

جامعة وهران 2

محمد بن احمد  
Université d'Oran 2  
Mohamed Ben Ahmed



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد

Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Polycopié de cours

**Analyse physico-chimiques  
Et thermiques de traitement  
de l'environnement**

**Auteur: Dr. AOUMEUR Nabila**

**1<sup>ère</sup> année Master Sécurité Industrielle et Environnement**

**2022/2023**

# Avant-propos

Le contenu de cette matière permet à l'étudiant de s'imprégner des méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques des différents compartiments dans le contexte de l'évaluation, de la surveillance de la qualité et de la protection de l'environnement.

L'objectif de ce document est de prendre connaissance des notions de base en biologie, chimie et en environnement. Connaître des techniques physiques, des traitements thermiques et des procédés chimiques pour l'analyse de l'environnement, Étude détaillée de quelques procédés.

Ce travail est destiné aux étudiants de première année Master "Sécurité Industrielle et Environnement". Le manuscrit contient six chapitres :

**Chapitre 1.** Sciences des procédés de traitement de l'air

**Chapitre 2.** Traitement des fumées : dépoussiérage, lavage et procédé secs et semi-humides

**Chapitre 3.** Sciences des procédés de traitement de l'eau : Paramètres de la qualité des eaux :

**Chapitre 4** Sciences des procédés de traitement des sols : Les sols pollués

**Chapitre 5** Traitement biologiques des sols : les diagnostics, les études détaillées et simplifiées des risques, les processus d'atténuation naturelle

**Chapitre 6 :** Autres procédés de traitement : techniques physiques, traitement thermiques, procédés chimiques.

## Liste des abréviations

°C : degrés Celsius

ADN : Acide désoxyribonucléique

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Atm : atmosphère

AE : Aspect environnemental

Ar : Argon

AVC : Accident vasculaire cérébral

AEP : Alimentation en Eau Potable.

Bar : Barre.

CS<sub>2</sub> : sulfure de carbone

Ca: Calcium

Cl<sup>-</sup> : Chlorures

CO<sub>2</sub>; CO<sub>x</sub> : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

**CMR** : Cancérigène mutagène reprotoxique

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DENOX: D'élimination des oxydes d'azote

*E. coli: Escherichia coli*

EC : Escherichia coli.

EPE : Entreprise Publique de L'eau.

Fe<sup>2+</sup> : Les ions ferreux

IE : Impact environnemental

g/cm<sup>3</sup> : Gramme par centimètre cube

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

H<sub>2</sub>O : Vapeur d'eau

H<sup>+</sup> : Le cation hydrogène

He : Hélium

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : Bicarbonate

K: Potassium

Kg : Kilogramme kJ/mol : Joule par mole L : litre

MES : Les matières en suspension MES : Matières En Suspensions

MSF : Multi stage flash distillation

mg/l : Milligramme par litre

MTH : Maladie à transmission hydrique

Ne : Néon

NH<sub>3</sub> : Ammoniac

N<sub>2</sub> : Azote

NO<sub>x</sub> : Oxydes d'azote

NA : Normes Algériennes

Na<sup>+</sup>: Sodium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Ammonium

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrite

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrate

O<sub>2</sub> : Oxygène

O<sub>3</sub> : Ozone

OH° : radicaux d'hydroxyles

OH : hydroxyle

OMS : Organisation Mondiale de la Santé ONU : organisation des nations unis

OPU : Opération unitaire d'un procédé.

Pa : Pascale .

PPmv: part per *milli volt*.

*PM10* et *PM2,5*: Matières de particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  et 2,5  $\mu\text{m}$

pH : potentiel Hydrogène.

UFC : Unité Formant Colonie.

VMC : Ventilation mécaniquement contrôlée

<b>Liste des figures</b>	
<b>Figure I.1</b> Les couches de l'atmosphère.	3
<b>Figure I.2.</b> Les effets de la pollution sur l'environnement.	10
<b>Figure I.3 :</b> Centrale de traitement d'air.	11
<b>Figure II.1 :</b> Procédé humide (source : de MR Julien Bertholon)	20
<b>Figure II.2.</b> Procédé semi-humide (source : de MR Julien Bertholon).	20
<b>Figure II.3.</b> Procédé semi-sec.	21
<b>Figure II.4.</b> Procédé sec.	21
<b>Figure II.5.</b> Sao Paulo noyé dans le smog.	24
<b>Figure II.6.</b> Relatif à la pénétration des particules dans l'organisme.	26
<b>Figure III.1.</b> Station d'épuration des eaux usées ( <i>assainissement collectif</i> ).	28
<b>Figure III.2.</b> Prétraitement des eaux usées en tête de station d'épuration.	30
<b>Figure III. 3 :</b> le principe du processus de flottation par air.	31
<b>Figure III.4.</b> Désaliénation l'eau de la mer.	34
<b>Figure III.5.</b> Schéma de dessalement.	35
<b>Figure III. 6.</b> Schéma d'une distillation fractionnée	36
<b>Figure III.7.</b> Schéma simple du plan MSF.	37
<b>Figure III.8.</b> Schéma multiples du plan MSF.	38
<b>Figure III.9.</b> Osmose inverse.	39
<b>Figure IV.1 :</b> Les conséquences possibles sur la santé	45
<b>Figure VI.1 :</b> Les différents types de contacteurs gaz/liquide.	62
<b>Figure VI.2.</b> Pilote de l'absorption dans laboratoire USTO, MB.	64
<b>Figure VI.3.</b> Schéma d'une colonne d'absorption avec régénération de solvant.	65
<b>Figure VI.4.</b> Schéma détaillé de l'absorption.	65
<b>Figure VI.5.</b> Divers modes de circulation des courants dans une opération de séparation	68

<b>Figure VI.6.</b> : Colonne d'absorption dans l'industrie.	73
<b>Figure VI.7.</b> Schéma d'une colonne a plateaux a courant croisé.	74
<b>Figure VI.8.</b> Schéma des colonnes a garnissage a contre-courant et a co-courant.	75
<b>Figure VI.9.</b> Colonne d'absorption a garnissage	77
<b>Figure VI.10.</b> Schéma d'une colonne d'absorption a garnissage	77

<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Tableau I.1</b> : Composition chimique de l'atmosphère	4
<b>Tableau I.2</b> : Composition de l'air.	5
<b>Tableau V.1</b> : Techniques biologiques de dépollution des sols retenues par l'ADEME dans le cadre de cette.	52
<b>Tableau IV.1</b> : Tableau de quelque colonnes et leur usage.	73



# Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I. CHAPITRE I : Sciences des procédés de traitement de l'air.....</b>	<b>2</b>
I.1 Introduction .....	2
I.2 Définitions.....	2
I.2.1 Couches de l'atmosphère.....	3
I.2.2 Composition chimique de l'atmosphère .....	4
I.3 Les polluants atmosphériques et les émissions industrielles.....	7
I.3.1 Les sources de la pollution atmosphérique .....	7
I.3.1.1 Pollution d'origine naturelle.....	7
I.3.1.2 Pollution d'origine anthropique .....	8
I.4 Les effets de la pollution de l'air .....	9
I.5 Différents paramètre de l'air .....	10
I.6 Les moyens techniques .....	11
I.6.1VMC :Ventilation mécaniquement contrôlée .....	11
I.6.1.1 Centrale de traitement d'air.....	11
I.6.2 La filtration : .....	13
I.6.2.1 Les différents filtations .....	13
I.7. Contrôle d'environnement .....	14
I.7.1 Contrôle particulière .....	14
I.8 Comment lutter contre la pollution d'air.....	15
I.9 Conclusion.....	16
Réfernces .....	17

**II. CHAPITRE II : Traitement des fumées : dépoussiérage, lavage et procédé secs et semi-humides.....  
...18**

II.1	Définition :	18
II.1.2.	Composition	18
II.2.	Les gaz.....	17
II.2.1	Définition :	18
II.2.2	Unité de mesure	18
II.3	Les techniques de traitement de fumées	19
II.3.1	Séparation des particules :	19
II.4	Neutralisation des gaz:	19
II.4.1	Procédé humide.....	19
II.4.2	Procédé semi humide :	20
II.4.3	Procédé semi sec :	21
II.4.4	Procédé sec.....	21
II.5	Poussière et particules.....	22
II.6	Les polluants gazeux :	22
II.7	Principaux polluants atmosphériques et leurs sources.....	23
II.8	Le Smog:	24
II.8.1	Définitions.....	24
II.9	Les impacts des COV sur l'environnement	24
II.10	Conclusion	27
	Références.....	27

**III. Chapitre 3 : Sciences des procédés de traitement de l'eau ..... 28**

III.1	Introduction.....	28
	-Partie A)	

III.2 Les traitements des eaux usées urbaines et leur finalité.....	29
III.2.1 Le traitement physico-chimique (sens large).....	29
III.2.2 Le traitement biologique .....	31
III.2.3 Le traitement tertiaire .....	32
-Partie B)	
III.3 Les principales technologies de dessalement des eaux .....	34
III.3.1 Définition du dessalement.....	34
III.4 La distillation .....	36
III.4.1 Principe .....	36
III.4.2 Montage .....	36
III.4.3 Exemple d'application .....	37
III.5 Conclusion .....	40
Références.....	40
IVChapitre 4: Sciences des procédés de traitement des sols : Les sols pollués.....	41
IV.1 Introduction.....	41
IV.1.2 Qu'est ce qu'un sol contaminé ? .....	41
IV.1.3 Types de polluants des sols .....	41
IV.2 Les procédés de traitement des sols :.....	42
IV.2.1 Les traitements biologiques.....	42
IV.3 Les procédés chimiques .....	43
IV.4 Les traitements thermiques.....	43
IV.5 Conséquence .....	43
IV.5.1 Les conséquences possibles sur la santé .....	44
IV.6 Les activités humaines principales responsables.....	45
IV.7 Conclusion .....	45
Références.....	46

<b>V Chapitre 5: Traitement biologiques des sols : les diagnostics, les études détaillées et simplifiées des risques, les processus d'atténuation naturelle.....</b>	<b>47</b>
V.1 Introduction .....	47
V.2 Les sols : sites d'industrie lourde.....	48
V.2.1 Les polluants : organiques et minéraux .....	48
V.2.2 Les techniques biologiques: .....	49
V.3 Les techniques biologiques innovantes .....	51
V.4 Diagnostic pollution sol, récapitulatif des réglementations .....	52
V.4.1 La réglementation relative aux plans de prévention, à la méthodologie d'évaluation et d'appréciation du risque.....	53
V.4.2 Réglementation relative à la notion de responsabilité, au principe pollueur-payeur, à la cessation d'activités et à la réhabilitation .....	56
V.4.3 Réglementation relative à la gestion de l'utilisation des sols .....	57
V.5 Conclusion .....	57
Références.....	58
<b>VI Chapitre 6: Autres procédés de traitement : traitement thermiques, procédés chimiques.....</b>	<b>59</b>
VI.1 Introduction.....	59
VI.1.1 Définition.....	60
VI.2 Les principales opérations unitaires .....	61
VI.2.1 Extraction liquide / liquide : séparation de liquides miscibles: .....	61
VI.3 Colonnes de séparation .....	62
VI.4 Qu'est ce qu'un bilan de matière .....	63
VI.5 Absorption-Désorption .....	63
VI.5.1 Introduction.....	63
VI.5.2 Les termes de phénomène d'absorption .....	64
VI.5.3 Description détaillé sur le procédé étudié.....	65

VI.5.4 Formulation théorique de l'équilibre liquide-gaz .....	68
VI.5.5 Méthode d'absorption.....	69
VI.6 Les Colonnes .....	72
VI.6.1 Description d'une colonne .....	72
VI.6.2 Les colonnes à plateaux .....	74
VI.6.3 Les colonnes à garnissage .....	75
VI.6.3.1 Description et principe de fonctionnement .....	75
VI.6.3.2 Caractéristiques de fonctionnement.....	76
VI.6.3.3 Domaine d'application.....	76
Références.....	77
<b>Des exercices .....</b>	<b>79</b>

## Introduction générale

L'appréciation de la qualité de *l'eau, sol* et *air* se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques, ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques ou terrestres, *indicateurs* d'une plus ou moins bonne qualité de l'environnement.

- Aspect environnemental (AE) : élément des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement.
- Impact environnemental (IE) : toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme.

La protection et la préservation de l'environnement sont l'un des piliers du développement durable, qui constitue actuellement un enjeu majeur pour l'avenir de l'homme et de la planète. Actuellement, l'humanité se trouve devant une croissance alarmante de la pollution du milieu naturel par des matières organiques ou inorganiques diverses : des pesticides, des détergents, des métaux lourds, et autres substances toxiques.

Les chercheurs scientifiques de différentes disciplines (chimie, géologie, agronomie, physiologie végétale, médecine, ...) s'intéressent de plus en plus à l'identification et à l'élimination des éléments polluants impliqués directement dans l'apparition de déséquilibres au niveau des écosystèmes. Pour réduire l'impact de cette pollution plusieurs méthodes ont été utilisées. La prévention de la pollution repose sur les aspects suivants: • aspect réglementaire qui consiste à fixer des normes, • aspect scientifique et technologique qui correspond à l'amélioration des procédés de dépollution.

Plusieurs techniques ont été employées pour l'élimination des polluants des effluents industriels. L'absorption est un procédé de transfert de matière d'un composé présent dans une phase gazeuse vers une phase liquide par dissolution. L'opération inverse de transfert d'un gaz dissous par un gaz inerte est appelée désorption.

### I.1. Introduction

L'air demeure un élément fondamental et indispensable pour les êtres vivants. Ainsi, chaque jour, nous inspirons environ 20m<sup>3</sup> d'air. Celui-ci est composé de 99% de deux gaz (azote 78%, oxygène 21%), le dernier pourcentage étant un mélange d'une multitude de substances très diverses (gaz carbonique, gaz rares, composés organiques...). La présence et la concentration de ces derniers sont telles que la vie est possible, ce qui reste pour l'instant un cas unique dans l'ensemble des planètes connues.

Cette monographie a pour objectif de synthétiser toutes les connaissances acquises sur la pollution atmosphérique qui ont été développées par plusieurs auteurs en expliquant d'une manière générale le phénomène de la pollution de l'air.

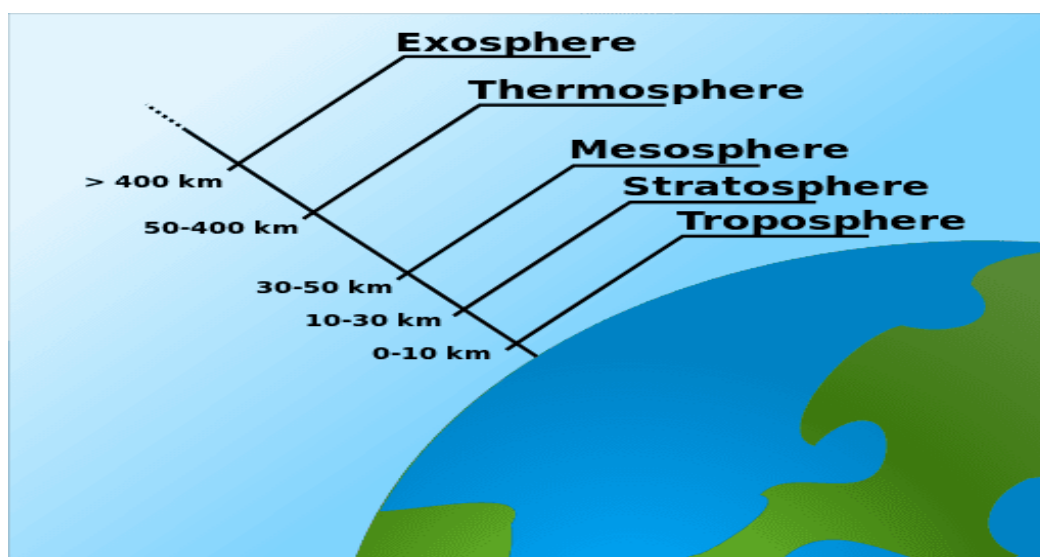
Le traitement de l'air qu'on appelle aussi purification de l'air regroupe l'ensemble des procédés et technologies permettant d'obtenir de l'air purifié et assaini des émanations chimiques toxiques de l'air, de la pollution atmosphérique, des particules volatiles intérieures nocives et des odeurs. Le traitement de l'air concerne aussi bien la pollution atmosphérique que la pollution domestique.

### I.2. Définitions

**L'atmosphère** est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleue foncée sur l'horizon. L'atmosphère est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre. Elle s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais elle est confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre.

**La pollution atmosphérique** est une altération de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique ou écotoxique.

## I.2.1. couches de l'atmosphère



**Figure I.1.** Les couches de l'atmosphère.

**A) Troposphère :** La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. Son épaisseur est variable: 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres, selon les saisons, dans la zone tempérée. L'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface réchauffe cette couche d'air.

**B) Stratosphère :** La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant.

**C) Mésosphère :** La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  à une altitude d'environ 80 km. (Zone de transition entre la Terre et l'espace).

**D) Thermosphère :** La couche la plus haute est la thermosphère. Dans cette couche se trouve la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes. La température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. avec l'altitude entre  $300^{\circ}\text{C}$  et  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



## I.2.2. Composition chimique de l'atmosphère

Tableau I.1 : Composition chimique de l'atmosphère.

Constituants	Symboles	Concentrations
<i>Azote</i>	N <sub>2</sub>	78,084%
<i>Oxygène</i>	O <sub>2</sub>	20,948%
<i>Argon</i>	Ar	0,948%
<i>Vapeur d'eau</i>	H <sub>2</sub> O	0,1 à 30,000 ppmv
<i>Dioxyde de carbone</i>	CO <sub>2</sub>	370 ppmv
<i>Néon</i>	Ne	18,18ppmv
<i>Ozone</i>	O <sub>3</sub>	0,5 à 10ppmv
<i>Hélium</i>	He	5,24 ppmv
<i>Méthane</i>	CH <sub>4</sub>	1,72 ppmv

L'atmosphère terrestre 'l'air' est un mélange de gaz et de particules fines (Les particules en suspensions : Poussières, Pollens, Germes (bactéries, champignons microscopiques)). Les gaz les plus abondants sont l'azote N<sub>2</sub> à 78 % et oxygène O<sub>2</sub> à 21% (ces pourcentages sont en masse et en volume), le 1% restant constitue les gaz en traces tels que :

Argon (Ar), Néon (Ne), Hélium (He), Krypton (Kr)

Xénon (Xe), Hydrogène (H<sub>2</sub>)

Il existe aussi de la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O, les composés volatils : Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, Composés Organiques Volatils : dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, monoxyde de carbone CO, méthane CH<sub>4</sub>, l'ozone O<sub>3</sub>, les oxydes d'azote ( N<sub>2</sub>O, NO.NO<sub>2</sub>), ammoniac (NH<sub>3</sub>), formaldéhyde ( HCHO), dioxyde de soufre ( SO<sub>2</sub>), le sulfure de diméthyle (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S, sulfure de carbone (CS<sub>2</sub>), sulfure de carbone (SCO), les radicaux d'hydroxyles (OH°), le radical hydroperoxyde (HO<sub>2</sub>°), le peroxyde d'hydrogène.

Bien que l'azote soit le constituant le plus abondant de l'atmosphère, il joue un rôle relativement limité dans les processus biologiques, il sert de molécule précurseur pour la formation du  $\text{NO}_3$  nécessaire à la synthèse des acides aminés, des protéines de la chlorophylle et des acides nucléides (ADN) dans le processus végétal.

**Tableau I.2:** Composition de l'air.

<i>Krypton</i>	<b>Kr</b>	1,14ppmv
<i>Hydrogène</i>	<b>H<sub>2</sub></b>	0.5ppmv
<i>Xénon</i>	<b>Xe</b>	0.09ppmv
<i>Oxyde d'azote</i>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,33ppmv
<i>Monoxyde de carbone</i>	<b>CO</b>	110ppbv
<i>Ozone</i>	<b>O<sub>3</sub></b>	20ppbv
<i>Ammoniac</i>	<b>NH<sub>3</sub></b>	4ppbv
<i>Formaldéhyde</i>	<b>HCOH</b>	0,1 à 1 ppbv
<i>Dioxyde de soufre</i>	<b>SO<sub>2</sub></b>	1ppbv
<i>Dioxyde d'azote</i>	<b>NO<sub>2</sub></b>	1 ppbv
<i>Carbonyl de sulfide</i>	<b>COS</b>	500pptv
<i>Disulfide de carbone</i>	<b>CS<sub>2</sub></b>	1 à 300 pptv
<i>Sulfure d'hydrogène</i>	<b>H<sub>2</sub>S</b>	50pptv

<i>Oxyde d'azote</i>	<b>NO</b>	50pptv
<i>Hydroxyde radical</i>	<b>OH°</b>	0,1 à 10pptv

A des hauteurs de 10 à 50Km, la concentration de l'ozone augmente considérablement (Tableau 2).

Lorsque l'onde se propage dans un milieu fluide compressible, il est possible d'observer une variation de pression qui va alors se propager sous la forme d'une onde. L'air nous entourant étant un milieu fluide compressible, il est alors possible de ressentir ces ondes sous la forme de son que l'on perçoit grâce aux tympans. Cependant, pour qu'elle soit perceptible, il faut que la variation de pression, parce que son amplitude est faible par rapport à la pression atmosphérique, soit suffisamment rapide et répétée. Il est possible de considérer tout objet vibrant, tel qu'un instrument de musique ou encore un haut-parleur, comme étant une source sonore qui est donc, comme son nom l'indique, la source des vibrations de l'air. Ainsi, les particules observées vibrent de façon parallèle à la direction de déplacement de l'onde. Une onde sonore peut également être transmise par un solide vibrant. En effet, la vibration va se propager au sein du solide comme dans les fluides : il y aura de faibles oscillations autour de la position d'équilibre des atomes constituant le solide. La conséquence est alors une contrainte du matériau qui, équivalente à la pression dans un fluide, est très difficile à mesurer. C'est donc la rigidité du matériau qui permettra la transmission des ondes de contraintes transversales. Il peut être intéressant de noter que, la vitesse de propagation du son, également appelée célérité, varie selon différentes propriétés du milieu comme :

- La nature du milieu ;
- La température du milieu ;
- Et la pression du milieu.

### **I.3. Les polluants atmosphériques et les émissions industrielles**

La pollution atmosphérique : est une altération de la pureté de l'air, par une ou plusieurs substances ou particules présentes à des concentrations et durant des temps suffisants pour créer un effet toxique ou écotoxique.



La pollution atmosphérique d'origine anthropogénique est libérée à partir de

- ⊙ **grandes sources fixes** (industries, des installations pour la production d'électricité)
- ⊙ **petites sources fixes** (installations pour le chauffage domestique)
- ⊙ **sources mobiles** (circulation automobile)

Ces différentes sources sont liées à la production et à la consommation d'énergie, particulièrement de combustibles fossiles

#### **I.3.1. Les sources de la pollution atmosphérique**

##### **I.3.1.1. Pollution d'origine naturelle**

Les sources des dioxyde de soufre des volcan et les décompositions biologique et les feux de forêts, L'Ozone formé au niveau du sol a cause des réactions chimique avec le soleil, Les composés organiques volatils (COVs) produite par les plantes et les forets Les particules de suspension généré par les organes de poussière

### I.3.1.2. Pollution d'origine anthropique

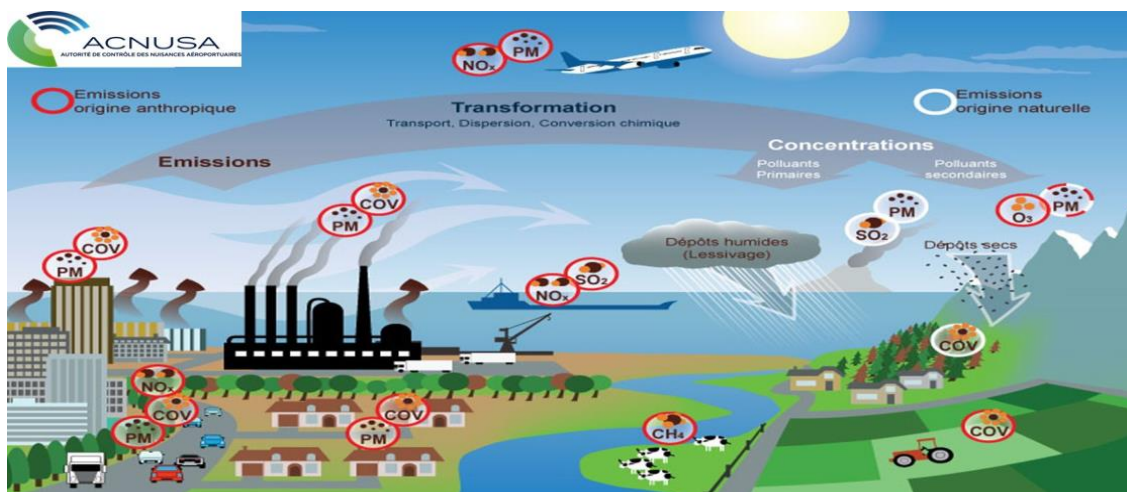
La production d'énergie thermique:

L'industrie

Les transports et l'automobile

Les déchets

Les activités agricoles



#### ➤ POLLUANTS PRIMAIRES

##### Polluants émis directement

- à partir de sources terrestres (industries, centrales électriques, voitures...)
- à partir sources présentes dans l'air (avion ...)

à partir de sources naturelles (volcans, le transport de poussière du désert,...), sont délivrés tels quels à partir de sources

- $\text{SO}_2$  (combustibles contenant soufre: charbon, gaz-oil)
- $\text{CO}$  (combustion incomplète, les véhicules à essence pendant la décélération, combustion fixes)
- $\text{CO}_2$  (qui dérive de la combustion complète)
- $\text{COV}$  (hydrocarbures)

- **les matières particulaires (PM10, PM2, 5)** (les suies de combustion, l'usure des freins, les pneus, les émissions industrielles - travail des métaux)
- **NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>)** (oxydation de N<sub>2</sub> atmosphérique dans les processus de combustion fixe et mobile)
- **HCl**
- **Micro-polluants** (métaux et hydrocarbures aromatiques)

#### ➤ **POLLUANTS SECONDAIRES**

Les substances inorganiques et organiques

- Ne sont pas émis directement à partir de sources au sol ou en altitude proviennent à partir de réactions chimiques qui ont lieu dans la partie inférieure de l'atmosphère (à la fois dans la phase gazeuse et dans phase liquide) et non pas globalement présente dans l'air.

Résultent des processus de transformation des polluants primaires à la suite de complexes mécanismes photochimiques (ensoleillement, type d'émissions)

- **O<sub>3</sub>**
- **NO<sub>2</sub> organique** fortement réactif
- **particules fines (PM10, PM2,5)**

### **I.4. Les effets de la pollution de l'air**

Les polluants peuvent agir à différents niveaux du corps humain ( voir la figure) suivante: au niveau de la peau : c'est le cas notamment des vapeurs irritantes et des phénomènes d'allergies, au niveau des muqueuses, au niveau des alvéoles pulmonaires. Au niveau de cœur .....

#### **Effets sur l'environnement : (voir la figure)**

Les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement sont visibles à différentes échelles, localement, avec des impacts sur les végétaux et les matériaux, mais également de façon planétaire pour ce qui est de l'effet de serre et du changement climatique.

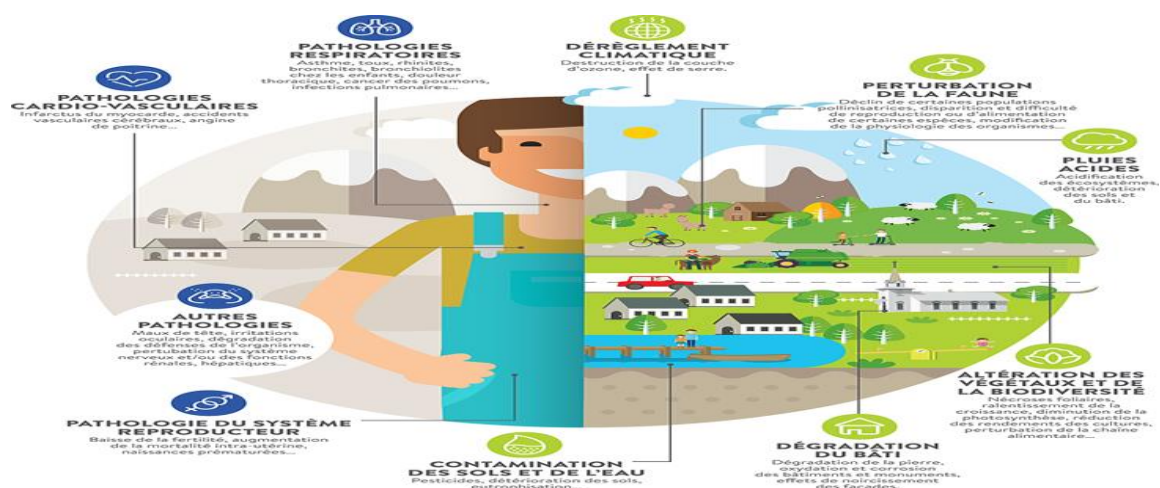


Figure I.2. Les effets de la pollution sur l'environnement.

## I.5. Différents paramètres de l'air

Traitement	effet	Parametre physique	Unité de mesures	Instruments de mesures	Moyens techniques d'obtention
Filtration	Elimination de particules	Classe d'empoussièremment	Concentration particulaire	Compteur de particules(0.5 µm et 5 µm )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtre</li> <li>• Système de renouvellement d'air</li> </ul>
	Elimination des micro-organismes	Classe bactériologique	UFC unité fomant colonie	Apparile à filtration ou impaction sur milieu gélosé	
Insufflation et/ou aspiration	Changement de pression de la pièce par rapport a la pression atmosphérique	Pression	Bar,Pa, atm,	Manomètre capteur de pression	VMC ( ventilation mécaniquement contrôlée)
	Maitrise des flux d'air	Classe d'empoussièremment et bactériologique	Concentration particulaire et UFC	-	Hotte système de soufflage
Humidifiacion	Condensation de l'eau	Hygrométrie	Taux d'hygrométrie	Hygrométrie	Humidificateur
Chauffage et ou rafraîchissement	Chaleur	température	C°, K	thermomètre	Chauffage , climatisation

## I.6. Les moyens techniques

### I.6.1. VMC : Ventilation mécaniquement contrôlée

L'apport d'air neuf et l'extraction de l'air vicié permet une élimination et une dilution des biocontaminants libérés dans l'air par le personnel et les équipements. Les variations du taux de renouvellement d'air permettent

#### Réglementation :

Arrêté du 24/03/1982 relatif à l'aération des logements et associé au DTU N°68.2 d'octobre 1988 AFNOR DTU P 50-411 (1 et 2) " exécution des installations de ventilation mécanique

VMC simple flux : permet de renouveler l'air en mettant les pièces en légères dépressions. Cette VMC est constituée d'un groupe d'extraction de l'air relié par un réseau de gaines à des bouches d'extraction calibrées pour un débit d'air donné. Le renouvellement d'air se fait par l'aspiration de l'air des autres pièces et de l'extérieur par les portes et les fenêtres non totalement étanches.

VMC double flux : permet de maintenir la pièce en légère surpression. Il comprend un groupe extracteur de l'air vicié, un groupe d'insufflation de l'air neuf et un échangeur récupérateur qui permet de préchauffer l'air insufflé par l'air vicié extrait.

#### I.6.1.1. Centrale de traitement d'air

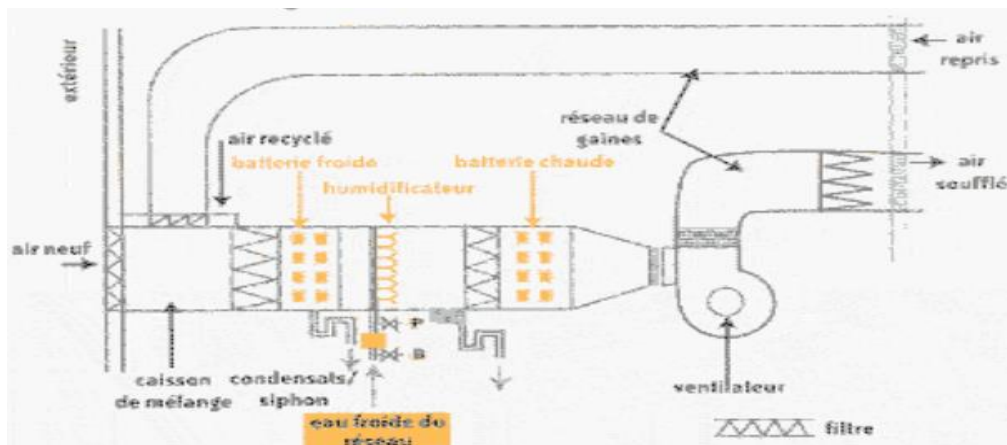


Figure I.3 : Centrale de traitement d'air.

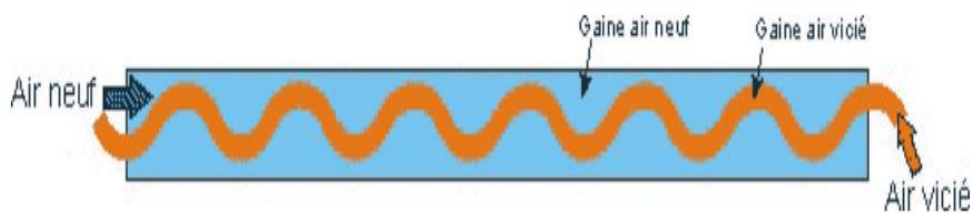


La centrale permet de réaliser : À L'extraction l'air vicié

À Le filtrage, la mise à température, l'humidification et l'apport de l'air neuf.

À La circulation d'air (Extraction de l'air vicié et apport d'air neuf) est assurée par un ventilateur et un système de gaine :

L'air vicié peut assurer la mise en température de l'air neuf : Dans le caisson de mélange ou lors du transport :



Les échangeurs thermiques ou batterie : Ils permettent obtenir grâce à un thermostat la température prescrite de l'air ambiant :

- Batterie froide : est alimentée en eau refroidie ou en fluide frigorigène ; elles ont une double action de mise en température de l'air à traiter et de déshumidification par formation d'eau condensée. Pour éviter les risques de contamination les circuits d'élimination des condensas doivent être maîtrisés.

- Batterie chaude : est alimentée en eau chaude, vapeur ou énergie électrique elle assure le préchauffage de l'air en cas de besoin.

- L'humidificateur : L'eau arrivant à l'humidificateur ne doit pas générer de germes. Il existe deux types de technologies:

- Humidificateur type bouilleur qui injecte de la vapeur. L'eau est ainsi stérilisée (conseillé).

- Humidificateur à pulvérisation qui pulvérise directement l'eau. (Déconseillé fort risque de contamination notamment par les légionelles.) Si cette technologie est déjà en place, il est conseillé d'effectuer des contrôles réguliers de la qualité de l'eau.

## **I.6.2. La filtration**

### **I.6.2.1. Les différents filtres**

L'efficacité d'un filtre est synthétisée de façon précise par une série de grandeurs dépendant des caractéristiques de l'air entrant : température et humidité, teneur en poussières, granulométrie des poussières, nature et structure physique des poussières. Concrètement, cela se traduit par une classification des performances en fonction des particules à arrêter.

. La dénomination de leur classe dépend de la méthode de mesure utilisée pour les essais. On classe les filtres à couche poreuse en fonction de leur efficacité :

- Filtres à moyenne efficacité (classes G1 à G4) : Filtre plan.

- Filtres à haute efficacité (classes F5 à F9) : Filtre à poches, Filtre plissé. - Filtres à très haute efficacité ou absolus (classes H10 à H14) : Filtre absolu.

Le plus grand risque avec les filtres est l'encrassement c'est pourquoi il est fortement indiqué de disposer de pré filtres. En effet plus le pouvoir de filtration est élevé plus le filtre s'encrasse rapidement. Une maintenance régulière avec changement des filtres est nécessaire.

## **I.7. Contrôle d'environnement**

Préliminaires :

- L'empoussièrement et la contamination microbiologique d'un local sont deux paramètres indépendants.
- L'appel à un laboratoire agréé par le ministère de la santé n'est obligatoire que pour l'analyse des eaux destinées à la consommation humaine, des eaux de piscine et de baignade aménagées dans le cadre de la réglementation.
- Il n'existe pas de réglementation spécifique quant aux prélèvements d'air (nature, fréquence).

### **I.7.1. Contrôles particulière**

**Généralités :**

Les contrôles particuliers se font à l'aide d'un compteur de particule. Ces contrôles sont assez reproductibles. **La norme NF EN ISO 14644-1** fixe à 5 le nombre minimum de points de prélèvement pour une salle de 20m<sup>2</sup>. Le volume d'air analysé doit être suffisant pour permettre un dénombrement de particules égal ou supérieur à 20.

➤ **Approche statique :**

Classe d'empoussièrement comptage du nombre de particules de pour chaque gamme (<sup>3</sup> 0.5µm et <sup>3</sup>5µm). Elle définit le nombre maximal de particules par m<sup>3</sup> supérieures à une dimension donnée.

➤ **Approche dynamique :**

Classe cinétique de décontamination particulière. Elle définit, pour une taille de particule donnée, par le temps nécessaire pour réduire de 90% la contamination particulière initiale avant mise en fonction du système de filtration.

## **I.8. Comment lutter contre la pollution d'air**

✓ **Pour les secteur d'agriculture:**

- Veiller aux bonnes pratiques d'épandage et à l'équilibre de la fertilisation.
- L'incorporation rapide des effluents (4h après) réduit de 80 à 90 % des émissions d'ammoniac.
- diversifier les cultures afin d'étaler l'activité agricole en sortie d'hiver et limiter le recours aux engrais grâce à l'introduction, dans la rotation, de légumineuses qui permettent d'enrichir le sol en azote, améliorer la teneur en matière organique du sol afin de limiter les émissions de particules au moment du travail du sol.
- Bâtiment vert: De la planification à la démolition, la construction écologique vise à créer des structures respectueuses de l'environnement et économes en ressources afin de réduire leur empreinte carbone.

✓ **Pour des transports routiers:**

- Développer les circulations douces (piéton, roller, vélo...)
- Réduire le besoin en transport à la source ( marche a pied )
- Encourager le transport ferré des marchandises et supprimer les exonérations fiscales accordées aujourd'hui aux énergies fossiles et au gazole routier en particulier.
- Abandonner les projets de nouvelle infrastructure routière qui auraient pour effet d'aggraver la situation.
- Assurer le rappel des véhicules (dieselgate) en vue de corriger leur niveau de pollution.
- Le passage aux véhicules électriques et aux véhicules à hydrogène, ainsi que la promotion de la mobilité partagée (c'est-à-dire le covoiturage et les transports publics) pourraient réduire la pollution atmosphérique.

✓ **Pour des transports maritimes:**

- Contraindre à l'utilisation d'un carburant chargé à 0,1% de soufre
- Permettre le branchement électrique à quai
- Encourager à mise en place et entretien des filtres et autres technologies de dépollution.

✓ **Pour le secteur industrielle:**

- Production de carburants renouvelables et d'énergie propre

- abandonner les combustibles fossiles et à les remplacer par des énergies alternatives telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique.
- Abaisser les Valeurs Limites d'Emissions définies par la législation nationale et européenne, pour imposer une réduction progressive des émissions des industries
- Conservation et efficacité énergétique par réduction de notre consommation d'énergie en adoptant des habitudes responsables et en utilisant des appareils plus efficaces.
- Améliorer la performance énergétique des installations industrielles afin qu'elles soient moins gourmandes en énergie fossile (qui engendre elle-même une pollution atmosphérique lors de la sa production).
- Renforcer les contrôles de l'État dans les installations industrielles, et la surveillance et le contrôle de niveau de pollution tout au long de leur fonctionnement par exemple la chimiluminescence, l'ionisation de flamme,
- Imposition et l'application de principe pollueur payeur selon les taux d'émissions de chaque industrie.

L'air est un élément vital, si on ne prend pas garde de sa qualité en continuant de le polluer il deviendra un souci majeur pour notre santé ainsi que pour l'environnement.

En outre ,il est nécessaire de réduire les émissions de polluants atmosphériques nocifs afin d'instaurer une qualité de vie sans nuisance. Ainsi cette réduction permet de minimiser les effets nocifs sur la santé humaine en accordant une attention particulière aux populations sensibles et à l'environnement dans son ensemble, d'améliorer la surveillance et l'évaluation de la qualité de l'air.

## **I.9. Conclusion**

On conclure que, Les Polluants atmosphériques (gaz et poussières) telsque : Oxyde de carbone, Oxydes d 'azote, Oxyde de soufre Hydrocarbures totaux, Ozone et poussières. ( Ces polluants affectent à des degrés divers, la santé, la végétation et l'environnement d 'une manière générale). Sources de rejets: véhicules, usines, chantiers urbains, combustions des déchets etc..

## Références

[1] M. Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.

[2] <http://www.lyc-richelieu-rueil.ac-versailles.fr/arch>.

[3] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat>

[4] AFSSET (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail), Pollution atmosphérique urbaine, (2006), « environnements et milieu», France. Disponible sur ([http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/developpement-durable-2/d/afsset\\_5434/](http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/developpement-durable-2/d/afsset_5434/))

[5] Bisson J, (1990), « Pollution atmosphérique et Environnement » Canada. Ottawa.

## Chapitre II: Traitement des fumées : dépolluissage, lavage et procédé secs et semi-humides

---

### II.1. Définition :

La fumée est l'émanation épaisse sortant d'une cheminée, d'un pot d'échappement ou bien produite lors d'une combustion. Généralement de couleur noire, mais pouvant varier de couleur dépendant du combustible, constituée de particules résiduelles, résultant de la combustion, de la vapeur d'eau et de la circulation d'air dans le four.

#### II.1.2. Composition :

La composition des fumées dépend directement de la composition des combustibles. On retrouve principalement les éléments suivants : $H_2O$ , vapeur d'eau,  $CO_2$ ,  $O_2$  comme dans toute combustion classique ; du  $CO$  si la combustion est incomplète. Un bon réglage permet de s'en affranchir ; des oxydes d'azote :  $NO$ ,  $NO_2$ , (gaz notamment responsables des pluies acides) ; gaz acides :  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ; dioxines, furanes, métaux lourds (plomb, mercure...).

### II.2. Les gaz :

#### II.2.1. Définition :

Le gaz est l'état le plus volatile de la matière. Généralement, un gaz est incolore mais dont l'odeur varie suivant sa formule.

#### II.2.2. Unité de mesure :

Le normo mètre cube, anciennement noté normaux-mètres cubes ou encore mètre cube normal ou encore cube normo mètre, ou encore normo cube mètre, de symbole :  $Nm^3$  ou parfois  $m^3(n)$ , est une unité de mesure de quantité de gaz qui correspond au contenu d'un volume d'un mètre cube, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression (0 ou 15 ou plus rarement 20 °C selon les référentiels et 1 atm, soit 101 325 Pa).

## II.3. Les techniques de traitement de fumées

### II.3.1. Séparation des particules

Il y a cinq (5) grandes techniques de séparation de particules :

- Chambre de sédimentation ;  Electrofiltre ;
- Dépoussiéreur humide ;
- Séparateur centrifuge (cyclone) ;  Filtration sur media fibreux.

## II.4. Neutralisation des gaz

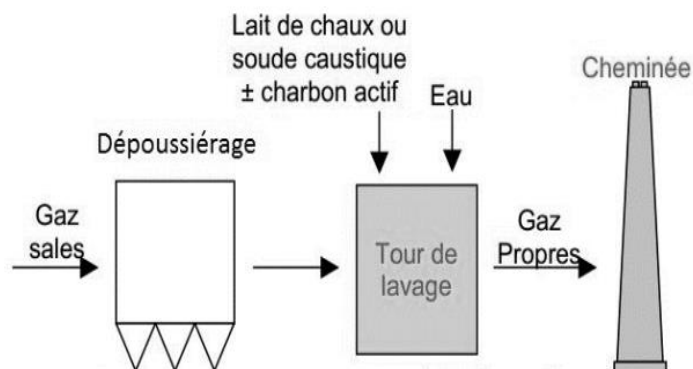
Différents modes de traitements existent : humide, semi-humide, semi-sec, sec. Le choix du traitement dépend des réactifs disponibles et des technologies souhaitées. Des analyseurs mesurent en continu certains gaz ( $CO$ ,  $HCl$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  ...) et permettent le contrôle de la combustion et la régulation du procédé de traitement.

Auparavant, l'installation comportait en général des filtres électrostatiques piégeant les particules sensibles à l'électricité statique (métaux lourds mais pas le plomb ou le mercure qui sont sublimés à basse température, de manière relative). Actuellement, des filtres à manches sont le plus souvent utilisés.

### II.4.1. Procédé humide

La fumée passe par un lavage au lait de chaux pour une désacidification, ce qui nécessite une installation de traitement des effluents liquides. Un panache important de fumées sort de la cheminée sous forme d'un « nuage » blanc, de la vapeur d'eau, car la plupart des incinérateurs sont équipés d'un lit catalytique ou DENOX où l'on injecte de l'ammoniaque ( $NH_4OH$ ) ce qui neutralise les  $NO_x$  ( $NO_x + NH_4OH$  donne  $H_2O + NH_3 + NO$ )



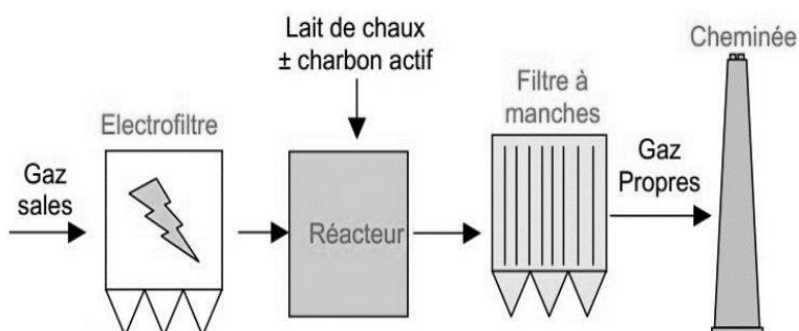


**Figure II.1** : Procédé humide (source : de MR Julien Bertholon)

### II.4.2. Procédé semi-humide

Le procédé semi-humide consiste, pour neutraliser les gaz acides, en la pulvérisation de fines gouttelettes de lait de chaux. Ce réactif est injecté dans les fumées à l'intérieur d'un réacteur, où vont se dérouler des réactions chimiques. La différence avec le procédé humide est l'absence d'eau pour la condensation des fumées. Il n'y aura donc pas d'effluent liquide en sortie de réacteur : la phase liquide est totalement évaporée.

La première partie de la réaction se déroule en phase humide (avec l'eau du lait de chaux). C'est la phase d'absorption des acides dans les gouttelettes. La température des gaz sèche le lait de chaux et la seconde partie de la réaction se fait en phase sèche lorsque toute l'eau s'est évaporée. C'est la phase de neutralisation des acides par les particules de chaux. Les fumées sont ensuite filtrées au moyen d'un filtre à manches afin de récupérer les résidus calciques (polluants et excès de chaux).



**Figure II.2.** Procédé semi-humide (source : de MR Julien Bertholon).

### II.4.3. Procédé semi-sec

Les fumées sont tout d'abord refroidies par vaporisation d'eau. La pression partielle en eau dans les fumées augmente. La neutralisation se fait par injection de chaux pulvérulente dans l'enceinte d'un réacteur.

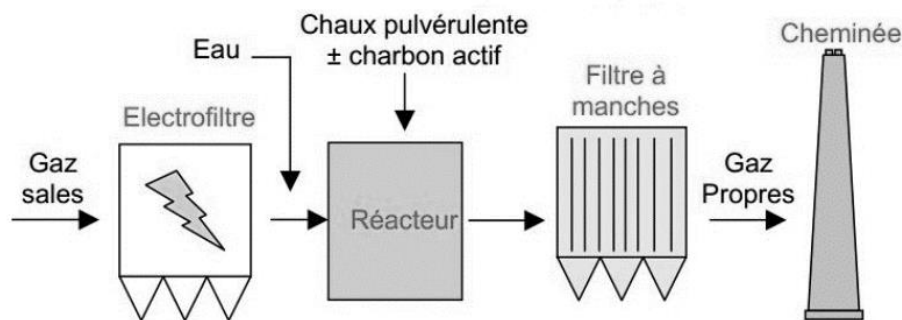


Figure II.3. Procédé semi-sec.

### II.4.4. Procédé sec

Il permet de mieux piéger les polluants dans la fumée. Pour cela, il convient d'injecter des réactifs dans la fumée (chaux spongiacale ou bicarbonate de sodium pour les acides, et charbon actifs pour les dioxines et furanes) en amont du filtre à manches. Le filtre à manche récupère alors les réactifs en proportion sur-stœchiométrique et les sels de réaction. Cette technologie permet de ne pas utiliser d'eau, de ne pas produire d'effluents liquides, et de supprimer le panache en sortie de cheminée. (Julien BERTHOLON)

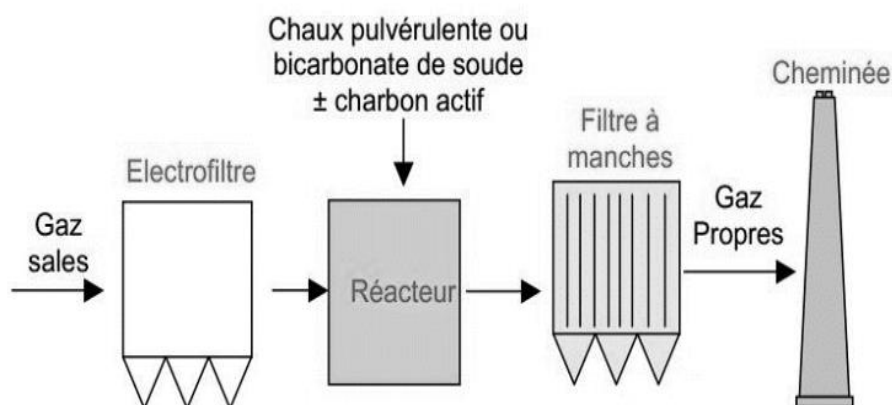


Figure II.4. Procédé sec.

## II.5. Poussières et particules

- **les particules totales en suspension** (appelées PTS ou TSP pour *Total Suspended Particulates*), qui regroupent l'ensemble des particules quelle que soit leur taille ;
- **les PM10**, dont le diamètre est inférieur à 10 µm (micromètres) ;
- **les PM2,5**, dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm. Ces dernières sont nommées particules fines et incluent les particules ultrafines de diamètre inférieur à 0,1 µm, qui relèvent de la problématique des nanoparticules.
- **Les poussières peuvent être d'origine naturelle** (érosion des sols, feux de forêt, etc.) **ou anthropique** (procédés industriels, combustion, activités agricoles), noires (combustion du charbon) ou blanches (cimenteries), issues de sources fixes (cheminées industrielles, chaufferies, bâtiments d'élevage, silos) ou de sources mobiles (circulation automobile, travail du sol).
- La matière particulaire peut être composée de substances différentes: sable, cendre, poussière, substances siliceuses de toutes sortes, matières végétales, composés métalliques, fibres textiles naturelles et artificielles, sels, éléments comme le carbone ou le plomb, etc.

Les **PM 10** sont des particules en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 10 micron. Ces particules sont **inhalables** et capables d'atteindre les voies respiratoires supérieures.

## II.6. Les polluants gazeux

### a) la famille du $CO_x$

On trouve le dioxyde de carbone  $CO_2$  et le monoxyde de carbone  $CO$ , les sources du  $CO_2$  sont :

-Naturelle : provient et associé au cycle de carbone organique :

1- photosynthèse des végétaux

2-l'activité industrielle « combustible fossile »

### b) le monoxyde de carbone ( $CO$ ) :



C'est un gaz incolore, inodore et inflammable et très toxique . Il se forme lors de la combustion des substances organiques lorsqu'elle est incomplète en raison d'un manque d'oxygène

. Le monoxyde de carbone est largement présent en particulier dans les zones urbaines en raison de la pollution des gaz d'échappement des véhicules automobiles.

*Famille des oxydes d'azote couramment regroupé sous la formule  $NO_x$  et comprenant les composés suivants : le monoxyde d'azote ( $NO$ ), le dioxyde d'azote ( $NO_2$ )*

**$NO_x$  : Gaz issus de la combustion .**

## **II.7. Principaux polluants atmosphériques et leurs sources**

**$NO_2$**  : transport principalement (80%)

**Particules fines** : transport /industrie /chauffage

**(Proportions variables selon les lieux )**

**Ozone** : transformation des  $NO_x$  et COV

Première cause du phénomène, les transports et notamment le trafic routier du quotidien. Par les pots d'échappement, l'usure des pneus et des freins, la climatisation ou le revêtement des voies, nos véhicules rejettent des particules fines et des gaz plus polluants encore que ceux émis par les centrales thermiques. Avec l'ozone et le dioxyde d'azote, les particules fines composées de nitrates et de carbone notamment comptent parmi les polluants atmosphériques les plus préoccupants puisque leur taille microscopique leur permet de rester en suspens dans l'air, et de s'infiltrer très profondément dans les poumons.

Le trafic routier est particulièrement problématique dans les zones urbaines, où près de 40 % des trajets effectués en voiture font moins de 3 km. Entre les arrêts, les redémarrages fréquents et la surconsommation de carburant lorsque le moteur est encore froid, les trajets courts sont en effet 2 fois plus polluants qu'un itinéraire plus long. Et puisque les gaz se déplacent, l'a pollution générée à un certain endroit pourra facilement avoir des effets néfastes sur un autre point de la planète.

S'ajoutent aussi les poussières et les rejets gazeux émis par les industries, l'incinération des déchets, les centrales thermiques, ou les divers pesticides et engrais utilisés pour l'agriculture qui sont responsables de 97 % des émissions d'ammoniac.

## II.8. le smog



**Figure II.5.** Sao Paulo noyé dans le smog.

### II.8.1. Définitions

- Le **smog**, de l'anglais *smoke*, fumée et *fog*, brouillard, est un nuage de pollution atmosphérique constitué de particules issues de la combustion (centrale au charbon, gaz d'échappement) et **d'ozone troposphérique**.
- est une **brume brunâtre** que nous voyons parfois les journées chaudes, de mai à septembre.
- **Le smog** se forme lorsqu'il fait chaud et que les émissions provenant des véhicules, des autres sources industrielles et des activités humaines se mélangent aux contaminants déjà présents dans l'air. Le smog peut envelopper les zones urbaines.

## II.9. Les impacts des COV sur l'environnement

Les Composés Organiques Volatils (COV) font partie des polluants atmosphériques.

**Les COV** : se sont les " hydrocarbures " on trouve les hydrocarbures aliphatiques (méthane....à aromatique (benzène et les dérivés ...à Halogènes , alcool , aldéhydes, cétones, les acides .

**Sources:** les hydrocarbures potentiels de part leurs impacts direct sur la santé de l'homme et son environnement. Vis-à-vis de la santé et, selon la nature du COV, cet impact peut aller d'une certaine gêne olfactive à des effets cancérigènes, en passant par des irritations diverses et une diminution de la capacité respiratoire. Vis-à-vis de l'environnement, ces composés interviennent dans le processus de formation d'ozone troposphérique répertorié comme étant un gaz à effet de serre.

**Transport:** combustion incomplète, vaporisation lors remplissage du réservoir d'automobile.

**Industries:** procédés industriels, solvants (peintures, encres, nettoyage de surface métallique).

➤ Effet sur l'environnement : provoquent la destruction de l'O<sub>3</sub> à cause de l'effet de serre.

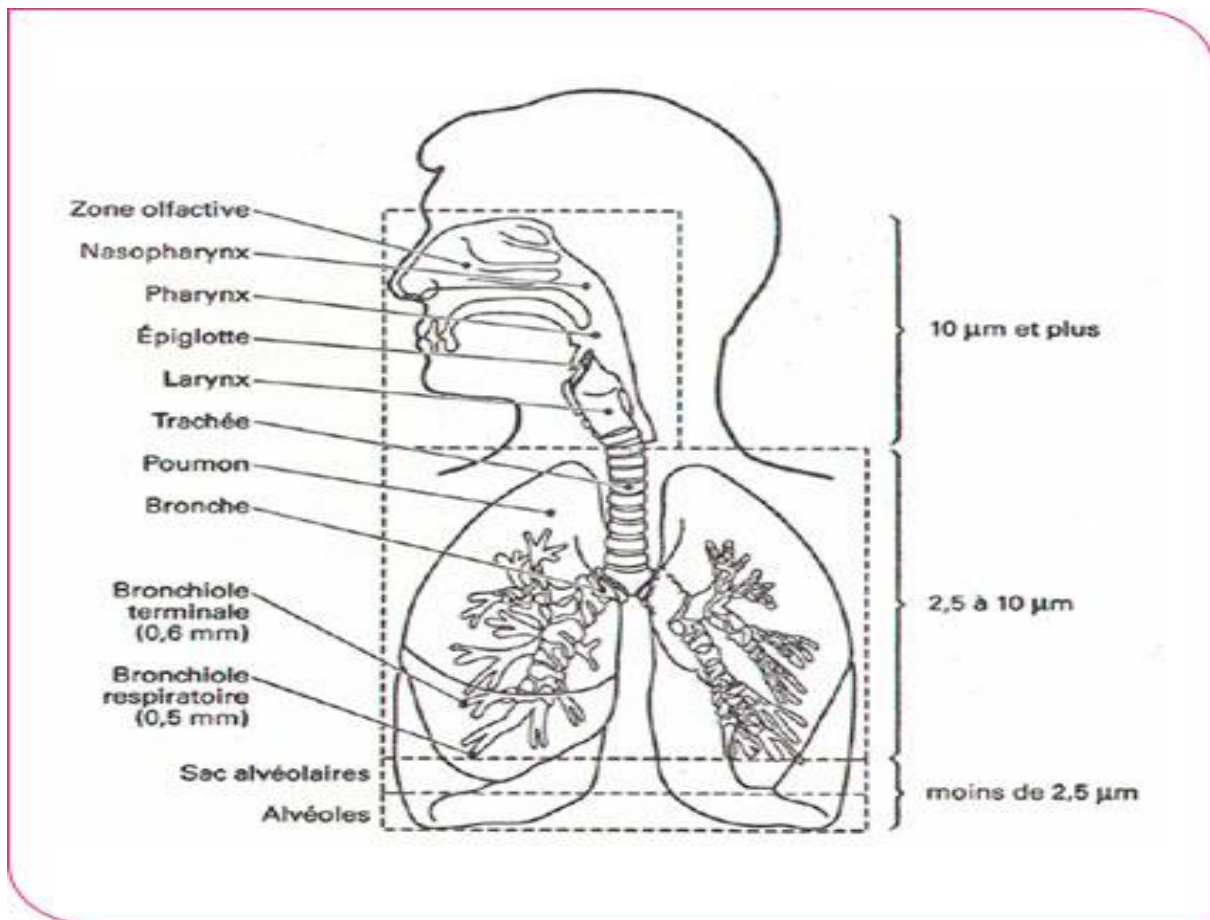
➤ Effet sur la santé :

- **Effets sur le système respiratoire :**

À court terme et même à de faibles niveaux d'exposition, la pollution provoque des irritations du nez et de la gorge. Mais parce que les nanoparticules s'infiltrant jusqu'aux alvéoles pulmonaires, elles aggravent aussi des pathologies chroniques comme l'asthme ou la bronchopathie. Ce risque est particulièrement alarmant chez les enfants, dont les poumons, en développement, peuvent être considérablement altérés. Sur le long terme, l'exposition aux polluants favorise l'apparition de cancers du poumon, en particulier quand elle s'ajoute à d'autres facteurs de risque comme le tabac.

Depuis 2013, les particules de l'air extérieur sont classées comme cancérigènes pour l'Homme par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). La toxicité de ces particules provenant à la fois de leur composition et de leur taille. Plus les particules sont fines, plus elles sont capables de pénétrer profondément dans l'organisme (Cf. schéma ci-après) et de passer par la circulation sanguine vers d'autres organes.

Des agents biologiques, tels que les pollens et moisissures, peuvent également être responsables d'effets sur la santé. Par ailleurs, il existe plusieurs types d'interactions entre polluants de l'air et pollens puisque certains polluants chimiques de l'air peuvent favoriser la réaction allergique en abaissant le seuil de réactivité bronchique et/ou en accentuant l'irritation des muqueuses nasales ou oculaires et peuvent également agir sur les grains de pollen, par exemple via la déformation ou la rupture de la paroi du grain de pollen, qui leur permettrait ensuite de pénétrer plus profondément dans le système respiratoire que les grains de pollen entiers.



**Figure II.6.** Relatif à la pénétration des particules dans l'organisme.

- **Effets cardio-vasculaires :**

La majorité des morts liées à la pollution de l'air sont dues à des pathologies cardiaques. En déclenchant des phénomènes inflammatoires, la pollution active la coagulation sanguine, facteur de caillots et de thromboses. Lors des fameux pics de pollution, on constate aussi une recrudescence d'infarctus du myocarde et d'accidents vasculaires cérébraux. Un AVC mortel sur trois serait même imputable à la pollution, selon l'OMS. À long terme, un air dégradé provoque des coronaropathies et des arythmies, elles aussi potentiellement létales.

## **II.10. Conclusion**

La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'air des tunnels. Pour le traitement des effluents gazeux, des évolutions technologiques importantes ont permis de passer des expérimentations en laboratoire à la réalisation opérationnelle en tunnel. Les quelques cas concrets d'équipements en tunnel apportent toutefois encore assez peu d'informations sur l'efficacité des dispositifs en exploitation notamment parce qu'ils sont récents. Les installations existantes reposent essentiellement sur la dénitrification par absorption utilisée après une filtration électrostatique des particules. Elles sont pour l'essentiel conçues dans un souci de limitation de l'impact des rejets sur l'environnement.

## **Références**

- [1] Contribution à l'étude de traitement de fumées de chaudière d'une unité de textile à Antananarivo. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo UFR Sciences Economiques et de Gestion de Bordeaux ,2017 RAKOTONDRAVELO Dina Harintsalama
- [2] Principaux procédés de filtration des gaz – OSSMAN Abir – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – Département de Génie Energétique – 1995
- [3] Abdelkader Hachaichi, « Etude de l'effet de la température de l'eau et du débit d'air sur les performances d'une installation de rafraîchissement par humidification », mémoire de master, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie(2018)
- [4] Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices (2010) – S. Colombano, A. Saada, V. Guerin, P. Bataillard, G. Bellenfant, S. Beranger, D. Hube, C. Blanc, C. Zornig et I. Girardeau, Rapport final BRGM-RP-58609 – FR



### III.1. Introduction

L'eau est la vie sur la terre. Donc, l'eau est quelque chose de spécial. Chaque chose vivante sur terre (micro-organismes, plantes, animaux, êtres humains et même notre cerveau) consiste principalement en eau. Le monde contient aussi beaucoup d'eau. Plus que 70% de la totalité de l'eau contenue sur terre, seulement une petite partie qui est convenable pour la consommation humaine ou l'usage agricole (approximativement 0.5% de toute l'eau dans le monde).

L'eau est un bien précieux qui subit diverses pollutions et dégradations : les écosystèmes et la santé des personnes en sont directement impactés. Les pollutions présentes dans l'eau sont d'origines diverses : industrielle, domestique ou agricole.

La pollution des eaux usées est une menace croissante pour les personnes et la vie marine et représente le plus grand pourcentage de pollution côtière dans le monde. À l'échelle mondiale, environ 80% des eaux usées - qui comprend les eaux usées humaines - est rejeté dans l'environnement sans traitement, libérant une gamme de contaminants nocifs dans l'océan et causant des dommages directs aux personnes et aux récifs coralliens. La recherche montre que la pollution des eaux usées se produit souvent à proximité des récifs coralliens du monde entier en raison d'une gestion inexistante ou inadéquate des eaux usées. Ces eaux résiduaires sont collectées et acheminées, en général vers les stations d'épuration affectées à chaque communauté urbaine pour les traiter avant leur rejet final.



**Figure III.1.** Station d'épuration des eaux usées (*assainissement collectif*).

## - **Partie A)**

### **III.2. Les traitements des eaux usées urbaines et leur finalité**

Les différents traitements des eaux résiduaires existant de nos jours ont tous pour but d'améliorer la qualité des effluents rejetés dans l'environnement. Cependant l'efficacité de toutes ces techniques est très différente, c'est pourquoi il convient le plus souvent de les utiliser en complément les unes des autres. Ainsi, le processus classique de traitement des effluent urbaines en station d'épuration comporte deux grandes phases , plus une troisième facultative :

**1<sup>er</sup> processus** : le traitement physico-chimique

**2<sup>ème</sup> processus** : le traitement biologique

**3<sup>ème</sup> processus** : la finition ou traitement tertiaire

#### **III.2.1. Le traitement physico-chimique (sens large)**

Il est constitué de trois niveaux

##### **a) Le prétraitement :**

Il a pour objectif principal d'éliminer une grande partie des éléments décan tables et colloïdaux contenus dans un effluent brut urbain : élément grossiers, graisses, huiles, etc.

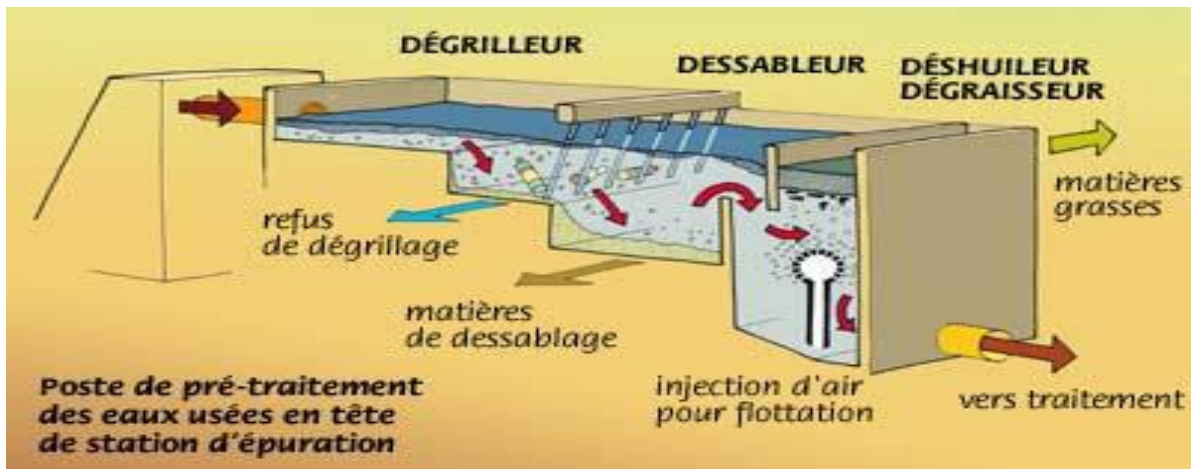
Il se compose de trois processus et se situe en tête de station d'épuration

- **le dégrillage** : élimine la plupart des éléments grossière.

- **le dessablage** : canal étroit reliant le dégrilleur au déshuileur et ayant pour but de faire décanter les éléments plus fins.

##### **➤ le déshuilage – dégraissage**

En général, l'effluent issu de ces traitements est trop chargé en éléments décan tables et ce prétraitement est suivi d'une décantation primaire et/ou d'un système de floculation – flottation.



**FigureIII2.** Prétraitement des eaux usées en tête de station d'épuration.

### b) La décantation primaire

Ce procédé a pour objectif de réduire de 90% les matières décan tables contenues dans l'effluent primaire (non-retenues par le prétraitement). Ces éléments constituent une part assez importante des matières sèches d'un effluent brut urbain (50 à 60 g de matières sèches /équivalent habitant en général).

### C) Le traitement physico-chimique (sens strict)

Il s'agit de procédé utilisés en complément du prétraitement dans le cas d'eaux fortement chargées en MES (matière en suspension)

✓ **La floculation** : consiste à ajouter à l'effluent prétraité une substance Chimique ayant pour rôle de faire flocculer les MES résiduelles ; les floccs ainsi formés vont décanter dans le fond du flocculateur et être éliminés.

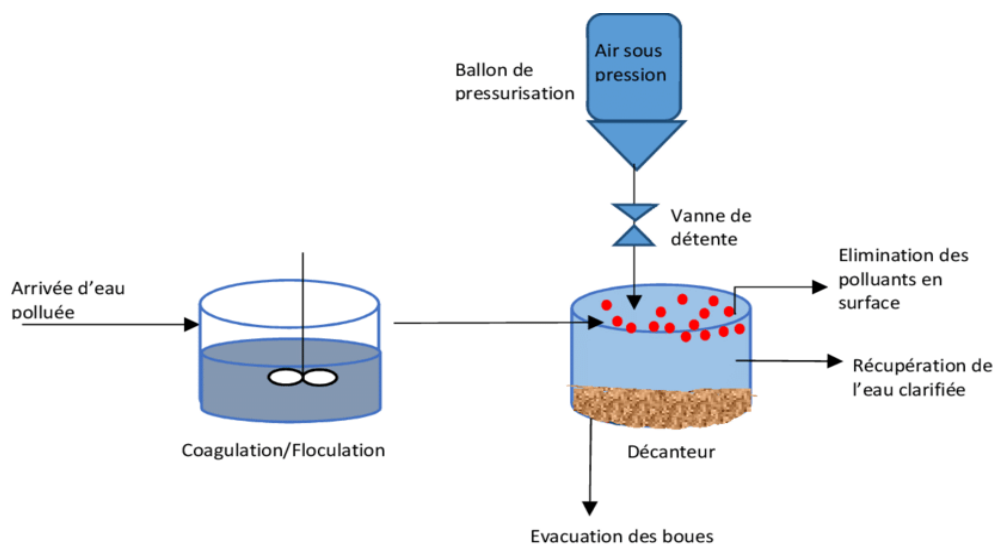
Les flocculant utilisés généralement sont :

- Les poly électrolytes de synthèse : très spécifique et permettant une réduction de 65% de la demande biologique en oxygène et 75% des MES de l'effluent.
- Les sels de fer et d'aluminium : permettant une réduction de 75% de la DBO et de 90% des MES .
- Les chaux : (à Ph élevé)

La flottation : méthode se servant d'eaux préalablement floculées :

Les floccs seront maintenus en surface de bassin grâce a des bulles d'air (ou de gaz) issues d'une eau pressurisée et détendue.

L'ensemble particule-bulle, ayant une densité inférieure à celle de l'eau va migrer en surface du bassin de stockage (éliminé ensuite par raclage automatique).



**Figure III. 3** : le principe du processus de flottation par air.

### III.2.2. Le traitement biologique

Ce procédé est le plus souvent utilisé en aval d'un décaiseur primaire. Chaque traitement sera caractérisé par une charge hydraulique qui permettra de déterminer le procédé à utiliser pour une communauté rurale, pour un village ou pour une zone urbaine dense.

#### a) Les boues activées :

Ce système d'épuration peut être appliqué soit en traitement secondaire soit en tertiaire

**Principe** : l'eau décaisée séjourne dans un bassin où existe une concentration de biomasse aérée de 2 à 5 mg/l, qui va consommer la matière biodégradable. Puis cette eau est séparée des boues dans un décaiseur secondaire (le clarificateur).

La fraction de boues en excès provient de la croissance bactérienne lors de la dégradation de la matière organique.

#### **b) le lagunage :**

Ce système peut être utilisé en tant que traitement primaire, secondaire ou tertiaire, ce qui prouve le manque de spécificité de ce procédé.

Le temps de séjour de l'effluent à traiter est nettement supérieur à ceux des autres Traitements et oscillent entre 5 et 60 jours (ce qui favorise une bonne épuration biologique).

#### **c) L'infiltration – percolation :**

ce procédé peut être utilisé tant en traitement secondaire qu'en traitement tertiaire .

**Principe** : il consiste à faire percoler des eaux usées issues d'un traitement primaire soit dans des bassins de faible profondeur remplis de sable , soit dans le sol directement . Ce sable joue rôle d'un support ou se crée une activité biologique et physico-chimique importantes, ayant pour résultat l'épuration des effluents traités.



#### **d) La méthanisation :**

Processus biologique dans lequel les microorganismes épurateurs se développent en l'absence d'air et produisent un gaz combustible : le biogaz

Le biogaz se produit a partir de  $\text{CH}_3 - \text{COOH} + \text{H}_2 + \text{CO}_2$  ; Température = 35°C (mésophile)

### **III.2.3.Le traitement tertiaire**

Il existe trois grands types de méthodes de finition en plus de toutes les combinaisons possibles des traitements primaires et secondaires pour obtenir une meilleure épuration des eaux :

- l'irrigation, l'épandage
- la désinfection
- l'infiltration – percolation

#### a) **L'épandage et l'irrigation**

Ces deux méthodes ont un principe commun de fonctionnement qui consiste à recouvrir une certaine surface (sol) avec l'effluent primaire ou secondaire à épurer, et le laisser s'infiltrer lentement.

**L'épandage** : il a pour but de recycler l'eau et les éléments fertilisants dans le sol, les racines des végétaux peuvent ainsi absorber ces éléments minéraux donc minéraliser la matière organique. Cependant, il faut que les effluents reçus par le sol ne soient pas trop chargés en matière organique pour qu'il y ait plus d'efficacité.

**L'irrigation**: a pour objectif de réutiliser les eaux usées dans l'agriculture, cette réutilisation agricole permet d'adopter une stratégie d'assainissement (mode d'épuration extensif dont le sol est le support) et d'augmenter les ressources en eaux

#### b) **la désinfection des effluents secondaires :**

il existe plusieurs moyens de désinfecter les eaux usées : par chloration, par ozonation, par les rayons ultraviolets, par la température.

La désinfection consiste en élimination durable des agents pathogènes de l'eau et elle est surtout pratiquée au chlore et à l'ozone.

c) **L'infiltration-percolation** : cette méthode permet d'obtenir une bonne épuration de finition, tant du point de vue physico-chimique que bactériologique et ce , sous des charges hydrauliques assez importantes.

Cette étude nous a permis de comprendre par quelles contraintes passait la dépollution des eaux et ses limites. Elle nous permet aussi de mesurer l'enjeu que représente chaque litre d'eau souillé, mais nous interroge également sur les conséquences environnementales que peut avoir une eau imparfaitement dépolluée.

## - Partie B)

### III.3. Les principales technologies de dessalement des eaux

#### III.3.1. Définition du dessalement

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation, ou plus rarement dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale.

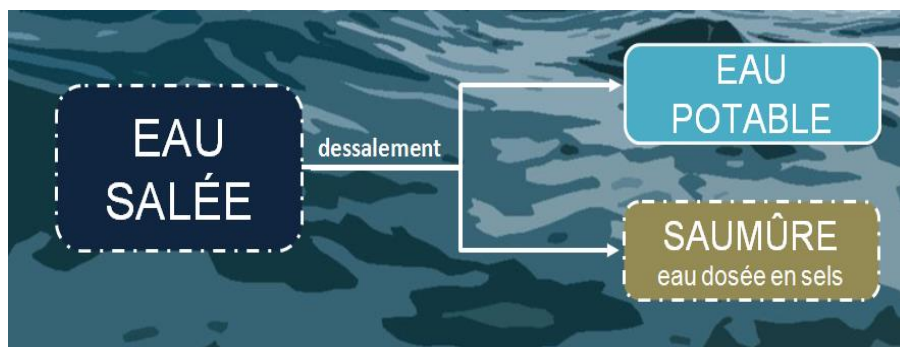


Figure III.4. désaliénation l'eau de la mer.

#### III.3.2. Techniques utilisées dans le dessalement

##### 1) les procédés faisant intervenir un changement de phase :

→ Evaporation

→ Congélation

##### 2) les procédés de perméation sélective à travers une membrane :

→ Transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse) ou d'un gradient de pression (piezodialyse)

→ Transfert d'eau sous l'action d'un gradient de pression (osmose inverse) ou sous l'action d'un gradient de température (thermo-osmose)

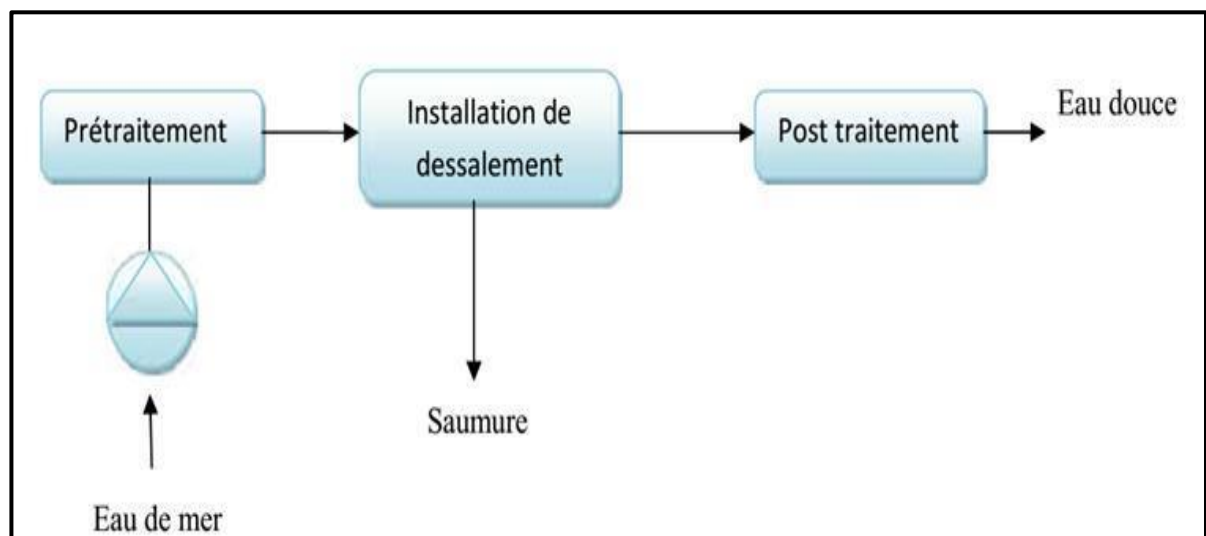
### 3) les procédés chimiques :

→ Echange d'ions

→ Extraction par solvant

En fait, la totalité des installations actuellement en service fait appel à deux grandes familles de procédés : les procédés par évaporation et les procédés de séparation par membranes qui sont plus récents.

Le rejet généré par l'usine de dessalement se présente généralement sous la forme d'une saumure contenant divers sels, et composés organiques. Cette saumure est deux à trois fois plus salée (entre 50 et 80 g/L) que l'eau de mer habituelle.



**Figure III.5.** Schéma de dessalement.



### III.4. La Distillation :

Elle concerne un mélange de plusieurs liquides miscibles, elle utilise une colonne de séparation (ou colonne de **Vigreux**) pour séparer les différents constituants du mélange en fonction de leurs températures d'ébullition au niveau de chaque plateau de cette colonne.

#### III.4.1.Principe

La distillation fractionnée, appelée également rectification, est un procédé permettant de séparer des liquides par fractionnement grâce à la différence de leur température d'ébullition. Le composant le plus volatil a un point d'ébullition moins haut s'évapore donc en premier. Le mélange porté à une ébullition lente reste à la même température jusqu'à ce que le composant

Le plus volatil soit complètement vaporisé, chaque liquide peut ainsi être distillé en fonction de sa température d'ébullition.

#### III.4.2.Montage

Le mélange à séparer est placé dans un ballon (bouilleur) surmonté d'une colonne de distillation. En tête de colonne, on place un réfrigérant droit en position inclinée de façon à permettre l'écoulement des liquides qui se condensent vers une allonge de recette. Un thermomètre est placé en tête de colonne de sorte que son réservoir soit placé au niveau de la jonction avec le réfrigérant (on mesure ainsi la température de l'équilibre liquide-vapeur du composé qui est récupéré dans le distillat).

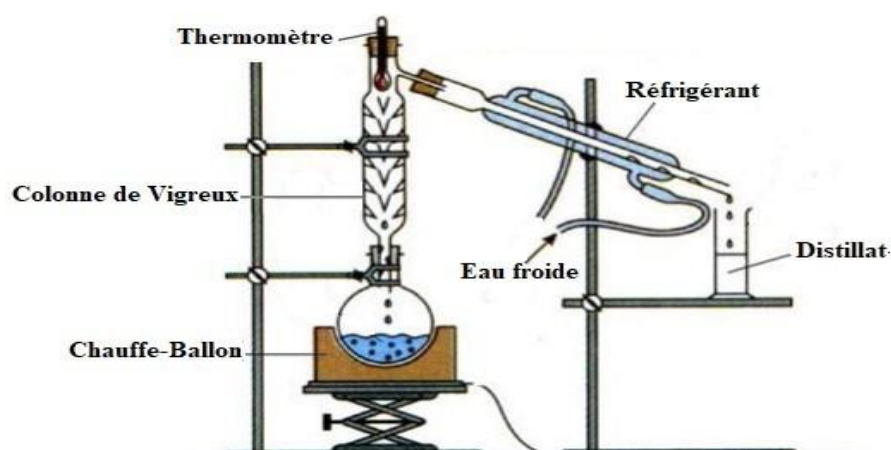


Figure III. 6. Schéma d'une distillation fractionnée

### III.4.3.Exemple d'application

**Etape 1:** le chauffe-ballon chauffe le mélange dans le ballon et celui-ci se met à bouillir.

**Etape 2:** la vapeur d'eau ainsi formée monte progressivement dans la colonne de Vigreux.

**Etape3:** le thermomètre permet de lire la température de la vapeur qui rentre dans le réfrigérant : elle est proche de 100 °

**Etape 4:** la vapeur d'eau (très chaude) entre en contact avec les parois du réfrigérant. Comme le réfrigérant est froid grâce à la circulation d'eau froide qui se fait autour, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en eau liquide.

**Etape 5:** les gouttes d'eau liquide ainsi formée roulent vers la sortie du réfrigérant et tombent dans le béccher. Le liquide ainsi obtenu, qui ne contient que de l'eau, est appelé le **distillat**.

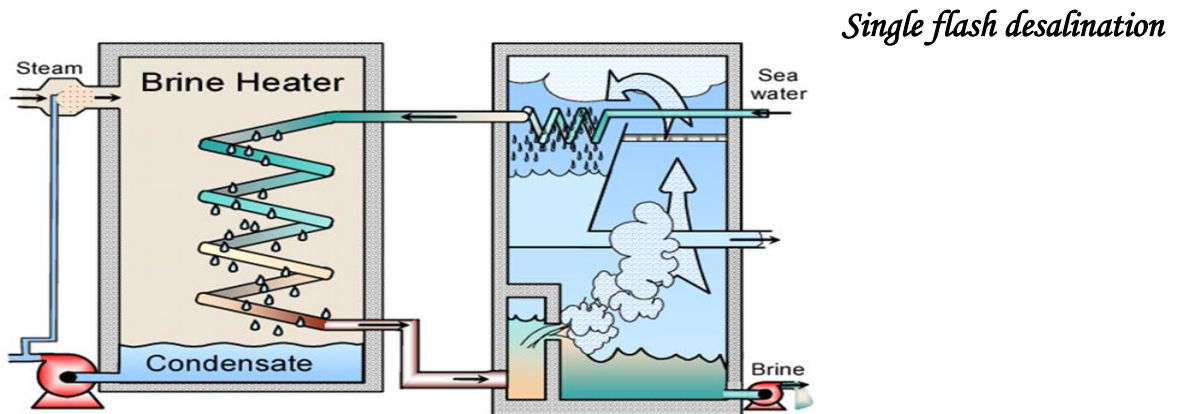


Figure III.7. Schéma simple du plan MSF

*Multi stage flash distillation*

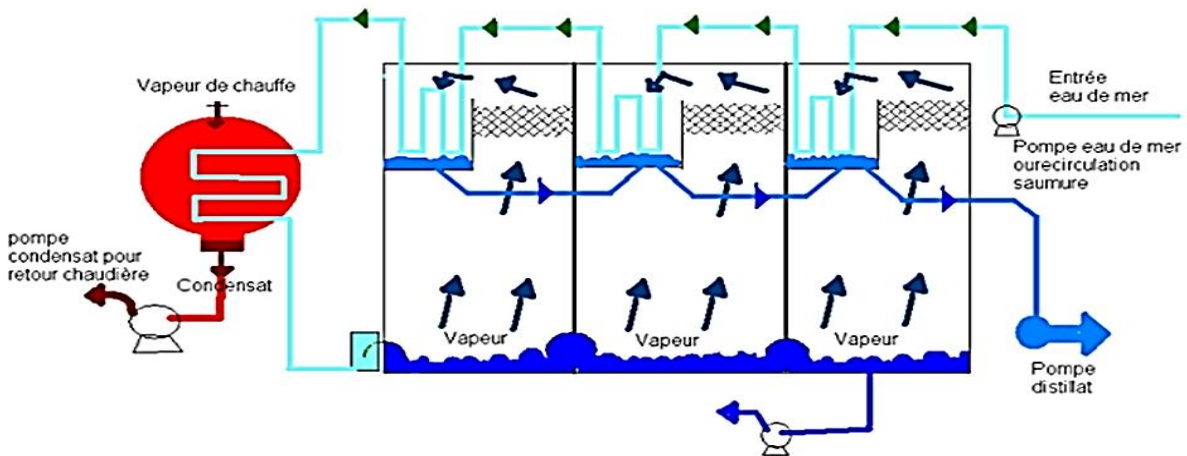
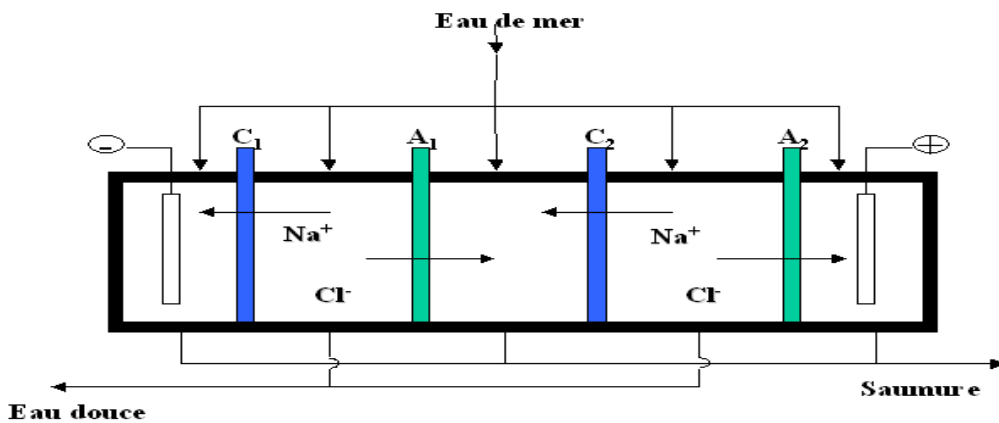


Figure III.8. Schéma Multiples du plan MSF

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash.



Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit perméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On

obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration.

### L'osmose inverse :

Un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression. Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer : les particules, les sels dissous, les molécules organiques de  $10^{-7}$  mm de taille.

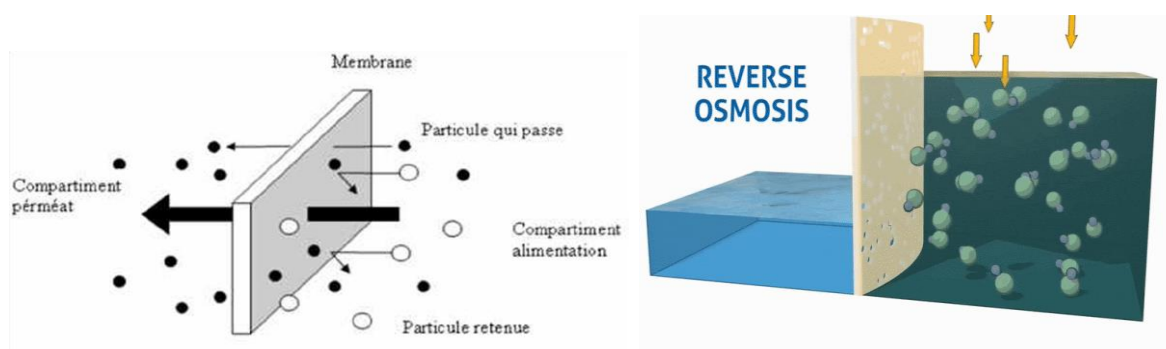


Figure III.9. Osmose inverse.

Le dessalement de l'eau de mer, aux multiples procédés que ce soit l'osmose inverse, la distillation ou même l'électrodialyse, se montre comme une solution face aux pénuries dans le monde.

Face à ses nombreux désavantages tantôt aux niveaux économiques, productifs ou même environnementaux, le dessalement de l'eau de mer devrait reposer sur les énergies renouvelables afin d'être une solution à tous les niveaux et par la suite être la source de vie du futur.

### III.5.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre par quelles contraintes passait la dépollution des eaux et ses limites. Elle nous permet aussi de mesurer l'enjeu que représente chaque litre d'eau souillé, mais nous interroge également sur les conséquences environnementales que peut avoir une eau imparfaitement dépolluée.

### Références

[1] Le centre d'information sur l'eau. Les traitements de l'eau dans cieau.com (page mise en ligne en février

2016): <http://www.cieau.com/images/brochures/pdf/Les%20traitements%20de%20l'eau%20potable.pdf>

[2] Pr. Fabien. La molécule H<sub>2</sub>O dans chez.com (page mise en ligne en 2002)  
: <http://exposeh2o.chez.com/molecule.htm>

[3] Julien Caboch. L'eau et son traitement dans vivelessvt.com (mise à jours en 2016)  
: <http://www.vivelessvt.com/college/leau-et-son-traitement-2/>

[5] Simate, G.S., 2015. The treatment of brewery wastewater for reuse by integration of coagulation/flocculation and sedimentation with carbon nanotubes 'sandwiched' in a granular filter bed. J. Ind. Eng. Chem. 21, 1277–1285. Doi : 10.1016/j.jiec.2014.06.001

[6] Verma, A.K., Dash, R.R., Bhunia, P., 2012. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. J. Environ. Manage. 93, 154–168. doi : 10.1016/j.jenvman.2011.09.012

[7] Metahri M.S, (2003) Contribution à la valorisation agricole des boues résiduelles de la station d'épuration Est de Tizi-Ouzou Algérie. Thèse d'ingénieur, 86 p.

### IV.1. Introduction

De multiples activités humaines sont à l'origine de la pollution des sites, des sols et des eaux souterraines. La décision de dépolluer et le choix des techniques à mettre en œuvre reposent sur différents critères, incluant le risque sanitaire, la localisation du site, l'usage ultérieur envisagé ainsi que le coût et les délais. Parmi ces techniques, certaines immobilisent la pollution, d'autres l'extraient ou la détruisent.

#### IV.1.2. Qu'est ce qu'un sol contaminé ?

Un sol contaminé peut être défini comme un sol dont la concentration d'un contaminant dépasse le niveau défini par la réglementation applicable. Généralement imputée aux activités humaines, cette concentration anormale peut être liée à l'utilisation d'engrais et de pesticides par l'agriculture, au passage d'engins lourds, aux rejets accidentels des industries ou à la multiplication des surfaces bétonnées. Parmi bien d'autres causes.

#### IV.1.3. Types de polluants des sols

##### Agent biologique Bactérie

- Virus
- Champignons
- Parasites



##### Pratiques agricoles

- Engrais chimiques
- Pesticides
- Herbicides



### Déchets industriels

- Raffineries de pétrole
- Production d'acier
- Production de médicaments



### Polluants radioactifs

- Uranium
- Radium

### Déchets urbains

- eaux usées
- ordures et déchets



## IV.2. Les procédés de traitement des sols

### IV.2.1. Les traitements biologiques

#### ✓ Biodégradation et bioventilation :

Le principe de biodégradation s'explique par la dégradation des composés à base de carbone par des microorganismes. **La bio ventilation** implique un système de ventilation permettant de transporter l'oxygène dans le sous-sol, où les organismes sont stimulés afin de métaboliser les composants.

#### ✓ Biopile :

La technique de traitement des sols par biopile (ou biotertre) consiste à amonceler les sols excavés, à les humidifier, à les amender et à les aérer afin d'accélérer la biodégradation des contaminants.

### **IV.3. Les procédés chimiques**

#### **✓ Oxydation chimique:**

La technique d'oxydation chimique est largement répandue dans les pays industrialisés. Cette technique consiste en une dégradation des contaminants en contact avec des réactifs oxydants injectés dans la zone de sols contaminés

(in-situ) ou mélangés dans un conteneur adapté (ex-situ).

#### **✓ Lavage des sols in-situ :**

Le traitement des sols avec un solvant consiste, en d'autres mots, à laver les sols. Les contaminants adsorbés sur les sols s'accrochent aux solvants ou à l'eau, dépendamment du type de lavage, permettant aux sols d'être réutilisés sur le site. Cette méthode de traitement n'est pas couramment employée.

### **IV.4. Les traitements thermiques :**

#### **✓ Désorption thermique:**

Cette technique consiste en la dégradation des molécules des contaminants par l'effet de l'augmentation de la température. La technique de désorption thermique est appliquée par l'injection de chaleur dans les sols (in-situ) ou dans un four (ex-situ).

#### **✓ Incinération :**

Parmi les techniques de traitement les plus anciennes, l'incinération consiste à brûler les sols contaminés dans un four atteignant des températures extrêmes (870 à 1200°C). Les contaminants sont donc détruits ou volatilisés.

### **IV.5. Conséquence :**

La pollution du sol a un impact sur la sécurité alimentaire en perturbant le métabolisme des plantes et donc en réduisant les rendements des récoltes et en rendant les cultures dangereuses pour la consommation. Les polluants vont également directement nuire aux organismes qui vivent dans les sols et les rendent plus fertiles.

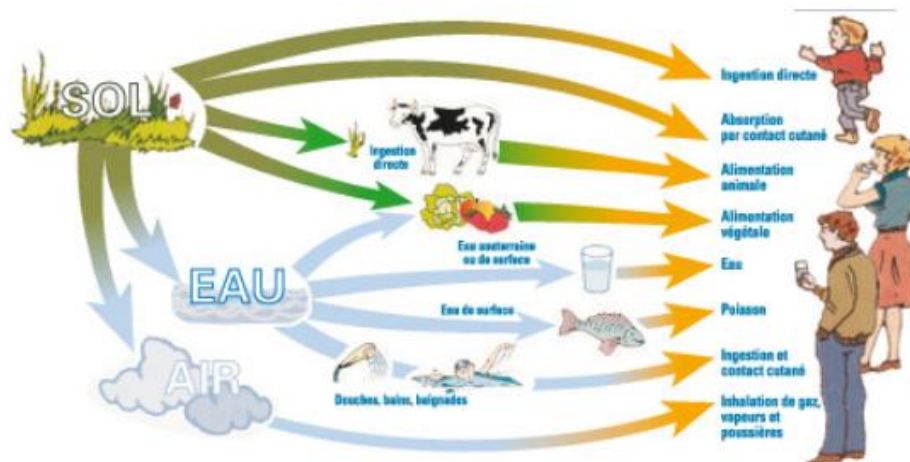


#### **IV.5.1. Les conséquences possibles sur la santé :**

L'évaluation des polluants présents dans le sol peut être réalisée par des mesures physiques ou chimiques (calcul de la concentration de polluants comme le mercure, le cuivre, le plomb, etc.), ou bien par observation des indicateurs biologiques : biodiversité végétale et animale, etc.

En effet, ces polluants peuvent se retrouver dans l'**air** (poussières) et dans l'**eau**, où ils deviennent dangereux car potentiellement absorbés par les êtres vivants et donc avoir un impact sur leur santé :

- Certains **métaux lourds** et **métalloïdes** sont connus pour leur **pouvoir neurotoxique** ou **cancérogène** par ingestion et/ou inhalation.
- Certains **hydrocarbures**, en particulier le benzène et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), sont reconnus pour leur effet CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique). En 2003, les HAP ont été rajoutés aux produits visés par la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants : ils ont été classés comme produits très préoccupants pour la santé.
- Beaucoup de **solvants halogénés** ou leurs produits de dégradation sont reconnus comme substances très toxiques, toxiques et nocives, parfois cancérogènes (par exemple le trichloroéthylène ou le chlorure de vinyle). Ils peuvent causer divers troubles, notamment neurologiques aigus et chroniques, cutanéomuqueux, hépato-rénaux, cardio-respiratoires et digestifs.



**Figure IV.1 :** Les conséquences possibles sur la santé

#### **IV.6. Les activités humaines principales responsables**

La grande majorité de la pollution des sols est due aux activités humaines.

Les activités industrielles telles que les activités minières, la fonte, la fabrication, les ordures ménagères, les déchets communaux, le bétail, les pesticides, les herbicides, les engrais utilisés dans l'agriculture, les émanations des moyens de transport, les produits dérivés du pétrole qui sont relâchés dans l'environnement ou se décomposent dedans - tous contribuent au problème.

Ce que l'on appelle « les polluants émergents » constituent aussi une source d'inquiétude. Il s'agit notamment des produits pharmaceutiques, des perturbateurs endocriniens, des hormones et des polluants biologiques, des déchets d'équipement électronique et des plastiques qui sont maintenant utilisés dans presque chaque activité humaine.

#### **IV.7. Conclusion**

La pollution des sols provoque une réaction en chaîne. Elle altère la biodiversité des sols, réduit la matière organique du sol et la capacité des sols à agir comme un filtre. Elle contamine l'eau stockée dans les sols et les eaux souterraines, et provoque un déséquilibre des éléments nutritifs présents dans les sols.

## Références

[1] Ademe, [Biodiversité & reconversion des friches urbaines polluées](#) « Connaitre pour agir » ([ISBN 978-2-35838-527-5](#)), février 2014.

[2] Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués, N° DOC 298, [PDF], 85 p., 2001.

[3] Procédés de traitements physiques et chimiques des sols pollués MOSIMONNOT, V CROZE - 2008 - techniques-ingenieur.fr

[4] Atlas, R. M. (1981). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. Microbiological reviews, 45(1), 180.

## **V.1. Introduction**

La dépollution des sols est un secteur professionnel en plein essor, **comme le montre le tonnage des terres dépolluées qui a progressé de plus de 68 % entre 2006 et 2010**. Il est donc important d'établir un état des lieux afin d'identifier les techniques employées et les risques professionnels associés.

Il s'avère que le traitement des terres polluées se fait majoritairement à l'aide de techniques biologiques qui s'appliquent préférentiellement hors site, dans des installations spécialisées recevant des terres de plusieurs origines. Suivent les techniques de biodépollution des sols in situ puis la biodégradation des polluants des terres mises en andain sur le site. Ces techniques se basent sur le fait que les micro-organismes qui se développent dans un sol pollué y trouvent des conditions favorables et se nourrissent notamment du polluant présent qui est alors dégradé. En modulant des paramètres comme l'oxygène, l'humidité, la température et les éléments nutritifs, la croissance des micro-organismes dépollueurs peut être optimisée. Toutefois, l'évaluation des risques biologiques et chimiques nécessite d'être approfondie et quantifiée, en tenant compte des particularités de chaque chantier. Cela doit permettre d'adapter plus précisément les mesures de prévention des risques pour le personnel travaillant dans le secteur de la biodépollution des sols.

Cette étude est consacrée aux techniques biologiques de traitement des sols pollués.

La nature de la pollution et la fonction des sites contaminés pris en compte dans ce travail reflètent les grandes préoccupations de la gestion des sols contaminés. Ainsi, les informations exploitées dans le cadre de ce travail concerneront les situations suivantes :

## V.2. Les sols : sites d'industrie lourde

Les sols pollués à prendre en compte dans cette étude sont des lieux où s'est établie une activité industrielle et notamment :

- des activités minières : charbon, fer, potasse, bauxite, minerai, etc.
- des activités pétrolières : sites d'exploitation pétrolière, raffineries, stations- service, déversement accidentel d'hydrocarbures
- l'industrie chimique : sites des centres de production et de stockage (tels les sites de la chimie bâloise, à la frontière suisse)
- des friches industrielles : sites d'anciennes usines comme par exemple :
  - ✓ Metaleurop (Nord-Pas-de-Calais) : divers métaux lourds (zinc, plomb, arsenic, métaux spéciaux)
  - ✓ Renault à Boulogne Billancourt (Hauts-de-Seine) : hydrocarbures lourds (huile d'usinage, gazole), chrome VI
- d'autres activités industrielles : cokerie, sidérurgie, fabrication de peinture, traitement de surface, automobile, etc.
- d'anciens sites de décharges (déchets industriels dangereux)

Il peut s'agir de sites actifs ou de sites au repos qui ont accueilli une activité industrielle génératrice de pollution pour les sols.

### V.2.1. Les polluants : organiques et minéraux

Les polluants concernés par cette étude sont les substances organiques, les éléments minéraux, ou leur mélange : **les composés organiques** :

- les produits pétroliers : hydrocarbures aliphatiques légers et lourds
  - linéaires (hexane, octane, etc.)
  - cycliques (BTEX : benzène, toluène, xylène, ...)

- polycycliques : HAP, PCB, pyrène, etc.

- les solvants et solvants halogénés

- phénolés (toluène)

- chlorés (TCE PCE, etc.)

○ **les métaux** : cuivre, zinc, plomb, cobalt, nickel, mercure, cadmium, etc.

○ **les pollutions mixtes** : composés organiques et métaux

Sont exclus du champ de l'étude les pollutions issues de l'utilisation de produits de l'agrochimie et

de l'agriculture (engrais, pesticides, herbicides, fongicides), de matières explosives (TNT, nitroglycérine, etc.), d'éléments radioactifs.

### **V.2.2. Les techniques biologiques**

Les techniques de traitement à identifier et à caractériser dans le cadre de cette étude sont les techniques biologiques, c'est-à-dire les techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant pour réaliser l'opération de dépollution. Ce sont des techniques de décontamination (extraction ou dégradation du contaminant) ou d'assainissement (réduction des risques, c'est-à-dire des impacts sur les récepteurs

via un abattement des sources d'exposition, des doses reçues par les récepteurs ou des organismes présents).

L'organisme vivant utilisé peut être un microorganisme (bactérie, champignon), un végétal (algue, plante, arbuste, arbre), un végétal complexe formé de l'association symbiotique d'un champignon et d'une algue, voire un animal (lombric, vers de terre). Cet organisme vivant agit sur le composé polluant par absorption, accumulation, digestion, transformation, dégradation, évapotranspiration, etc., pour le rendre moins toxique, l'extraire, l'immobiliser ou le diluer considérablement.

On considèrera aussi bien les techniques utilisées individuellement, que celles combinées à un autre procédé qu'il soit physico-chimique, thermique ou biologique. Ainsi, on s'intéressera aux techniques mise en oeuvre de la manière suivante :

o in situ : traitement du sol sur le site même, sans excavation

ex : **phytoremédiation**

o sur site : traitement du sol excavé sur le site même, avant d'être remis en place

ex : **bioréacteur**

o hors site : traitement du sol qui a été excavé et transporté vers un centre de dépollution

ex : **biocentre**

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt a été porté sur les techniques biologiques innovantes et dont le stade de développement se rapproche de l'application sur le terrain et de la commercialisation.

Les techniques déjà anciennes et dont la mise en œuvre évolue peu n'ont pas été prises en compte.

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes et l'analyse des procédés impliqués met en évidence l'existence de deux catégories principales : les techniques de bioremédiation qui utilisent essentiellement des bactéries et les techniques de phytoremédiation qui exploitent les propriétés des végétaux (plantes, arbustes, arbres). Elles peuvent être classées en fonction de leur degré d'innovation :

- les techniques innovantes qui font l'objet de travaux de recherche et développement poussés et d'essais pilotes sur site
- les techniques plus anciennes, qui n'évoluent plus vraiment, à l'exception d'ajustements mineurs pour optimiser leur rendement et gagner en efficacité.

### **V.3. Les techniques biologiques innovantes**

Parmi les techniques biologiques innovantes, certaines sont commercialisées tout en faisant l'objet de travaux de recherche et développement en vue d'améliorer les conditions d'utilisation et d'optimiser les performances, d'autres n'ont pas dépassé le stade expérimental et sont étudiées soit en laboratoire, soit dans des serres, ou font l'objet d'essais sur le terrain (chantiers expérimentaux, sites pilotes). Figurent parmi ces technologies innovantes à la fois des techniques de bioremédiation et de phytoremédiation.

#### **❖ Les techniques de bioremédiation**

utilisent les propriétés dépolluantes de microorganismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé et peuvent être subdivisées en huit catégories selon le principe biologique ou mode de dépollution mis en œuvre. Ces catégories répertoriées ci-après sont présentées plus en détail dans le tableau A :

biodégradation

bioimmobilisation

biolixiviation

bioslurry (traitement en bioréacteur)

biorestauration

bioaugmentation

biostimulation

#### **❖ Les techniques de phytoremédiation**

Exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (strates herbacées, plantes, arbustes, arbres, algues) à interagir avec des composés chimiques organiques ou minéraux pour dépolluer un terrain contaminé *in situ*. Le plus souvent, ce sont les microorganismes de la rhizosphère qui dégradent les composés organiques. Il arrive que les produits issus de la dégradation, qui peuvent ou non être accumulés par le végétal, soient plus dangereux que le polluant d'origine. La biomasse produite peut contenir le polluant (tiges, feuilles) et doit être traitée d'une façon adéquate, qui revient souvent à récolter les végétaux pour les incinérer. La phytoremédiation peut utiliser cinq catégories de procédés pour dépolluer un sol contaminé, listées ci-après et détaillées dans le tableau A :



**Tableau V.1** : Techniques biologiques de dépollution des sols retenues par l'ADEME .

	Technique	Principe	Polluant	Niveau de développement	Exemple	
<i>in situ</i>	Bioremediation (microorganismes)	Biodégradation	Utilisation de la capacité de certains microorganismes à transformer le polluant en substrat (source de carbone, d'énergie)	Hydrocarbures pétroliers, (HAP, BTEX, solvants industriels (TCE, PCE, PCB, métaux lourds	Procédé INIPOL par TOTAL : accélérateur de biodégradation des hydrocarbures. Site expérimental en Russie	
		Bio-immobilisation	Utilisation de la capacité de certains microorganismes à immobiliser un ou plusieurs composants présents à l'état soluble (bactéries)	Métaux et produits pétroliers	BRGM : R&D et essai pilote sur site	Tests sur le site d'Hispano-Suiza (Cr)
		Biolixiviation	Solubilisation et entraînement dans la phase aqueuse par les microorganismes de polluants fixés ou piégés dans le sol	Minerais, métaux lourds (Cu, Cr, Fe, Pb, Zn, Co), phosphore	BRGM et INSA Lyon : R&D dans le cadre de la traitabilité des sols pollués	
<i>hors site</i>	Bioremediation	Traitement en bioréacteur (bioslurry)	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. En fin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place.	Hydrocarbures, phénols, HAP, pétrole, PCB, pentachlorophénol, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils	Commercialisé	HP Biotechnologie a dépollué un site allemand avec le réacteur horizontal du procédé HBBM (hydrocarbures, phénols, HAP).

#### V.4. Diagnostic pollution sol, récapitulatif des réglementations

Les diverses réglementations en matière de **pollution de sols** s'appuient à la fois sur les notions de risques, de réhabilitation, mais aussi sur celle de responsabilité, plus présente encore depuis ces dernières années.

L'objectif ci-après est de présenter par grandes thématiques les différentes et principales réglementations pouvant être recensées. Cette liste n'est de ce fait pas exhaustive, mais permet d'appréhender une vision globale de cet aspect juridique fort complexe.

##### V.4.1. La réglementation relative aux plans de prévention, à la méthodologie d'évaluation et d'appréciation du risque

a) La circulaire BPSPR/2005-400 du 14 décembre 2005 relative à l'approche méthodologique harmonisée pour la gestion des stations-service autoroutières.

Dans le cadre de la prochaine remise en concurrence du contrat de concession de près de 300 stations-service autoroutières, la présente circulaire a pour objet de mettre en place une gestion cohérente des aspects liés à la pollution des sols de ces installations. La circulaire précise les modalités d'application de cette gestion cohérente et du guide méthodologique qui lui est associé.

b) L'arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

L'arrêté porte modification à l'élaboration des études de dangers afin que ces études prennent désormais en compte une série de phénomènes physiques liés aux phénomènes dangereux et aux accidents. En annexe sont précisées des valeurs de référence des seuils d'effets des phénomènes dangereux.

c) La circulaire du 1er mars 2005 relative à l'inspection des installations classées

– sites et sols pollués Conséquences de l'arrêt de la Cour de justice des Communautés européennes dit « Van de Walle »

Il s'agit de l'interprétation d'un arrêt de la Cour de justice des Communautés européennes qui indiquait que « des hydrocarbures déversés de façon non intentionnelle et à l'origine d'une pollution des terres et des eaux souterraines sont des déchets ». La présente circulaire alerte les préfets sur l'impossibilité de transposer directement les dispositions de cet arrêt aux instructions relatives à l'application des législations nationales encadrant respectivement les installations classées et les déchets.

d) La loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 dite « loi Bachelot » relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. S'inscrivant dans une logique de précaution, les dispositions législatives introduites par la loi Bachelot entendent,

d'une part, soumettre les exploitants d'installations classées à la mise à jour régulière de l'état de la pollution des sols sur lesquels est sise l'installation.

La loi institue donc de réelles avancées en matière de remise en état des terrains, renforçant aussi bien le principe de responsabilité des travaux de dépollution que les modalités du processus de réhabilitation des sites. Les obligations faites à l'exploitant de remise en état du site lors de la cessation définitive d'activité sont donc clarifiées. (Pour les nouvelles installations, l'arrêté d'autorisation fixe le niveau de dépollution à atteindre.) L'usage futur du site devra être pris en compte par l'exploitant dans son action de remise en état.

– La circulaire du 3 octobre 2005 relative à la mise en oeuvre des plans de prévention des risques technologiques

La circulaire précise la définition du périmètre d'étude nécessaire à la prescription d'un PPRT.

e) La circulaire DPPR/SEI n° 97-072 du 12 février 1997 relative aux sites et sols pollués. Les circulaires des 3 et 18 avril 1996 avaient introduit la démarche nationale d'identification de sites pollués. La circulaire du 12 février 1997 apporte des compléments concernant la méthodologie d'appréciation du risque vis-à-vis des alimentations en eau potable.

Elle indique également la procédure d'information et de concertation à mettre en place avec les entreprises concernées par la démarche.

f) La directive 96/82/CE du Conseil du 9 déc. 1996 dite « directive Seveso II » La directive remplace celle du 24 juin 1982 à compter du 3 février 1999, en renforçant le dispositif de prévention des accidents majeurs impliquant des substances dangereuses : gestion de l'utilisation et de l'usage des sols afin de réduire les conséquences des accidents majeurs, organisation de la sécurité, renforcement de la participation et de la consultation du public, etc.

– L'arrêté du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. L'arrêté fixe les prescriptions relatives à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans les ICPE soumises à autorisation

mentionnées. Il transpose ainsi la directive européenne du 9 décembre 1996, la directive Seveso II.

Est considéré comme accident majeur « un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation, entraînant, pour les intérêts visés au L. 511-1 du Code de l'environnement, des conséquences graves, immédiates ou différées et faisant intervenir une ou plusieurs substances ou des préparations dangereuses »

L'arrêté précise notamment que l'exploitant entreprend une analyse des risques, puis une étude de dangers.

g) La circulaire du 10 décembre 1999 relative aux sites et sols pollués et aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation.

La circulaire énonce les principes applicables pour la prescription de travaux de réhabilitation sur des sites dont les sols ont été pollués par des activités industrielles classées dans le cadre de la loi du 19 juillet 1976. Des précisions sont apportées sur la réalisation de diagnostics approfondis et d'évaluations détaillées des risques, notamment des risques pour la santé humaine et pour l'environnement.

Elle rappelle le principe d'information des citoyens en matière de pollution des sols.

h) La circulaire du 3 avril 1996 relative à la réalisation de diagnostics initiaux et de l'évaluation simplifiée des risques sur les sites industriels en activité.

i) La circulaire du 18 avril 1996 relative aux sites et sols pollués. Ces deux circulaires complémentaires précisent la démarche d'identification des sites pollués par des ICPE, démarche qui repose sur deux étapes : le diagnostic initial, puis l'étude simplifiée des risques. Les préfets doivent établir une liste des entreprises qui devront réaliser ces études, l'objectif de la circulaire du 18 avril étant de réaliser, sur cinq ans, des diagnostics initiaux et des ESR sur 2000 sites.

j) La directive n° 82/501/CEE du 24 juin 1982 dite « directive Seveso » Au titre de la prévention des accidents majeurs des installations industrielles, la directive impose notamment aux États membres la mise en place d'un système de contrôle des établissements classés à risques. Elle introduit par ailleurs une classification des activités

industrielles en fonction des produits utilisés et de leur quantité sur le site. Elle est remplacée par la directive du 9 décembre 1996 à compter du 3 février 1999.

#### **V.4.2. Réglementation relative à la notion de responsabilité, au principe pollueur-payeur, à la cessation d'activités et à la réhabilitation**

a) La directive n° 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil de 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux.

La directive établit un cadre de responsabilité environnementale fondé sur le principe du « pollueur-payeur » en vue de prévenir et de réparer les dommages environnementaux à un coût raisonnable économiquement. Le délai de transposition de la directive dans les législations nationales

des pays membres est fixé au 30 avril 2007.

b) La loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 dite « loi Bachelot » relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. S'inscrivant dans une logique de précaution, les dispositions législatives introduites par la loi Bachelot entendent, d'une part, soumettre les exploitants d'installations classées à la mise à jour régulière de l'état de la pollution des sols sur lesquels est sise l'installation (voire à la réalisation d'études relatives aux conséquences environnementales de l'activité potentiellement polluante) et, d'autre part, créer des mécanismes de garanties financières, à la charge de l'exploitant, mécanismes devant assurer en particulier les actions de remise en état du site lors de la cession d'activité.

La loi institue donc de réelles avancées en matière de remise en état des terrains, renforçant aussi bien le principe de responsabilité des travaux de dépollution que les modalités du processus de réhabilitation des sites. (Pour les nouvelles installations, l'arrêté d'autorisation fixe le niveau de dépollution à atteindre.) L'usage futur du site devra être pris en compte par l'exploitant dans son action de remise en état.

c) La circulaire du 18 octobre 2005 relative à la mise en oeuvre des nouvelles dispositions introduites par le décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 concernant la cessation d'activités des installations classées.

Suite à la modification du décret du 21 septembre 1977 introduite par le décret du 13 septembre 2005, la circulaire fixe les principes de mise en sécurité du site après la

notification d'arrêt définitif de l'installation ainsi que les conditions de mise en oeuvre du processus de réhabilitation de terrains libérés, depuis le mode de détermination de l'usage futur à l'élaboration du projet de réhabilitation.

Elle détermine les conditions d'application de ces dispositions aux installations soumises à déclaration, aux installations à implanter sur un site nouveau et aux anciens sites.

#### **V.4. 3. Réglementation relative à la gestion de l'utilisation des sols**

a) La loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 dite « loi Bachelot » relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. Les PPRT introduits par la loi créent un outil de maîtrise de l'urbanisation autour des sites identifiés à risques.

b) La loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la Solidarité et au Renouvellement urbains.

Les documents d'urbanisme déterminent les conditions permettant d'assurer « la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des écosystèmes, des espaces verts, des milieux, sites et paysages naturels ou urbains, [...], la prévention [...], des risques technologiques, des pollutions et des nuisances de toute nature ».

c) La loi n° 95-101 du 2 février 1995 dite « loi Barnier » relative au renforcement de la protection de l'environnement – introduction du principe de précaution.

d) La loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux ICPE. La prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets comptent parmi les principaux objets de la loi du 13 juillet 1992.

#### **V.5. Conclusion**

Selon la nature et l'importance de la pollution organique, divers procédés peuvent être mis en oeuvre pour filtrer des gaz en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et du degré d'épuration visé.

Le choix entre ces solutions devra faire intervenir non seulement des considérations d'ordre technique liées par exemple à l'efficacité relative de ces divers procédés, mais aussi un point

de vue économique portant non seulement sur l'estimation des frais d'investissement mais également sur les frais d'exploitation.

Il nous paraît important d'insister sur le fait qu'il n'existe pas de solutions universelles et que l'extrapolation d'un procédé de filtrer, est difficile, voire même quasi impossible.

## References

[1] Casteel SW, Weis CP, Henningsen GM, et al. Estimation of Relative Bioavailability of Lead in Soil and Soil Like Materials Using Young Swine. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114, 1162–71 doi:10.1289/ehp.8852 available at <http://dx.doi.org/> [Online 4 April 2006].

[2] Cave, M., Wragg, J., Klinck, B., Grön, C., Oomen, A.G., Ollson, C., Koch, I., Reimer, K., Basta, N., Tack, K and Casteel, S. Preliminary assessment of a unified bioaccessibility method for Arsenic in soils. International conference in Epidemiology and Environmental Exposure. Paris, 2- 6 september 2006.

[3] Techniques de traitement par voie biologique des sols pollués, septembre 1998, coll. « Connaître pour agir » (ADEME/Rhone-Poulenc/IFP).

[4] Ministère du Développement durable, Environnement, Faune et Parcs (2002a). Bilan sur les terrains contaminés/statistiques générales en décembre 2001. In Gouvernement du Québec. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/bilan-2001/chapitre\\_2.htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/bilan-2001/chapitre_2.htm) (Page consultée le 13 février 2013)

**Chapitre VI :** Autres procédés de traitement : traitement thermiques, procédés chimiques.

---

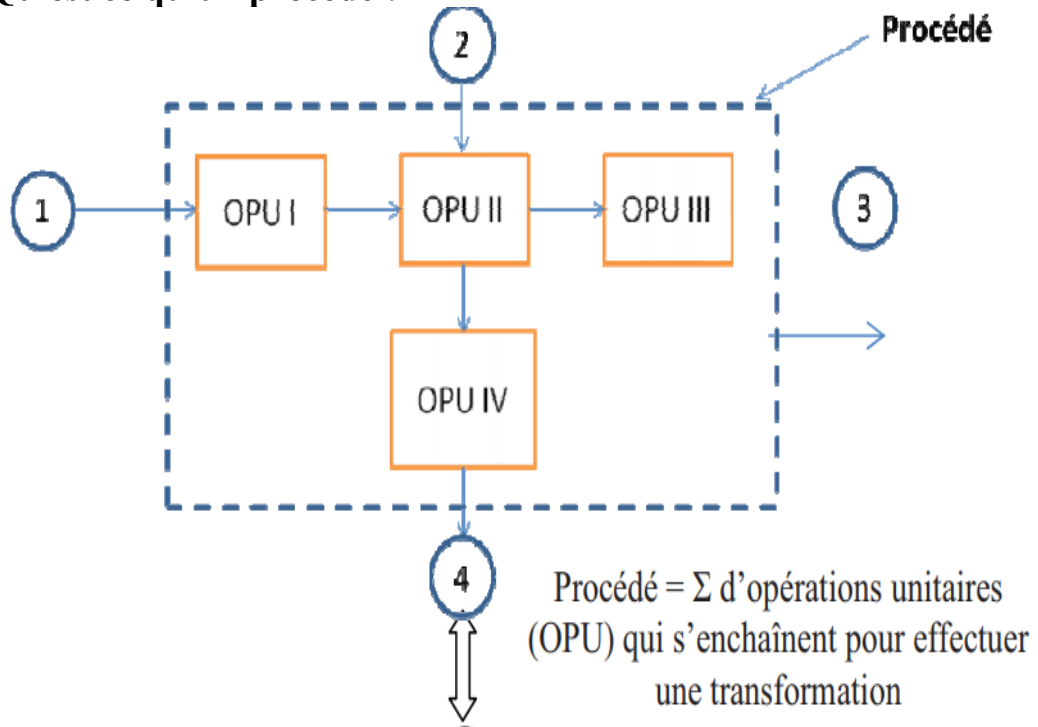
## VI.1 Introduction

Dans l'industrie chimique un procédé de fabrication peut être décomposé en une succession d'opération qui constitue ses étapes clés. On distingue généralement le/les réacteurs qui sont constitués par les enceintes dans lesquelles se déroulent les réactions chimiques et les opérations de séparations qui sont destinées à séparer et purifier les constituants d'un mélange. Les opérations unitaires sont des procédés permettant de séparer des mélanges en leurs exposants purs. Elles ont d'une grande importance industrielle et elles ont rendu un grand service à l'humanité surtout dans l'industrie pétrochimique, chimique et dans le domaine de traitement des eaux. Le principe fondamental de toute opération unitaire est toujours le même, à savoir la préparation et la mise en contact intime des phases en présence pour assurer le développement des réactions, les mécanismes de transport et de transfert de masse (ou matière), de chaleur et de quantité de mouvement qui ont lieu durant la chaîne de transformation, ainsi que la séparation des constituants du mélange résultant.

- Le choix d'une opération unitaire dépend de différentes considérations :
  - La possibilité effective de séparation sur des bases thermodynamiques;
  - La possibilité offerte par la cinétique physique d'avoir un transfert plus ou moins rapide selon la nature des phases en présence;
  - La volonté d'utiliser préférentiellement certaines sources d'énergie (par exemple l'énergie électrique);
  - Le souhait d'économiser de l'énergie ou de diminuer les frais de fonctionnement ainsi que celui d'abaisser les coûts d'investissement.
  
- Avant de débiter un cours de bilans, il faut bien définir le contexte dans lequel il doit être développé et donc répondre à ces différentes questions :

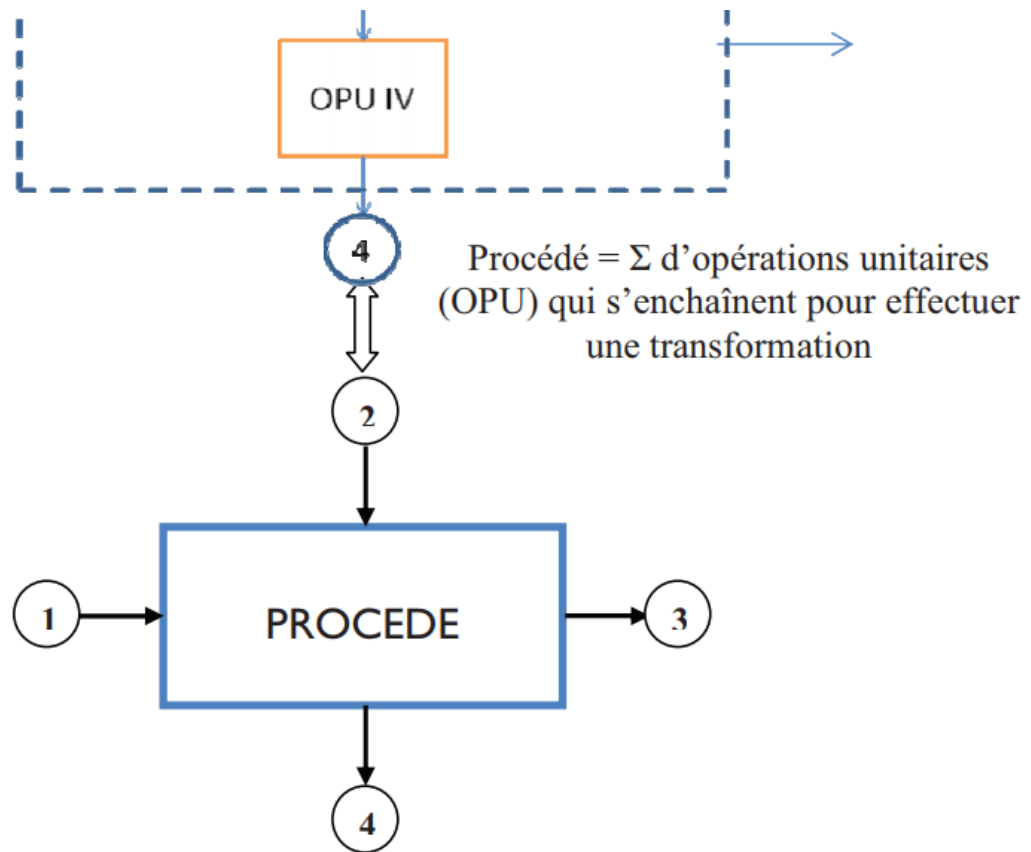


- Qu'est ce qu'un « PROCÉDE » ?
- Qu'est ce qu'un « BILAN DE MATIERE » ?
- A quoi servent-ils ??
- Comment établit-on ces bilans ?
- **Qu'est ce qu'un procédé :**



### VI.1.1. Définition :

- **Une opération unitaire** est une subdivision d'un procédé industriel qui consiste en général en une opération physique ou chimique.



- **Un procédé** : de séparation est une technique qui permet d'enrichir un mélange de deux ou plusieurs composés en produit recherché

## VI.2. Les principales opérations unitaires

### VI.2. 1. Extraction liquide / liquide : séparation de liquides miscibles.

- **Séchage** : récupération de l'humidité ou d'autres liquides d'un solide par évaporation ou d'autres moyens.
- **Tamissage** : triage de particules solides selon leurs granulométries.
- **Filtration** : séparation des particules solides à partir d'un liquide ou d'un gaz.
- **Distillation** : séparation des liquides miscibles de densités différentes par évaporation.
- **Absorption** : transfert d'un soluté gazeux vers une phase liquide.

- **Adsorption** : récupération sélective des substances à partir d'un liquide ou d'un gaz par réaction avec les solides.

### VI.3. Colonnes de séparation

**Absorption / lavage de gaz** : Transfert d'un soluté dissous en phase gazeuse vers une phase liquide.

**Désorption** : Transfert d'un soluté dissous en phase liquide vers une phase gazeuse.

**Extraction liquide/liquide** : Extraction d'un soluté d'une phase liquide à une autre, ces deux phases étant non miscibles.

Ces OPU de séparation s'effectuent dans des systèmes appelés échangeurs de matières ou colonnes conçues de manière à augmenter la surface d'échange entre les différentes phases présentes. (Figure 1) Il en existe 2 types principaux :

- **Echangeurs à structure continue** - **Echangeurs à structure discontinue**

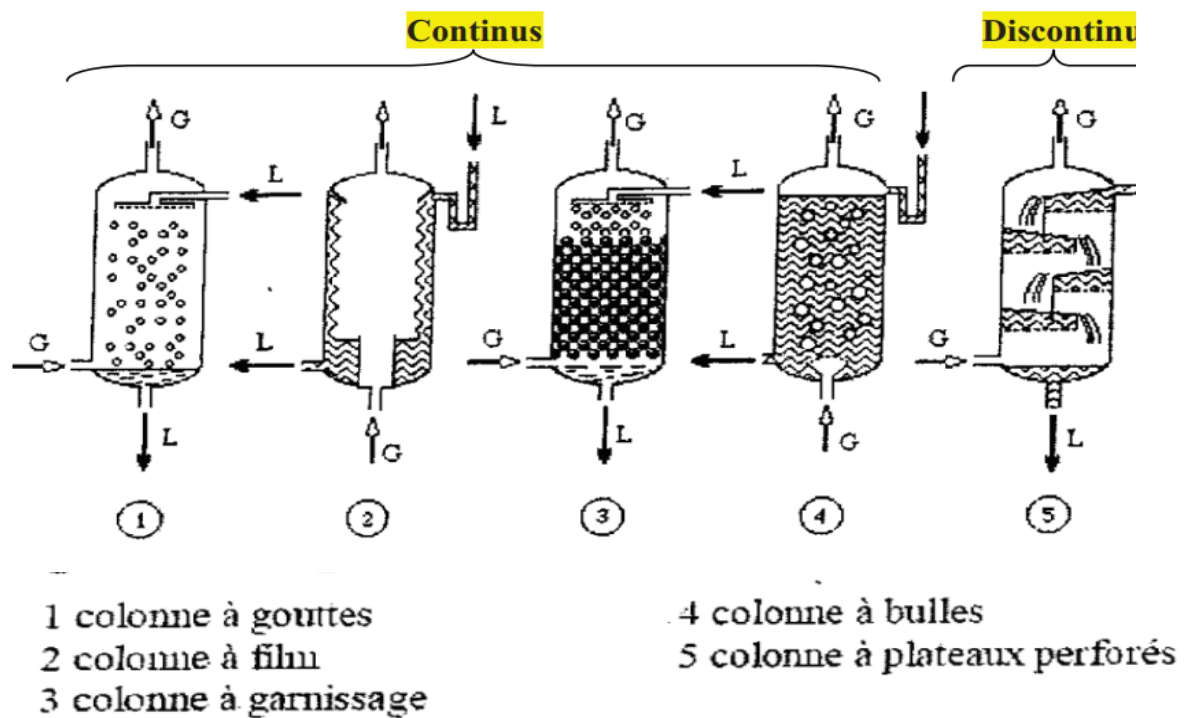


Figure VI.1 : Les différents types de contacteurs gaz/liquide.

## VI.4. Qu'est ce qu'un bilan de matière

Pour un procédé et pour une quantité de produit à fabriquer, le bilan de matière est la connaissance des débits à l'entrée et à la sortie de chaque OPU.

- Bilan sur chaque OPU ou bilan total sur tout le procédé.
- Bilan partiel sur un constituant ou bilan global sur tous les constituants.

### ➤ A quoi servent les bilans ?

Les bilans servent à calculer l'ensemble des données pour dimensionner une installation.

Etablir les bilans sert également à optimiser une installation existante.

Repérer les pertes de chaleur, optimiser l'utilisation des produits, vérifier le bon fonctionnement des capteurs.....

$$\text{Débit d'entrée} = \text{Débit de sortie}$$

Comment établit-on ces bilans ?

## VI.5. Absorption-Désorption

### VI.5. 1. Introduction

L'absorption est un procédé de transfert de matière d'un composé présent dans une phase gazeuse vers une phase liquide par dissolution. L'opération inverse de transfert d'un gaz dissous par un gaz inerte est appelé désorption. Ces procédés sont effectués dans une colonne à garnissage entre un effluent gazeux ascendant et une solution ou un solvant descendant (fonctionnement à contre-courant).

La présence de garnissage augmente la surface d'échange liquide – gaz, donc les transferts de matière. Un échangeur de chaleur en pied de colonne permet de refroidir la solution sortante (l'absorption est une réaction exothermique); en fonctionnement discontinu cet échangeur permet de vérifier l'influence de la température sur l'efficacité de l'absorption. Un mélangeur statique, situé en amont de l'introduction de gaz dans la colonne, sert à diluer le gaz à traiter avec un gaz inerte (air ou azote).



**Figure VI.2.** Pilote de l'absorption dans laboratoire USTO, MB.

#### **IV.5.2. Les termes de phénomène d'absorption**

- Les termes de phénomène d'absorption sont :

-

**a- Le soluté ou absorbât :** est le gaz contenu dans le gaz porteur, que l'on doit extraire par dissolution dans le liquide.

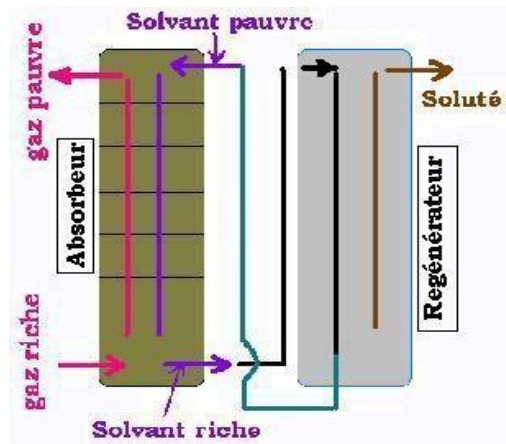
**b- Le diluant ou inerte :** le gaz mélangé au soluté. Il est souvent insoluble ou peu soluble dans le solvant.

**c--Le gaz riche :** le mélange gazeux entrant diluant-soluté.

**d-Le gaz pauvre :** le gaz sortant, dépourvu plus ou moins complètement du soluté.

**e-L'absorbeur ou solvant :** c'est le liquide destiné à dissoudre le soluté.

**f- La solution riche :** c'est le liquide obtenu par dissolution du soluté dans le solvant.



**Figure IV.3.** Schéma d'une colonne d'absorption avec régénération de solvant.

### IV.5.3. Description détaillé sur le procédé étudié

L'absorption gaz-liquide est une opération (physique) unitaire dans laquelle un ou plusieurs composés sont transférés d'une phase gazeuse vers une phase liquide (absorption) ou d'une phase liquide vers une phase gazeuse (désorption) en fonction des différences d'affinité pour ces deux phases. Les performances de ce type d'opération sont principalement contrôlées par la cinétique de transfert de matière de part et d'autre de l'interface gaz-liquide.



**Figure VI.4.** Schéma détaillé de l'absorption.

➤ ***La température***

La solubilité augmente quand la température diminue il y aura donc tout intérêt à travailler à température aussi basse que possible il faut de plus tenir compte du fait que l'absorption est un phénomène exothermique et que la chaleur produite devra être dissipée.

➤ ***La surface de contact***

En augmentant la surface de contact entre le gaz et le liquide augmente la possibilité d'échange entre les deux phases pour un contacteur gaz/liquide il sera donc important d'avoir une grande aire interfaciale (ou aire spécifique).

➤ ***Le temps de contact***

Le temps de contact doit être suffisant pour permettre le transfert de polluant de la phase gaz vers la phase liquide il est directement fonction du rendement de dépollution recherché et il conditionne en partie dimensionnellement de l'absorbeur.

➤ ***La réaction chimique***

L'adjonction d'un réactif dans la solution de lavage a un double objectif

- ✓ Éliminer le polluant de la phase liquide et donc augmenter le transfert vers cette phase
- ✓ régénérer en continu la solution de lavage

➤ **Principe de l'absorption**

- dissoudre un soluté contenu dans un mélange gazeux, à l'aide d'un solvant liquide dans lequel le soluté est soluble
- absorption de nature physique (équilibres physico-chimiques)
- absorption de nature chimique (avec réaction, par exemple absorption du CO<sub>2</sub> par de la soude)
- absorption discontinue, semi-continue (continue sur la phase gaz,

et discontinue sur la phase liquide), ou continue (sur les deux phases)

- opération exo-thermique (dégagement de chaleur)
- favorisée par une pression élevée et une faible température

➤ **Principe de l'absorption:**

- dissoudre un **soluté** contenu dans un mélange gazeux, à l'aide d'un **solvant** liquide dans lequel le soluté est soluble
- absorption de nature physique (équilibres physico-chimiques)
- absorption de nature chimique (avec réaction, par exemple absorption du CO<sub>2</sub> par de la soude)
- absorption discontinue, semi-continue (continue sur la phase gaz, et discontinue sur la phase liquide), ou continue (sur les deux phases)
- opération exo-thermique (dégagement de chaleur)
- favorisée par une pression élevée et une faible température

**Principe de la désorption:**

- opération inverse de l'absorption, c'est-à-dire élimination d'un soluté dissous dans un liquide, à l'aide d'un gaz non soluble dans ce liquide
- opération généralement endo-thermique (absorption de chaleur)
- favorisée par une faible pression et une température élevée

**Exemples de solutés en absorption - désorption**

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, SiF<sub>4</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub>, ...

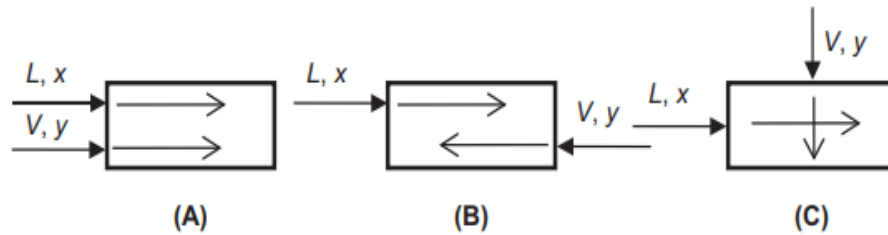
**Exemples de solvants en absorption**

Eau sous pression, amines (absorption chimique par l'éthanolamine...), ...



➤ **Divers types de procédés :**

La séparation d'un composé C après un équilibre entre deux phases, L et V, se fait après avoir effectué un contact efficace entre ces phases. Ce contact peut se faire en continu ou en discontinu en procédant à une circulation des phases à : – co-courants (courants parallèles) (Fig. A) ; – contre-courants (méthodique) (Fig. B) ; – courants croisés (courants étagés) (Fig. C).



(A) A CO-courants. (B) A Contre-courants. (C) A Courants croisés.

**Figure VI.5.** Divers modes de circulation des courants dans une opération de séparation.

#### VI.5.4. Formulation théorique de l'équilibre liquide-gaz

Pour une faible concentration de soluté, la loi de Henry est employée pour exprimer l'équilibre entre les phases.

$$P_i = H_A \cdot X_i \quad ; \quad P_A = H_A \cdot X_A \quad ;$$

**P<sub>A</sub>**: est la pression partielle du soluté A dans la phase gazeuse;

**X<sub>A</sub>**: la fraction molaire dans la phase liquide

**H<sub>e</sub>**: est la constante de Henry du soluté A, à l'état gaz on applique la

La loi de Dalton (Gaz) :

$$P_A = P_{\text{tot}} \cdot Y_A$$

**Y<sub>A</sub>**: fraction molaire en phase gaz /entre Henry et Dalton

On fait :  $P \cdot Y_A = H_A \cdot X_A$

Il ya une courbe de distribution est la pente  $H_A/P$ .

### VI.5.5.Méthode d'absorption

Les principales opérations peuvent être classées d'après le sens du déplacement des fluides, gaz et liquide, en deux catégories :

L'absorption à Co-courant

L'absorption à contre-courant

#### Équations de bilan matière

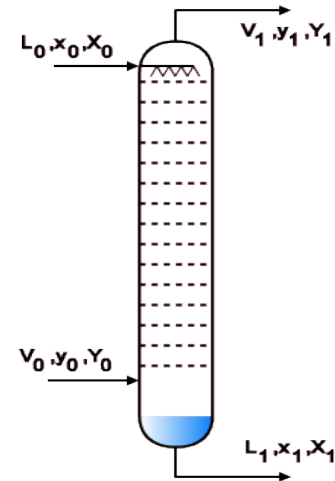
##### ❖ Notations phase liquid :

**L** débit de la phase liquide, indice **0** à l'entrée, **1** à la sortie

**x** titre massique en soluté dans la phase liquide

**X** rapport massique en soluté dans la phase liquide, avec  $X = x/(1-x)$

**L'**, débit du liquide exempt de soluté, c.à.d. :  $L' = L (1-x)$ . Ce débit est constant tout le long de la colonne lorsque le gaz inerte est insoluble dans le liquide.



##### ❖ Notations phase gaz :

- V débit de la phase gaz à l'entrée, indice 0 à l'entrée, 1 à la sortie
- y titre massique ou molaire en soluté dans la phase gaz
- Y rapport massique ou molaire en soluté dans la phase gaz, avec  $Y = y/(1-y)$
- V' débit de gaz inerte hors soluté, c.à.d.  $V' = V (1-y)$ . Ce débit est constant tout le long de la colonne lorsque le gaz inerte est insoluble dans le liquide.

#### Bilans matières global:

**Entrée= sortie**

**E=S**

Bilans matières, en soluté, en solvant et en inerte (bilans matières partielles) :

- $L_0 + V_0 = L_1 + V_1$  / ou bien  **$Le+Ve = Ls+Vs$**
- $L_0 x_0 + V_0 y_0 = L_1 x_1 + V_1 y_1$  /  **$LeXe + VeYe = LsXs + VsYs$**

- $L' = L_0 (1-x_0) = L_1 (1-x_1)$

$$V' = V_0 (1-y_0) = V_1 (1-y_1)$$

Rq : LeXe: débit de soluté de la phase liq a l'entrée.

### Quelques calculs classiques en absorption - désorption:

#### Exercice du cours:

- L'équilibre à 20°C et pression atmosphérique d'une solution eau - ammoniacale est donné par:

**Phase liquide:** solution aqueuse d' $\text{NH}_3$  à 5g pour 100g d'eau

**Phase gaz:** pression totale  $P_{\text{totale}} = 760 \text{ mmHg}$ , Pression partielle  $P_{\text{NH}_3} = 31.7 \text{ mmHg}$ .

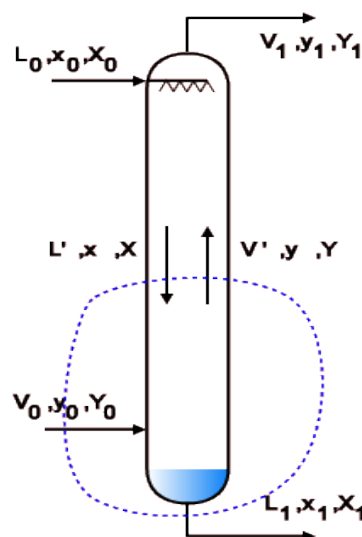
1- Calculer les titres et rapports massique et molaires des deux phases.

2- Calculer la concentration molaire de la phase liquide.

#### Schéma de principe

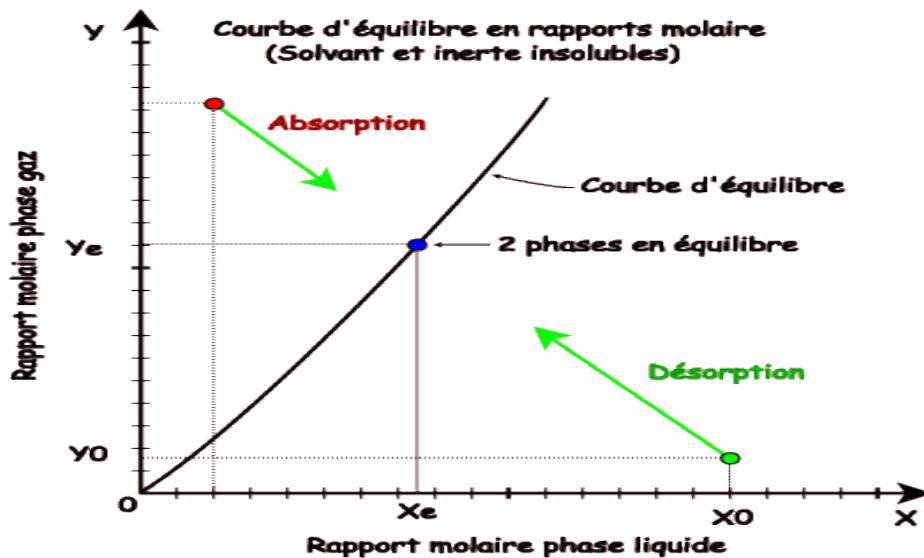
#### Droite opératoire et construction de MacCabe et Thiele à contre courant

**Données:**  $M_{\text{NH}_3} = 17 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $\rho = 0.980 \text{ kg.L}^{-1}$ ,  $M_{\text{air}} = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ .



## Représentation des équilibres

Graphe d'absorption et désorption



Y rapport molaire en soluté phase gaz

X rapport molaire en soluté phase liquide

Débit de solvant pur:  $L' = L (1-x) = L_0 (1-x_0) = L_1 (1-x_1)$

Débit d'inerte pur:  $V' = V (1-y) = V_0 (1-y_0) = V_1 (1-y_1)$

Bilans sur l'enveloppe bleue:  $L x - L_1 x_1 = V y - V_0 y_0$

En remplaçant  $L_1$  par  $L'/(1-x_1)$ ,  $L$  par  $L'/(1-x)$ ,  $V_0$  par  $V'/(1-y_0)$  et  $V$  par  $V'/(1-y)$  on obtient:

$$L' x / (1-x) - L' x_1 / (1-x_1) = V' y / (1-y) - V' y_0 / (1-y_0)$$

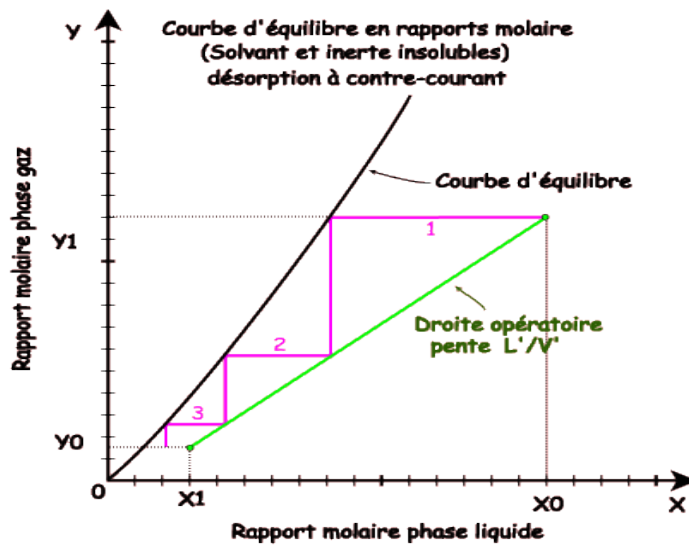
soit encore  $L' (X - X_1) = V' (Y - Y_0)$ , qui s'écrit enfin:  $(Y - Y_0) = (L'/V') (X - X_1)$

C'est l'équation de la droite opératoire, qui passe par les points  $(X_1, Y_0)$  et  $(X_0, Y_1)$ , coordonnées des deux extrémités de la colonne. Le tracé de cette droite opératoire sur la courbe d'équilibre permet de déterminer le **Nombre d'Etage Théorique NET** de la colonne.

### Remarques:

Cette construction peut être tracée sur la courbe d'équilibre en rapport massique ou en rapport molaire, le rapport  $L'/V'$  devant être dans les mêmes unités.

Cette construction peut également être tracée sur la courbe d'équilibre en titre massique ou en titre molaire avec une approximation tout à fait satisfaisante si les titres sont inférieurs à quelques pourcent (1 à 5% par ex)



## VI.6. Les colonnes

### VI.6.1. Description d'une colonne:

Les colonnes ont une forme cylindrique, leur hauteur est toujours très grande comparée à leur diamètre.

Les plus utilisées sont équipées de plateaux (ils peuvent être de plusieurs types); mais il existe aussi des colonnes à garnissage (là aussi plusieurs types de garnissage sont disponibles sur le marché).

Il existe 2 types de matériels internes aux colonnes : les plateaux et les garnissages.



**Figure VI.6.** : Colonne d'absorption dans l'industrie.

En ce qui concerne les colonnes à plateaux, elles sont généralement utilisées pour :

- des opérations de distillation
- des opérations d'absorption sans réaction chimique ou impliquant des réactions chimiques ayant une vitesse moyenne.

Quand aux colonnes à garnissage, elles sont utilisées pour des opérations :

- de distillation,
- d'absorption sans ou avec réaction chimique (vitesse de réaction moyenne ou très grande),
- De lavage des gaz.

**Tableau IV.1** : Tableau de quelque colonnes et leur usage.

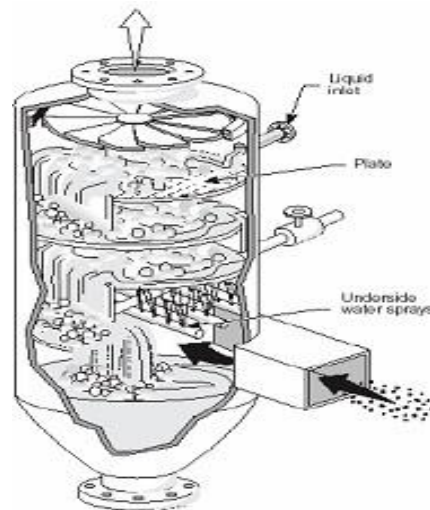
Appareil	Usage	Pertes de charge et coûts énergétiques
Colonne à garnissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appareillage le plus classique</li> <li>• Tous les usages</li> </ul>	Moyens
Colonne à plateaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplace la colonne garnie pour les diamètres élevés ou si le débit est trop faible pour mouiller le garnissage</li> </ul>	Moyens
Colonne à pulvérisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement des composés à très grande solubilité</li> <li>• Recommandé lorsqu'il y a une réaction chimique</li> </ul>	Faibles
Laveur Venturi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recommandé lorsqu'il y a une réaction chimique</li> </ul>	Élevés
Mélangeurs statiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recommandé lorsqu'il y a une réaction chimique</li> </ul>	Élevés

## VI.6.2. Les colonnes à plateaux

Les colonnes à plateaux ont à l'origine été inventées pour la distillation, mais elles peuvent également être utilisées comme absorbeur. Les plateaux munis de déversoirs sont particulièrement bien adaptés pour l'absorption, mais en fait, tous les types de plateaux peuvent être utilisés.

Les plateaux, éléments actifs d'une colonne, sont en fait conçus pour assurer la dispersion de la phase gazeuse au sein du liquide en utilisant directement l'énergie de pression de cette phase gazeuse. Les dispositifs de dispersion divisent la vapeur en jets indépendants et augmentent la surface de contact avec le liquide.

Au sein des colonnes à plateaux, le mouvement de la phase liquide a toujours lieu du haut vers le bas.



**Figure VI.7.** Schéma d'une colonne à plateaux à courant croisé.

Mis à part certains dispositifs, dans leur ensemble, les plateaux peuvent être classés en deux grandes catégories :

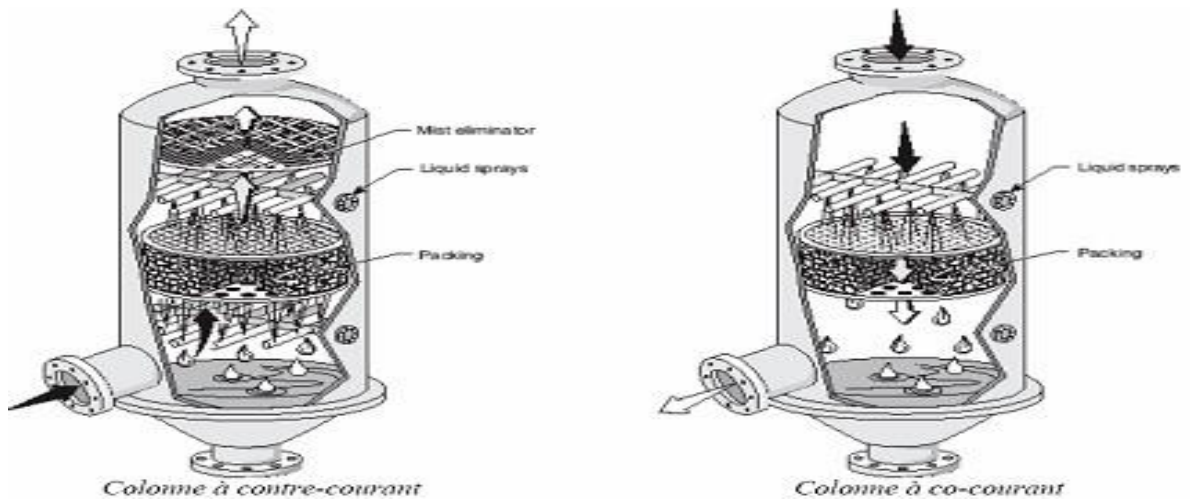
- les plateaux à courants croisés avec trop plein
- les plateaux à contre-courant sans trop-plein

## IV.6.3. Les colonnes à garnissage

### IV.6.3.1. Description et principe de fonctionnement

Une colonne à garnissage est une colonne qui est remplie d'éléments permettant d'augmenter la surface de contact entre la phase gazeuse et la phase liquide.

Ce sont ces éléments qui constituent le garnissage.



**Figure VI.8.** Schéma des colonnes à garnissage à contre-courant et à co-courant.

La colonne contient également :

- dans sa partie inférieure, un plateau pour supporter le garnissage et un injecteur de gaz ;
- dans sa partie supérieure, un distributeur de liquide et parfois un dévésiculeur ;
- parfois un redistribuera.

En considérant la façon d'alimenter la colonne en gaz et en liquide, on peut distinguer trois types de colonnes:

- à co-courant ;
- à contre-courant ;
- à flux croisé.

Dans les colonnes à garnissage, le liquide est pulvérisé sur le garnissage placé entre des grilles. La phase liquide qui contient l'absorbant, forme un film sur les éléments de garnissage (zone de mouillage).

Le garnissage qui crée une série d'obstacles sur le parcours du liquide et du gaz au sein de la



colonne permet :

- d'augmenter la surface de contact entre les deux phases ;
- d'augmenter le temps de séjour des deux phases dans la colonne et donc leur durée de contact
- de créer un régime turbulent de la phase gaz.

#### **IV.6.3.2. Caractéristiques de fonctionnement**

Les colonnes garnies peuvent avoir une grande efficacité. L'efficacité pour une colonne donnée, dépend d'un grand nombre de facteurs, à savoir :

- la vitesse du gaz ;
- la solubilité du polluant dans la solution ;
- la concentration de l'absorbant dans la solution ;
- la réactivité éventuelle du gaz avec les constituants du liquide ;
- la diffusivité du polluant dans la phase gazeuse et de l'absorbant dans la phase liquide ;
- la teneur en polluant de la phase gazeuse ;
- la hauteur de la colonne.

Un des paramètres très important pour le dimensionnement des colonnes à garnissage est la perte de charge, car c'est elle qui limite le débit de gaz introduit dans la colonne.

La perte de charge est proportionnelle :

- au carré de la vitesse de propagation du gaz au sein de la colonne ;
- à la masse volumique du gaz.

Elle augmente également avec le débit du liquide

#### **IV.6.3.3 Domaine d'application:**

Les colonnes à garnissage sont généralement utilisées pour l'absorption de gaz et de substances corrosives.

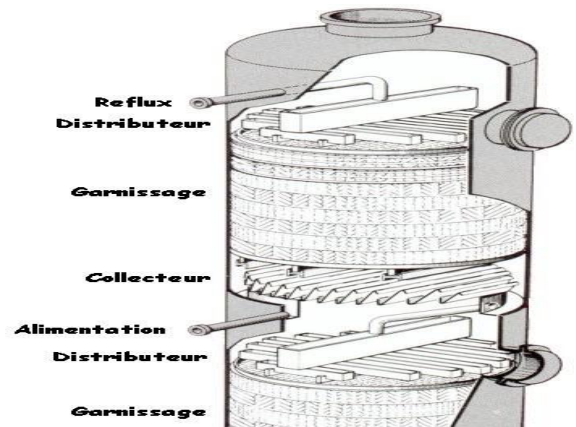
Si le barbotage de la phase gaz dans le liquide provoque son moussage, il est préférable de choisir une colonne du type à garnissage.

De même il sera préférable d'utiliser une colonne à garnissage pour :

- les opérations discontinues car la rétention du liquide dans ce type de colonne est faible.
- les transferts de matière limités par la phase gazeuse.



**Figure VI.9.** Colonne d'absorption a garnissage



**Figure VI.10.** Schéma d'une colonne d'absorption a garnissage

## Références

- [1] Spanjers H ; Vanrolleghem P.A ; Olsson G ; Dold P.L, (1998). Respirometry in control of the activated sludge process : Principles, IAWQ, Scientific and Technical Report N°7
- [2] Laouedj Nadjia , 2017.Opérations Unitaires Cours ,Université des sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf Faculté de Chimie.
- [3]Henri ANGELINO, Henri GIBERT, Pierre PIGANIOL, « **GÉNIE CHIMIQUE** », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 22 février 2023. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/genie-chimique/3-les-bases-techniques/>
- [4] Fernández G. (24 novembre 2014). Opérations unitaires Récupéré le 24 mai 2018 sur: [industriaquimica.net](http://industriaquimica.net)

[5] Carlos A. Bizama Fica. Opérations unitaires: Thème 4: Types d'opérations unitaires.  
[PDF] Récupéré le 24 mai 2018 de: academia.edu

[6] Cours: Technologie chimique (organique). *Conférence 3: Principes fondamentaux des processus unitaires et des opérations unitaires dans les industries chimiques organiques.*  
[PDF] Récupéré le 24 mai 2018 de: nptel.ac.in.

## Des Exercices

---

### **Exercice 1:**

Une mole de gaz parfait se trouvant dans les conditions normales. Donner la valeur de la constante des gaz parfaits (R) lorsqu'elle est exprimée en :

- a- L.atm.K-1.mol-1 ;
- b- b- en J.mol-1.K-1 ;
- c- c- en L.mmHg.mol-1.mol-1 ;
- d- d-en cal.mol-1.K-1

**Exercice 2** : Un réservoir contient 30 m<sup>3</sup> d'air à 400 K et 1,013.10<sup>5</sup> Pa. Sachant que la composition molaire de l'air est de 20 % d'oxygène et 80 % d'azote, déterminer :

- a) La masse totale du mélange
- b) La concentration massique de l'azote
- c) La masse volumique du mélange
- d) La pression partielle de l'oxygène

### **Exercice 3 :**

**Expérience 1** Un mélange gazeux est constitué de diazote N<sub>2</sub> et de dioxygène O<sub>2</sub>, la composition de ce mélange est inconnue. La pression du mélange gazeux est égale à P<sub>0</sub>=385.10<sup>5</sup> Pa pour une température de T<sub>0</sub>=25°C. Le système est fermé. (R=8,314 J.K-1.mol

- 1) Déterminer la nouvelle pression (P<sub>1</sub>) du gaz ?
- 2) Quelle est la quantité de matière totale de gaz si le volume est de 10 L ?

**Expérience 2** grâce à une réaction adaptée, la totalité du dioxygène est enlevée du mélange, alors que le diazote demeure inaltéré. On mesure une nouvelle pression P'=250.10<sup>5</sup>Pa. On rappelle que le mélange initial était celui décrit au tout début de l'exercice).

3) Calculer la fraction molaire en diazote et en dioxygène dans le mélange initial ?

**Exercice 4 : Application de la loi de Henry: solubilité de l'oxygène dans l'eau**

Les constantes de Henry pour le système eau - oxygène sont:

- à 20°C,  $H_{x,20^{\circ}\text{C}}=4.01\text{e}4$  atm/titre molaire,
- à 0°C,  $H_{x,0^{\circ}\text{C}}=2.55\text{e}4$  atm/titre molaire.

Calculer la quantité d'oxygène dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'air à 20°C (on dit aussi à saturation) dans les systèmes d'unités suivantes:

- titre molaire,
- titre massique,
- $\text{g.m}^{-3}$ ,
- $\text{mol.L}^{-1}$ .

En déduire les constantes de Henry pour l'oxygène à 20°C  $H_{c,20^{\circ}\text{C}}$  et à 0°C  $H_{c,0^{\circ}\text{C}}$ , en  $\text{atm.L.mol}^{-1}$ .

**Exercice 5; Bilan matière d'une désorption Eau-NH3-Air**

On réalise en continu dans une colonne à garnissage la désorption d'une solution eau-NH<sub>3</sub> par de l'air exempt d'NH<sub>3</sub>. Les conditions de fonctionnement sont les suivantes:

- Alimentation liquide:  $L_e = 4 \text{ kg.h}^{-1}$ , titre massique  $x_{e,\text{NH}_3}=7\%$ ,
- Sortie liquide:  $L_s = 3.8 \text{ kg.h}^{-1}$ ,  $x_{s,\text{NH}_3}=2.1\%$ ,
- Débit d'air d'alimentation:  $V_e = 1.3 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$  (sans NH<sub>3</sub>).

1°) Calculer le débit masse d'NH<sub>3</sub> désorbé en  $\text{g.h}^{-1}$ .

2°) Calculer les rapports massiques en NH<sub>3</sub> des phases liquides entrant et sortant de la colonne, notés  $X_{e,\text{NH}_3}^{\text{mass}}$  et  $X_{s,\text{NH}_3}^{\text{mass}}$ .

3°) Calculer les rapports molaires en NH<sub>3</sub> des phases liquide entrant et sortant de la colonne, notés  $X_{e,\text{NH}_3}^{\text{mol}}$  et  $X_{s,\text{NH}_3}^{\text{mol}}$ .

4°) Calculer le rapport molaire en NH<sub>3</sub> de la phase gaz sortant  $Y_{s,\text{NH}_3}^{\text{mol}}$ .

Données:

- $M_{\text{air}}=29 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{eau}}=18 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{NH}_3}=17\text{g.mol}^{-1}$ ,  $R=8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,
- Conditions Normales de Température et de pression (CNTP): 0°C ou 273.15K et 1.013e5 Pa.
- rappel: 1 Nm<sup>3</sup> (normal mètre cube) est 1 m<sup>3</sup> de gaz pris dans les CNTP.

**Questions de cours :**

1. Citer les principaux gaz à effet de serre ?

2. Pourquoi la présence de l'ozone  $O_3$  dans la stratosphère est-elle importante ?
3. Définir le Smog, Quelles sont les principaux polluants atmosphériques et leurs sources ?
4. Définir le procédé industriel et quels sont les divers types de procédés ?