus couramment utilisées en spectrophotométrie visible est la colorimétrie. L'ajout de réactifs dans l'eau engendre un changement de couleur dont l'intensité dépend de la concentration en polluants. L'intensité du signal, liée au changement de couleur, est mesurée avec un spectrophotomètre de terrain. Les capteurs UV-visible permettent d'obtenir des données de très bonne qualité, notamment grâce

à une calibration in situ régulière, mais ils sont limités en autonomie. De plus, ce sont souvent des appareillages lourds et encombrants.

L'analyseur grand fond développé par l'Ifremer (jusqu' à 6000 m de profondeur) ALCHIMIST (Analyseur Chimique In Situ) (Figure 3.4) permet la mesure in situ de la concentration en sulfures, des ions nitrates et nitrites et du fer (II). L'ALCHIMIST est composé de trois modules : hydraulique (H 291 mm X L 325 mm X 180 mm), spectrophotométrie (L 661 mm, Ø 120 mm) et électronique (L 580 mm, Ø 192mm).

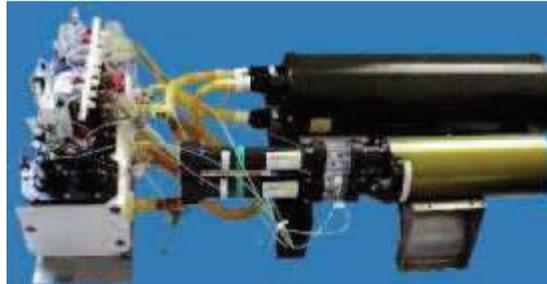


Figure 3 4:L'ALCHIMIST développé par l'Ifremer

Evolution miniaturisée de l'ALCHIMIST, CHEMINI (chemical miniaturized analyzer) (Ifremer) (H 225 mm X L 146 mm X I120 mm, 3.8 Kg) (figure 3.5) est un analyseur fluorimétrique de surface pour la mesure d'ammonium dans l'eau. Il atteint des limites de détection de 0.7 ppb. (Baudet, 2015)

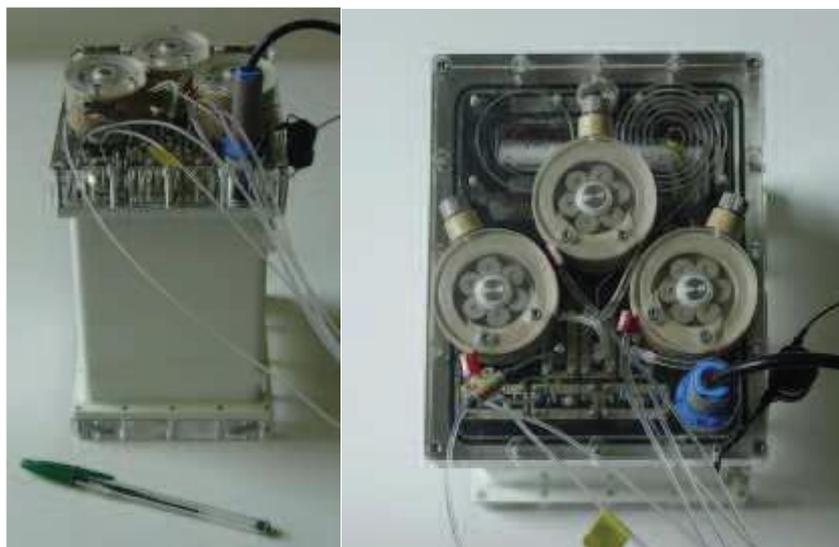


Figure 3 5: analyseur CHEMINI d'azote ammoniacal par fluorométrie

### 6.3 La spectroscopie par les capteurs MIR :

La lumière infrarouge est une radiation de nature électromagnétique dans laquelle on distingue différents domaines de longueurs d'onde : le proche infrarouge entre 800 nm et 2,5 µm (12500

- 4000  $\text{cm}^{-1}$ ), le moyen infrarouge entre 2,5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$  (4000 - 400  $\text{cm}^{-1}$ ) et le lointain infrarouge au-delà de 25  $\mu\text{m}$ .

L'émission lumineuse d'un corps noir est directement liée à sa température. Plus un corps noir est chaud, plus il émet un rayonnement électromagnétique intense et plus son rayonnement se décale vers les courtes longueurs d'onde. Par conséquent, les corps noirs dont la température avoisine la température ambiante, émettent un maximum dans le domaine du moyen infrarouge (Figure 3.6).

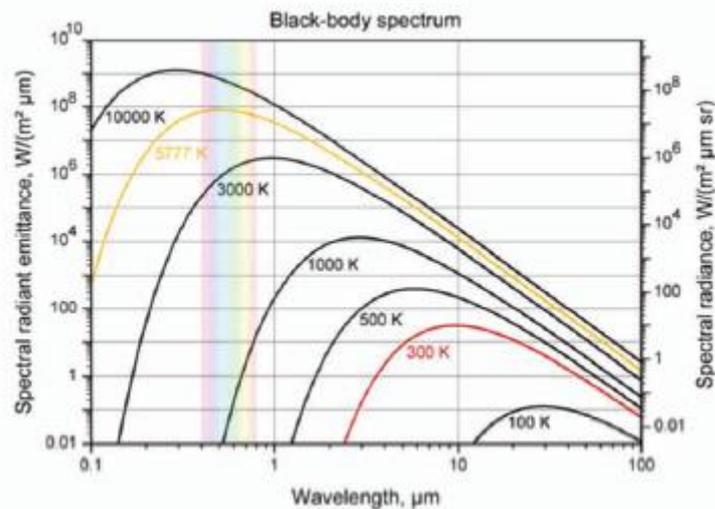


Figure 3 6: émission d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de sa température

La spectroscopie moyenne infrarouge (MIR) est une technique d'analyse très largement utilisée car elle permet d'identifier un grand nombre d'espèces chimiques, En effet. Les molécules organiques possèdent toutes des fonctions chimiques dont les niveaux d'énergie vibrationnels absorbent le rayonnement électromagnétique dans le MIR. La spectroscopie MIR permet l'enregistrement de ces bandes d'absorption qui sont la signature de la présence des molécules dans le milieu sondé. La spectroscopie MIR permet à la fois une analyse qualitative en identifiant les molécules en présence à partir de leur signature spectrale et une analyse quantitative à déterminant les concentrations des différentes espèces chimiques car l'absorbance est directement liée à la concentration d'après la loi de Beer-Lambert. (Baudet, 2015)

## 7. Chromatographie :

La chromatographie permet de séparer les constituants chimiques d'un liquide ou d'un gaz. Parmi toutes les méthodes de chromatographie, la chromatographie d'exclusion permet de séparer des grosses molécules et des particules selon leurs tailles. Ce type de chromatographie

repose sur la séparation de composés entraînés par un liquide (phase mobile) à travers un solide poreux (phase stationnaire, en général un polymère) qui est soit placé dans un tube (colonne chromatographique), soit fixé sur une surface inerte. Les diamètres des pores sont choisis selon les tailles des éléments à séparer. La séparation s'opère suivant les interactions chimiques ou physiques de l'analyse avec la phase mobile ainsi qu'avec la phase stationnaire. Le solide poreux agit comme un tamis permettant de sélectionner les particules selon leurs tailles. Ainsi des particules peuvent être séparées dans une gamme de taille s'échelonnant de 30 nm à environ 1.5 µm. Elle permet l'analyse en ligne des fractions séparées avec tous types de détecteurs. (Chromatographie en phase liquide à haute performance, s.d.)

### **7.1 La chromatographie en phase liquide (LC) ou à haute performance (CLHP) :**

On trouve plus fréquemment l'abréviation anglaise (HPLC) (high performance liquid chromatography ou plus rarement high pressure liquid chromatography) est une technique de séparation analytique et/ou préparatrice de molécules présentes dans un mélange. Cela permet d'adapter les méthodes chromatographiques usuelles sur un montage haute pression. Cette forme de chromatographie est fréquemment utilisée en biochimie, ainsi qu'en chimie analytique.

**Nb :** Le P du sigle, à l'origine signifiait Pression mais lorsque la méthode a été améliorée (réduction des particules et régulation de la phase stationnaire) le P a été attribué à Performance afin de marquer cette innovation.

L'échantillon à analyser est poussé par un liquide (appelé phase mobile) dans une colonne remplie d'une phase stationnaire de fine granulométrie (les « grains » sont de très petite taille). Le débit d'écoulement de la phase mobile est élevé ce qui entraîne une augmentation de la pression dans le système. Ce débit élevé diminue le temps nécessaire pour séparer les composants le long de la phase stationnaire. La fine granulométrie de la phase stationnaire permet une meilleure séparation des composants. En effet, pour un même volume de phase stationnaire la surface d'échange augmente si les « grains » qui la composent sont de diamètre plus petit. Les pics obtenus (via un détecteur à UV (les protéines absorbent à 275-280 nm) relié à un système d'intégration et de calcul) sont plus étroits donc la résolution est améliorée (les pics sont bien séparés, on peut donc bien les différencier), le seuil de détection est également plus bas (des pics étroits et hauts sont plus faciles à isoler du bruit de fond que des pics larges et bas). La combinaison de ces attributs, rapidité et résolution élevées conduit à l'appellation « haute performance ».

Les phases mobiles utilisées sont des mélanges d'eau et d'un solvant organique miscible (acétonitrile, méthanol) ou des combinaisons de solvants organiques (alcools, hexane, dichlorométhane, etc.) miscibles entre eux.

Souvent, la composition de la phase mobile est modifiée au cours de l'analyse, c'est le mode dit « gradient » ou « élution graduée » (en opposition au mode « isocratique », pour lequel la composition de la phase mobile reste la même tout au long de la séparation). (Chromatographie en phase liquide à haute performance, s.d.)

## **7.2 La chromatographie ionique :**

Est une variante de la chromatographie liquide, elle permet de séparer et analyser quantitativement en solution aqueuse et à température ambiante, des anions (chlorures, fluorures, bromures, nitrites, nitrates, sulfates, sulfites ...) ou des cations (lithium, sodium, calcium, potassium, magnésium...) en utilisant une phase mobile liquide (solutions aqueuses). Les colonnes analytiques les plus fréquemment utilisées contiennent des supports comprenant des groupements échangeurs de cations ou d'anions.

Les détecteurs les plus utilisés sont le détecteur conductimétrie, le détecteur ampérométrique, le détecteur UV. (La chromatographie ionique, s.d.)

## **8. Les systèmes des biocapteurs :**

### **8.1 Définition :**

Un biocapteur est défini par l'IUPAC (Union internationale de chimie pure et appliquée) comme un dispositif intégré capable de fournir des informations spécifiques quantitatives ou semi-quantitatives grâce à un élément de reconnaissance d'origine biologique en contact direct avec un élément de transduction.

Un biocapteur est un analyseur biologique conçu pour fonctionner en continu ou semi-continu et donner une réponse en temps réel sur la qualité des flux au sein desquels il est placé. C'est un outil ou un système analytique constitué d'un composé biologique immobilisé, appelé « ligand », relié à un transducteur qui transforme le signal biochimique en un signal physique quantifiable. (Kaoutar, 22/10/2020)

### **8.2 Principe général :**

En terme instrumental, le biocapteur est soumis à l'action d'un phénomène non électrique, présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant). Suivant cette

optique, le biocapteur est conçu pour transformer un phénomène ou une propriété biochimique d'un système en un signal électrique (Figure 3.7). (Kaoutar, 22/10/2020)

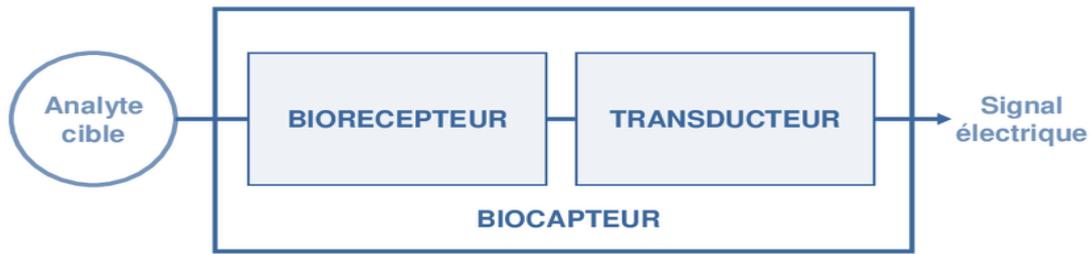


Figure 3 7:Représentation schématique d'un biocapteur

### 8.3 Description du biocapteur :

#### 8.3.1 Plates -formes de détection du biocapteur

Les plates-formes de détection sont généralement composées d'un élément de reconnaissance et d'un dispositif de transduction comme la montre la (Figure 3.8). Dans le cas particulier des biocapteurs, l'élément de reconnaissance est une biomolécule avec des capacités de réponse aux stimuli. Le dispositif de transduction convertit donc une réponse biologique ou changement physico-chimique en un signal électrique. Parmi les molécules de reconnaissance les plus courantes : les enzymes, les anticorps, l'ADN.... (Kaoutar, 22/10/2020)

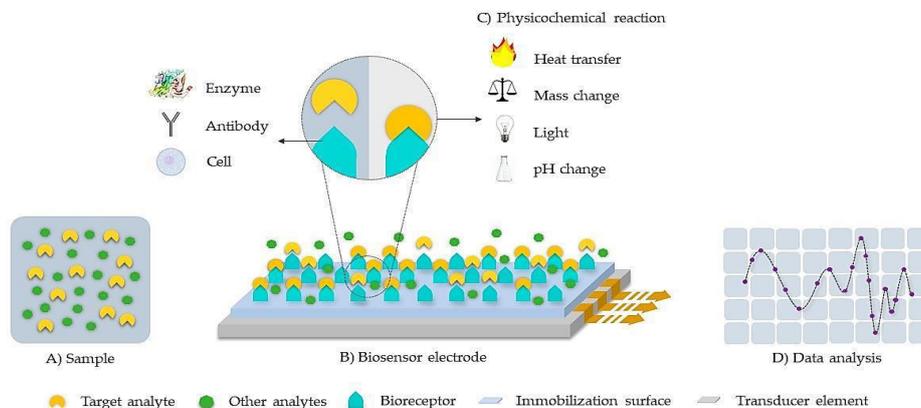


Figure 3 8:Schéma d'une architecture de système de biocapteur typique

#### 8.3.2 Transducteur :

Le transducteur est l'élément physique qui sert à exploiter la modification biochimique issue d'une interaction entre un analyte et le bio-récepteur pour la transformer en signal électrique. Le type de transducteur sera choisi en fonction des modifications biochimiques se produisant au niveau du bio-récepteur. Cette adéquation entre le transducteur et l'élément biologique permettra d'obtenir un signal sensible, facilement exploitable et avec un minimum de bruit de fond.

Un système transducteur transforme l'interaction chimique en un signal électrique. La transduction peut être reliée à des phénomènes de nature différente : piézoélectrique, optique, thermique ou électrochimique. (Kaoutar, 22/10/2020)

### 8.3.3 Bio-récepteur :

Le bio-récepteur correspond à tout composé biologique immobilisé sur un substrat qui reconnaît de manière spécifique l'analyte recherché. Les composés biologiques fixés peuvent être séparés en deux catégories (Figure 3.9) : ceux fixant simplement l'analyte sans modification et ceux ayant une activité catalytique. L'étape de reconnaissance peut alors révéler soit un événement statique grâce aux bio-récepteurs d'affinité soit un événement dynamique au travers des bio-récepteurs métaboliques.

Le bio-récepteur reconnaît spécifiquement une molécule du milieu et l'information biochimique qui en résulte est convertie par le transducteur en un signal analytiquement utile. (Kaoutar, 22/10/2020)

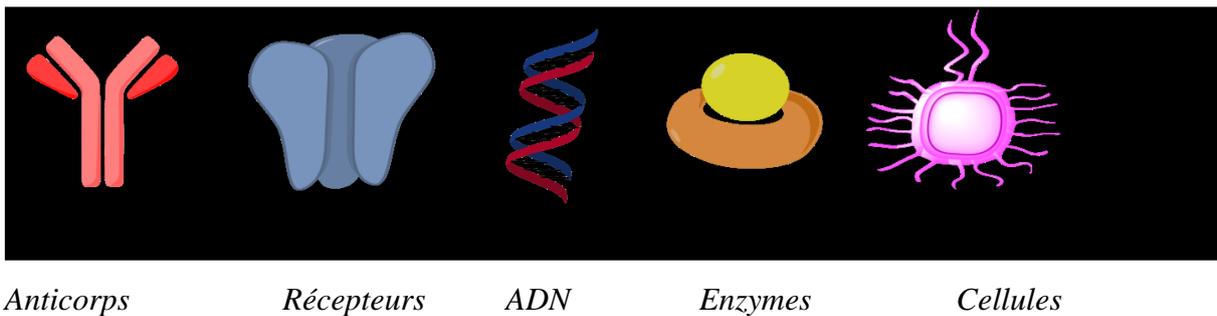


Figure 3.9: Représentation des différents types de bio-récepteurs

### 8.4 Les performances des biocapteurs :

Ils sont caractérisés par différents paramètres. Les principaux sont les suivants :

- La sensibilité : lien entre les variations de signal du capteur et la concentration en espèce cible.
- La stabilité : la reproductibilité dans les mêmes conditions de réponse.
- La limite de détection : concentration minimale détectable en espèce cible.
- La sélectivité : la capacité de détection à détecter l'espèce cible parmi les autres espèces.
- La durée de vie : période pendant laquelle les caractéristiques du capteur permettent son utilisation avec un degré de précision suffisant. (Kaoutar, 22/10/2020)

### **8.5 Biocapteurs électrochimiques :**

Au cours des 20 dernières années, la recherche et le développement dans le domaine des biocapteurs ont augmenté de façon exponentielle que ce soit en termes d'investissements ou de nombre de publications scientifiques.

L'électrochimie a pour but d'étudier les changements chimiques causés par le passage d'un courant électrique. De façon générale, un capteur électrochimique est un récepteur dont la réponse dépend de la composition chimique de l'échantillon et d'un transducteur qui transforme une énergie en signal électrique mesurable. Les biocapteurs ont investi un autre vaste champ, celui de l'électrochimie. Les biocapteurs électrochimiques sont des capteurs d'espèces ioniques en solution, ils opèrent donc dans les milieux liquides de manière continue, c'est-à-dire qu'ils se classent dans la catégorie des biocapteurs métaboliques. (Kaoutar, 22/10/2020)

### **8.6 Biocapteurs électrochimiques et le Monitoring :**

Les biocapteurs sont développés pour différentes applications, notamment le contrôle de l'environnement et des bioprocédés. En conséquence, la plupart des travaux de recherche et de développement ont été consacrés à ce domaine.

La surveillance de l'environnement pour les contaminants est aujourd'hui étroitement liée à notre planète entière et la santé humaine. En raison de la grande diversité des polluants et des analyses environnementales, la nécessité d'une analyse rapide, sensible et décentralisée est en constante augmentation. Les biocapteurs électrochimiques pourraient être bien adaptés à cet effet mais pourrait également compléter les techniques d'analyse standard validées pour une certaine analyse environnementale. (Kaoutar, 22/10/2020)

## **9. Capteurs in situ pour la détection de pollution des eaux :**

Les sondes in situ disponibles dans le commerce sont des sondes immergeables vendues, soit seules soit avec un boîtier transmetteur pouvant accueillir une ou plusieurs sondes. Les sondes et capteurs sont de différents types : autonome, poste fixe, sur canalisation, en dérivation, etc. Les principes de mesure des sondes pour les paramètres physico-chimiques (pH et conductivité entre autres) peuvent être légèrement différents (notamment dans les cas de l'oxygène dissous et de la turbidité). Parmi ces différentes techniques, les capteurs potentiel-métriques, comme leur nom l'indique sont basés sur la mesure du potentiel électrochimique, celui-ci variant en fonction de la concentration des molécules à détecter. Les capteurs ampérométriques mesurent l'intensité du courant en solution, et les capteurs volta-métriques quant à eux étudient le flux de courant résultant de la réduction ou de l'oxydation d'une molécule suite à l'application d'une différence

de potentiel. Pour les autres paramètres comme les nitrates, la matière organique, la chlorophylle, les cyanobactéries ou les HAP, les sondes se basent sur le principe physique de l'absorption dans l'UV-Vis ou la fluorescence UV. Il existe deux principaux types de mesure pour ces paramètres, la mesure à une ou plusieurs longueurs d'onde prédéterminées, la mesure sur l'ensemble du spectre UV-visible.

Une décomposition du signal ou un modèle de régression multilinéaire permet ensuite de déterminer les concentrations des différentes espèces après étalonnage avec des échantillons analysés au laboratoire. Les micropolluants pour lesquels il existe une sonde in situ sont les hydrocarbures notamment les HAP ainsi que des métaux. Dans le cas des métaux (Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, Fe), il existe une seule sonde de mesure in situ, la sonde VIP D'IDRONAUT. Le principe de mesure utilisé est la volt-ampère-métrie anodique cyclique à impulsions carrées surimposées. Elle associe les techniques d'ampère-métrie et de volt-métrie. Les limites de détection atteintes sont très faibles, de l'ordre de quelques ng.L-1. En ce qui concerne les HAP et les hydrocarbures de façon générale, il existe principalement 5 fabricants distributeurs de sondes in situ : AQUAMS, Chelsea Technologies Group, CONTROS, Hach Lange et Trios. La sonde Chelsea Technologies Group est principalement déployée en eaux marines pour la détection de pollution par le pétrole, alors que la sonde Trios est déployée largement en eaux marines et en eaux douces (notamment sur les captages d'eaux potables en amont des stations de traitement d'eau). La sonde Chelsea Technologie Group permet de détecter les BTEX à des concentrations comprises entre 3 ppb et 50 ppm par exemple, mais sans sélectivité. Il existe également quelques appareils portables permettant des mesures in situ rapides. Il en existe pour les paramètres physico-chimiques, la détermination des composés organiques, des nitrates ou des algues par exemple. L'Ifremer a notamment développé un analyseur de terrain (Figure 3.10) pour la mesure des paramètres chimiques de l'eau de mer (pH, pCO<sub>2</sub>, sels nutritifs, Fe(2)/Fe(3), sulfures, etc...). Le CHEMINI (CHEMical MINIaturized Analyzer) est un dispositif modulable et peut donc servir aussi bien dans le cadre de la surveillance de l'environnement côtier que dans celui des analyses grand fond, c'est-à-dire jusqu'à 6000 m de profondeur.



Figure 3 10:Cheminé surface et grand fond

L'inconvénient majeur de la plupart des outils permettant un contrôle continu est que leur limite de détection est relativement élevée. Ainsi, ils ne sont pas toujours suffisamment sensibles pour permettre la détection de polluants en faibles concentrations. De ce fait, la qualité de l'eau peut être un frein à l'utilisation de la mesure sur site. (Baillieul, 2019) (Valérie LAPERCHE, 2014)

## **10. Techniques de caractérisation physico-chimique des particules dans les liquides :**

### **10.1 Centrifugation et ultracentrifugation :**

La granulométrie centrifuge permet de séparer en classe de tailles des particules dont les tailles s'échelonnent de 10 nm à 50  $\mu\text{m}$  (mais la technique est essentiellement utilisée pour le submicronique). Elle permet d'effectuer une séparation et des mesures de tailles pour des diamètres de particules inférieurs à 100 nm. En revanche, le temps nécessaire à l'analyse peut être long comparé à d'autres techniques. Pour extraire les plus petites particules, dans des gammes de tailles inférieures à 20 nm, il faut alors recourir à l'ultracentrifugation avec un ordre de grandeur du temps requis de plusieurs heures. Cependant, il est à noter que l'ultracentrifugation est une technique de séparation ne permettant pas d'analyse granulométrique. (Faye, Détection des polluants métalliques particuliers dans les liquides par la spectroscopie de plasma induit par laser, 2006)

### **10.2 Techniques de mesure de la taille :**

Après prélèvement et séparation, les particules peuvent être transférées vers un support permettant leur analyse par microscopie donnant des informations sur leurs morphologies, tailles, et également leurs compositions chimiques élémentaires. D'autres techniques, basées

sur la diffusion de la lumière, permettent de déterminer les tailles de particules et leurs charges surfaciques (potentiel zêta) directement dans un échantillon liquide. (Faye, Détection des polluants métalliques particulaires dans les liquides par la spectroscopie de plasma induit par laser, 2014)

### **10.3 Microscopie électronique MEB / MET / AFM :**

La taille des particules peut être déterminée par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et par Microscopie Electronique à Transmission (MET) après un prélèvement. Dans les deux cas, l'analyse est effectuée par bombardement avec un faisceau d'électrons. La différence majeure entre le MEB et le MET, réside dans la formation de l'image. Avec le MET, l'image est formée par détection directe du faisceau d'électrons ayant traversé une grille MET contenant les particules à analyser. La grille MET est en cuivre recouvert de carbone d'une épaisseur de quelques dizaines de nm. Dans le cas du MEB, l'image est formée par détection d'électrons secondaires issus de la particule. Le MET dispose d'une meilleure résolution que le MEB, environ 0,3 nm pour le MET contre 5-10 nm pour le MEB.

Ces deux instruments permettent également de réaliser une analyse chimique élémentaire des particules lorsqu'ils sont couplés avec la technique (Energy Dispersive X-ray EDX) basée sur l'analyse de transitions dans le domaine de longueur d'onde des rayons X. Le MEB et le MET peuvent être équipés d'un logiciel d'analyse d'images permettant de remonter à la distribution granulométrique des particules. Mais cette analyse reste longue et pas toujours possible.

La microscopie à force atomique ou (Atomic Force Microscopy AFM) peut être utilisée pour caractériser la topographie de la surface des particules nanométriques prélevées. Cette forme de microscopie est essentiellement basée sur l'analyse d'un objet point par point grâce à une sonde locale assimilable à une pointe effilée, balayant la surface de l'objet.

Spectroscopie par corrélation de photons (PCS : Photon Correlation Spectroscopy)

Il s'agit d'une technique basée sur la diffusion de la lumière. Elle permet d'évaluer les âmes de taille de particules directement dans un échantillon liquide, même si celui-ci est turbide. Elle est plus rapide que l'analyse par microscopie ou centrifugation, mais ce sont des diamètres hydrodynamiques qui sont mesurés. Elle est opérationnelle dans une gamme de taille s'échelonnant de 5 à 5000 nm. L'évaluation du diamètre est basée sur l'étude du mouvement Brownien. Très brièvement, une fine couche de liquide est irradiée par un faisceau laser continu. A l'aide d'un détecteur optique, plusieurs enregistrements de la lumière diffusée sont réalisés. A partir de ces enregistrements de l'évolution temporelle de l'intensité diffusée, le coefficient de diffusion des particules, calculé à partir de la théorie du mouvement Brownien, permet de

remonter aux diamètres hydrodynamiques. Ces détecteurs permettent de mesurer les tailles de particules pourvu qu'il n'y ait qu'un nombre limité de classes de taille. Ils ne permettent pas de remonter à la granulométrie d'une distribution fortement poly-dispersée. (IHIWAKRIM, 2019)

#### **10.4 Techniques de mesure de la masse et du nombre :**

- Concentration en masse : La concentration en masse peut être déterminée par gravimétrie à la suite d'un prélèvement sur filtre.
- Concentration en nombre : Il existe des compteurs permettant de déterminer la concentration en nombre des particules dans les liquides. Ce comptage peut s'effectuer sur une gamme de taille s'échelonnant environ de 50 à 5000 nm, pour des concentrations de l'ordre de ou inférieures à 10<sup>4</sup> particules/ml. Le principe de fonctionnement de ces compteurs, repose sur la diffusion de la lumière par une source laser et la détection du signal par un système de photodiodes.

Ce type d'instrument peut être utilisé en ligne 24 heures/24 et 7 jours/7 avec un débit de 100 ml/min. (Faye, Détection des polluants métalliques particulaires dans les liquides par la spectroscopie de plasma induit par laser, 2006)

Chapitre 4 : techniques  
d'identification de la  
pollution du sol

## 1. Introduction :

La pollution du sol dans les secteurs industriels est l'un des types de pollution les plus dangereux dans les secteurs qui doivent être contrôlés et éliminés. Pour cette raison, ils doivent être identifiés soit à l'œil nu ou par des techniques simples. Cependant, à mesure que l'industrie continue de se développer, ces méthodes sont devenues inefficaces. Nous devons mettre au point des techniques appropriées pour une détection précise et rapide des polluants dans les sols, et c'est ce qu'on va montrer dans ce chapitre.

## 2. Démarche générale suivie pour les analyses des polluants dans le sol :

Rappelons ici que la démarche présentée ici concerne avant tout les sols affectés par des pollutions ponctuelles et/ou concentrées : elle s'applique aux sols non contaminés ou aux pollutions diffuses moyennant quelques précautions. L'évolution dans le temps des concentrations des substances polluantes présentes dans les matrices des sols en provenance de site industriels, est dépendante des propriétés physico-chimiques de ces substances et de celles du sol qui les contient. Les substances présentes dans les échantillons de sols prélevés pour analyses au laboratoire, subissent une évolution analogue durant la phase précédant l'analyse, c'est-à-dire du prélèvement à l'étape analytique proprement dite. (R.Jeannot)

### 2.1 Plan générale d'une analyse de sol :

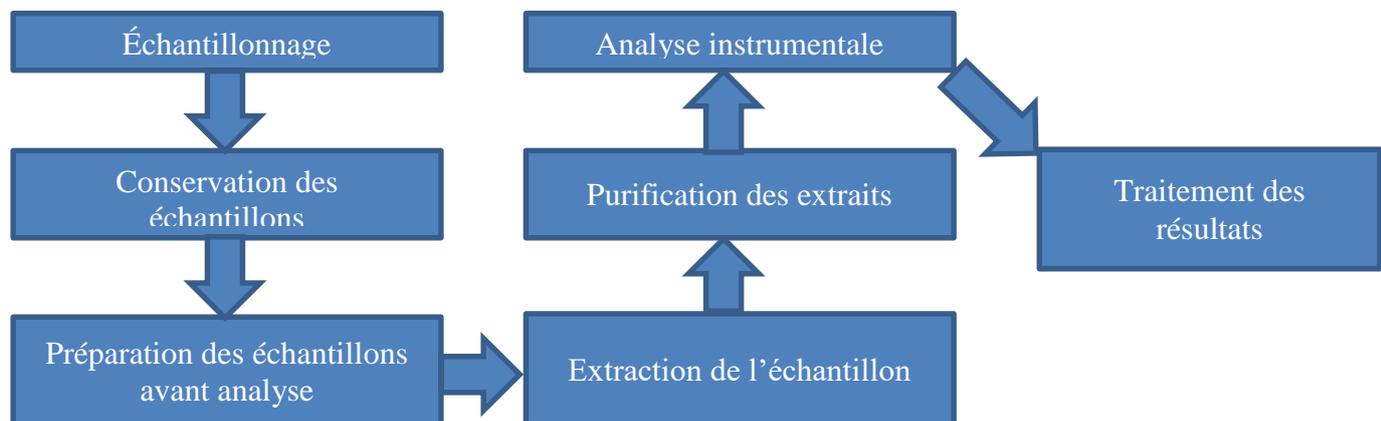


Figure 4 1: Plan générale d'une analyse de sol

## 3. Les tests éco-toxicologiques :

Il existe de nombreux tests sont en développement sur les phases solides (sols). Les bio-tests consistent à exposer des espèces biologiques définies à des doses croissantes de polluants afin de mesurer les effets sur la mortalité, la croissance ou encore la reproduction.

Ces essais, contrairement aux analyses chimiques, sont destinés à évaluer l'existence d'un danger. Deux approches sont possibles : l'approche direct où l'organisme est mise en contact direct avec le sol contaminé et l'approche indirect qui consiste à extraire les polluants du sol avec de l'eau afin de déterminer la fraction bio-disponible des polluants et à expose ensuite des organismes à cet extrait. Concernant l'impact des polluants sur la microflore du sol, deux normes concernant de la détermination de la biomasse bactérienne (iso 14240-1) et le potentiel de nitrification du sol (iso 14238) ont été développés. Le test d'inhibition de la luminescence de *vibrio fischeri* est le plus souvent utilisé pour évaluer la toxicité des molécules dissoutes. De plus certains tests développés en milieu aqueux comme les tests Microtox peuvent être appliqués directement sur les suspensions de sol.

L'ensemble de ces tests permet d'évaluer la toxicité aiguë des polluants. Il existe d'autres tests bactériens pour l'étude de la géno-toxicité tels les tests d'Ames et Mutatox. Par ailleurs, deux ont été développés pour identifier les dangers des sols pollués pour la microfaune : les tests de mortalité et de reproduction sur ver de terre ou sur collembole. Enfin, pour évaluer l'impact des polluants sur la flore, le test classiquement employé est le test d'inhibition de croissance de l'argue *pseudokirschieriella subcapitata*. Sur phase solide, les tests les plus employés sont les tests de germination et de croissance. Ils peuvent utiliser une grande variété de plantes.  
(R.Jeannot)

Tableau 4 1:seuil de toxicité pour certains polluants minéraux rencontrés sur les sites pollués

Elément	Valeur indicative (mg/kg de sol MS)
Plomb	50
Cuivre	40
Cadmium	0.8
Zinc	150
Nickel	50
Chrome	50
Cobalt	25
Mercure	0.5

## **4. Les méthodes rapides de terrain :**

### **4.1 Principe et objectifs :**

Les méthodes de terrain ou méthodes in situ désignent des méthodes capables de donner directement des résultats analytiques sur le terrain. Si on compare ces dernières aux méthodes classiques d'analyse en laboratoire, on se rend compte que les méthodes in situ regroupent un certain nombre d'avantages :

- Elles fournissent des réponses rapides, ce qui permet de sélectionner plus précisément les échantillons et donc de limiter le nombre d'échantillons qui seront envoyés au laboratoire pour des analyses complètes.
- Elles permettent généralement de multiplier le nombre d'analyses effectuées, et donc d'obtenir des données statistiques plus fiables pour évaluer le degré de pollution du site.
- Elles sont faciles à mettre en œuvre.

Certaines méthodes de terrain sont déjà commercialisées alors que d'autres sont encore en voie de développement. (R.Jeannot)

### **4.2 Limitations et contraintes d'utilisation :**

Parmi les inconvénients des méthodes in situ, on peut citer :

- obtention de données souvent semi-quantitatives.
- nécessité de valider ces méthodes en les comparant avec les méthodes de référence de laboratoire.
- manque de robustesse de l'appareillage, qui est souvent sensible aux variations de température, à la poussière et à l'humidité.
- forte dépendance des résultats par rapport à la composition du sol.

D'une manière générale, on n'utilisera pas les résultats quantitatifs des méthodes in situ par rapport à des valeurs absolues telles que des normes, des valeurs-guides, etc. Pour cet usage, il est nécessaire de n'utiliser que des analyses de Laboratoire.

On ne comparera pas entre eux des résultats obtenus in situ sur des matrices différentes. On pourra comparer des résultats obtenus in situ sur des matrices similaires, notamment en vue d'identifier sur un site des secteurs plus ou moins contaminés et de hiérarchiser des lots d'échantillons. On peut ainsi souvent réaliser une cartographie semi-Quantitative, dont les valeurs absolues seront à ne considérer qu'à titre indicatif.

Les méthodes in situ sont particulièrement adaptées pour sélectionner les échantillons que l'on soumettra au laboratoire.

Enfin il est essentiel de ne pas regrouper des analyses in situ et des analyses de laboratoire dans un même tableau de résultats ou un même traitement statistique ou cartographique. (R.Jeannot)

### **4.3 Les méthodes les plus commercialisé :**

#### 4.3.1 Teste immune-enzymatique (ELISA) :

Les techniques de dosage immune-enzymatiques sont utilisées depuis de nombreuses années dans le domaine médical, pour détecter diverses molécules endogènes (ex: les hormones) ou exogènes (ex: les principes actifs). Plus récemment ce type de technique est appliqué au domaine de l'environnement pour offrir une alternative à l'analyse classique en laboratoire. En effet, le dosage immune-enzymatique semble rapide, fiable, facile à mettre en œuvre et peu coûteux. Il possède un large domaine d'application (pesticides, composés organiques et inorganiques). Cependant le principe, relativement complexe, de la technique mise en œuvre et ses implications sont mal connus des principaux utilisateurs (bureaux d'études, société de dépollution, laboratoires...) L'apparente facilité d'utilisation de ces kits, le manque de formation des utilisateurs et la mauvaise maîtrise de la technique peuvent bien souvent conduire à leur utilisation en dehors de leur domaine de validité, à une extrapolation abusive de leurs réponses et de leurs performances réelles et donc à des résultats erronés ou mal interprétés. L'objet de cette recherche est de faire le point sur les performances des méthodes immune-enzymatiques appliquées à l'environnement et dans les sites industrielles et plus particulièrement à l'analyse des sols pollués, d'identifier leurs avantages et leurs limites. (Guillaume Pépin)

##### 4.3.1.1 Principes du teste immune-enzymatique (ELISA) :

Les kits de dosage immune-enzymatiques de certains polluants dans l'environnement sont fondés sur la technique Elisa (Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay). Celle-ci utilise la capacité des anticorps à mesurer spécifiquement la concentration d'une molécule ou d'une famille de molécules de structures très proches dans un mélange contenant d'autres contaminants. L'anticorps, immobilisé à la surface d'un solide, est mis en présence d'un mélange qui pourrait contenir l'analyse recherché, et d'un réactif qui contient un analogue de l'analyse, greffé à un marqueur (le conjugué enzymatique), introduit en quantité précise. Après compétition des différents composés du mélange vis à vis de l'anticorps, l'excès de molécules (analyste ou conjugué enzymatique) non fixées à la phase solide est éliminé par lavage. On utilise ensuite, par l'ajout d'un mélange substrat + chromogène, la réaction enzymatique qui va

permettre de catalyser la transformation du chromogène en un produit coloré. La concentration du produit coloré est directement proportionnelle à la quantité de marqueur enzymatique et donc inversement proportionnelle à la concentration de l'analyse recherché. Elle se mesure par spectrophotométrie. On détermine la réponse ou l'intervalle de réponse vis-à-vis d'une gamme étalon. Le principe à retenir est « plus la couleur de l'échantillon est soutenue, moins l'échantillon est contaminé ».

Le principe de la méthode utilise deux réactions successives :

- Une réaction immunologique.
- Une réaction enzymatique.

Chaque type de réaction possède des caractéristiques et des spécificités différentes et la compréhension de ces deux mécanismes est indispensable pour appréhender de façon globale la technique de dosage.

Si la réaction immunologique n'a pas eu lieu avec l'analyte présent en solution, on obtient un faux négatif. C'est le cas pour une famille de produits n'ayant pas une affinité très grande avec l'anticorps. L'instabilité du conjugué enzymatique ou la présence d'interférents bloquant la réaction enzymatique peut donner lieu à des faux positifs. (Guillaume Pépin)

#### 4.3.1.2 Spécificité :

Que l'on souhaite doser un produit défini (par exemple un pesticide), ou bien un mélange de plusieurs produits (HAP, PCB ...), les anticorps sont préparés pour réagir à une molécule-cible. Quoique la réaction soit très spécifique, des composés chimiques présentant des homologies de structure peuvent développer des affinités, variables, vis-à-vis des anticorps. Il est même possible d'établir une échelle d'affinité respective pour un certain nombre de composés similaires au composé-cible. Cette affinité est nommée « Réactivité croisée » ou « Cross Reactivity ».

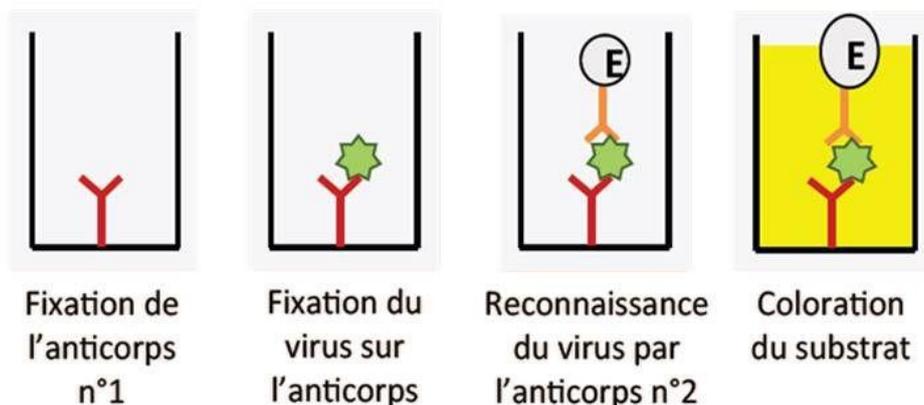


Figure 4 2:schéma d'application du teste immune-enzymatique

#### 4.3.1.3 Application à l'analyse des sols :

- Méthode de dosage :

Chaque fournisseur de kit propose une gamme spécifique de matériels et de produits consommables pour couvrir les 4 étapes suivantes :

1. Collecte de l'échantillon : Cette étape primordiale consiste en la réalisation d'une prise d'essai d'une dizaine de grammes. La représentativité de celle-ci sera liée directement au degré d'hétérogénéité du sol. Il convient d'apporter un grand soin dans sa réalisation.
2. Extraction de l'échantillon : Les kits d'extraction proposent des fioles permettant une agitation manuelle à température ambiante parfois facilitée par la présence de billes métalliques permettant une meilleure mise en contact de la prise d'essai avec l'extractant. Celui-ci est un solvant (méthanol) dans le cas du dosage des HAP et des PCB), auquel sont parfois adjoints des agents tensioactifs permettant une meilleure dispersion du sol dans le milieu ou des solutions tampons permettant une meilleure extraction en fixant un PH adéquat. Des facteurs comme la granulométrie du sol, sa teneur en argile, sa porosité, sa compacité et sa teneur en eau vont influencer notablement la facilité d'extraction du polluant.
3. Dilution de l'extrait: Les kits du commerce sont adaptés pour diverses applications. Suivant leur conception, ils offrent des seuils de détection allant de 1 ppm à 0,1 ppb. Lorsque qu'on extrait un sol susceptible d'être fortement contaminé, une dilution importante est incontournable pour que le mélange à doser possède une concentration mesurable dans la plage déterminée par les solutions de calibration. Pour les kits offrant de très faibles seuils de détection, une dilution adéquate peut nécessiter plusieurs étapes (de 1 000 ppm à 1 ppb : dilution de 1 000 000). Ceci multiplie les risques d'erreurs potentiels.
4. Dosage de la substance par réaction immune-enzymatique: Bien que chaque fabricant développe une spécificité particulière pour l'emploi de son kit, sur un plan fondamental le principe est toujours le même.



Figure 4 3: Kit de Dosage immuno-enzymatique (ELISA)

- Interprétation des résultats :

L'interprétation des résultats s'avère être un des points clés de l'utilisation correcte des kits immuno-enzymatiques. Il existe deux façons d'interpréter les résultats : l'une en utilisant une fourchette de concentration, l'autre en donnant un résultat numérique.

- Détermination d'une fourchette et raisonnement par rapport à un seuil :

Cette méthode utilise l'emploi de deux calibreurs ou plus (solutions étalons) distants d'un intervalle suffisamment significatif. La réponse calculée pour l'échantillon permet de situer l'échantillon par rapport aux calibreurs. Dans le cas fréquent de deux calibreurs ( $C_1$  ;  $C_2$  ;  $C_1 < C_2$ ), on a 3 possibilités : inférieur à  $C_1$ , compris entre  $C_1$  et  $C_2$ , supérieur à  $C_2$ . Ceci permet donc de travailler avec des seuils de manière semi-quantitative.

- Détermination d'une valeur quantitative pour la contamination :

Cette méthode exige l'emploi de trois calibreurs au minimum. La réponse exprimée pour chaque calibreur permet, après transformation des variables, de tracer une droite d'étalonnage. La réponse donnée par l'échantillon est quantifiée à l'aide de cette courbe. Bien que fournissant une évaluation chiffrée de la contamination, il existe un danger dans la démarche qui consiste à exprimer les résultats sous forme d'une valeur précise qui masque les incertitudes liées à la spécificité de réponse des kits, à la composition complexe des pollutions et au rendement d'extraction. Ce test ne donne pas non plus d'informations sur la composition du mélange de polluants dans l'échantillon testé. L'opérateur et a fortiori les utilisateurs des résultats analytiques doivent impérativement garder à l'esprit que la valeur obtenue n'est qu'un indice de

la contamination, un ordre de grandeur qui ne peut être utilisé comme valeur certifiée. (Guillaume Pépin)

#### 4.3.2 La méthode ROCK-EVAL 7 S :

##### 4.3.2.1 Définition :

Conçue et mise au point dans les années 1970, la technologie Rock-Eval est devenue une référence pour évaluer le potentiel pétrolier, le type et la maturité thermique des roches mères (Espitalié et al, 1977). Initialement basé sur un système de pyrolyse ouvert avec un détecteur d'ionisation de flamme en ligne (FID) pour la détection des hydrocarbures, le dispositif a ensuite été complété par un système d'oxydation ouvert, pour oxyder la roche après pyrolyse, et un spectromètre infrarouge en ligne pour la détection du CO et du CO<sub>2</sub>.

Le ROCK-EVAL 7 Soufre, toute dernière version du ROCK-EVAL, permet de quantifier la teneur en soufre des pétroles, des kérogènes, de certaines roches et des sols. Il permet l'identification de certains minéraux soufrés tels que les sulfures métalliques.

Ces améliorations ont permis de quantifier la teneur en carbone organique et en carbone minéral des roches (Espitalié et coll., 1985). Ensuite, grâce à des programmes de température appropriés, la technologie ROCK-EVAL a prouvé son applicabilité pour obtenir un aperçu de l'occurrence et de la nature des hydrocarbures accumulés dans les sections de réservoir (Lafargue et al., 1998), y compris les réservoirs non conventionnels tels que les sables bitumineux (Lamoureux-Var et al., 2011) et des roches mères riches en pétrole (Romero-Sarmiento et al., 2016). Plus récemment, cette technologie a été utilisée pour caractériser la matière organique des sédiments récents (Baudin et al, 2015) et des sols (Soucémariadin et al, 2018).

Son étalonnage multipoints permet d'améliorer la fiabilité et la précision des résultats d'analyses. Pour cela, 6 matériaux de référence ont été créés par IFPEN spécifiquement, couvrant de larges gammes de teneurs en soufre et en carbone. Ainsi, 4 roches mères, 1 kérogène et 1 roche réservoir sont mis à la disposition des utilisateurs au travers d'une mallette matériaux d'étalonnage et de calibration disponible auprès de Vinci Technologies.(Violaine Lamoureux-Var)

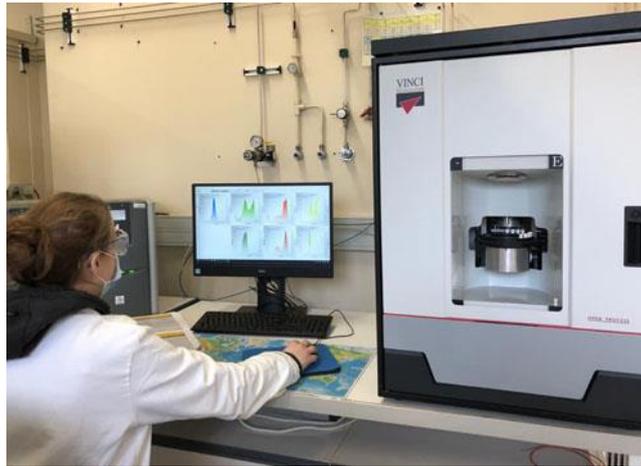


Figure 4 4: kit de la méthode ROCK-EVAL 7S

#### 4.3.2.2 La performance :

Aujourd'hui, un nouveau bond technologique permet de caractériser le soufre en tandem avec les hydrocarbures, le CO<sub>2</sub> et le CO. Quant au dispositif ROCK-EVAL 6, le nouveau ROCK-EVAL 7S comprend deux fours principaux, l'un pour la pyrolyse et l'autre pour l'oxydation. Pendant le pyrolyse, une partie des effluents passe par un four de combustion relié au four de pyrolyse, où les composés sulfurés sont convertis en SO<sub>2</sub>. Le SO<sub>2</sub> est détecté par un spectromètre UV, tandis que les hydrocarbures et le CO/CO<sub>2</sub> sont détectés respectivement par le spectromètre FID et le spectromètre IR. Après pyrolyse, le résidu de pyrolyse est oxydé dans le four d'oxydation. Les rejets de SO<sub>2</sub>, de CO et de CO<sub>2</sub> sont détectés respectivement par le spectromètre UV et IR. La conception du four double (pyrolyse et oxydation) est nécessaire pour permettre la formation d'un revêtement carboné permanent à la surface intérieure du four de pyrolyse. Ce revêtement, oxydé dans des machines à four unique, empêche toute adsorption ultérieure et toute perte subséquente d'hydrocarbures interférant avec les valeurs des hydrocarbures (pics S1 et S2 du FID). Cette conception empêche également l'oxydation non désirée des hydrocarbures condensés sur la sortie du répartiteur dirigée vers la conduite de CO/CO<sub>2</sub>. La comparaison des teneurs en carbone et en soufre mesurée par ROCK EVAL 7S et par analyse élémentaire a montré une excellente corrélation. De plus, l'étalonnage du dispositif, séparément en pyrolyse et en oxydation, permet de quantifier la teneur en soufre libérée lors de la pyrolyse (la « teneur en soufre de la pyrolyse ») et la teneur en soufre résiduelle. La « pyrolyse du soufre » dans les roches, le bitume et les huiles riches en soufre est une information intéressante, car elle est probablement la source de composés organe-sulfurés et de H<sub>2</sub>S qui sont produits lors de processus géologiques ou anthropiques thermiques. Il est également possible de quantifier le soufre organique associé aux pics S1 et S2 du FID. Le logiciel de

traitement des données permet alors de simuler, en plus de la cinétique de fissuration de la matière organique, la cinétique de fissuration de ses fonctions organe-sulfureuses. Cela peut aider à déchiffrer le craquage thermique des kérogènes riches en soufre et des roches sources. La superposition des signaux SO<sub>2</sub> et hydrocarbures permet de distinguer le soufre organique, qui est associé aux pics S1 et S2 du FID, et le soufre pyrétique. Cependant, la présence d'argiles et/ou de carbonates dans les roches induit des réactions chimiques avec des composés sulfurés au cours de l'analyse, entravant l'interprétation des signaux. Dans ce cas, une estimation de la teneur en soufre pyrétique et en soufre organique peut être obtenue via un modèle mathématique basé sur des paramètres dérivés de l'analyse ROCK-EVAL 7S (Aboussou, 2018). Grâce à une température d'oxydation atteignant 1200°C, la décomposition thermique des sulfates dans les roches est possible. Des sulfates de fer, des sulfates de magnésium et surtout des sulfates de calcium, présents dans la grande majorité des roches sédimentaires, peuvent alors être détectés. Néanmoins, leur quantification reste difficile pour deux raisons : les sulfates de calcium peuvent ne pas se décomposer complètement s'ils sont à teneur élevée ; certains sulfates peuvent être néoformés au cours de l'analyse. (Violaine Lamoureux-Var)

#### **4.4 Techniques de laboratoire adapté au terrain :**

##### 4.4.1 La spectroscopie infrarouge :

L'analyse du sol par spectroscopie infrarouge a été proposée comme alternative à l'analyse conventionnelle du sol pour détecter la contamination du sol. Les chercheurs à développer une solution innovante, in situ, méthode rapide, précise, peu coûteuse et facile à mettre en œuvre pour évaluer la contamination des sols par les polluants. Ce paragraphe décrit le développement et la validation d'une nouvelle méthode d'extraction par extraction sorbante en couche mince et spectroscopie infrarouge à réflectance totale atténuée - transformée de Fourier (TLSE-ATR-FTIR). Dans un premier temps, cette méthode permet la pré-concentration des polluants thermo-désorbés sur un film mince de polymère puis, leur quantification par ATR-FTIR à l'aide d'une méthode d'addition standard. Un plan factoriel fractionnaire à cinq facteurs a été utilisé pour identifier les facteurs les plus significatifs ayant un impact sur l'analyse. Ces facteurs comprennent la texture du sol, le carbone organique total (COT), l'humidité et les concentrations de contaminants. Les résultats ont montré que le COT, la nature (argileuse, sableuse et limoneuse) du sol, et la concentration de polluants peut affecter l'absorbance infrarouge. La méthode analytique a été validée en vérifiant les différents critères de performance tels que la linéarité, l'exactitude, la précision et la limite de quantification. La comparaison des résultats obtenus par TLSE-ATR-FTIR aux résultats d'analyses

conventionnelles réalisées par des laboratoires accrédités confirme que l'utilisation de la méthode proposée peut devenir une alternative efficace aux méthodes actuelles de détermination des polluants dans les sols. (outils et méthodes physiques et chimiques pour la détection des polluants dans le sol )

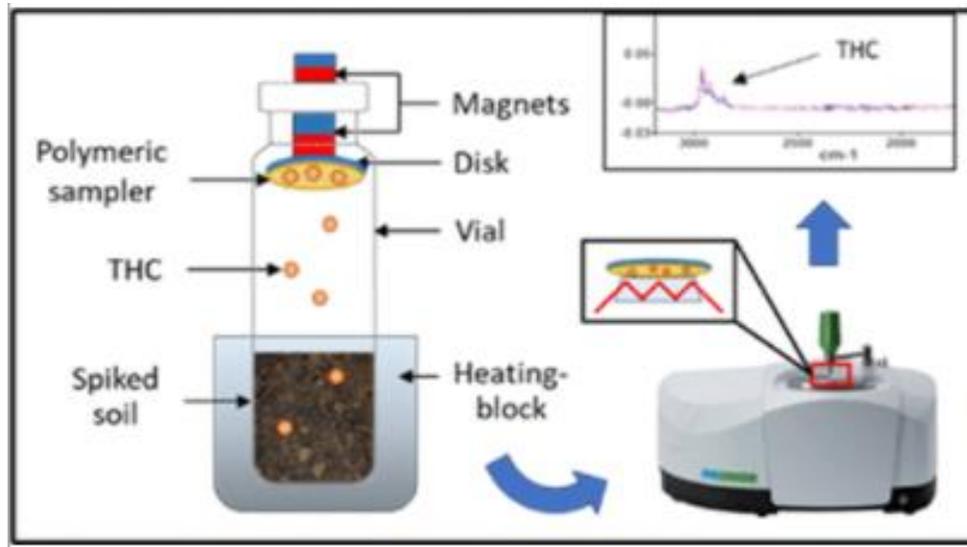


Figure 4 5: le spectromètre infrarouge

#### 4.4.2 La spectroscopie de plasma induit par laser :

La spectroscopie de plasma induit par laser appartient à la famille des techniques de spectroscopie d'émission atomique. Cette technique permet de faire une analyse qualitative et quantitative de la composition chimique d'un échantillon (solide, liquide, gaz et aérosols).

Elle peut se résumer en trois étapes:

- Ablation laser : vaporisation d'une fraction de matière à analyser et transformation de celle-ci à l'état plasma.
- Emission optique du plasma : désexcitation des atomes et des ions excités présents dans le plasma par émission spontanée de radiations.
- Analyse spectroscopique du signal d'émission du plasma : elle est réalisée au cours de l'émission plasma à l'aide d'un spectromètre équipé d'un détecteur.

La focalisation d'un laser à impulsions brèves (nanoseconde par exemple), permet de réaliser la vaporisation et la désexcitation en une seule et même étape, c'est la base de la technique LIBS.

L'ablation laser consiste à focaliser une impulsion laser énergétique sur un échantillon. L'énergie des photons du rayonnement laser qui arrivent sur la surface de l'échantillon, provoque un échauffement brutal de la matière. Il en résulte une élévation très localisée de la température du matériau. Lorsque la fluence ou l'irradiance (densité d'énergie par unité de

surface) du laser dépasse le seuil d'ablation du matériau, celui-ci est vaporisé localement au niveau du point focal du laser.

La vaporisation entraîne la formation d'un plasma. La température initiale du plasma peut atteindre plusieurs milliers de degrés. Une partie du rayonnement émis par le plasma est ensuite collectée grâce à une fibre optique reliée à un spectromètre couplé avec un détecteur. Cette chaîne de collection de photons permet d'enregistrer des spectres de raies dans une gamme de longueurs d'onde s'échelonnant du proche ultraviolet (UV) jusqu'au proche infrarouge (IR) et incluant la gamme du visible (VIS). Chaque raie renseigne alors sur la présence et éventuellement avec un étalonnage préalable, sur la concentration d'une espèce atomique présente dans l'échantillon. La (figure 4.6) représente le schéma d'un montage standard LIBS. La technique LIBS présente des avantages de grand intérêt pour des applications industrielles. Tous les éléments atomiques peuvent être détectés. En effet, l'échantillon à analyser n'a pas besoin d'une préparation préliminaire. Cette technique d'analyse élémentaire permet une détection simultanée de tous les éléments contenus dans un échantillon donné. Elle permet des mesures in-situ. La LIBS est potentiellement rapide et est adaptée à l'analyse à temps réel. Cette rapidité est fonction du nombre d'impulsions laser pour obtenir des résultats justes et exacts. L'analyse à distance ou de près reste encore possible selon les besoins. (MOTTO-ROS)

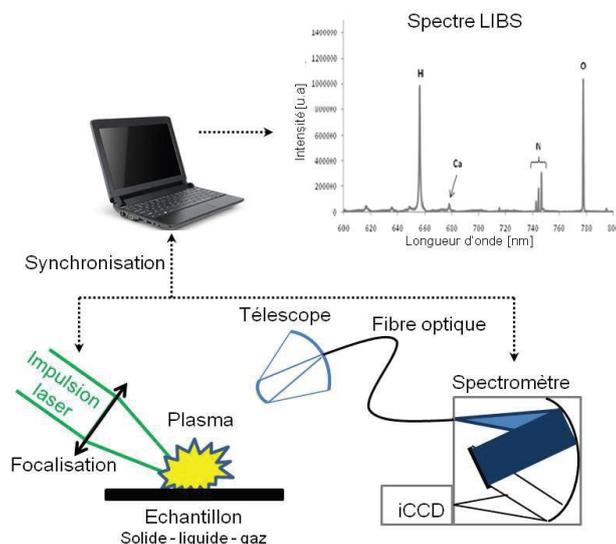


Figure 4 6:schéma d'un montage standard LIBS

#### 4.4.3 La spectroscopie par des kits à fluorescence X :

##### 4.4.3.1 Définition :

La spectrométrie de fluorescence X (XRF) est une méthode d'analyse élémentaire utilisant une propriété physique de la matière : « La Fluorescence de rayons X ». En effet, lorsqu'un

échantillon est bombardé par un rayonnement primaire émis par une source d'excitation énergétique, un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés de leurs orbitales atomiques (ou couches électroniques). Ainsi, un électron d'une couche électronique supérieure vient remplacer l'électron éjecté et libère à son tour de l'énergie sous forme de rayons X. Ce rayonnement secondaire constitue le phénomène de « Fluorescence ».

Chaque élément chimique est caractérisé par un spectre de fluorescence X spécifique. L'analyse de ce spectre permet d'identifier les éléments présents dans un échantillon et de déterminer leurs concentrations.

Un spectromètre XRF est constitué principalement de deux parties : une source de rayonnement primaire et un détecteur. (BAYOULI, 2016)

- Interactions des rayons X avec la matière :

Lorsqu'un rayonnement X primaire bombarde les atomes de la matière, différents types de rayonnement peuvent avoir lieu, (i) Un rayonnement secondaire caractéristiques des éléments chimiques et qui représente la "Fluorescence X" (ii) Un rayonnement rétrodiffusé divisé en diffusion cohérente ou diffusion de Rayleigh qui se fait sans modification d'énergie et une diffusion incohérente appelée "Effet Compton" et se fait avec perte d'énergie voir (Figure 4.7). La diffusion de Rayleigh est plus importante pour les éléments ayant un numéro atomique  $Z$  élevé alors que la diffusion Compton est plus importante pour les éléments de  $Z$  faible. Ces deux phénomènes, la diffusion de Rayleigh et l'effet Compton, sont à l'origine du "Bruit de fond" du signal représenté par le fond continu des spectres. Le Bruit de fond peut être causé aussi par deux autres phénomènes liés à l'échantillon: la diffraction des rayons X lorsqu'il s'agit d'un échantillon cristallisé et le rayonnement continu créé par le ralentissement de charges électriques lorsque les électrons sont éjectés. (BAYOULI, 2016)

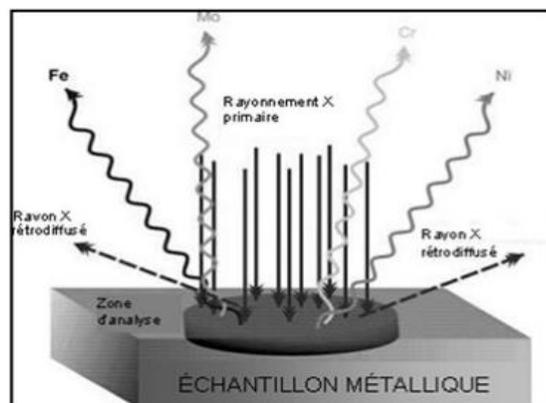


Figure 4 7 : Principes de la fluorescence X

#### 4.4.4 La spectroscopie par PXRF (field portable X-ray fluorescence) :

##### 4.4.4.1 Définition :

Le PXRF est un outil d'analyse par fluorescence X (non destructif). Initialement conçu pour détecter le plomb, puis d'autres métaux, les chercheurs ont utilisé cet outil et développé ses méthodes d'utilisation pour le diagnostic des sites et sols pollués, ainsi que pour différentes applications en géosciences. Ce type d'outil permet d'adapter, en temps réel, le plan d'échantillonnage au fur et à mesure de l'acquisition des données. Ceci permet une meilleure connaissance de l'étendue, du type et des niveaux de pollution. Sa capacité de détection va du mg/kg à quelques % selon les éléments. Il détecte des éléments atomiques du K au Pb, ainsi que Th et U. Certains modèles permettent, moyennant des équipements, de mesurer également Mg, Al, Si, P, S et Cl.



Figure 4 8:PXRF (field portable X-ray fluorescence)

Tableau 4 2 : La concentration moyenne des ETM dans le sol non polluée.

Les éléments traces métalliques	Concentration Moyenne (mg/kg)
ARSENIC (As)	2
CADMIUM (Cd)	entre 0,1 et 0.7
CHROME (Cr)	entre 100 et 200
CUIVRE (Cu)	entre 2 et 40
MERCURE (Hg)	entre 0,03 et 0,15

NICKEL (Ni)	entre 20 et 40
PLOMB (Pb)	entre 13 et 16
ZINC (Zn)	entre 70 et 132

#### 4.4.5 Types d'appareillage du spectromètre :

Pour l'analyse du rayonnement de fluorescence X émis par l'échantillon, il existe deux grands types d'appareillage : les spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF, Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry) et les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF, Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry). (Spectromètre à fluorescence X (pXRF))

##### 4.4.5.1 Les spectromètres à dispersion en longueur d'onde :

Dans ce type d'appareillage, pour identifier les différents rayons X émis par l'échantillon est intercalé sur leur trajet un cristal analyseur. Le dispositif utilise la propriété des solides cristallins de pouvoir diffracter des rayons X dans certaines conditions. Un solide cristallin peut être vu comme la répétition périodique tridimensionnelle d'éléments (atomes ou molécules) et être caractérisé par des plans réticulaires espacés d'une distance  $d$  passant par les centres de ces éléments. Ces plans ont la propriété de diffracter un rayonnement X de longueur d'onde  $\lambda$  lorsque l'angle incident  $\theta$  entre ce rayonnement X et les plans du solide cristallin est tel que l'équation dite de Bragg (1) est satisfaite.

Equation de Bragg :  $n \lambda = 2 d \sin \theta$  (1)

Avec  $\lambda$  = longueur d'onde du rayonnement X incident,  
 $n$  = ordre de la réflexion (entier positif),  
 $d$  = distance inter réticulaire du cristal analyseur,  
 $\theta$  = angle d'incidence du rayonnement X.

Dans un WDS, le rayonnement de fluorescence X émis par les atomes constituant l'échantillon est d'abord collimaté par un système de fentes appelées fentes de Soler ou collimateur en un faisceau de rayons parallèles (pour concentrer le rayonnement) vers un cristal analyseur (figure 4.9).

Le cristal analyseur est placé sur un goniomètre, ainsi l'angle qu'il présente aux rayonnements de fluorescence X peut varier. Un rayonnement caractéristique d'un atome ne sera détecté pour une position donnée du cristal que si sa longueur d'onde répond au critère de Bragg. Ainsi pour

une position donnée du cristal, une seule raie caractéristique de longueur d'onde  $\lambda$  sera diffractée. L'analyse se fait donc de façon séquentielle.

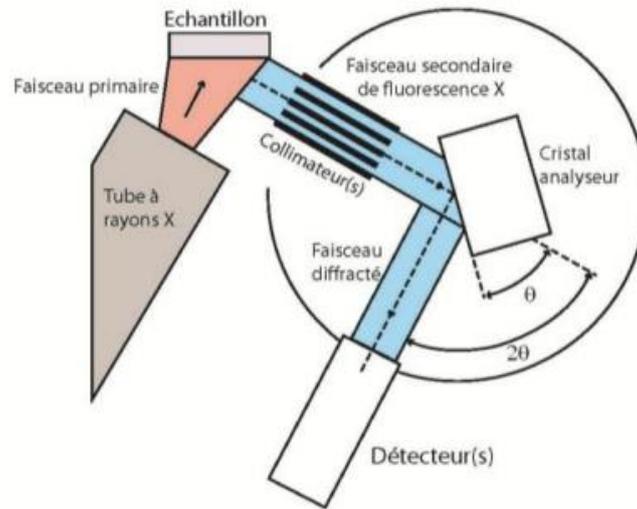


Figure 4 9:Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en longueur d'onde

Le faisceau diffracté est alors dirigé vers un système de détection placé tel que lorsque le cristal varie d'un angle  $\theta$ , le système de détection varie d'un angle  $2\theta$ . Il est toujours bien placé pour recevoir les rayons diffractés par le cristal. Le système de détection, constitué d'un détecteur à flux gazeux et d'un compteur à scintillation montés souvent l'un derrière l'autre et utilisables en tandem<sup>1</sup>, convertit le signal reçu en une impulsion électrique de magnitude proportionnelle à l'énergie du photon.

Ainsi, en faisant varier l'angle  $\theta$ , et en utilisant successivement plusieurs cristaux (donc avec des valeurs de  $d$  différentes), il est possible d'identifier tous les atomes constituant l'échantillon (analyse qualitative) et la mesure de l'intensité des raies diffractées permettra de déterminer la concentration massique de chaque élément chimique contenu dans l'échantillon (analyse quantitative). (Thirion-Merle, 2016)

#### 4.4.5.2 Les spectromètres à dispersion en énergie (EDS) :

Ces spectromètres utilisent la sensibilité de détecteurs à l'énergie des photons X émis par les atomes qui constituent l'échantillon à analyser. Il s'agit de détecteurs de type semi-conducteur (classiquement des détecteurs Si (Li) silicium dopé au lithium) ou de détecteurs au silicium à diffusion (Silicon Drift Detector, SDD) connectés à un amplificateur. Les photons X qui pénètrent dans le détecteur vont provoquer des ionisations dans le semi-conducteur, les paires électrons/trous vont migrer sous l'effet du champ électrique de polarisation et provoquer des impulsions de courant dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie du photon. Le détecteur

convertit les photons X en charge électrique et l'amplificateur transforme le signal en impulsion électrique. Plus le photon X incident aura une énergie élevée, plus il créera de défauts dans le semi-conducteur et plus l'amplitude de l'impulsion électrique sera grande. Ainsi l'amplitude des impulsions est directement proportionnelle à l'énergie du photon X pénétrant dans le détecteur. L'énergie des photons X incidents étant caractéristique des atomes constitutifs de l'échantillon, on pourra utiliser la hauteur des impulsions pour connaître la nature de ces atomes. Plus la concentration d'un élément est élevée, plus l'appareil captera de photons X ayant la même énergie ou la même hauteur d'impulsion. Pour établir la concentration des éléments présents dans un échantillon, il faut compter le nombre d'impulsions de même hauteur. (Thirion-Merle, 2016)

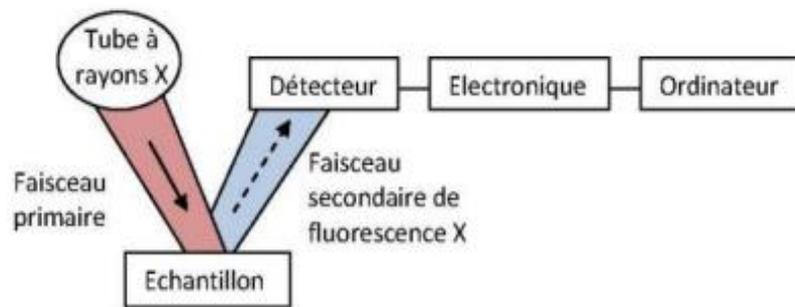


Figure 4 10: Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en énergie

#### 4.4.5.3 Comparaison des spectromètres EDS et WDS :

Tableau 4 3: Comparaison des spectromètres EDS et WDS

EDS	WPS
montage compact et simplifié	montage peu compliqué
pas de pièces en mouvement	présente de pièces en mouvement
le détecteur est placé plus près de l'échantillon à analyser	le détecteur est placé plus loin que dans le EDS
moins encombrants de taille	plus encombrants
meilleur marché	Peu couteux
Analyse rapide	Analyse plus lente
Tous les éléments étant détectés en même temps	Analyse séquentielle élément par élément
Déconseiller pour l'analyse quantitative	Plus adaptés aux applications où une analyse quantitative
/////	Performants pour les éléments légers

Fiable pouvoir de résolution ou résolution spectrale	Capacité de séparation des raies nettement supérieures
--	--

#### 4.4.5.4 Applications potentielles :

- Evaluation du niveau de contamination.
- Pollution des sols, sédiments.
- Suivi de procédés.
- Possibilités de développement de calibration spécifiques pour d'autres types d'échantillons (matrices).
- Recherche et analyse de minerais.
- Gestion qualitative des déchets.
- Exploration et mine, suivi de sondage et détection d'éléments stratégiques ou précieux (Nb, Ta, Ag, Au, etc.).

#### 4.4.5.5 Technologies a développées :

- Participation et échanges avec les développeurs de ThermoFisher pour le développement d'un « kit » permettant de préparer les échantillons afin d'améliorer la quantification des teneurs des éléments (diminution des effets de l'humidité, de la granulométrie, de la surface...),
- Développement de méthodologies et de guide méthodologique de mesure. (Spectromètre à fluorescence X (pXRF))

Chapitre 5 : réalisation d'un  
système de détection du  
monoxyde de carbone et du  
fumé dans l'air

## 1. Objectif de ce travail :

L'objectif de ce travail est de réaliser un système d'identification et de détection de la fumée ou de monoxyde de carbone.

## 2. Le principe de ce système :

Principe de ce système de :

- Identifier et mesurer la concentration de fumée, de monoxyde de carbone
- Contrôler la température de la zone étudiée.
- Donner des signaux visuels et sonores due l'augmentation de monoxyde ou de fumée.

## 3. Description des différents composants utilisés pour la réalisation :

### 3.1 ARDUINO MEGA 2560 :

3.1.1 La constitution de la carte Arduino Mega :

La carte Arduino **Mega 2560 R3** est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560 . Il dispose de 54 broches d'entrée/sortie numériques (dont 15 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP, et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour prendre en charge le microcontrôleur ; connectez-le simplement à un ordinateur avec un câble USB ou alimentez-le avec un adaptateur CA/CC ou une batterie pour commencer.( Arduino Mega 2560 Rev3, s.d.).

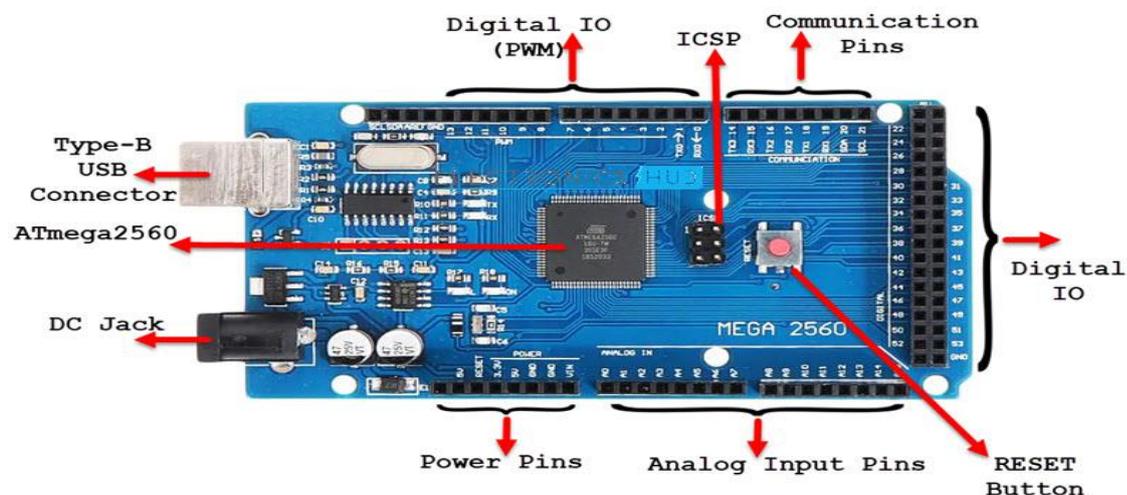


Figure 5 1 : carte ARDUINO Méga

### 3.1.2 Les sources de l'alimentation de la carte :

Les broches d'alimentation sont les suivantes :

- VIN. La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée). Vous pouvez alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.
- 5V. La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de tout autre source d'alimentation régulée.
- 3V3. Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V).

### 3.1.3 Entrées et sorties numériques :

Chacune des 54 broches numériques de la carte Méga peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions `pinMode ()`, `digitalWrite ()` et `digitalRead ()` du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction `digitalWrite (broche, HIGH)`.

### 3.1.4 Entrées et sorties analogiques :

La carte Mega2560 dispose de 16 entrées analogiques, chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c.à.d. sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead ()` du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction `analogReference ()` du langage Arduino. (HINAULT, 2010)

Note : les broches analogiques peuvent être utilisées en tant que broches numériques.

### 3.2 DETECTEUR de fumée « MQ2 » :

Le MQ-2 est un capteur qui permet de détecter du gaz ou de fumée à des concentrations de 300 ppm à 10000 ppm. Après calibration, le MQ-2 peut détecter différents gaz comme le GPL (LPG), l'i-butane, le propane, le méthane, l'alcool, l'hydrogène ainsi que les fumées. Il est conçu pour un usage intérieur à température ambiante.

Le MQ2 doit être alimenté en 5V pour le capteur physico-chimique puisse atteindre sa température de fonctionnement. Il dispose d'une sortie analogique et d'un réglage de la sensibilité par potentiomètre.



Figure 5 2: capteur de fumée

Le senseur MQ-2 est un senseur avec une sortie analogique (AOut) qui signale la présence de fumée en élevant la tension en sortie. Plus il y a de fumée et plus la tension monte. Il est possible de réglé la sensibilité du module à l'aide du potentiomètre se trouvant à l'arrière du module, ce dernier permet d'ajuster un seuil d'activation pour le signal digital (DOut) qui change lorsque le seuil est atteint. (Riadh, 2018)

Tableau 5 1: les caractéristiques et les différents pins du capteur MQ2

<b>Les Caractéristiques du MQ2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Puce principale : LM393, ZYMQ-2 détecteur de gaz</b></li><li>• <b>Haute sensibilité et bonne sélectivité</b></li><li>• <b>Tension de fonctionnement : 5V DC</b></li><li>• <b>Tension de sortie analogique : 0 ~ 5V (plus la concentration est élevée, plus la tension est élevée</b></li><li>• <b>Plage de détection : 200 à 10000ppm</b></li><li>• <b>Longue durée de vie et stabilité fiable</b></li></ul>
------------------------------------	---

<p><b>Les différents pins d'un capteur MQ2</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VCC: alimentation positive (5V)</li> <li>• GND: alimentation négative</li> <li>• DO: sortie du signal du commutateur</li> <li>• TTL AO: sortie du signal analogique</li> <li>• Quatre trous de vis pour un positionnement facile</li> <li>• Dimensions : 32 x 22 x 27mm</li> </ul>
--	---

### 3.3 Capteur de monoxyde de carbone « MQ7 » :

Ceci est un simple à utiliser Monoxyde de carbone (CO) capteur, adapté à la détection des concentrations de CO dans l'air. Le MQ-7 peut détecter les concentrations de gaz CO de 20 à 2000ppm.

Ce capteur a une sensibilité élevée et un temps de réponse rapide. La sortie du capteur est une résistance analogique. Le circuit de commande est très simple. Tout ce que vous devez faire est d'alimenter le serpentin de chauffage avec 5V, la résistance de charge et de connecter la sortie à un CAN.



Figure 5 3 : détecteur de monoxyde de carbone MQ7

Le senseur MQ-7 est un senseur avec une sortie analogique (AOut) qui signale la présence de CO en élevant la tension en sortie. Plus il y a de CO et plus la tension monte. Il est possible de réglé la sensibilité du module à l'aide du potentiomètre se trouvant à l'arrière du module, ce dernier permet d'ajuster un seuil d'activation pour le signal digital (DOut) qui change lorsque le seuil est atteint. (Riadh, 2018)

Tableau 5 2 : les caractéristiques et les différents pins du capteur MQ7

<p><b>Les Caractéristiques du MQ7</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Puce principale : LM393, ZYMQ-7 détecteur de gaz</b></li> <li>• <b>Haute sensibilité et bonne sélectivité</b></li> <li>• <b>Tension de fonctionnement : 5V DC</b></li> <li>• <b>Tension de sortie analogique : 0 ~ 5V (plus la concentration est élevée, plus la tension est élevée)</b></li> <li>• <b>Plage de détection : 200 à 10000ppm</b></li> <li>• <b>Longue durée de vie et stabilité fiable</b></li> </ul>
<p><b>Les différents pins d'un capteur MQ7</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VCC: alimentation positive (5V)</li> <li>• GND: alimentation négative</li> <li>• DO: sortie du signal du commutateur</li> <li>• TTL AO: sortie du signal analogique</li> <li>• Quatre trous de vis pour un positionnement facile</li> <li>• Dimensions : 32 x 22 x 27mm</li> </ul>

### 3.4 Capteur de température LM35 :

Le capteur de température LM35 est un capteur analogique de température fabriqué par Texas Instruments. Il est extrêmement populaire en électronique, car précis, peu coûteux, très simple d'utilisation et d'une fiabilité à toute épreuve.

Le capteur de température LM35 est capable de mesurer des températures allant de -55°C à +150°C dans sa version la plus précise et avec le montage adéquat, de quoi mesurer n'importe quelle température.

**N.B.** Les versions grand publiques sont capables de mesurer des températures comprises entre -40°C et +110°C.

La sortie analogique du capteur est proportionnelle à la température. Il suffit de mesurer la tension en sortie du capteur pour en déduire la température. Chaque degré Celsius correspond à une tension de +10mV.

NB :

- On utilise valeur \* (5.0 / 1023.0 \* 100.0) dans le calcul du produit en croix, car lors de la compilation du programme, c'est le type des valeurs d'une opération qui définit le type du résultat. Si on fait valeur \* (5 / 1023 \* 100) comme valeur, 5, 1023 et 100 sont des nombres entiers, le résultat est un nombre entier, ce qui n'est pas notre but, nous voulons un calcul avec des nombres à virgule. On utilise donc 5.0, 1023.0 et 100.0 pour forcer un calcul avec des nombres à virgule.
- On multiplie par 100 dans le calcul, car dans 5 volts (= 5000mV) il y a 100 fois 10mV (= 1°C). (Mesurer une température avec un capteur LM35 et une carte Arduino / Genuino, 2016)

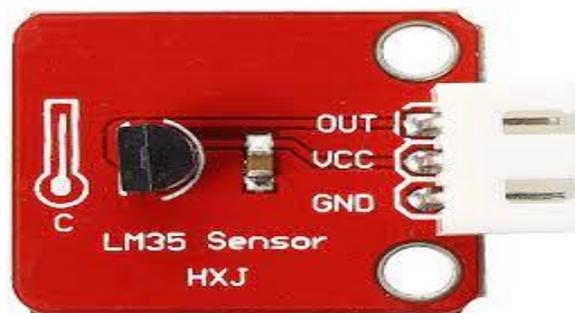


Figure 5 4 : capteur de temperature LM35

### 3.5 Les câbles :

Les connexions entre les composants sont réalisées par des jumpers, sortes de petits câbles.

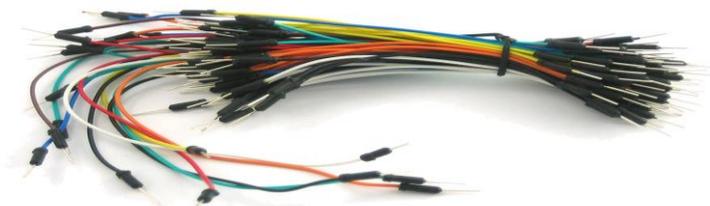


Figure 5 5:les câbles de connexions

### 3.6 La platine d'expérimentation :

Une platine d'expérimentation permet de réaliser des prototypes de montages électroniques sans soudure et donc de pouvoir réutiliser les composants.

Tous les connecteurs dans une rangée de 5 sont reliés entre eux. Donc si on branche deux éléments dans un groupe de cinq connecteurs, ils seront reliés entre eux. Il en est de même des alignements de connecteurs rouges (pour l'alimentation) et bleus (pour la terre). Ainsi, les liens peuvent être schématisés : (Physique-chimie, s.d.)

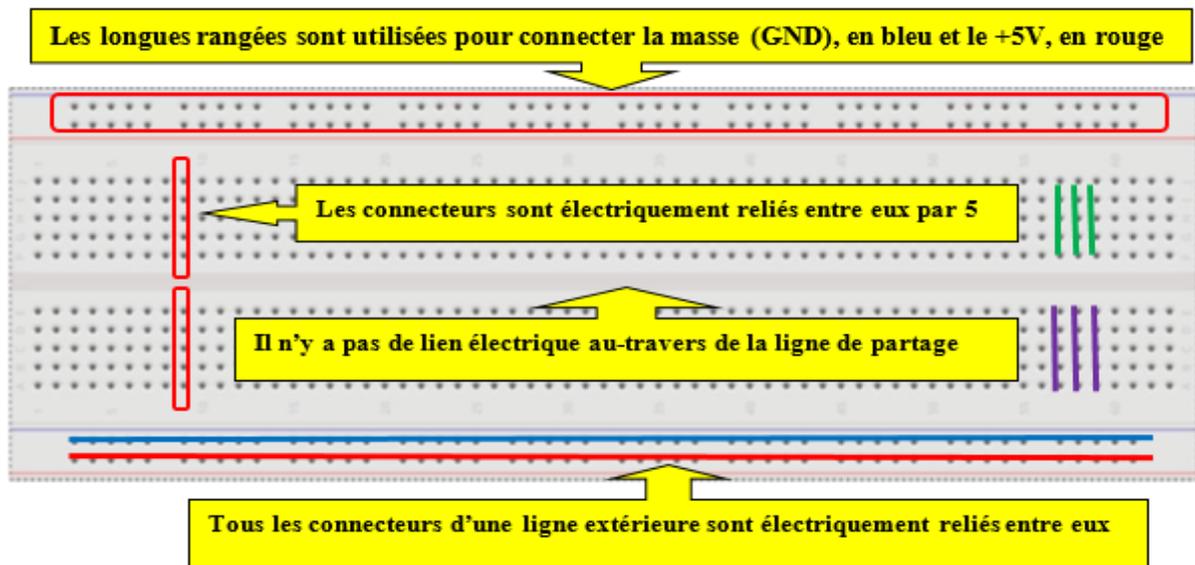


Figure 5 6:La platine d'expérimentation

### 3.7 Diode électroluminescente (LED) :

Une diode électroluminescente (LED) est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu' il est parcouru par un courant électrique. Comme une diode classique la LED laisse passer le courant dans un sens (polarisation direct) et le bloque dans le sens inverse (polarisation inverse).

Ainsi, chaque LED possède une tension de seuil propre à elle. (Dulex, 2018)



Figure 5 7:les diodes électroluminescentes

### 3.8 Buzzer :

Le buzzer est un composant constitué essentiellement d'une lamelle réagissant à l'effet piézoélectrique. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains minéraux de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Ce phénomène est réversible ; si nous déformons ce minéral, il produit de l'énergie électrique.

Dans l'univers Arduino, le buzzer est principalement utilisé pour émettre un son. (ARDUINO PASSION, 2016)



Figure 5 8 : le Buzzer

### 3.9 Logiciel arduino :

#### 3.9.1 Prise en main de logiciel :

Ouvrir le logiciel Arduino :

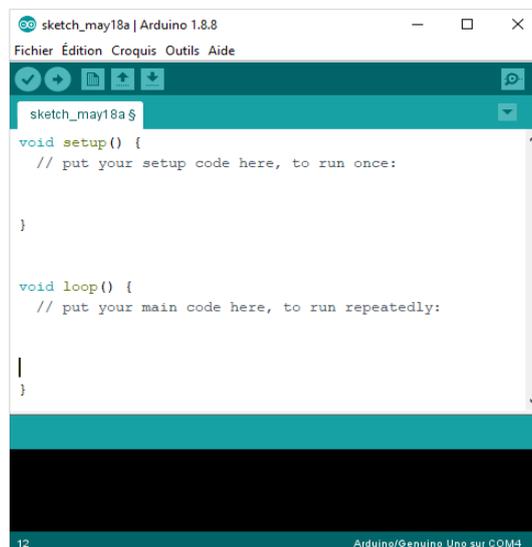


Figure 5 9 : interface de logiciel

Choisir le type de carte :

Faire **Outils > Type de carte > arduino/genuino méga or méga 2560**

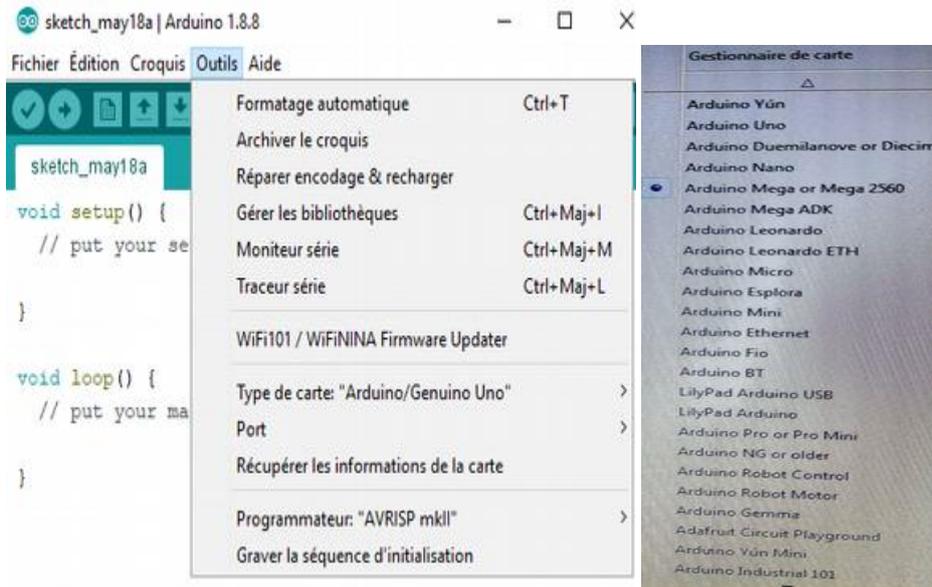


Figure 5 10:interface de logiciel

3.9.2 L'interface du logiciel :

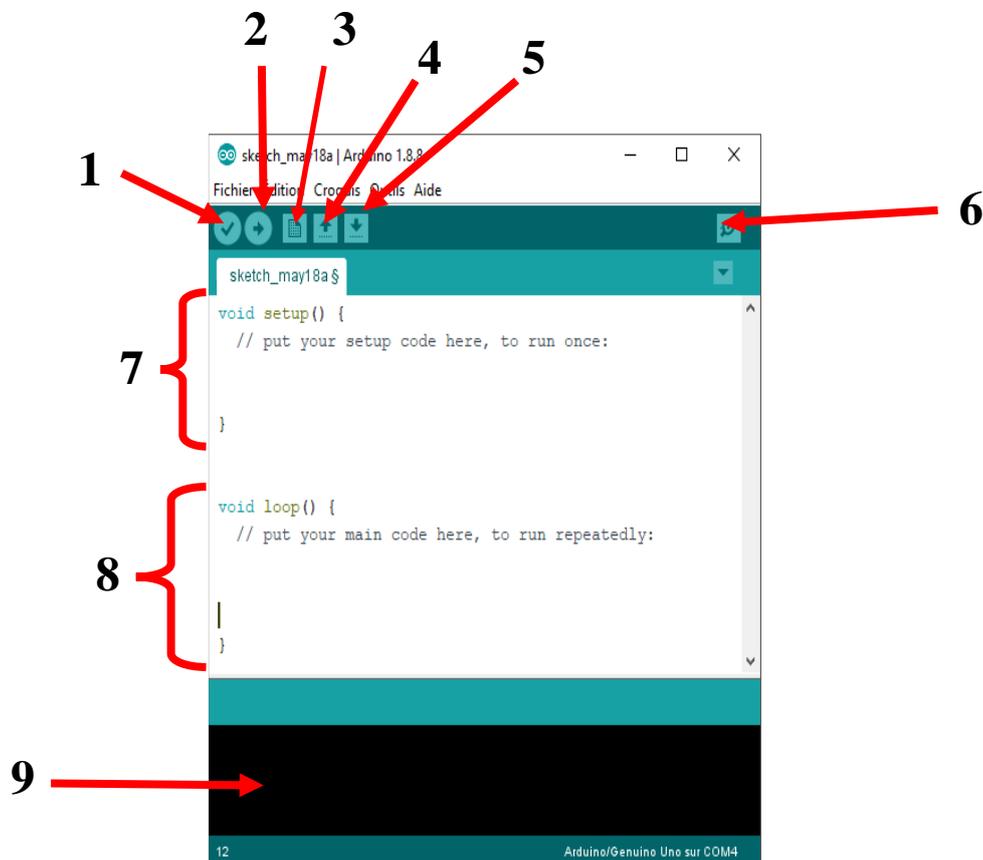


Figure 5 11:interface de logiciel

- **Bouton 1** : Compile le programme, c'est-à-dire vérifie s'il n'y a pas d'erreur. Peut être utilisé, même si aucune carte n'est connectée, pour corriger la syntaxe d'un programme.
- **Bouton 2** : Envoi le programme sur la carte Arduino, pour qu'il puisse tourner. Dès qu'une modification est faite dans le programme, il faut envoi le programme de nouveau pour qu'elle soit prise en compte.
- **Bouton 3** : Créer un nouveau fichier.
- **Bouton 4** : Ouvrir un fichier existant.
- **Bouton 5** : Enregistrer un fichier
- **Bouton 6** : Lance le moniteur série qui affiche les valeurs et mesures renvoyée par la carte par la fonction :  
Serial.print()  
Serial.println() (pour sauter des lignes)
- **7** : Cette boucle est exécutée une fois à l'initialisation du programme et quand le bouton reset de la carte est pressé.
- **8** : La partie de programme se trouvant se répètent indéfiniment tant que la carte est alimentée.
- **9** : Les messages d'erreur s'afficheront ici.

### 3.9.3 Langage de logiciel :

#### 3.9.3.1 Les fonctions de programme :

Le contenu du programme, donc le programme en lui-même, est ce qui va définir chaque action que va exécuter la carte Arduino. Mais ce n'est pas tout ! Dans le programme il y a plusieurs zones, que nous verrons plus en détail tout au long de la lecture de ce cours, qui ont chacune un rôle particulier. Voici leur présentation accompagnée d'un exemple.

1. La première zone sert principalement (je ne vais pas m'étendre) à dire à la carte de garder en mémoire quelques informations qui peuvent être : l'emplacement d'un élément connecté à la carte, par exemple une LED en broche 13, ou bien une valeur quelconque qui sera utile dans le programme :

**// déclaration de variables globales (broches...)**

**const int ledPin = 13;**

2. La zone secondaire est l'endroit où l'on va initialiser certains paramètres du programme. Par exemple, on pourra dire à la carte qu'elle devra communiquer avec l'ordinateur ou simplement lui dire ce qu'elle devra faire de la LED qui est connectée sur sa broche 13.

```
void setup()  
{  
  // Declaration de la broche en sortie  
  pinMode(ledPin, OUTPUT);  
}
```

3. La dernière zone est la zone principale où se déroulera le programme. Tout ce qui va être écrit dans cette zone sera exécuté par la carte, ce sont les actions que la carte fera. Par exemple, c'est ici qu'on pourra lui dire de faire clignoter la LED sur sa broche 13.

```
void loop() {  
  digitalWrite(13, HIGH); // led a l'etat haut  
  delay(1000); // attendre 1 seconde  
  digitalWrite(13, LOW); // led a l'etat bas  
  delay(1000); // attendre 1 seconde
```

(Dulex, 2018)

### 3.9.3.2 Les instructions :

Les instructions sont des lignes de code qui disent au programme : "fais ceci, fais cela..." Ce sont donc les ordres qui seront exécutés par l'Arduino. Il est très important de respecter exactement la syntaxe; faute de quoi, le code ne pourra pas être exécuté.

**pinMode (13, OUTPUT)** : initialise la broche 13 du microcontrôleur comme sortie, c'est-à-dire que des données seront envoyées depuis le microcontrôleur vers cette broche (on va envoyer de l'électricité).

**pinMode (13, INPUT)** : initialise la broche 13 du microcontrôleur comme entre, c'est-à-dire que des données seront envoyées depuis cette broche vers le microcontrôleur (on va envoyer de l'électricité).

**Serial.begin(9600)** : initialise le port série qui permet à l'Arduino d'envoyer et de recevoir des informations à l'ordinateur. C'est recommandé, mais cela fonctionne aussi sans.

**digitalWrite(13, HIGH)** : le microcontrôleur connecte la broche D13 au +5V ce qui a pour effet d'allumer la LED (de l'électricité sort de la broche D13).

L'instruction

**delay(9000)** : indique au microcontrôleur de ne rien faire pendant 9000 millisecondes, soit 3 seconde.

**digitalWrite (13, LOW)** : le microcontrôleur connecte la broche D13 à la masse (Gnd) ce qui a pour effet d'éteindre la LED (on coupe l'alimentation en électricité).

**Tone(8,440,1000)** : La fonction **tone()** permet de générer un son de fréquence et durée choisie sur une sortie digitale de l'Arduino. Signifie jouer un son de fréquence **440Hz** pendant **1000** ms sur la borne (pin) **8**. (Dulex, 2018)

3.9.3.3 Les points virgules :

Les points virgules terminent les instructions. Si par exemple on dit dans notre programme : "appelle la fonction manger Le Chat", on doit mettre un point-virgule après l'appel de cette fonction.

Lorsque le code ne fonctionne pas, c'est souvent parce qu'il manque un point-virgule. Il faut donc être très attentif à ne pas les oublier! (Dulex, 2018)

3.9.3.4 Les accolades :

Les accolades sont les "conteneurs" du code du programme. Elles sont propres aux fonctions, aux conditions et aux boucles. Les instructions du programme sont écrites à l'intérieur de ces accolades. (Dulex, 2018)

3.9.3.5 Les commentaires :

Les commentaires sont des lignes de codes qui seront ignorées par le programme. Elles ne servent en rien lors de l'exécution du programme. Ils permettent d'annoter et de commenter le programme.

Ligne unique de commentaire :

```
//cette ligne est un commentaire sur une seule ligne
```

Ligne ou paragraphe sur plusieurs lignes :

```
/*cette ligne est un commentaire, sur PLUSIEURS lignes qui sera ignoré par le programme, mais pas par celui qui lit le code ;) */
```

(Dulex, 2018)

### 3.9.3.6 Les accents :

Il est formellement interdit de mettre des accents en programmation! Sauf dans les commentaires. (Dulex, 2018)

## 4. Application de pratique :

### 4.1 Le principe de Câblage:

La carte ARDUINO est alimenter par une tension de 5V (GND, +5V), cette tension est fournie soit par une prises d'alimentation qui sera branche sur les broches (power) soit par la pris USB (jack) utilisé pour la connecter à un ordinateur. On branche les capteurs de MQ2 et MQ7 et ML35 sur les broches analogiques car ces broches fonctionnent comme des entrées analogiques, ces broches acceptent des tensions comprises entre 0 et 5 V. un convertisseur analogique/numérique qui s'occupe de traduire ces valeurs physique en données numérique. Les LED ( $V_7 J_7 R_7$ ,  $V_2 J_2 R_2$ ) et le Buzzer sont connecter avec les broches digitales car ces broches fournissent des données digitales sous forme des signaux logiques, elles ne peuvent donc contenir que deux valeurs, un (0) logique correspond à une absence de tension et le (1) logique correspondant à une tension de 5V.

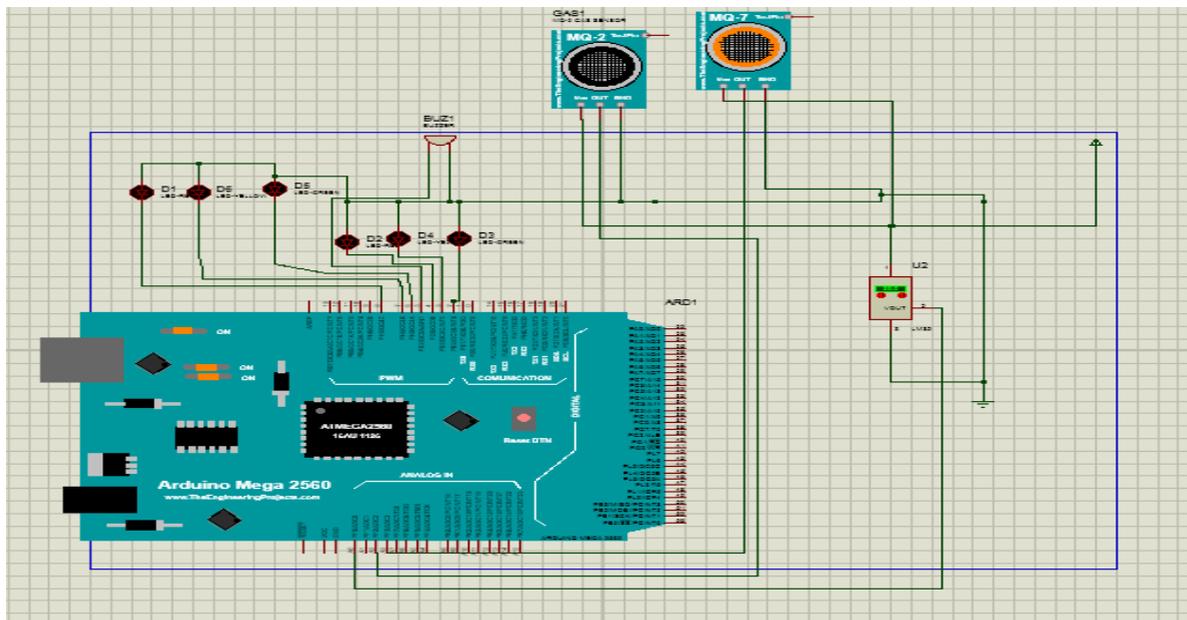


Figure 5 12: schéma de câblage de système

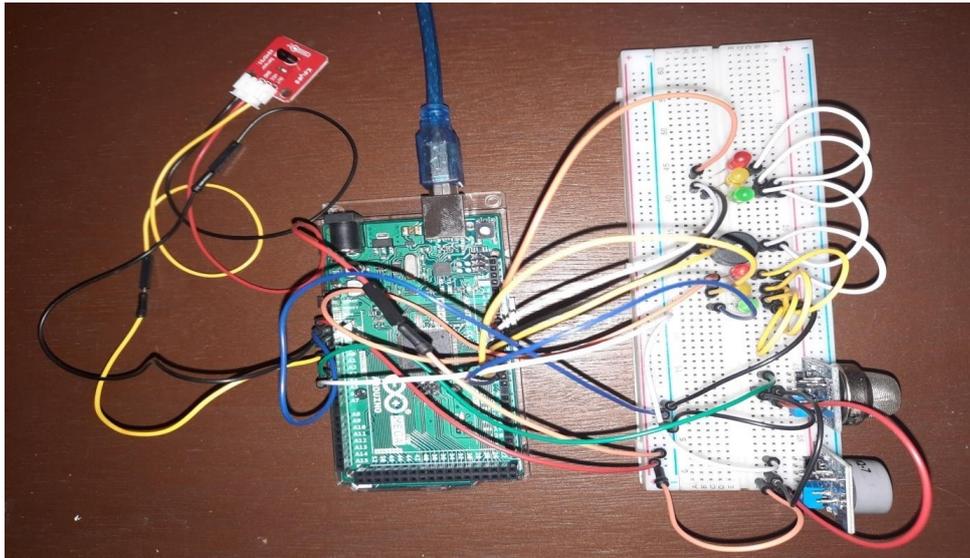


Figure 5 13 : réalisation de câblage de système

#### 4.2 Le programme arduino :

Afin de réaliser notre programmation nous avons :

Ouvrir le logiciel arduino

Programmé chaque capteur séparément, et les regroupés à dans programme que nous l'avons appelé le programme de détection.

Ajouté les programme des témoins lumineux et sonores afin d'atteindre notre programme final.

Envoyé le programme sur la carte arduino pour fonctionné le système.

Le programme sera comme suite :

```
int smokeA2 = A2;
int redLedMQ2 = 4;
int YELLOWLedMQ2 = 3;
int GREENLedMQ2 = 2;
int BUZZERMQ =5;
int redLedMQ7 = 8;
int YELLOWLedMQ7 = 7;
int GREENLedMQ7 = 6;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(smokeA2, INPUT);
  pinMode(redLedMQ2, OUTPUT);
  pinMode(YELLOWLedMQ2, OUTPUT);
  pinMode(GREENLedMQ2, OUTPUT);
  pinMode(BUZZERMQ, OUTPUT);
}
```

```

pinMode(redLedMQ7, OUTPUT);
pinMode(YELLOWLedMQ7, OUTPUT);
pinMode(GREENLedMQ7, OUTPUT);
}
void loop() {
  int valeur_brute = analogRead(A0);
  float temperature_celcius = valeur_brute * (5.0 / 1023.0 * 100.0);
  Serial.print("1:la température en degré celcius est de:");
  Serial.print (temperature_celcius );
  Serial.println("°C ");
//CAPTEUR MQ2
  int MQ2 = analogRead(smokeA2);
  Serial.print("2:la concentration de fumée est: ");
  Serial.print(MQ2);
  Serial.println(" PPM" );
  if (MQ2 > 60 && MQ2<150)
  {
    digitalWrite(YELLOWLedMQ2, HIGH);
    digitalWrite(GREENLedMQ2, LOW);
    digitalWrite(redLedMQ2, LOW);
    tone(BUZZERMQ,500, 500); // la note est jouée pendant
500 ms
  }
  else if (MQ2 >= 150)
  {
    digitalWrite(redLedMQ2, HIGH);
    digitalWrite(YELLOWLedMQ2, LOW);
    digitalWrite(GREENLedMQ2, LOW);
    tone(BUZZERMQ,500, 5000); // la note est jouée pendant
500 ms
  }
  else
  {
    digitalWrite(GREENLedMQ2, HIGH);
    digitalWrite(redLedMQ2, LOW);
    digitalWrite(YELLOWLedMQ2, LOW);
    digitalWrite (BUZZERMQ, LOW);
  }
//CAPTEUR MQ7
  int MQ7 = analogRead(A3);
  // print out the value you read:
  Serial.print("3:la concentration du monoxyde est:");
  Serial.print(MQ7);
  Serial.println(" PPM" );
  if (MQ7 > 300 && MQ7<500)
  {
    digitalWrite(YELLOWLedMQ7, HIGH);
    digitalWrite(GREENLedMQ7, LOW);
    digitalWrite(redLedMQ7, LOW);

```

```

    tone(BUZZERMQ,900, 500);           // la note est jouée pendant
500 ms
}
else if (MQ7 >= 500)
{
    digitalWrite(redLedMQ7, HIGH);
    digitalWrite(YELLOWLedMQ7, LOW);
    digitalWrite(GREENLedMQ7, LOW);
    tone(BUZZERMQ,900, 5000);         // la note est jouée pendant
500 ms
}
else
{
    digitalWrite(GREENLedMQ7, HIGH);
    digitalWrite(redLedMQ7, LOW);
    digitalWrite(YELLOWLedMQ7, LOW);
    digitalWrite (BUZZERMQ, LOW);
}
delay(3000 );
}

```

### 4.3 Les tests de ce système de détection :

- **Test 1 :**

Nous avons mesuré la concentration de fumée et de monoxyde de carbone dans une pièce.

Les résultats analogiques sont présentés dans la figure ci-dessous :

```

COM3
1:la température en degré celcius est de:26.88°C
2:la concentration de fumée est: 28 PPM
3:la concentration du monoxyde est:114 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:114 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:114 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:113 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 30 PPM
3:la concentration du monoxyde est:113 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 30 PPM
3:la concentration du monoxyde est:113 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:113 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:112 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 31 PPM
3:la concentration du monoxyde est:112 PPM

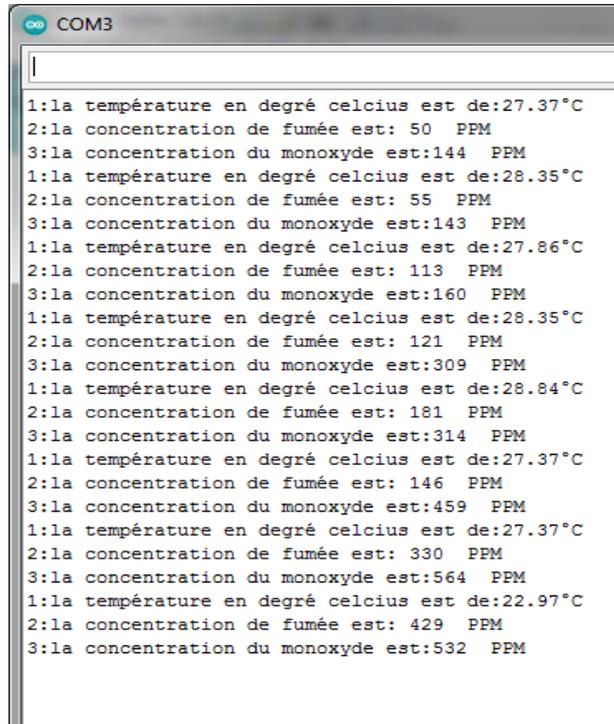
```

Figure 5 14 : les résultats du test 1

- Test2 :

Nous avons fait la même expérience, mais avec l'ajout d'un facteur (papier brulant).

Les résultats analogiques sont présentés dans la figure ci-dessous :



```
COM3
1:la température en degré celcius est de:27.37°C
2:la concentration de fumée est: 50 PPM
3:la concentration du monoxyde est:144 PPM
1:la température en degré celcius est de:28.35°C
2:la concentration de fumée est: 55 PPM
3:la concentration du monoxyde est:143 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.86°C
2:la concentration de fumée est: 113 PPM
3:la concentration du monoxyde est:160 PPM
1:la température en degré celcius est de:28.35°C
2:la concentration de fumée est: 121 PPM
3:la concentration du monoxyde est:309 PPM
1:la température en degré celcius est de:28.84°C
2:la concentration de fumée est: 181 PPM
3:la concentration du monoxyde est:314 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.37°C
2:la concentration de fumée est: 146 PPM
3:la concentration du monoxyde est:459 PPM
1:la température en degré celcius est de:27.37°C
2:la concentration de fumée est: 330 PPM
3:la concentration du monoxyde est:564 PPM
1:la température en degré celcius est de:22.97°C
2:la concentration de fumée est: 429 PPM
3:la concentration du monoxyde est:532 PPM
```

Figure 5 15: les résultats analogiques de test 2

**Remarque :**

La comparaison entre les deux tests, nous permet de remarquer l'augmentation de monoxyde de carbone et de fumée lorsque nous avons ajouté le papier brulant, nous concluons donc que le système fonctionne bien.

#### 4.3.1 Les résultats digitaux de ces 2 tests :

##### 4.3.1.1 Les LEDS :

Dans notre programme nous avons donné des valeurs afin que les LEDS s'allument :

1. Monoxyde de carbone MQ7 :

Si la concentration de monoxyde de carbone est inférieure à 300

- LED verte est allumé et les autres LEDS sont éteints

Si la concentration de monoxyde de carbone est supérieure à 300 et inférieure à 500

- LED orange est allumé et les autres LEDS sont éteints

Si la concentration de monoxyde de carbone est supérieure à 500

- LED rouge est allumé et les autres LEDS sont éteignent

2. Fumée MQ2 :

Si la concentration de fumée est inférieure à 60

- LED vert est allumé et les autres LEDS sont éteignent

Si la concentration de fumée est supérieure à 60 et inférieure à 150

- LED orange est allumé et les autres LEDS sont éteignent

Si la concentration de fumée est supérieure à 150

- LED rouge est allumé et les autres LEDS sont éteignent

#### 4.3.1.2 Le Buzzer :

Le buzzer fonctionne avec les deux capteurs.

1. il déclenche intermittent lorsque :

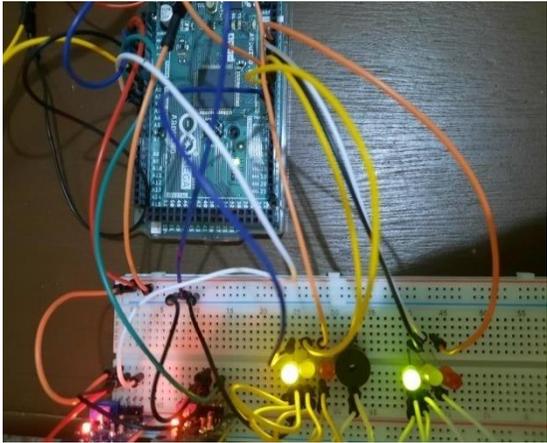
Soit la concentration de fumée est supérieure à 60 et inférieure à 150 ou le degré de monoxyde de carbone est supérieur à 300 et inférieur à 500

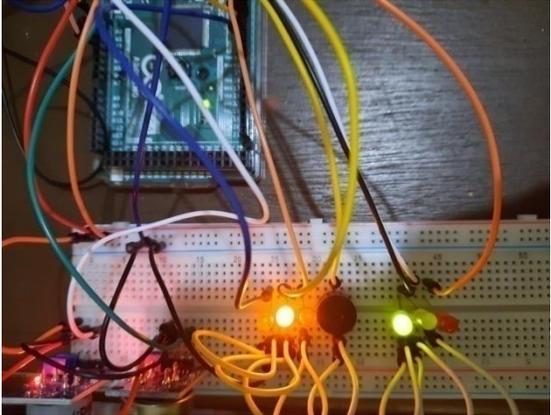
2. il déclenche continuellement lorsque :

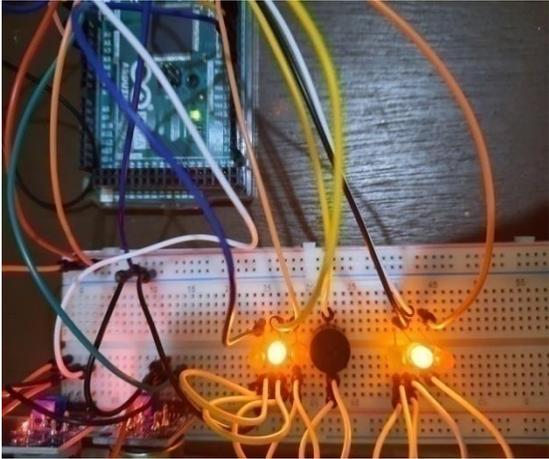
Soit la concentration de fumée est supérieure à 150 ou le degré de monoxyde de carbone est supérieur à 500.

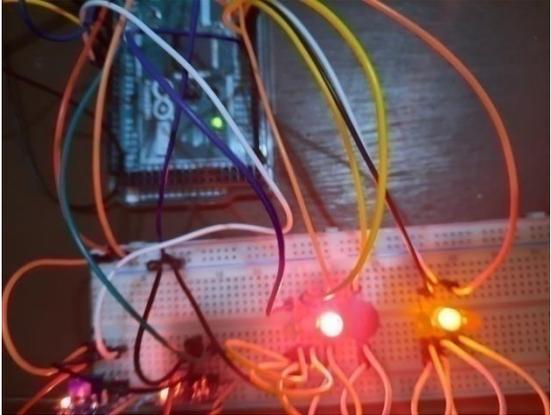
Les résultats sont présents dans les tableaux ci-dessus :

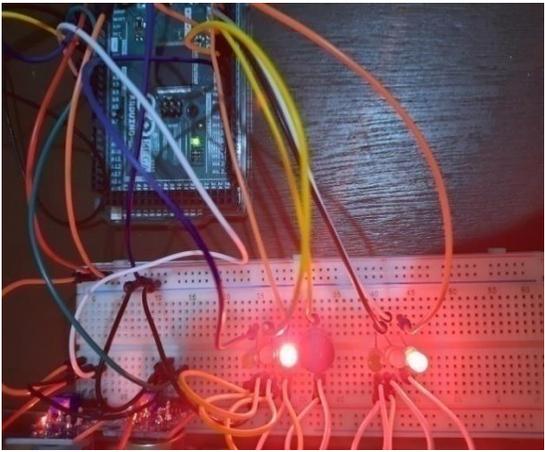
Tableau 5 3 : les résultats digitaux de deux test

N°	Affichage numérique (a)	détecteur	Les couleurs des LEDS	L'état de LEDS	Affichage numérique (d)
01	<pre> 1:la température en degré celcius est de:26.88°C 2:la concentration de fumée est: 28 PPM 3:la concentration du monoxyde est:114 PPM 1:la température en degré celcius est de:27.86°C 2:la concentration de fumée est: 31 PPM 3:la concentration du monoxyde est:114 PPM 1:la température en degré celcius est de:27.86°C 2:la concentration de fumée est: 31 PPM 3:la concentration du monoxyde est:114 PPM 1:la température en degré celcius est de:27.86°C 2:la concentration de fumée est: 31 PPM </pre>	MQ2	Verte	on	
			orange	off	
			rouge	off	
		MQ7	verte	on	
			orange	off	
			rouge	off	

N°	Affichage numérique (a)	détecteur	Les couleurs des LEDS	L'état de LEDS	Affichage numérique (d)
02	<p>1:la température en degré celcius est de:27.86°C</p> <p>2:la concentration de fumée est: 113 PPM</p> <p>3:la concentration du monoxyde est:160 PPM</p>	MQ2	Verte	off	
			orange	on	
			rouge	off	
		MQ7	verte	on	
			orange	off	
			rouge	off	

N°	Affichage numérique (a)	détecteur	Les couleurs des LEDS	L'état de LEDS	Affichage numérique (d)
03	<pre> 1:la température en degré celcius est de:28.35°C 2:la concentration de fumée est: 121 PPM 3:la concentration du monoxyde est:309 PPM </pre>	MQ2	Verte	off	
			orange	on	
			rouge	off	
		MQ7	verte	off	
			orange	on	
			rouge	off	

N°	Affichage numérique (a)	détecteur	Les couleurs des LEDS	L'état de LEDS	Affichage numérique (d)
04	<pre> 1:la température en degré celcius est de:28.84°C 2:la concentration de fumée est: 181 PPM 3:la concentration du monoxyde est:314 PPM </pre>	MQ2	Verte	off	
			orange	off	
			rouge	on	
		MQ7	verte	off	
			orange	on	
			rouge	off	

N°	Affichage numérique (a)	détecteur	Les couleurs des LEDS	L'état des LEDS	Affichage numérique (d)
05	<p>1:la température en degré celcius est de:27.37°C</p> <p>2:la concentration de fumée est: 330 PPM</p> <p>3:la concentration du monoxyde est:564 PPM</p>	MQ2	Verte	off	
			orange	off	
			rouge	on	
		MQ7	verte	off	
			orange	off	
			rouge	on	

## 5. Simulation de système de détection interfacé à la carte arduino avec logiciel MATLAB :

### 5.1 Les étapes à suivre :

1. Installation du MATLAB 2016
2. Installation du package ARDUINO\_IO et le décompresser à la racine de votre disque par exemple dans `c:\arduinoio`, ce package nous permet d'identifier la carte arduino et la manipuler correctement.
3. Programmer votre arduino avec le programme `srv.pde` (qui se trouve dans de sous répertoire « pde » de ce même et précédent répertoire « `c:\arduinoio` ». qui permet de synchroniser la carte arduino avec le MATLAB en temps réel.
4. Procèdes à la programmation d'une interface SIMULINK.
  - Lancer Matlab et placer vous dans le répertoire `E :\arduinoio`
  - Exécuter la commande : `install-arduino`
  - Fermer et relancer Matlab puis Simulink Matlab
  - Dans les bibliothèques se trouvent maintenant les blocs dans Arduino IO library.

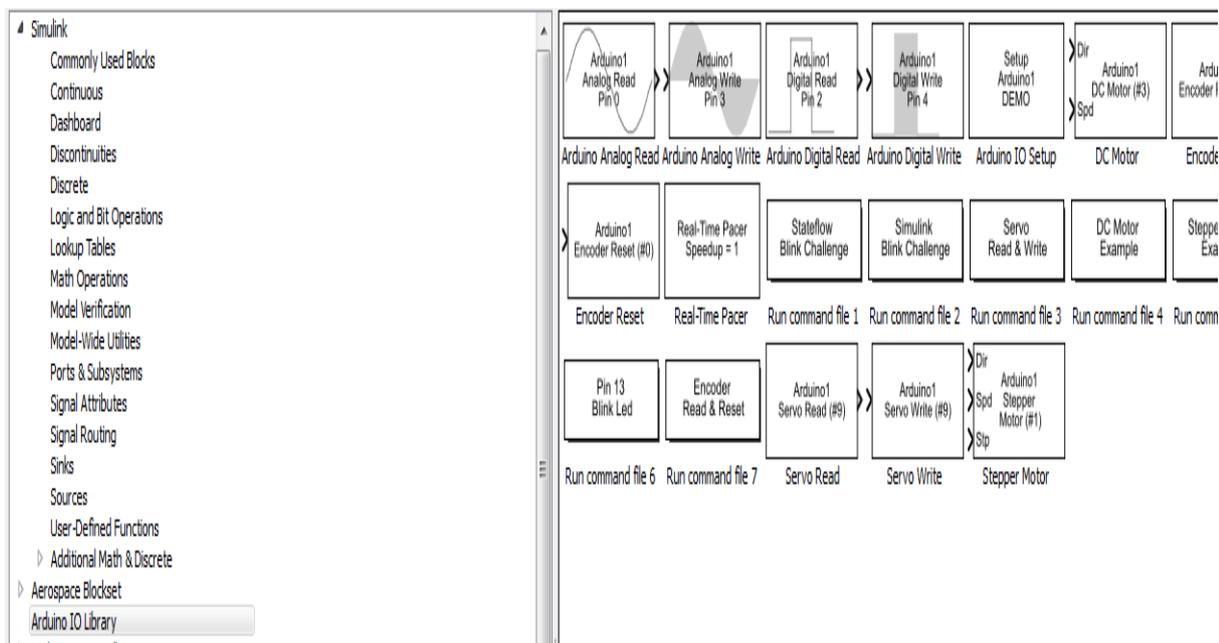


Figure 5 16 : les blocs dans arduino IO

## 5.2 Exploitation de la bibliothèque ArduinoIO sous Simulink :

Les blocs nécessaires pour notre objectif d'asservissement sont les suivants :

**Real-Time Pacer:** Ce bloc permet de ralentir le temps de simulation de sorte qu'il synchronise avec le temps réel écoulé. Le coefficient de ralentissement est contrôlable par l'intermédiaire du paramètre Speedup.

**Arduino IO Setup:** Pour configurer sur quel port la carte Arduino méga est connectée. Pour cela il suffit de voir dans Gestionnaire des périphériques.

**Arduino Analog Read:** Pour configurer à partir de quel pin [0, 1, 2, 3, 4,5] on va acquérir les données du capteur.

**Arduino AnalogWrite:** Pour configurer à partir de quel pin [2,3, 5, 6, 9, 10, 11,12, 13, 14,15] on va envoyer la commande en PWM vers l'actionneur.

**Delay :** pour afficher les résultats numériques.

**Scop :** pour afficher les courbes.

### 5.2.1 Les résultats obtenues :

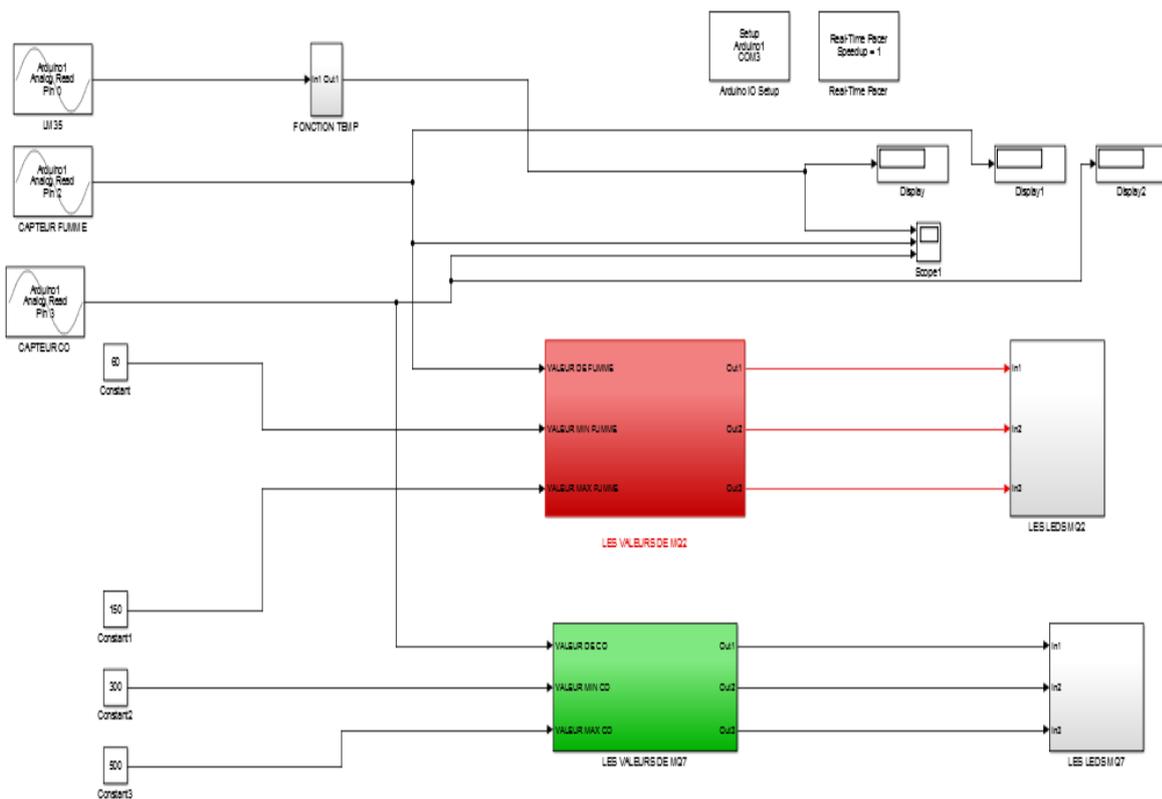


Figure 5 17: schéma de simulation de système de détection

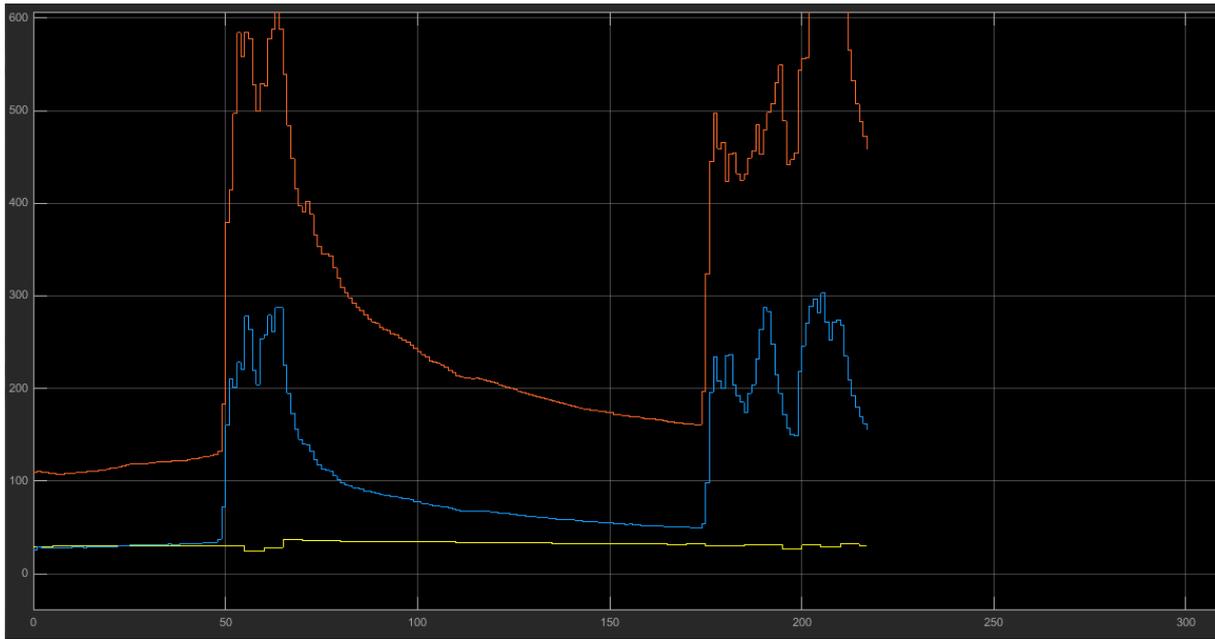


Figure 5 18:les courbes des résultats des tests par la simulation Matlab

- Monoxyde de carbone
- Fumée
- Température

## Conclusion général

## Conclusion général

Les techniques d'identification de la pollution est importante à bien des égards.

L'identification ou la détection de la pollution nous permet de surveiller la qualité de l'air que nous respirons, de l'eau que nous buvons et des aliments que nous mangeons. La détection de la pollution est une étape cruciale dans une mesure préventive efficace donc Il est important de savoir quand la pollution est présente afin de pouvoir prendre rapidement des mesures correctives pour protéger votre site industriel et environnement en générale « l'impact du changement climatique et des catastrophes naturelles sur notre environnement ». En plus de protéger la santé humaine, elle peut contribuer à protéger la biodiversité et la beauté de la nature. Les systèmes de détection de la pollution offrent également des avantages économiques en créant des emplois pour les scientifiques et les ingénieurs qui collectent des données pouvant être utilisées par les gouvernements pour des politiques de protection de l'environnement et par les entreprises pour de meilleures pratiques de gestion.

Notre travail a donc permet d'aboutir aux résultats suivants :

- Réaliser un système pour identifier et mesurer la concentration de fumée, de monoxyde de carbone et le degré de la température. et permet de donner des signaux :
  - 1- analogiques : permet d'afficher le résultat des tests de mesure de fumée, monoxyde de carbone et la température sur un écran d'affichage « ordinateurs ».
  - 2- digitales : permet de donner des signaux lumineux et sonores.
- Faire des tests à partir de ce système et ça nous a permis de :
  - 1- identifier la pollution et surveiller la qualité de l'air.
  - 2- Les témoins lumineux et sonores aident à alerter la personne exposée au danger.

# Bibliographie

## Bibliographie

- Arduino Mega 2560 Rev3*. (s.d.). Récupéré sur store.arduino:  
<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- 2.- *METHODES ET TECHNIQUES*. (s.d.). Récupéré sur [https://web-new.univ-pau.fr/RECHERCHE/SET/Auteurs/Deletraz/E\\_Art\\_3.PDF](https://web-new.univ-pau.fr/RECHERCHE/SET/Auteurs/Deletraz/E_Art_3.PDF).
- ARDUINO PASSION*. (2016). Récupéré sur <https://pecquery.wixsite.com/>:  
<https://pecquery.wixsite.com/arduino-passion/le-buzzer>
- Baillieul, M. (2019, 03 11). *Capteurs infrarouges de polluants aquatiques: synthèse, optimisation et qualification*. Récupéré sur Hal.archives-ouvertes.fr: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02063341/document>
- Baudet, E. (2015, 11 26). *Micro-capteurs optiques fonctionnant dans l'infrarouge pour la détection de polluants émergents en eaux souterraines et marines*. Récupéré sur hal.archives-ouvertes.fr: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01234254/document>
- BAYOULI, I. (2016, 08 16). *PPLICATION DE LA SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X À L'ANALYSE IN SITU DES MÉTAUX DANS LES SOLS CONTAMINÉS*. Récupéré sur espace ets mémoire et thèse: [https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1761/1/BAYOULI\\_Imen.pdf](https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1761/1/BAYOULI_Imen.pdf)
- Chapitre 1 : Techniques de prélèvement et Méthodes d'analyse de la pollution intérieure*. (s.d.). Récupéré sur [dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1019/4/Chapitre1-BoudaoudChahrazed.pdf](https://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1019/4/Chapitre1-BoudaoudChahrazed.pdf).
- Chromatographe en phase gazeuse - Laboratoire*. (s.d.). Récupéré sur [www.lpc-expert.fr/instrumentation/27-chromatographe-en-phase-gazeuse](http://www.lpc-expert.fr/instrumentation/27-chromatographe-en-phase-gazeuse).
- Chromatographie en phase liquide à haute performance*. (s.d.). Récupéré sur wikipédia:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Chromatographie\\_en\\_phase\\_liquide\\_%C3%A0\\_haute\\_performance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chromatographie_en_phase_liquide_%C3%A0_haute_performance)
- Clémentine Des femmes. (2012, 03 4). *L'agriculture biologique, une solution à la pollution de l'eau*. Récupéré sur gerbeaud: <https://www.gerbeaud.com/nature-environnement/agriculture-biologique-solution-pollution-eau.php>
- Cours Pollution & Nuisances – LFSNA3*. (s.d.). Récupéré sur Cours Pollution & Nuisances – LFSNA3:  
<http://www.fsg.rnu.tn/imgsite/cours/cours%20pollution%20et%20nuisance%20chapitre%20III.pdf>
- définition de pollution*. (s.d.). Récupéré sur wikipédia:  
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution#:~:text=La%20pollution%20est%20la%20destruction,le%20fonctionnement%20de%20cet%20%C3%A9cosyst%C3%A8me>.
- Détection en temps réel des polluants - Risques - INRS*. (s.d.). Récupéré sur [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr).
- Directives concernant les limites de détection ICP-OES et ICP-MS*. (s.d.). Récupéré sur eurofins:  
<https://eag.com/fr/resources/appnotes/icp-oes-and-icp-ms-detection-limit-guidance/>
- DJELAD-KADDOUR, D. (s.d.). *Pollutions Air – Eau – Sol - Télé-enseignement*. Récupéré sur <http://elearn.univ-oran1.dz/course/overviewfiles>:

file:///C:/Users/user/Documents/Downloads/cours%20pollutions%202020%20Dr%20Djela d%20(4).pdf

Dulex, F. G.-P. (2018, 02). *Arduino à l'école*. Récupéré sur [Arduinocours.fr](http://Arduinocours.fr):

[http://arduino.education/wp-content/uploads/2018/01/Arduino\\_cours.pdf](http://arduino.education/wp-content/uploads/2018/01/Arduino_cours.pdf)

*Eau et société/Santé humaine et pollution de l'eau*. (s.d.). Récupéré sur les capsules du G3E:

[https://www.g3e-ewag.ca/ressources- interactives/capsules/eau\\_societe/sante\\_pollution\\_eau.html](https://www.g3e-ewag.ca/ressources- interactives/capsules/eau_societe/sante_pollution_eau.html)

Economopoulos, A. P. (s.d.). *EVALUATION RAPIDE DES SOURCES DE POLLUTION DE L'AIR, DE L'EAU AT DU SOL*. Récupéré sur [researchgate](https://researchgate.net/publication/261047931_EVALUATION_RAPIDE_DES_SOURCES_DE_POLLUTION_DE_L%27AIR_DE_L%27EAU_AT_DU_SOL):

[https://www.researchgate.net/publication/261047931\\_EVALUATION\\_RAPIDE\\_DES\\_SOURCES\\_DE\\_POLLUTION\\_DE\\_L%27AIR\\_DE\\_L%27EAU\\_AT\\_DU\\_SOL](https://www.researchgate.net/publication/261047931_EVALUATION_RAPIDE_DES_SOURCES_DE_POLLUTION_DE_L%27AIR_DE_L%27EAU_AT_DU_SOL)

Fabrégat, S. (09 juillet 2010, juillet 09). Récupéré sur [actu environnement.com](https://www.actu-environnement.com/ae/news/pollution-naturelle-eaux-sols-aquatrain-10649.php4): <https://www.actu-environnement.com/ae/news/pollution-naturelle-eaux-sols-aquatrain-10649.php4>

Faye, C. B. (2006, 08 07 ). *Détection des polluants métalliques particuliers dans les liquides par la spectroscopie de plasma induit par laser*. Récupéré sur [hal.archives-ouvertes.fr](http://hal.archives-ouvertes.fr):

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01073923/>

Faye, C. B. (2014, 10 10). *Détection des polluants métalliques particuliers dans les liquides par la spectroscopie de plasma induit par laser*. Récupéré sur [Hal.archives-ouvertes.fr](http://Hal.archives-ouvertes.fr):

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01073923/document>

Guillaume Pépin, J. B. (s.d.). *TECHNIQUES IMMUNO-ENZYMATIQUES APPLIQUÉES A LANALYSE DES SOLS POLLUÉS*. Récupéré sur [TECHNIQUES IMMUNO-ENZYMATIQUES APPLIQUÉES A LANALYSE DES SOLS POLLUÉS](http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/814/dst_1997_8_15.pdf): [http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-](http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/814/dst_1997_8_15.pdf)

[techniques/docannexe/file/814/dst\\_1997\\_8\\_15.pdf](http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/814/dst_1997_8_15.pdf)

HDR, K. K. (s.d.). *Chapitre V Pollution de l'environnement*. Récupéré sur [Chap 5 La pollution du sol.pdf](https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2019/Chap%205%20La%20pollution%20du%20sol.pdf):

<https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2019/Chap%205%20La%20pollution%20du%20sol.pdf>

HEBBAR, D. C. (2019). *partie1 de coure protection de l'environnement* . oran , essenia, Algérie.

HINAULT, X. (2010). *La carte Arduino Mega 2560*. Récupéré sur Référence Arduino français:

[http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki\\_reference\\_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielMega2560](http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielMega2560)

IHIAWAKRIM, D. (2019, 04 02). *Étude par les techniques avancées de microscopie électronique en transmission de matériaux fragiles*. Récupéré sur [Hal.archives-ouvertes.fr](http://Hal.archives-ouvertes.fr): [https://tel.archives-](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02464449/document)

[ouvertes.fr/tel-02464449/document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02464449/document)

Kaoutar, G. (22/10/2020). *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER : Conception et développement d'une nouvelle partie sensible d'un biocapteur basée sur un biomatériau composite pour la détection de divers polluants dans une phase liquide*. Jijel: Université de Jijel / Faculté des Sciences et de la Technologie / Département de Génie des procédés.

Koller, E. (juin 2009). *Traitement des pollutions industrielles - 2ème édition*.

*La chromatographie ionique.* (s.d.). Récupéré sur INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS:  
<https://www.ipgp.fr/fr/chromatographie-ionique>

*la rousse.* (s.d.).

Latifa, M. H.-B. (s.d.). *Mémoire sur Pollution engendrée par les poussières agro-alimentaires - risque spécifique dans les minoteries et les semouleries –étude de l'explosion des poussières, mesures de prévention et mise en place de la protection-cas de BLAYE.* amphy 2 intitulé de maintenance et sécurité industrielle , oran, esenia, Algérie .

Le Pôle de compétence sites et sédiments pollués. (s.d.). *Connaître et maîtriser les risques liés à l'environnement.* Récupéré sur oree: <http://risquesenvironnementaux-collectivites.oree.org/le-guide/risques-mon-territoire/sante-environnement/pollution-du-sol.html>

Lecomte, V. (s.d.). *POLLUANTS ET MICROPOLLUANTS : DÉFINITIONS ET CLASSIFICATION.* Récupéré sur ecotoxicologie.fr: <https://ecotoxicologie.fr/classes-polluants>

*Mesurer une température avec un capteur LM35 et une carte Arduino / Genuino.* (2016). Récupéré sur carnetdumaker.fr: <https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-temperature-avec-un-capteur-lm35-et-une-carte-arduino-genuino/>

MOTTO-ROS, J. Y. (s.d.). *Spectroscopie du plasma induit par laser pour l'analyse de matière organique.* Récupéré sur détection de pollution :  
<https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2013/01/photon201363p38.pdf>

N. Ghellai, A. B.-E. (2011, 01 15). *photonique* . Récupéré sur edp sciences :  
<https://www.photoniques.com/articles/photon/abs/2011/01/photon201151p22/photon201151p22.html>

*outils et méthodes physiques et chimiques pour la détection des polluants dans le sol .* (s.d.). Récupéré sur RR-40231-FR.pdf: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-40231-FR.pdf>

Physique-chimie, N. p. (s.d.). *programmer en langage arduino.* Récupéré sur prise\_en\_main\_carte\_arduino\_langage\_arduino.fr: [http://ww2.ac-poitiers.fr/sc\\_phys/sites/sc\\_phys/IMG/pdf/prise\\_en\\_main\\_carte\\_arduino\\_langage\\_arduino.pdf](http://ww2.ac-poitiers.fr/sc_phys/sites/sc_phys/IMG/pdf/prise_en_main_carte_arduino_langage_arduino.pdf)

*pollution de l'air.* (s.d.). Récupéré sur wikipédia:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution#Pollution\\_de\\_l'air](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution#Pollution_de_l'air)

*pollution d'eau.* (s.d.). Récupéré sur wikipédia:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution#Pollution\\_de\\_l'air](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution#Pollution_de_l'air)

*Pollution des sols : définition, causes et conséquences.* (s.d.). Récupéré sur coservation nature:  
<https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-pollution-des-sols/>

*Pollution des sols.* (2021, 06 26). Récupéré sur wikipédia:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution\\_des\\_sols](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_des_sols)

*pollution marine* . (s.d.). Récupéré sur wikipédia: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution\\_marine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_marine)

- R.Jeannot, B. S. (s.d.). *guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués*. Récupéré sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50128-FR.pdf>
- Riadh, Z. M.-N. (2018). *CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE D'UNE HABITATION*. Récupéré sur PROJET DE FIN D'ETUDE: [https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/6260/ZerroukiMohamedAmine\\_NesnasRiadh.pdf](https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/6260/ZerroukiMohamedAmine_NesnasRiadh.pdf)
- Spectromètre à fluorescence X (pXRF)*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.captiven.fr/>: [http://www.captiven.fr/sites/default/files/BRGM\\_pXRF-OK.pdf](http://www.captiven.fr/sites/default/files/BRGM_pXRF-OK.pdf)
- techniques d'ingénieur*. (s.d.).
- Thirion-Merle, V. (2016, 11 08). *spectrométrie de fluorescence x*. Récupéré sur [hal archives-ouvertes.fr](http://hal.archives-ouvertes.fr/): <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393984/document>
- Tous les catalogues et fiches techniques (PDF) ENVEA*. (s.d.). Récupéré sur [pdf.directindustry.fr/pdf/envea-23554.html](http://pdf.directindustry.fr/pdf/envea-23554.html).
- Valérie LAPERCHE, D. H. (2014, 11). *OUTILS DE MESURE SUR SITE :QUEL BESOIN ET QUELLES MESURES POUR QUELLE UTILISATION ?* Récupéré sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr/): <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-outils-mesures-sur-site.pdf>
- Violaine Lamoureux-Var, P. D. (s.d.). *Rock-Eval 7S: Technology and Performance*. Récupéré sur [researchgate](https://www.researchgate.net/publication/336008593_Rock-Eval_7S_Technology_and_Performance): [https://www.researchgate.net/publication/336008593\\_Rock-Eval\\_7S\\_Technology\\_and\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/336008593_Rock-Eval_7S_Technology_and_Performance)
- Zmirou D, B. d.-B. (2003). *déchets et sol polluée*. Récupéré sur <file:///C:/Users/Hichem/Desktop/sols%20pollu%C3%A9%20origine.pdf>

## Les annexes

## Les annexes

### Annexe 1 : iso 14238

L'ISO 14238:2012 spécifie des modes opératoires de laboratoire destinés à mesurer la minéralisation de l'azote et la nitrification par la flore microbienne du sol.

Un mode opératoire est donné pour mesurer les taux et l'importance de la minéralisation de l'azote dans le ou les sol(s) de qualité connue ou inconnue, dans le cadre des recherches relatives à l'évaluation de la qualité du sol ou aux effets de la contamination.

Un mode opératoire simple est donné pour permettre l'évaluation de l'effet de produits chimiques uniques et fournit une base de comparaison des toxicités de différents produits chimiques, en ce qui concerne la recherche de la toxicité éventuelle des produits chimiques pour la minéralisation de l'azote dans les sols.

### Annexe 2 : iso 14240-1

La présente partie de l'ISO 14240-1 prescrit une méthode pour l'estimation de la biomasse microbienne aérobie hétérotrophe active dans les sols agricoles et minéraux aérés.

**Annexe 3 :** Synthèse et méthodes de référence utilisées pour les analyses des sols en provenance de site potentiellement pollué.

Eléments et composés analysés	Référence des méthodes ISO/AFNOR	Principe des méthodes	Limites de quantification
PH	ISO 10390(X31-117)	Suspension du sol dans l'eau et mesure du PH de l'extrait par potentiel-métrie.	////
Carbone total	ISO 10694(X31-409)	Combustion sèche en courant d'oxygène et analyse du CO <sub>2</sub> par détection infrarouge.	0.05 0.01
Carbone organique	ISO 10694(X31-409)	Combustion sèche en courant d'oxygène et analyse du CO <sub>2</sub> par détection infrarouge après décarbonatation.	
Carbone organique	NF X31-109	Oxydation sulfochromique et analyse par spectrophotométrie	0.01
Carbone organique	NF X31-419	Oxydation sulfochromique et analyse par spectrophotométrie	0.01
Azote total (kjeldalh modifiée)	ISO 111261(X31-111)	Minéralisation en milieu acide sulfurique avec le dioxyde de titane, suivie d'une détermination quantitative de l'ammoniac par titrimétrie.	0.01
Phosphore soluble	ISO 11263 (X31-403)	Solubilisation des formes phosphorées dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium et dosage final de la solution par spectrophotométrie	0.01
fluorures	NF X31-148	Mise en solution du fluor par fusion alcaline et analyse du	50mg/kg

		fluor total par électrode spécifique	
Soufre total	ISO/DIS 15178	Combustion sèche et dosage du dioxyde de soufre par détection infrarouge	0.01
sulfates	ISO 11048	Solubilisation en milieu acide chlorhydrique et analyse par méthode gravimétrique	0.05
Teneur pondérale en matière sèche et en eau	ISO 11465 (X31-102)	Perte de masse à 105 °C	////
Métaux par attaque acide	NF X31-151	Attaque du sol à l'eau régale ou avec un mélange acide fluorhydrique/perchlorique et analyse des métaux dans la solution d'attaque par spectrométrie d'absorption atomique	1-10 mg/kg selon les éléments
Métaux traces solubles dan eau régale	ISO 11466 (NF X31-415)	Attaque du sol à l'eau régale et analyse des métaux dans la solution d'attaque par spectrométrie d'absorption atomique	1-10 mg/kg selon les éléments
Métaux : mise en solution totale	NF X 31-147	Attaque du sol par un mélange acide fluorhydrique/perchlorique et analyse des métaux dans La solution d'attaque par spectrométrie absorption atomique	1-10 mg/kg selon les éléments
Cyanures totaux	NF X 31-407	Décomposition des cyanures complexes en milieu acide sulfurique et analyse des cyanures sous forme libre par spectrophotométrie	0.1mg/kg
Indice phénol	FD X 31-144	Extraction des phénols à l'eau distillation et analyse par spectrométrie	0.2mg/kg
Hydrocarbures aromatiques volatils et hydro halogénés volatils	NF X31-426	Espace de tête dynamique et chromatographie en phase gazeuse.	0.01mg/kg
Pesticides et PCB	Projet ISO/DIS 10382	Extraction éther de pétrole/acétone et analyse par CPG avec détecteur à capture d'électrons	1-10 mg/kg selon les éléments
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	ISO 13877	Extraction par toluène ou acétone et analyse par HPLC/UV et fluorescence	0.1mg/kg

Huiles minérales	NF X31-410	Extraction des hydrocarbures au fréon 113 - et analyse quantitative par CPG avec détecteur à ionisation de flamme ou par spectrophotométrie infrarouge	100mg/kg
------------------	------------	--	----------

#### Annexe 4 : Techniques de prélèvements

De nombreuses études consacrées à la mesure et au contrôle des concentrations de polluants dans l'air des espaces clos portent sur la répartition de ces polluants dans certains types de bâtiments, parfois en fonction de la présence de certaines sources. Si, en l'occurrence, on mesure simultanément les concentrations de polluants dans l'air extérieur et les taux d'infiltration, on peut évaluer la puissance des sources contenues dans les espaces considérés. Lorsque ces mesures s'accompagnent d'observations, ces derniers servir à l'élaboration de modèles prédictifs des concentrations de polluants de l'air dans des bâtiments similaires, ou pour confirmer la justesse des modèles prédictifs construits à partir d'autres séries de données.

On mesure les concentrations de polluants en espace clos de trois façons :

- Par prélèvements ponctuels ;
- Par prélèvements accumulés dans le temps ;
- Par une surveillance continue en temps réel.

1. **Prélèvements ponctuels** : La façon la plus simple consiste à prélever de l'air en une fois dans un récipient, ou à faire passer un volume d'air connu à travers un matériau absorbant. Les récipients, qui doivent être imperméables au gaz recherché, peuvent se présenter sous la forme de bouteilles en matière plastique, de sachets en Mylon ou en Tedlar, ou de tubes de verre remplis d'absorbants.
2. **Prélèvements accumulés** : Il est postulé que les effets de beaucoup de polluants, y compris ceux de la masse totale des particules en suspension et ceux du radon et de ses descendants, sont proportionnels aux concentrations moyennes de ces polluants sur une longue période, et on préfère dans leur cas des techniques de mesure qui permettent de connaître aussi leur concentration accumulée avec le temps. Le plus souvent, on mesure la concentration moyenne, sur 24 heures ou davantage, des particules en suspension recueillies sur un papier filtrent à travers lequel on a fait passer une quantité d'air connue.
3. **Surveillance continue en temps réel** : Les mesures en temps réel sont possibles grâce aux appareils d'analyse en continu qui peuvent déterminer, de façon spécifique, la présence d'un ou plusieurs polluants déterminés. De tels appareils existent, entre autres, pour SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> [NO et

NO<sub>2</sub>], O<sub>3</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, particules en suspension PM<sub>10</sub> (leur dimension entre 0.1 à 10µm) et PM<sub>2,5</sub> (leur dimension entre 0.1 à 2.5µm), etc. ... . La détection, dans les appareils, est basée sur une propriété physico-chimique du polluant. Les appareils d'analyse aspirent, en continu, l'air à travers une chambre de réaction et délivrent en permanence un signal de mesure représentatif de la concentration instantanée. Cependant certains appareils ne donnent qu'une valeur moyenne pour une durée minimale de quelques minutes. Dans la plage de mesure de l'appareil, le signal de mesure varie de façon linéaire avec la concentration présentée. Ce système offre des avantages évidents lorsque les concentrations de crête sont élevées, ou bien lorsque la puissance des sources ou les taux d'infiltration varient dans le temps, mais s'assortit aussi de nombreux inconvénients. Le matériel consomme beaucoup d'énergie électrique, il est encombrant et coûteux, et il exige de nombreuses manipulations. Comme la surveillance continue exige de la compétence et du soin, qu'elle est encombrante et coûteuse, elle ne sert en général qu'à la recherche.

## **Annexe 5 : la pollution sonore (bruit)**

### **1- DEFINITION DU BRUIT :**

Le bruit est un son [vibration de l'air], continu ou non, particulièrement désagréable et gênant à entendre. Le bruit, caractérisé par son intensité et sa fréquence, peut avoir des conséquences physiques et psychiques graves sur les personnes. Ces nuisances sonores peuvent être la cause de certaines perturbations de l'organisme comme le stress, des troubles du sommeil ou une baisse de l'ouïe.

La perception du bruit varie d'un individu à l'autre [un bruit peut être agréable pour certaines personnes mais désagréable pour d'autres]. Nous ne sommes donc pas tous égaux face au bruit.

### **2- CARACTERISTIQUES DU BRUIT**

Un bruit se définit selon différents paramètres :

- **Sa fréquence** : s'exprime en « hertz – Hz » et correspond à la hauteur de ce bruit [sons graves, sons médiums ou sons aigus].

- **Son niveau d'intensité** : s'exprime en « décibels - dB » et correspond à la quantité de bruit [niveaux faibles ou niveaux élevés].

- **La durée d'exposition** du salarié correspond à une journée de travail habituelle d'environ 8h.

**Note** : On mesure physiquement le niveau du bruit en décibels. Pour prendre en compte le niveau réellement perçu par l'oreille, on utilise un décibel dit « physiologique » appelé **décibel A**, dont l'abréviation est dB(A). Dans les niveaux très élevés, l'oreille humaine ne filtre pas les bruits de la même manière. On prend en compte cet effet en utilisant comme unité le **décibel C**, noté dB(C).

Les décibels ne s'additionnent pas comme n'importe quels nombres.

### 3- NIVEAUX DE BRUIT

Les niveaux de bruit correspondent à la quantité de bruit que va recevoir un salarié, à son poste de travail.



Le schéma ci-dessus illustre très bien les niveaux de bruit que l'on peut rencontrer dans notre vie quotidienne.

Selon l'INRS, « être exposé 8 heures à 80 dB(A) est aussi dangereux que d'être exposé 1 heure à 89 dB(A).

Niveau sonore en dB(A)	Durée d'exposition maximale
80	8 heures
83	4 heures
86	2 heures
89	1 heures
92	30 minutes
95	15 minutes
98	7,5 minutes

### 4- LES EFFETS DU BRUIT :

#### 4-1 les troubles auditifs :

Nous allons rencontrer plusieurs types de dommages pouvant être causés directement par le bruit.

- Le traumatisme de l'audition
- La perte de l'audition de manière temporaire < 85 dB (A)
- La perte de l'audition de manière définitive > 8 dB (A)

#### 4-2 les troubles non auditifs.

**5- Les moyens d'identification de la pollution sonore :**

L'appareille	Photo
Le sonomètre	
Le dosimètre	
Le sonomètre intégrateur	
Le sonomètre à impulsions	