
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : eau sol et Aménagement

Thème

**ETUDE CRITIQUE DES DIFFERENTS MOYENS DE DEPOLLUTION
ET DE PREVENTION CONTRE LA POLLUTION DES EAUX ET DES
SOLS**

Présenté par

HEZZAT HICHEM

Devant le jury composé de :

Bessedik M.	<i>Maître de Conférences classe B</i> – Université de Tlemcen	Président
Adjim M.	<i>Maître de Conférences classe A</i> – Université de Tlemcen	Encadreur
Adjim F.	<i>Maître de Conférences classe A</i> – Université de Tlemcen	Co-encadreur
Chiboub F.A.	<i>Professeur</i> de département d'hydraulique – Université de Tlemcen	Examineur
Djedid H.	<i>Maître Assistante</i> Chargée de Cours – Université de Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2011-2012

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes parents, à mes frères et sœurs et à mes amis(e).

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier Dieu pour m'avoir inspiré la volonté et le courage d'acheminer ce travail jusqu'à la fin.

Mes remerciements vont d'abord à mes encadreurs Mr M. Adjim et M^{me} F. Adjim qui, avec leurs expériences, m'ont guidé le long de la réalisation de ce travail. Leurs conseils et recommandations ont été précieux pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Mr A. Chiboub Fellah et Mme H. Djedid pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire en acceptant de l'examiner. Mes vifs remerciements vont à Mr M. Bessedik pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et il me serait impossible de citer tous, mais j'en suis sûr qu'ils s'y reconnaîtront dans ce remerciement.

RESUME

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît, en totalité ou en partie, comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directs ou indirects. Ces modifications génèrent des conséquences néfastes sur les milieux écologiques en général et sur l'Homme et sa santé en particulier.

Pour limiter la pollution des eaux et des sols, la question de la nécessité d'une dépollution peut être posée. La dépollution est un traitement pour rendre les sources propres afin de satisfaire les besoins des populations. Le traitement des sources contaminées est coûteux. A cet effet, la prévention est le seul moyen de lutte contre la pollution.

Dans ce travail, nous essayons dans un premier temps de décrire les différents moyens de prévention et dépollution des eaux et des sols. Nous établissons ensuite une étude sur les principaux textes législatifs concernant la protection contre la pollution à l'échelle nationale, et à l'échelle mondiale. La comparaison de la législation algérienne avec la législation des pays développés, montre que notre pays nécessite un enrichissement du point de vue législation, ou bien du point de vue de son application sur terrain.

Dans la région de Maghnia, l'oued Mouillah est soumis à l'importante pollution générée par les rejets liquides et solides des villes d'Oujda et Maghnia, cette pollution affecte le milieu naturel jusqu'à atteindre le barrage Hammam Bougherara. Pour maîtriser ce problème, des recommandations pour les travaux futurs sont données.

Mots-clés : eaux – sol – pollution – dépollution – prévention - textes législatifs - bassin versant d'oued Mouillah - Barrage Hammam Bougherara.

ملخص

التلوث هو تغيير سلبي في البيئة الطبيعية الذي يظهر كليا أو جزئيا كمنتج ثانوي لعمل الإنسان، من خلال الآثار المباشرة أو غير المباشرة. هذه التغييرات تولد نتائج تؤثر على المجتمعات الإيكولوجية والبشرية والصحة.

لحد من تلوث المياه والتربة، يمكن طرح السؤال عن الحاجة إلى التنظيف. التنظيف هو علاج لهذه المصادر، هذه المصادر تعتبر خاصة لتلبية حاجيات الناس. معالجة المصادر الملوثة تعتبر عملية مكلفة. تحقيقا لهذه الغاية الوقائية هي الطريقة الوحيدة لمحاربة التلوث.

في هذا العمل، حاولنا في المرحلة الأولى أن نصف مختلف وسائل وقاية وعلاج المياه والتربة. ثانيا قمنا بدراسة لمختلف النصوص التشريعية الرئيسية بشأن الحماية من التلوث على الصعيد الوطني والعالمي. مقارنة التشريع الجزائري مع تشريعات الدول المتقدمة يظهر أن بلادنا بحاجة إلى إثراء وجهة نظر التشريع، أو من وجهة نظر التطبيق على أرض الواقع.

في منطقة مغنية، يخضع واد مويلح لتلوث كبير ناتج عن التفريغ السائل والصلب لمدينتي وجدة ومغنية، يؤثر هذا التلوث على البيئة المعنية، يصل إلى غاية سد حمام بوغرارة للسيطرة على هذه المشكلة، يتم إعطاء التوصيات للعمل عليها في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: المياه - التربة - التلوث - المعالجة - الوقاية - التشريع - مستجمعات المياه لواد مويلح - سد حمام بوغرارة.

ABSTRACT

Pollution is an unfavorable modification of the natural environment which appears, entirely or partly, like a by-product of the human action, through the direct or indirect effects. These modifications generate consequences on the ecological mediums and the man and his health.

For limited the ground and water pollution, the question of the need for a depollution can be posed. Depollution is a treatment to return the sources clean to satisfy the needs for the populations. The treatment of the contaminated sources is expensive. For this purpose, the prevention is the only means of fight against pollution.

In this work, we initially try to describe the various means of prevention and depollution of water and the grounds. We draw up then a study on the principal legislative texts concerning protection against pollution with the national scales, and on a worldwide scale. The comparison between the Algerian legislation and the legislation of the countries developed, watch which our country requires an enrichment from the legislation point of view, or from the point of view of the application on ground.

In the area of Maghnia, the Mouillah wadi is subjected to the important pollution generated by the rejections liquid and solid of the towns of Oujda and Maghnia, this pollution affects the natural environment until attack the dam of Hammam Bougherara. For controlled this problem, recommendations for future work are given.

Key words: water - ground - pollution - depollution - prevention - legislative texts - catchment area of Mouillah wadi – Dam Hammam Bougherara.

ABREVIATIONS

<u>Abréviations</u>	<u>Significations</u>
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
BTEX	composés mono-aromatiques
BTP	Bâtiment Travaux Public
CET	Centres d'Enfouissement Technique
CFC	Chloro-Fluoro-Carbone
CH ₄	le méthane
CITEPA:	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CIV	Composés Inorganiques Volatils
CO	monoxyde de carbone
CO ₂	dioxyde de carbone
COHV	Composés organiques Halogènes Volatils
COT	Carbone Organique Total
COV	Carbone Organique Volatil
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
CSDU	Centre de Stockage des Déchets Ultimes
DASRI	Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux
DBO	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DIB	Déchets Industriels Banals
DIS	Déchets Industriels Spéciaux
EC	Environnement Canada
EDTA	Ethylène Diamine Tétra Acétique
EH ou Eq/Hab	Equivalent Habitant
FFOM	Fraction Fermentescibles des Ordures ménagères
H ₂ S	l'hydrogène sulfuré
HACCP	Hazard Analysis, Critical Control Points
HAM	Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques

HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
ISDD	Installation de Stockage des Déchets Dangereux
ISDI	Installation de Stockage des Déchets Inertes
ISDND	Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux
K	Potassium.
MES	Matières En Suspensions
MO	Matière Organique
MRM	Metal Removal Media
MS	Matière Sèche
MTH	Maladie à Transmission Hydrique
NGL	Azote total
NH ₄ ⁺	Ammonium
NO ₂	Nitrite
NO ₃	Nitrate
NO _x	dioxine
NTK	Azote Kjeldahl
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement
OGM	Organismes Génétiquement Modifiés
OM	Ordures Ménagères
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCB	Poly-Chloro-Biphényles
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCP	PentaChloroPhénol
PCT	PolyChloroTerphényles
PH	Potentiel d'Hydrogène
PO ₄	Phosphate
POP	Polluants Organiques Persistants
ppm(v)	Partie par million en volume (% pour mille en volume)
PT	Phosphore Total
REFIOM	Résidus d'Épuration des Fumées provenant de l'Incinération d'Ordures Ménagères

SCOHV	Sous-Composés Organiques Halogènes Volatils
SCOV	Sous-Composés Organiques Volatils
SDWA	Safe Drinking Water Act
STEP	Station d'épuration
T	Température (en degré centigrade)
TEQ	Toxicité Equivalente
UIOM	Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères
US EPA	US Environmental Protection Agency
UV	Ultra Violets
UVB	Unterdruck-Verdampfer-Brunnen
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	
REMERCIEMENTS	
RESUME	
ملخص	
ABSTRACT	
ABREVIATIONS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	3
GENERALITES SUR LA POLLUTION	3
1.1. LE CONCEPT « ENVIRONNEMENT » :	3
1.2. L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT :	4
1.3. LA POLLUTION :	5
1.3.1. Définition de la pollution :	5
1.3.2. Historique de pollution :	6
1.3.2.1. Pollution de l'air :	6
1.3.2.2. Pollution de l'eau :	7
1.3.3. Principales formes de pollution :	8
1.3.4. Différents types de pollution:	11
1.3.4.1. La pollution de l'air:	12
1.3.4.2. La pollution de l'eau:	19
1.3.4.3. Pollution des sols :	26
1.4. CONCLUSION :	29
CHAPITRE II	30
MOYENS DE PREVENTION ET DE DEPOLLUTION	30
2.1. PREVENTION ET DEPOLLUTION DES EAUX :	30
2.1.1. Les eaux souterraines:	30
2.1.1.1. La prévention des eaux souterraines contre la pollution :	31
2.1.1.2. La dépollution des eaux souterraines:	37
2.1.2. Les eaux de surface:	64
2.1.2.1. La prévention des eaux de surface contre la pollution:	64
2.1.2.2. La dépollution des eaux de surface :	70
2.2. PREVENTION ET DEPOLLUTION DES SOLS :	93
2.2.1. La prévention contre la pollution des sols :	94
2.2.1.1. Gestion des déchets :	95
2.2.2. La dépollution des sols :	125
2.2.2.1. Critères de choix d'une méthode de dépollution :	125
2.2.2.2. Techniques de dépollution des sols :	126
2.3. CONCLUSION :	158
CHAPITRE III	160

SYNTHESE SUR LES TEXTES LEGISLATIFS CONCERNANT LA PREVENTION CONTRE LA POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS.....	160
3.1. LEGISLATIONS ALGERIENNES :	160
3.1.1. <i>Inventaire des textes législatifs concernant la protection des eaux et des sols en Algérie</i> :	160
3.1.2. <i>Synthèse des grandes lignes concernant la protection des eaux et sols contre la pollution</i> :	162
3.2. LEGISLATIONS ETRANGERE :	176
3.2.1. <i>Législations européennes</i> :	176
3.2.2. <i>Législations Suisse</i> :	182
3.2.2.1. <i>Mise en œuvre des politiques environnementales renforcées</i> :	182
3.2.2.2. <i>engagements internationaux</i> :	184
3.2.2.3. <i>Principaux textes législatifs concernant la protection des eaux en Suisse</i> :	184
3.2.3. <i>Législations canadienne</i>	192
3.2.4. <i>Législations en France</i> :	195
3.2.5. <i>Législations en Allemagne</i> :	196
3.2.6. <i>Législations aux Etats-Unis</i> :	196
3.3. LACUNES OBSERVEES AU NIVEAU DES TEXTES ALGERIENS:	197
3.4. CONCLUSION :	198
CHAPITRE IV.....	200
ETUDE DE CAS ; IMPACT DE LA POLLUTION D'OUED MOUILLAH SUR LE BARRAGE BOUGHERARA.....	200
4.1. INTRODUCTION :	200
4.2 LE BASSIN VERSANT D'OUED MOUILLAH:	200
4.3. BARRAGE HAMMAM BOUGHRARA :	201
4.3. SOURCES DE POLLUTION :	202
4.3.1. <i>Source urbaines</i> :	203
4.3.2. <i>Sources industrielles</i> :	203
4.3.2.1. <i>Sources de pollution liquide</i> :	203
4.3.2.2. <i>Sources de pollution solide</i> :	204
4.3.3. <i>Sources de pollution agricoles</i> :	204
4.3.4. <i>Sources de pollution frontalière</i> :	204
4.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION :	205
4.4.1. <i>Impact de la pollution sur le Bassin d'oued Mouillah</i> :	205
4.4.1.1. <i>Impact de la pollution sur l'être humain</i> :	205
4.4.1.2. <i>Impact de la Pollution sur le milieu récepteur</i> :	205
4.4.1.3. <i>Impact de la pollution sur le barrage Bougherara</i> :	206
4.5. ANALYSE DE LA POLLUTION :	207
4.6. RECOMMANDATIONS :	209
4.6.1. <i>Recommandation 1 : Pollution transfrontalière</i>	209
4.6.2. <i>Recommandation 2 : Epuration par les plantés</i>	209
4.6.3. <i>Recommandation 3 : Techniques modernes de gestion des déchets hospitaliers</i>	211
4.7. CONCLUSIONS :	215
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES :	218
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	219
ANNEXE A	238

ANNEXE B	239
ANNEXE C	240
ANNEXE D	241
ANNEXE E	242
ANNEXE F.....	243
ANNEXE G	244
ANNEXE H	245
ANNEXE I	246
ANNEXE J	247
ANNEXE K	249
ANNEXE L.....	250

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1: COMPOSANTS MAJEURS DE L'ENVIRONNEMENT	4
FIGURE 1-2: INTERACTIONS ENTRE L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT (SCHEMA SIMPLIFIE). LES RELATIONS SONT REPRESENTEES PAR DES LIGNES	4
FIGURE 1-3: POLLUTION DIFFUSE, DIFFERENTS VOIES DE TRANSFERT	9
FIGURE 1-4: LES FEUX DE FORETS EMETTENT BEAUCOUP DE GAZ ET DE PARTICULES DANS L'ATMOSPHERE	14
FIGURE 1-5: POLLUTION PAR LES HYDROCARBURES	21
FIGURE 1-6: POLLUTION DE SOL PAR LES DECHARGES.	28
FIGURE 2-1: OBJECTIFS DE LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES.....	32
FIGURE 2-2: LES TYPES DE PERIMETRE DE PROTECTION.	34
FIGURE 2-3: EXEMPLE DE CARTE DE PROTECTION DES EAUX EN SUISSE	37
FIGURE 2-4: SCHEMA DE PRINCIPE DU POMPAGE-ECREMAGE	39
FIGURE 2-5: SCHEMA DE PRINCIPE DE SEPARATEUR A HYDROCARBURES.....	40
FIGURE 2-6:SCHEMA DE PRINCIPE DU CONFINEMENT IN SITU.....	42
FIGURE 2-7: INJECTION D'AIR SOUS PRESSION ET BULLAGE « SPARGING » DANS LA ZONE SATUREE	44
FIGURE 2-8: SCHEMA DE PRINCIPE DU STRIPPING.....	45
FIGURE 2-9: SCHEMA DE PRINCIPE DU VENTING	47
FIGURE 2-10: DECONTAMINATION IN SITU PAR BIODEGRADATION ET VENTILATION.	51
FIGURE 2-11: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PHOTO-OXYDATION SOUS ULTRAVIOLETS	54
FIGURE 2-12:SCHEMA DE PRINCIPE DU FILTRE A CHARBON ACTIF.	55
FIGURE 2-13:SCHEMA DE PRINCIPE DE LA SEPARATION PAR MEMBRANE.....	56
FIGURE 2-14: LES TYPES D'EXTRACTION TRIPLE PHASE.....	57
FIGURE 2-15: SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE RESINE ECHANGEUSES D'IONS.....	58
FIGURE 2-16: SCHEMA DE PRINCIPE DE BOUES ACTIVEES	600
FIGURE 2-17:SCHEMA DE PRINCIPE DES LITS BACTERIENS	622
FIGURE 2-18: SCHEMA DE PRINCIPE DES DISQUES BIOLOGIQUES.	622
FIGURE 2-19: SCHEMA DE PRINCIPE DU LAGUNAGE.....	633
FIGURE 2-20: EVALUATION DES RISQUES DE POLLUTIONS ACCIDENTELLES ET METTRE EN PLACE DES DISPOSITIFS DE SECURITE	688
FIGURE 2-21: SCHÉMA DE PRINCIPE DES STRATÉGIES POSSIBLES UTILISÉES POUR UNE STATION D'ÉPURATION.....	732
FIGURE 2-22: LES TYPES DES ALGUES.	766
FIGURE 2-23: LE FONCTIONNEMENT DE LAGUNAGE	788
FIGURE 2-24: LES MÉCANISMES EN JEU DANS LES BASSINS DE LAGUNAGE NATUREL.	79
FIGURE 2-25: SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA MISE EN ŒUVRE DES MICRO-ORGANISMES EN ANAÉROBIOSE	800
FIGURE 2-26: SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA MISE EN ŒUVRE DES MICRO-ORGANISMES EN AÉROBIOSE.	800
FIGURE 2-27: LES 3 NIVEAUX DE TRAITEMENT AU NIVEAU DES BASSINS FACULTATIFS.	811
FIGURE 2-28: LAGUNAGE AÉRÉS	844
FIGURE 2-29: SCHÉMA DU PHRAGMIFILTRE.....	888
FIGURE 2-30: COUPE REPRÉSENTATIVE D'UN FILTRE À ÉCOULEMENT VERTICAL	900
FIGURE 2-31: COUPE REPRÉSENTATIVE D'UN FILTRE À ÉCOULEMENT HORIZONTAL.....	911
FIGURE 2-32: SCHÉMA DE L'ACTIVITÉ DES MACROPHYTES	922
FIGURE 2-33: SCHÉMA DU PRINCIPE DES JARDINS FILTRANT.....	922
FIGURE 2-34: LES TYPES DES DÉCHARGES.....	955
FIGURE 2-35: SCHÉMA SIMPLIFIÉ DU CHEMINEMENT DES DÉCHETS	967
FIGURE 2-36: LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE TRI SELECTIF	98
FIGURE 2-37: LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE COMPOSTAGE	1000
FIGURE 2-38: LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE METHANISATION	1033
FIGURE 2-39: LES PROCÉDÉS DE L'INCINÉRATION	10909
FIGURE 2-40: SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN FOUR À GRILLE	1100

FIGURE 2-41: SCHÉMA DE FOUR À LIT FLUIDISÉ	111
FIGURE 2-42: SCHÉMA DE FOUR OSCILLANT.....	1122
FIGURE 2-43: LES PROCÉDÉS DE GAZÉIFICATION.....	1155
FIGURE 2-44 : LES PROCEDES DE VITRIFICATION.....	11717
FIGURE 2-44: LES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'OHT.....	1211
FIGURE 2-45: LE STOCKAGE DANS UN CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE	1233
FIGURE 2-46: FAMILLE DE TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION DES SOLS PAR LIEU DE TRAITEMENT.....	12727
FIGURE 2-47 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'EXCAVATION.....	12828
FIGURE 2-48 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA SOLIDIFICATION/STABILISATION ON SITE OU EX SITU	12929
FIGURE 2-49 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA REDUCTION ON SITE.....	1311
FIGURE 2-50 : SCHEMA DE PRINCIPE DU LAVAGE EX SITU.....	1333
FIGURE 2-51 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ENCAPSULATION SUR SITE.....	134
FIGURE 2-52 : EXEMPLE DE COUCHE DE FOND D'ENCAPSULATION.....	1344
FIGURE 2-53 : SCHEMA DE PRINCIPE DU CONFINEMENT DES SOLS SUR SITE	13737
FIGURE 2-54 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'INCINERATION A LIT FLUIDISE.....	13939
FIGURE 2-55 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA DESORPTION THERMIQUE EX SITU OU ON SITE	14040
FIGURE 2-56 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PYROLYSE.....	1411
FIGURE 2-57 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA VITRIFICATION THERMIQUE	1422
FIGURE 2-58 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN BIOREACTEUR	1433
FIGURE 2-59 : SCHEMA DE PRINCIPE DU BIOTERTRE.....	1455
FIGURE 2-60 : SCHEMA DE PRINCIPE DU COMPOSTAGE.....	1455
FIGURE 2-61 : SCHEMA DE PRINCIPE DU LANDFARMING.....	14747
FIGURE 2-62 : TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT PAR BIOVENTING.....	14848
FIGURE 2-63 : PRINCIPAUX MECANISMES DE PHYTO-DEPOLLUTION: PHYTO-EXTRACTION, PHYTO-DEGRADATION, PHYTO-STABILISATION ET RHIZO-DEGRADATION.....	1511
FIGURE 2-64 : METABOLISME DES XENOBIOTIQUES CHEZ LA PLANTE	1533
FIGURE 4-1 : BASSIN VERSANT DE MOUILLAH.....	2011
FIGURE 4-2 : LOCALISATION DES SOURCES DE POLLUTION	2022
FIGURE 4-3 : ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE DCO	20707
FIGURE 4-4 : ILLUSTRATION D'UNE GOULOTTE D'UN SYSTEME EPUVALISATION.....	2100
FIGURE 4-5: SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UN INCINÉRATEUR DES DAS.....	2133

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1: METHODES DE TRAITEMENT DE L'EAU EN FONCTION DU TYPE DE POLLUANT	53
TABLEAU 2-2: EVOLUTION DE LA MISE EN PLACE DE FILTRES PLANTES DE MACROPHYTES DANS QUELQUES PAYS EUROPEENS..	
.....	877
TABLEAU 2-3: CONTRAINTES ET AVANTAGES SPECIFIQUES DES PROCEDES BIOLOGIQUES DE TRAITEMENT DES DECHETS .	1055
TABLEAU 2-4: ELEMENTS DE COUT DES PROCEDES BIOLOGIQUES DE TRAITEMENT DES DECHETS.....	1055
TABLEAU 2-5: ELIMINATION DES DECHETS MENAGERS PAR INCINERATION DANS LE MONDE (EN % DES VOLUMES TRAITES)	
.....	1066
TABLEAU 2-6: COUT DE DIFFERENTES METHODES DE DEPOLLUTION	1266
TABLEAU 2-7 : EXEMPLE DE RESULTATS OBTENUS PAR BIOREACTEUR	1444
TABLEAU 2-8 : TRAITEMENT PAR LANDFARMING ET COMPOSTAGE : EXEMPLE DE RESULTATS	14747
TABLEAU 4-1: CONCENTRATION EN DBO5 ET EN DCO	2044
TABLEAU 4-2 : REJET D'OUED MOUILLAH DANS LE BARRAGE	20808

INTRODUCTION GENERALE

Fort utilisé de nos jours le terme de pollution recouvre bien des exceptions et qualifie une multitude d'actions qui dégradent l'environnement, ce vocable désigne sans aucune ambiguïté les effets de l'ensemble des composés toxiques libérés par l'homme dans la biosphère. A l'opposé, son emploi paraît moins évident au profane lorsqu'il concerne des substances inoffensives pour les êtres vivants parfois même favorables à ces derniers, mais qui peuvent exercer une action perturbatrice dans les écosystèmes pollués du fait de leur trop grande concentration.

La définition la plus générale du terme de pollution a été donnée par le premier rapport du conseil sur la qualité de l'environnement de la Maison Blanche (1965) « la pollution » dit ce rapport « *est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît, en totalité ou en partie, comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eaux et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu* » (François R., 2000).

Le présent travail est un guide sous le titre « *Etude critique des différents moyens de dépollution et de prévention contre la pollution des eaux et des sols* ». Donc on a deux termes à étudier la pollution des eaux et la pollution des sols.

La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et perturbe l'écosystème. Malheureusement, les ressources en eau sont pratiquement touchées en majorité par le fléau de la pollution, en fait, presque la quasi-totalité des rejets domestiques, industriels et même agricoles finissent d'une façon directe ou indirecte dans l'eau, polluant ainsi les bassins versants et affectant les eaux de surfaces et les eaux souterraines (les barrages, les mers, aquifères etc.).

La pollution des sols est une dégradation ou accumulation de plusieurs effets (quelquefois opposés) provoqués par les polluants anthropologiques sur diverses transformations physiques, chimiques et biologiques. Les principaux responsables de la pollution des sols sont ; l'urbanisation, l'agriculture, l'industrialisation, l'artisanat et le transport.

Dans ce mémoire, nous essayons dans un premier temps de donner les généralités sur la pollution. Nous établissons ensuite une étude critique des différents moyens de prévention et de dépollution des eaux et des sols. Après nous essayons de synthétiser les différents textes législatifs concernant la prévention contre la pollution des eaux et des sols. Les points importants, à l'échelle nationale et étrangère, sont mis en exergue. Nous finirons ce travail par une étude de cas : « impact de la pollution d'Oued Mouillah sur le barrage Hammam Bougherara » afin de contribuer à trouver des solutions pour maîtriser la pollution de ce bassin versant.

Dans le chapitre I, nous introduisons brièvement un aperçu général sur le concept de l'environnement et la relation entre l'homme et l'environnement plus la relation entre les différents types de pollution (air, eau, sol). Ceci après avoir fait une

étude détaillée sur les différents types de pollutions, leurs origines, leurs formes, leurs causes et conséquences.

Le chapitre II est consacré à une description des principales méthodes de prévention et de dépollution des eaux et des sols, la présentation de chaque méthode rassemble les informations relatives à sa description, son domaine d'application, son efficacité, ses coûts, ses avantages et ses inconvénients.

Dans le chapitre III, nous présentons une étude synthétique des textes législatifs concernant la protection de l'environnement contre tous types de pollution en Algérie et dans les pays développés comme l'union européenne et le Canada entre autres. Ensuite nous faisons une comparaison entre les textes législatifs algériens et ceux des pays développés, avec des propositions pour l'amélioration et l'application des nouveaux textes législatifs.

Enfin dans le dernier chapitre, nous étudions un cas de site pollué qui est celui du bassin versant de l'Oued Mouillah. Nous avons fait un inventaire des données existantes concernant les analyses et les sources de pollution de cette zone et leur impact sur le barrage Hammam Bougherara, destiné à l'alimentation en eau potable. Ces résultats sont présentés pour justifier et conforter l'idée véhiculée dans ce chapitre concernant des recommandations pour minimiser l'impact de cette pollution. Nous argumentons, entre autres, la nécessité de l'implantation de deux stations d'épuration pour les eaux usées véhiculées par Oued Mouillah. La première, est une station à filtres plantés d'espèces végétales capables d'absorber certains métaux lourds, sera implantée à l'amont de l'Oued Mouillah au niveau de la frontière algéro-marocaine. La deuxième station est un filtre planté de macrophytes sera implantée en aval de l'agglomération de la ville de Maghnia.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA POLLUTION

1.1. LE CONCEPT « ENVIRONNEMENT » :

De nos jours, l'environnement est une notion contemporaine qui est utilisée sous différents aspects et qui reste par conséquent assez floue. Souvent, l'environnement se rapporte à ce qui vit, c'est-à-dire aux hommes, aux animaux, aux plantes et aux microorganismes. Ces espèces vivantes dépendent les unes des autres et de leur milieu, qui se compose d'innombrables « éléments » influents, qu'on appelle les facteurs écologiques. De tels facteurs correspondent à toutes les influences extérieures possibles, auxquelles les êtres vivants peuvent être exposés. La somme de tous les facteurs environnementaux constitue l'environnement et la nature. L'environnement est donc l'ensemble de toutes les influences directes et indirectes exercées sur l'être vivant et de ses relations avec le reste du monde. Au sens le plus large, à côté de l'environnement naturel, les environnements sociaux et intellectuels en font également partie (Bliefert C. et Perraud R., 2004). Dans la suite de ce travail le concept d'environnement sera utilisé dans son sens restreint.

Les actions exercées sur les être vivants peuvent être réparties selon différents points de vue, par exemple :

- Influences dues à des facteurs abiotiques, sans vie, et biotiques, vivants.
- Influences climatiques, chimiques ou mécaniques.
- Influences naturelles et anthropogéniques, provoquées par l'homme, etc.

Souvent, on parle de biosphère (du grec bios, vie ; du latin sphaira, sphère, globe terrestre) à la place d'environnement et on pense alors à l'ensemble des zones de la terre peuplées par des organismes vivants, êtres humains, animaux, plantes, microorganismes, c'est-à-dire l'atmosphère jusqu'à environ 25 km d'altitude, les mers jusqu'à 10 km de profondeur et la croûte terrestre jusqu'à environ 3 km de profondeur. Mais quelles que soient les limites qu'on prend en compte, l'environnement est de toute façon un système complexe, dans lequel le sol, l'eau, l'air ainsi que le monde des animaux et des plantes, et le climat en sont les composants majeurs (figure 1.1). La biosphère est donc un gigantesque système extrêmement complexe composé du monde vivant et non vivant, en interaction l'un avec l'autre. Concernant le système environnemental, la prise en compte individuelle de la plupart des évolutions n'a pas de sens, car les relations avec d'autres développements ou des rétroactions ne doivent pas être négligées. Un raisonnement linéaire, chaque effet provenant d'une seule et unique cause, ne conduit le plus souvent à aucun résultat quand il s'agit de problèmes environnementaux. Au sein du complexe écosystème environnemental on fait plutôt appel à un « **raisonnement en réseau** » : à cause des fortes interactions et des importantes rétroactions existant dans

l'environnement, il est souvent impossible d'apporter une réponse simple à une question relevant de l'écologie ou de l'environnement (Bliefert C. et Perraud R 2004).

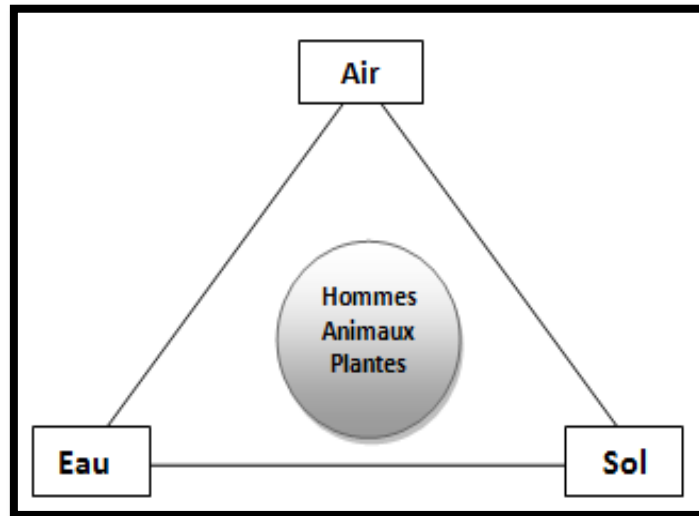


Figure 1-1: Composants majeurs de l'environnement (Bliefert C. et Perraud R 2004).

1.2. L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT :

L'homme est une partie de l'écosystème de la terre. Il influence son environnement et réciproquement : l'homme utilise l'environnement et le transforme à travers l'économie, la technique, etc. ; ainsi il crée son espace vital et assure ses besoins (figure 1.2).

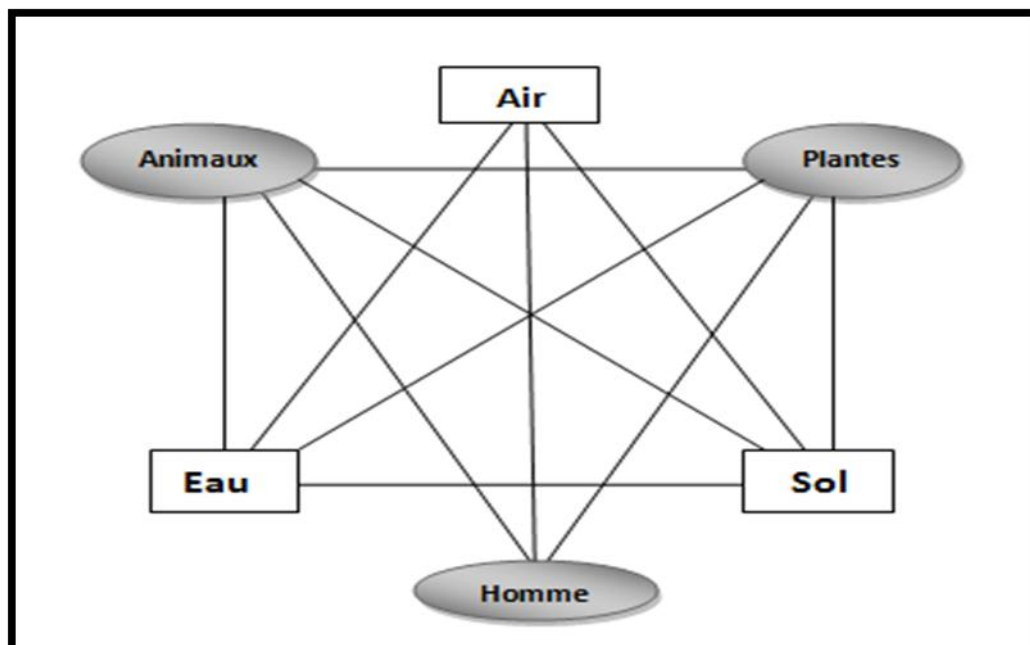


Figure 1-2: interactions entre l'homme et l'environnement (schéma simplifié). Les relations sont représentées par des lignes (Bliefert C. et Perraud R 2004).

Entre-temps, l'homme est devenu le facteur déterminant dans l'écosystème. Il a surtout beaucoup intervenu dans l'aménagement de la nature par l'industrialisation et

a fortement transformé son environnement ; ce n'est que lors des dernières années que la conscience du public a été touchée, en partie probablement parce que les effets en retour négatifs de l'activité industrielle des hommes ne sont, pour la plupart, visibles ou perceptibles que de nos jours. Le développement ultérieur de l'environnement, et par conséquent de la terre, dépend de la façon dont l'homme comprend le comportement du système de la biosphère et de la façon dont il prend connaissance des relations, des rétroactions ou d'autres manières d'agir de ce système et de la façon dont il peut alors s'y intégrer.

Dans les discussions concernant l'environnement, il existe deux autres notions de toute première importance. Sous le concept d'impact environnemental, on entend l'ensemble de tous les facteurs qui perturbent l'environnement. De telles perturbations environnementales ont lieu, quand l'environnement naturel – l'état normal – est influencé par des interventions physiques, chimiques, biologiques et technologiques, comme par exemple lorsque des matériaux sont soustraits de l'environnement en grandes quantités par l'exploitation des richesses naturelles ou lorsque certains domaines de l'environnement sont remplis de matières « non naturelles », comme les gaz d'échappement, les eaux usées ou les déchets.

Lorsqu'il se produit des dommages vis-à-vis de la nature, par l'introduction de substances, on parle souvent (dans un sens étroit) de *pollution de l'environnement*.

Selon le domaine de l'environnement concerné, on peut faire par exemple la distinction entre la pollution de l'air, des eaux ou des sols (Bliefert C. et Perraud R., 2004).

1.3. LA POLLUTION :

1.3.1. DEFINITION DE LA POLLUTION :

On peut définir la pollution, et les polluants, comme des résidus de l'activité des hommes qui directement ou indirectement, volontairement, et souvent inconsciemment sont rejetés dans la nature. Ils sont la conséquence non désirée d'activités d'extraction, de production ou de consommation qui procurent de l'utilité. C'est parce que ces résidus ne procurent, eux, aucune utilité et qu'ils n'ont, de ce fait, aucune valeur marchande, qu'ils sont rejetés dans l'environnement. Des sous produits qui acquièrent de l'utilité cessent d'être rejetés et d'être des polluants (Rémy P., 1981).

Un milieu aquatique est dit pollué lorsque son équilibre a été modifié de façon durable par l'apport en quantités trop importantes soit de substances plus ou moins toxiques, d'origine naturelle ou issues d'activités humaines, soit encore d'eaux trop chaudes. Ces pollutions peuvent entraîner divers types de nuisances : augmenter la mortalité de certaines espèces animales ou végétales jusqu'à parfois les faire disparaître, altérer leurs capacités physiologiques, détériorer la qualité de l'eau au point de la rendre impropre à certains usages, comme l'alimentation humaine [1].

Tous les polluants ne présentent pas les mêmes risques pour les écosystèmes. Certains notamment sont biodégradables. Riche en espèces animales et végétales et en micro-organismes, un écosystème est naturellement capable de transformer et d'éliminer, en partie ou en totalité, les substances biodégradables qu'il reçoit et d'assurer ainsi le maintien de son équilibre et de la qualité de ses eaux. Mais, si l'abondance de ces substances dépasse un seuil critique, ses capacités d'autoépuration ne suffisent plus : l'agent polluant ne peut plus être éliminé assez rapidement ; il s'accumule, rompant progressivement l'équilibre dynamique naturel du milieu aquatique, et peut même devenir toxique. On dit alors qu'il y a pollution.

D'autres agents polluants, comme les plastiques, les métaux et certains pesticides, ne sont pas ou peu biodégradables : le processus d'autoépuration est alors inopérant et ces substances s'accumulent dans l'écosystème, intoxiquant les espèces vivantes qui les ingèrent. Certaines de ces substances, de surcroît, comme les métaux lourds ou les pesticides, s'accumulent dans les organismes, se concentrant dans certains tissus ou organes à des doses parfois bien supérieures à celles mesurées dans l'eau, un phénomène appelé " bioaccumulation ". Cette accumulation, qui s'amplifie à chacun des maillons de la chaîne alimentaire, peut prendre parfois une ampleur inquiétante.

Il n'est pas toujours facile d'identifier les sources de pollution ni d'estimer leurs effets respectifs, qui dépendent à la fois de la nature et de la concentration du polluant et de l'écosystème considéré, les phénomènes en jeu étant fort complexes. Il est donc souvent difficile de déterminer, pour chaque substance toxique, une concentration maximale acceptable pour un écosystème. Il n'existe d'ailleurs aucun consensus sur les seuils à ne pas dépasser. Dans les rares cas où les lois fixent des normes, celles-ci varient selon les pays [1].

1.3.2. HISTORIQUE DE POLLUTION :

1.3.2.1. POLLUTION DE L'AIR :

L'histoire de l'environnement et avant tout l'histoire de sa pollution, pour une grande part, ce sont les changements opérés dans l'air, l'eau et le sol par les êtres humains qui en sont à la base, à savoir la pollution due à la circulation, aux petites et grandes industries et aux nécessités de l'agriculture.

Dans le passé, les pollutions de l'air étaient en général dues à des problèmes de fumées, qui concernaient avant tout le dioxyde de soufre et les poussières. Déjà les romains se plaignaient de la saleté de l'air de leur ville. Les problèmes devinrent de plus en plus importants quand on commença à rechercher du charbon à partir du 13^e siècle, principalement dans les villes. Par exemple, en 1578, ELISABETH I (Reine d'Angleterre et d'Irlande entre 1558 et 1603) interdisait la combustion du charbon à Londres, pendant que le parlement siégeait ; et dans une loi édictée en 1627 à Lyon,

on trouve explicitement le texte suivant : « Aerem corrumpere non licet » (il est interdit de polluer l'air).

Au plus tard depuis le milieu du 20^e siècle, de nouvelles pollutions et de nouveaux dangers qui leur sont liés ont eu pour origine les nombreux moteurs à combustion présents dans le trafic routier et aérien.

1.3.2.2. POLLUTION DE L'EAU :

La plupart des villes anciennes, exceptées quelques-unes comme Babylone, rejetaient leurs déchets, encore jusqu'au 19^e siècle, directement ou indirectement dans des fleuves et des lacs. Ce n'est que dans cette période qu'on trouve les premiers essais d'épuration des eaux usées.

Par contre, des unités d'alimentation en eau centralisées sont déjà citées à la fin du 15^e siècle, entre autres à Bâle, Berne, Nuremberg, Munich. L'eau provenant avant tout des puits était la source de vie d'une ville. Lors de sièges de ces villes, l'eau garantissait une certaine autarcie ; par exemple au milieu du 15^e siècle, la ville de Nuremberg possédait 100 puits municipaux. La pollution de ces puits a été sévèrement punie, parfois jusqu'à la peine de mort, dans certaines villes. Entre autres, il était interdit d'y jeter les excréments, d'y laver son linge ou d'y faire boire les chevaux.

En ce qui concerne l'utilisation des fleuves, des ruisseaux ou des lacs comme moyens de transport des déchets, nos ancêtres étaient extrêmement généreux. Des manufactures de laine, des laveries, des tanneries, des forgerons et des fabricants de parchemins avaient souvent le droit particulier de rejeter leurs déchets dans les fleuves, pendant la nuit (il s'agissait de déchets liquides comprenant par exemple des colorants pour les textiles, des substances servant à la préparation des cuirs ou des acides et des bases pour le traitement des surfaces de métaux) ; des droits similaires avaient été octroyés aux teintureries et aux abattoirs.

Les problèmes d'environnement ont eu très tôt des conséquences sur la planification au niveau des villes : ainsi, par exemple, les élus municipaux de la ville de Paris faisaient attention à ce que les tanneurs et les bouchers s'installent en dehors de l'agglomération et en aval du fleuve, où leurs eaux de rejets ne pouvaient plus contaminer leur propre ville.

A) Pollution émanant de l'industrie:

Les premières activités industrielles comprenaient les mines, la poterie (7000 avant J-C.) et la fabrication du verre. L'industrie chimique telle qu'on la conçoit aujourd'hui débuta vers 1850 ; c'est aussi à cette époque qu'on situe le début de l'industrialisation. C'est la première fois que des substances chimiques, avant tout du carbonate de sodium et d'autres composés alcalins,

ont été utilisées en quantité importante dans l'industrie textile – lors de la fabrication de la laine – et dans l'industrie du verre.

B) Pollution provenant des nécessités de l'agriculture :

Il y a environ 8000 ans que l'homme a commencé à développer l'agriculture, et à utiliser des engrais. Dans le cours de l'histoire, de nombreux composés chimiques ont été utilisés contre les épidémies. En Chine par exemple, les hommes qui vivaient avant 4000 ans en arrière utilisaient la « fumée de soufre » contre les rats. Dans son livre De « agricultura » (200 avant J-C.) CATON (homme politique romain) écrivait qu'on utilisait de l'huile pour lutter contre la peste. En 77 après J-C., selon PLINE l'ANCIEN (naturaliste et écrivain latin) on a combattu des organismes nuisibles présents sur les vignes avec de l'oxyde d'arsenic sous forme de As_2O_3 . Déjà les grecs et les romains utilisaient le dioxyde de soufre, comme produit de lutte contre les insectes.

Au cours du 19^e siècle s'ajoutèrent de nouveaux composés inorganiques comme le vert de paris qui était efficace dans la lutte contre les sauterelles et autres insectes. Des composés soufrés ont été utilisés à l'encontre des champignons nuisibles, comme par exemple des mélanges de soufre et d'hydroxyde de calcium, des polysulfures de calcium.

1.3.3. PRINCIPALES FORMES DE POLLUTION :

L'activité humaine, qu'elle soit industrielle (chimie, papeterie, industrie agroalimentaire, etc.), urbaine (usages domestiques, commerce, entretien des rues), ou agricole (utilisation d'engrais et de pesticides), produit des quantités de substances polluantes de toute nature qui sont à l'origine de différents types de pollutions : des pollutions organiques (essentiellement d'origine animale), chimiques (fertilisants, pesticides, métaux, détergents...), biologiques (bactéries, virus et autres champignons), radioactives ou acides. Ces polluants sont émis dans l'atmosphère, évacués dans les eaux usées ou épandus sur les sols, sous forme de gaz, de substances dissoutes ou de particules. La plupart finissent par rejoindre les milieux aquatiques. Comment font-ils ? Grâce à l'eau ! Capable de dissoudre quantités de substances, l'eau est en effet, au cours de son cycle, le véhicule privilégié de la pollution. Des voies diverses peuvent être empruntées : déversement direct d'effluents industriels et d'eaux d'égouts (dans les pays ne disposant pas d'infrastructures d'assainissement), retombées sur les sols de polluants atmosphériques entraînés par la pluie, lessivage des sols pollués par ruissellement et/ou infiltration souterraine des eaux de pluie... [1]. On distingue deux grandes formes de pollution : la pollution ponctuelle et la pollution diffuse.

- La pollution ponctuelle : c'est la pollution provenant d'un site unique, par exemple le point de rejet d'un effluent, zone contaminée. Du point de vue de la réglementation, on entend par " pollution ponctuelle " d'une nappe d'eau souterraine toute

pollution dont l'origine peut être localisée géographiquement de façon précise. Une pollution ponctuelle peut être issue de plusieurs sources géographiquement localisables proches les unes des autres, peu nombreuses et parfaitement dénombrables [10].

- La pollution diffuse : par opposition à « pollution ponctuelle », c'est la pollution dont la ou les origines peuvent être généralement connues mais pour lesquelles il est impossible de repérer géographiquement des rejets dans les milieux aquatiques et les formations aquifères (figure 1.3). Les pratiques agricoles sur la surface cultivée peuvent être à l'origine de pollutions diffuses par entrainement de produits polluants dans les eaux qui percolent ou ruissellent [11].

On parle aussi de : Pollution temporaire, pollution chronique, pollution historique, pollution nouvelle, pollution résiduelle, pollution dispersée, pollution accidentelle, pollution toxique, etc. [11].

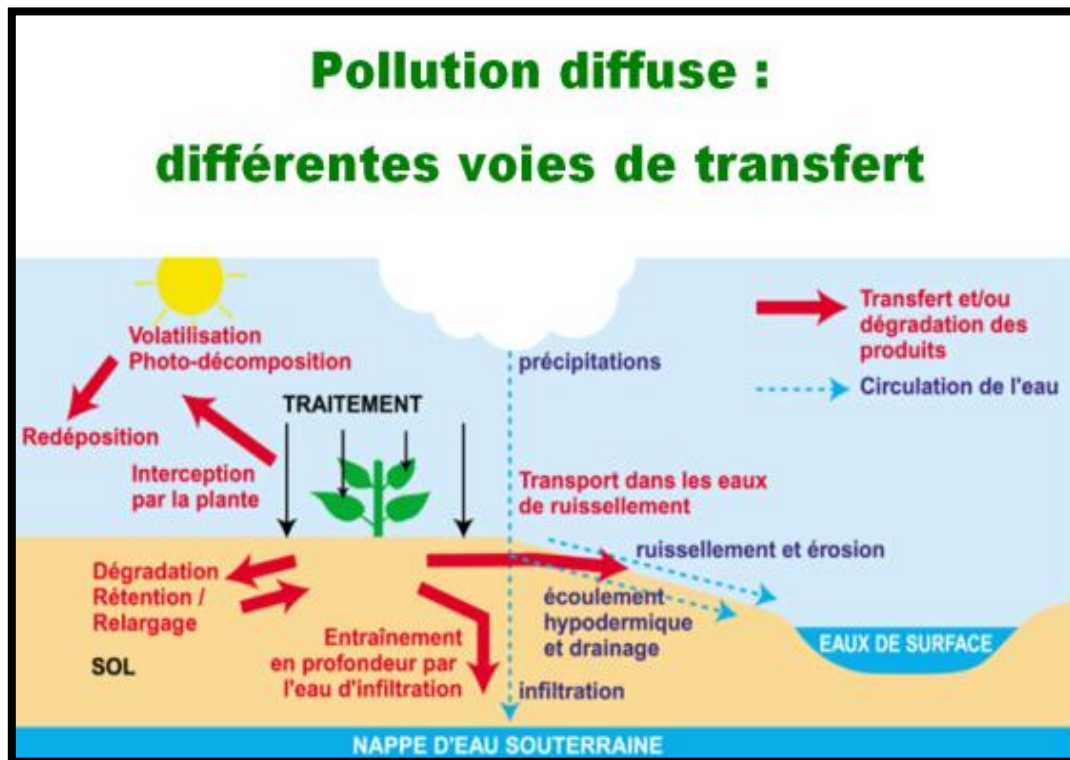


Figure 1-3: Pollution diffuse, différents voies de transfert [11].

- Pollution temporaire et pollution chronique : L'émission exceptionnelle de matière polluante, peut entraîner un transfert de cette dernière à la nappe. Le degré de pollution dépend de sa vitesse de percolation ainsi que le pouvoir d'autoépuration du sol. La pollution chronique est une pollution permanente causée

soit par des émissions répétées ou continues de polluants, soit par la présence de polluants très rémanents. Connue ou prévisible, ce type de pollution peut être très variable dans le temps [21]. La pollution chronique survenant sur de longues durées, elles ont souvent pour origine des fuites sur des conduites ou autres réseaux enterrés, sur des cuvettes de stockage non parfaitement étanches, mais aussi des lixiviats issus de dépôts de déchets ou de produits [09]. Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues (pollution agricole par les nitrates; contaminations par hydrocarbures à partir de sols pollués) (Chabni L., 2005).

- Pollution historique : la pollution historique résulte d'une activité passée. Exemple : pollution des sols à l'emplacement actuel du stade de France. Elle peut être accidentelle : pollution des sols suite à un incendie d'entrepôt ayant eu lieu il y a plusieurs années. Elle peut être graduelle : pollution des sols par infiltration d'hydrocarbures pour une ancienne station d'essence [18].
- Pollution accidentelle : Par opposition à la « pollution chronique », pollution caractérisée par l'imprévisibilité sur : le moment de l'accident, le lieu de l'accident, le type de polluant, la quantité déversée, les circonstances de l'accident, les conséquences de l'accident [11].

Elles proviennent généralement d'un déversement ponctuel et momentané de substances polluantes. Elles engendrent, en règle générale, d'abord une dégradation du milieu sur une surface limitée ; si aucune intervention n'est réalisée dans un délai relativement court, la pollution peut alors migrer vers le sous-sol [09].

Quelles sont les sources de pollutions accidentelles ? Pour moitié, la pollution accidentelle des eaux de surface provient de déversements d'hydrocarbures. De graves pollutions des eaux peuvent également être provoquées par des incendies de sites industriels stockant des produits chimiques, les eaux d'extinction étant susceptibles d'entraîner les produits dans les rivières via le réseau d'assainissement. Le rejet d'eaux usées non traitées provenant de déversoirs d'orage, par exemple, ou le rejet d'eaux pluviales polluées lors de fortes pluies, peuvent aussi être la cause de pollutions accidentelles.

Les pollutions accidentelles peuvent-elles toucher les ressources souterraines ? Des déversements accidentels peuvent contaminer les ressources souterraines par infiltration à travers les sols ou bien, s'il s'agit d'une nappe alluviale, par percolation d'eau polluée dans les berges d'un cours d'eau (Veolia eau).

- Pollution toxique : la pollution par des substances à risque toxique qui peuvent, en fonction de leur teneur, affecter gravement et/ou durablement les organismes vivants, ces substances peuvent conduire à une mort différée ou immédiate, à des troubles de reproduction ou à un dérèglement significatif des fonctions biologiques (troubles de reproduction, par exemple). Les principaux toxiques rencontrés dans l'environnement lors des pollutions chroniques ou aiguës sont généralement des métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, zinc,...), des halogènes (chlore, brome, fluor, iode), des molécules organiques complexes d'origine synthétique (pesticides,...) ou naturelle (hydrocarbures).
- Pollution éliminée : pour une station d'épuration des eaux usées, différence entre la pollution traitée (pollution mesurée en entrée) et la pollution résiduelle (pollution mesurée en sortie). La pollution éliminée est déterminée par les Agences de l'Eau sur la base de mesures ou d'évaluations forfaitaires pour le mois de pointe.

1.3.4. DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION:

Les activités humaines, tout comme les processus naturels, modifient les milieux où elles se déroulent. Trois d'entre eux sont touchés : l'air, l'eau et les sols, avec échanges entre eux. C'est à travers l'air (poussières ou gaz) et l'eau que les risques sont souvent les plus présents : chaque jour un individu respire en moyenne quinze kilogrammes d'air, dont il consomme près d'un kilogramme d'oxygène, alors qu'il boit quelques litres ou kilogrammes d'eau, et ne mange environ qu'un kilogramme de nourriture [05].

On distingue plusieurs types de pollutions :

- La pollution de l'air, provoquée par des polluants dits atmosphériques (rejet de pots d'échappement, des usines...etc).
- La pollution du sol souvent d'origine industrielle ou agricole (utilisation d'engrais, de pesticides ...etc).

- La pollution de l'eau qui peut résulter de la contamination des eaux usées, des rejets de produits (les produits phytosanitaires, ceux présents dans les engrais, les hydrocarbures...etc.).

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, l'homme prend peu à peu conscience de l'impact de ses actions polluantes et, de plus en plus, les gouvernements adoptent des mesures pour essayer de limiter l'empreinte écologique des activités humaines.

Les industries sont particulièrement touchées par ces mesures. Pour limiter la pollution dont elles sont responsables, elles tentent de réduire leurs émanations toxiques, d'utiliser des moyens de transports moins polluants et des fournisseurs moins éloignés, etc. [2].

1.3.4.1. LA POLLUTION DE L'AIR:

Pour vivre, un être humain a besoin d'environ entre 10 000 et 15 000 litres d'air chaque jour. Cela représente entre 12 et 18 kg d'air. La composition normale de l'air est : 78 % d'azote (N), 21 % d'oxygène (O), 01 % d'autres gaz. Quand cet air est modifié par des éléments qui sont nuisibles à notre santé et à notre environnement (les polluants), on dit que l'air est pollué.

On peut définir la pollution atmosphérique comme étant " l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives" [3].

A. Origine des polluants:

Les sources peuvent être classées de différentes manières. Une distinction est faite entre les sources naturelles et anthropiques. Une autre classification fréquente se fait en termes de sources stationnaires (centrales thermiques, incinérateurs, appareils industriels, etc.) et sources mobiles (transport auto, navires et avions). On peut aussi parler de sources uniques (une cheminée), multiples (une ligne de cheminées) ou d'une aire (ville).

Les contaminants de l'air étant produits de plusieurs façons et provenant de plusieurs sources disséminées sur l'ensemble de la terre, il est donc difficile d'identifier tous les responsables. Cependant, suivant leur origine, les polluants peuvent être classés comme suit [6] :

A.1. Polluants dus aux procédés industriels :

L'activité industrielle crée des polluants très variés : ceux-ci sont constitués, de manière générale, de produits faisant l'objet d'une fabrication, ou de produits primaires ou intermédiaires de cette fabrication, ou encore de

produits de décomposition des produits précités. Ces émissions peuvent être continues ou discontinues. A titre d'exemple, on peut citer :

- Les usines métallurgiques (poussière, cendres, fumées, vapeurs, etc.) ;
- L'électrolyse (poussières, fluorures).
- L'industrie chimique (SO₂ et SO₃, NO_x, fluorures).
- Les cimenteries (silicates, poussières).
- Les raffineries de pétrole (SO₂, substances malodorantes).
- Les usines d'incinération d'ordures et déchets spéciaux, que l'on peut assimiler à des installations industrielles et qui émettent essentiellement des poussières et des polluants gazeux à des teneurs relativement faibles (en particulier SO₂ et HCl).
- L'industrie des matériaux de construction (poussières, fluorures).

A.2. Polluants dus à la combustion :

Provoquée par les combustibles solides, liquides ou gazeux qu'utilisent les foyers industriels et domestiques, elle est constituée essentiellement d'émissions de SO₂, NO_x, CO et particules. Le polluant qui caractérise véritablement la combustion est le SO₂ qui provient de la combustion du soufre contenu dans les combustibles. Malgré les techniques de désulfuration appliquées, une partie du soufre contenu dans les combustibles utilisés est rejetée dans l'atmosphère.

La combustion est également l'origine d'émissions, pour l'instant quantitativement mal connues, d'oxydes d'azote provenant de la réaction de l'oxygène et de l'azote de l'air. Les combustibles émettent globalement des quantités de CO qui sont très faibles par rapport à celles qui sont rejetées par les véhicules.

Les particules émises sont d'une part les cendres volantes provenant de la combustion du charbon, d'autre part des imbrûlés solides. La combustion des produits pétroliers provoque la formation de fines particules d'imbrûlés ; une partie est évacuée dans les gaz de combustion où elle peut s'imprégner d'acide sulfurique et s'agglomérer pour former des fumerons ; le reste se dépose sur les différentes parties de l'installation et est évacué de façon plus ou moins brutale lors de ramonages.

Les particules provenant de combustions incomplètes représentent environ un tiers de la poussière en suspension dans l'air ; la moitié de ce tiers est constituée de particules de suie, soupçonnées d'être cancérogènes. Un second tiers est formé d'aérosols secondaires, notamment de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium, produits lorsque des émanations

gazeuses de processus de combustion (SO_2 , NO_x) réagissent avec de l'ammoniac, également gazeux (provenant de l'agriculture et des sols). Des particules minérales provenant de l'érosion par le vent, des chantiers de construction et de l'usure des routes semblent jouer un rôle important dans le troisième tiers (Emilian K., 2004).

B. Différents polluants atmosphériques :

Pour généraliser à l'ensemble des émissions gazeuses (exemple feux des forêts, figure 1.4), les polluants peuvent être regroupés en plusieurs grandes familles telles que, par exemple les poussières, les métaux lourds, les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les oxydes de carbone, les dioxines les furanes, les composés organiques volatils et les molécules odorantes.



Figure 1-4: Les feux de forêts émettent beaucoup de gaz et de particules dans l'atmosphère [14].

B.1. Poussières :

Les poussières comprennent à la fois les particules minérales, les particules organiques et les bactéries. Leurs tailles vont de $1\ \mu\text{m}$ à $1\ \text{mm}$ environ. Les particules de petites tailles représentent à peu près 99 % des poussières rencontrées dans l'atmosphère car leur vitesse de sédimentation est pratiquement nulle. Les sources de poussières peuvent être naturelles (volcan, érosion des sols, micro-organismes...) ou anthropiques, parmi lesquelles on peut citer : les industries lourdes (la sidérurgie, les cokeries, la chimie et la pétrochimie...), les activités liées au génie civil et aux bâtiments, l'incinération d'ordures ménagères ou, encore, les émissions automobiles (particules de freins ou de combustion dans des moteurs Diesel).

Les poussières provoquent des irritations des voies respiratoires. Dans des ambiances fortement polluées, des maladies professionnelles ont été répertoriées, notamment l'asbestose et la silicose. Associés aux particules, on rencontre des métaux lourds, des dioxines et furanes, du benzopyrène dans les émissions de moteurs Diesel ou encore des bactéries. Les poussières ont sur l'environnement un impact direct visuel et un impact indirect du fait de l'association particules-polluants.

B.2. Métaux lourds :

On rencontre les métaux lourds (cuivre, nickel, zinc, plomb, mercure, sélénium...), seuls ou associés, sous forme de métal, à des degrés d'oxydation variables ou sous forme organométallique. Leurs sources sont d'origine naturelle (érosion des sols, éruptions volcaniques, feux de forêts...) ou anthropogéniques (production d'énergie par combustion, pyro-métallurgie, incinération des déchets...).

Chaque métal génère des effets différents sur la santé humaine. Ainsi le mercure, sous la forme de méthyle mercure, s'accumule dans la chaîne alimentaire avec des facteurs de concentrations non négligeables. Le plomb organique perturbe fortement le système nerveux et le plomb métal peut conduire au saturnisme. Le cadmium est répertorié comme très toxique. Le nickel et le béryllium provoquent des allergies cutanées. Le zinc et ses sels sont à l'origine de problèmes respiratoires et intestinaux.

B.3. Oxydes de soufre (SO_x) :

Les oxydes de soufre émis dans l'atmosphère proviennent principalement de la combustion de combustibles fossiles dont la teneur massique en soufre varie de 0,5 à 5 % pour le charbon et de 0,5 à 3 % pour le fuel. Les rejets de soufre se font principalement sous la forme de SO₂ (95 %) et de SO₃ (1 à 2 %) ; environ 2 % sont piégés dans les cendres volantes et 1 % se retrouve dans les scories.

Des études épidémiologiques montrent que l'impact le plus important concerne d'abord les enfants. En effet, des maladies respiratoires chroniques peuvent se développer et sont par la suite aggravées par l'usage de tabac ou par des conditions de travail spécifique. Il convient aussi de noter que le couple polluant-poussières possède un impact important.

Le caractère oxydo-réducteur des oxydes de soufre agit sur les plantes et les végétaux. Pour des concentrations faibles, on observe des taches brunes dues à une nécrose des tissus végétaux. Des teneurs élevées peuvent entraîner la mort de la plante.

B.4. Oxydes d'azote (NO_x) :

Les estimations des émissions mondiales d'azote dans l'atmosphère se situent dans une large gamme allant de $2 \cdot 10^7$ à 10^8 tonne/an. Une grande incertitude subsiste quant aux rejets d'origine naturelle. L'utilisation de carburant fossile génère des rejets de 10^7 à $2 \cdot 10^7$ tonne/an. Les transports automobiles sont responsables de la moitié de ces émissions. Les NO_x ont pour sources les processus biologiques, l'oxydation du diazote lors de combustion (gaz, charbon, fuel - diesel), les réactions photochimiques dans l'atmosphère...

En termes de toxicité chronique, il est montré que le dioxyde d'azote NO₂ est quatre fois plus toxique que le monoxyde d'azote NO et dix fois plus toxique que le l'oxyde de carbone CO. L'effet des NO_x sur les êtres humains ou les animaux est relativement bien connu. NO réduit l'oxyhémoglobine en méthémoglobine qui n'est plus capable de fixer l'oxygène. Le sang ne pouvant alors plus véhiculer l'oxygène, il s'ensuit une cyanose. NO₂ provoque aussi

une modification des tissus des poumons et est alors à l'origine d'emphysème pulmonaire.

Les végétaux sont sensibles à NO_2 . On a constaté la formation de nécrose à la surface des feuilles après une exposition de 1 h à des concentrations de 4 à 8 ppm en NO_2 . Les pluies acides provoquent directement, ou via les sols, des dégâts sur les végétaux et les arbres ainsi que des phénomènes de corrosion. Les NO_x attaquent directement les colorants et les fibres textiles.

B.5. Oxydes de carbone

□ Monoxyde de carbone (CO) :

Le monoxyde de carbone (CO) provient de sources naturelles comme les éruptions volcaniques et le phytoplancton. Les sources anthropiques sont essentiellement les combustions de produits organiques en quantité insuffisante d'oxygène.

Ainsi, les véhicules produisent la majorité (70 %) des émissions de CO mesurées en milieu urbain à des concentrations de l'ordre de 50 ppm(v) avec des valeurs instantanées de 250 ppm(v) dans les tunnels routiers où une ventilation forcée est alors mise en œuvre. Dans des conditions de températures faibles, les foyers domestiques à charbon émettent aussi du monoxyde de carbone.

CO est un gaz asphyxiant. En effet, il se fixe sur l'hémoglobine du sang (myoglobine, ferroprotéines) pour former un composé relativement stable, la carboxyhémoglobine, suivant une réaction équilibrée. Très souvent, la production de CO est liée à une raréfaction de l'oxygène provoquant des troubles cardiaques. On peut noter aussi des problèmes au niveau des tissus aortiques ou encore des artères. Dans l'atmosphère, CO accélère l'oxydation de NO en NO_2 en présence d'oxygène donnant naissance à un brouillard photochimique oxydant.

□ Dioxyde de carbone (CO_2) :

La concentration de CO_2 dans l'air, hors de toute pollution externe, est d'environ 300 ppm(v). La production naturelle de CO_2 provient des volcans et de l'oxydation chimique ou biologique de matières organiques (feu de forêts, biodégradation, fermentation...). La combustion des combustibles fossiles donne, comme produit final, du CO_2 . Dans les villes où les sources mobiles (transports) sont importantes, la teneur dans l'air peut approcher 600 ppm(v). À l'inverse des sources fixes (incinération, combustion...).

La toxicité directe du CO_2 sur l'être humain est très faible. Dans un local confiné, la valeur recommandée est de 1 000 ppm(v).

On considère actuellement que le CO₂ est responsable de la moitié de l'effet de serre, les autres gaz étant le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les chlorofluoro-carbones (CFC) et l'ozone (O₃).

Les mécanismes de photosynthèse permettent la production de matière organique (végétation, arbres). Les phénomènes naturels d'absorption du CO₂ par les océans sont actuellement étudiés afin de chiffrer les possibilités de stockage de l'excès de dioxyde de carbone produit.

B.6. Dioxines et furanes :

Ces composés sont susceptibles de se former à des températures de l'ordre de 300 C° lors des émissions gazeuses des incinérations de composés hydrocarbonés en présence de dérivés chlorés. Les dioxines (75 composés possibles) et les furanes (135 molécules) sont analysés en TEQ¹, estimant la toxicité équivalente de l'ensemble des produits mesurés. Les dioxines et furanes sont stables, non volatils, fortement lipophiles, peu biodégradables et très toxiques.

Les unités d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) produisent ce type de molécules qui se répartissent à 85 % dans les cendres volantes, 10 % dans les fumées et 5 % dans les mâchefers. Les concentrations dans les émissions gazeuses d'une UIOM avec un traitement classique des fumées sont de l'ordre de 1 à 15 ng TEQ/m³ contre des valeurs de 0,05 ng TEQ/m³ avec l'utilisation d'adsorbants (chaux et charbon actif).

B.7. Composés organiques volatils (COV) :

Les sources majeures en COV sont les transports (40 %) et l'industrie (20 %). Le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) effectue régulièrement des inventaires de rejets dans l'atmosphère de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM).

Les COV ont un effet direct sur la santé humaine mais du fait de leur impact dans le cycle de Chapman où ils sont à l'origine de la formation d'ozone, ils induisent aussi un effet indirect. Un grand nombre de solvants fait l'objet d'une réglementation au niveau de l'émission mais aussi dans les ambiances de travail en raison des problèmes de santé induits comme des irritations de la peau, des yeux ou des organes respiratoires, des troubles cardiaques et digestifs, des maux de têtes, des troubles du système nerveux, des actions cancérigènes et mutagènes.

L'ozone est, quant à lui, connu depuis longtemps pour ses effets indésirables à haute concentration sur les voies respiratoires, en particulier chez les sujets ayant des problèmes d'asthme.

¹ TEQ : toxicité équivalente. Les dioxines et furanes ont une toxicité différente suivant les produits. Afin de globaliser et de normaliser les données, on donne un poids équivalent en toxicité pour chaque produit suivant leur concentration dans le gaz

Les dommages créés par l’ozone sur les feuillages ont été établis. En revanche, les effets sur les mécanismes d’attaque des fonctions vitales des plantes et des arbres ne sont pas encore bien compris. On note aussi des effets importants sur les surfaces peintes, laquées ou vernies, sur les plastiques et les caoutchoucs qui vieillissent plus rapidement.

B.8. Molécules odorantes :

Sous-ensemble de la famille des COV et des composés inorganiques volatils (CIV), les molécules odorantes peuvent être classées en trois grandes catégories : les composés soufrés, les composés azotés et les composés oxygénés. Elles sont produites à partir de sources naturelles comme les volcans. De nombreuses activités agricoles, industrielles ou domestiques sont aussi sources de nuisances olfactives. Dans tous les cas, il se produit des réactions de dégradation (d’oxydation ou de réduction) de molécules complexes en composés volatils à chaîne courte.

Du fait des concentrations rencontrées qui sont généralement très faibles, il n’y a pas, à notre connaissance, d’effets directs des odeurs sur la santé humaine. Cependant, il convient alors de parler de nuisances olfactives dont les riverains de l’émission s’habituent difficilement, engendrant alors de nombreuses plaintes (Pierre LE CLOIREC).

C. Les conséquences de la pollution atmosphérique :

Les conséquences de la pollution atmosphérique sont de deux sortes :

- Impact sanitaire et environnemental: trouble de la santé humaine principalement, mais aussi dégradation des sols, des eaux ou de la végétation.
- Impact climatique : réchauffement de la planète, destruction de la couche d’ozone, les pluies acides, les pics d’ozone [7].

Les conséquences de la pollution sont aussi nombreuses que les polluants ; elles affectent aussi bien l’être humain lui-même que son environnement. Il y a les conséquences à long terme, comme la destruction de la couche d’ozone, l’effet de serre et les changements du climat et les conséquences à court terme, telles que la pollution urbaine. Elle entraîne une augmentation des maladies respiratoires (comme asthme, les angines ou insuffisance respiratoire ou bronchiolite) et cardio-vasculaires. Les enfants sont plus sensibles que les adultes à la pollution automobile [6].

D. Influence de la météo sur la qualité de l'air :

Les conditions météorologiques ont de nombreuses influences sur la pollution :

Le vent est bon allié de la lutte anti-pollution : il favorise la dispersion des polluants. Mais parfois en les déplaçant, il déplace le problème...

La pluie permet, elle aussi, de lessiver l'air en dissolvant les molécules de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote dans l'eau. L'air est purifié, mais les pluies deviennent acides...

Le soleil intervient directement sur la pollution en transformant les oxydes d'azote en ozone. C'est la pollution photochimique.

La température : en été, les températures élevées peuvent agir sur la formation d'ozone. En hiver, les différences de températures entre la nuit et le jour provoquent des inversions thermiques et des dômes de pollution. Et quand il fait très froid, il faut également faire marcher des centrales pour produire de l'énergie pour chauffer les bâtiments, ce qui dégage des polluants [3].

1.3.4.2. LA POLLUTION DE L'EAU:

La pollution de l'eau peut être définie comme n'importe quelle action humaine qui compromet l'utilisation de l'eau, aussi comme ressource. L'eau polluée peut tuer. Chaque année, les maladies hydriques sont responsables de la mort de 3 millions de personnes, des enfants surtout, et plus de 1 milliard d'indispositions passagères par an. Par ailleurs, les quantités disponibles d'eau de bonne qualité diminuent, contaminée par les rejets domestiques, l'industrie, les produits chimiques utilisés pour l'agriculture et la mauvaise utilisation des terres.

A. Classification de la pollution de l'eau :

On peut classer la pollution de l'eau en fonction de son origine ou selon la nature des polluants.

A.1. En fonction de l'origine de la pollution:

On a quatre principales origines de pollution à savoir, la pollution agricole, la pollution industrielle, la pollution domestique et la pollution par les hydrocarbures.

□ La pollution agricole :

Les agriculteurs utilisent l'eau pour abreuver le bétail et irriguer les terres cultivables. Les déjections animales (lisier, fumier) sont source de pollution. Lorsque les animaux sont concentrés de façon importante sur un même site (élevage hors-sol), il y a concentration de la pollution. Les déjections doivent être stockées dans une fosse avant d'être épandues dans les champs en respectant certains règlements. Les agriculteurs utilisent des engrais minéraux et des pesticides pour améliorer le rendement de leur culture. La mauvaise utilisation d'engrais, de façon non adaptée aux besoins des sols et des cultures, est source de pollution diffuse. Les produits épandus en surplus ne sont pas absorbés par les plantes. Ils ruissellent à la surface du sol ou s'infiltrent dans le sol en

direction des rivières ou des nappes souterraines (Lallemand B A, 1995).

□ La pollution industrielle :

Les industriels peuvent utiliser l'eau pour fabriquer les produits (eaux de procédé), pour refroidir les machines (eaux de refroidissement), pour l'hygiène des employés (eaux sanitaires) ou pour nettoyer l'usine (eaux de lavage). La fabrication de certains produits nécessite une grande consommation d'eau. Il faut par exemple 80 litres d'eau pour fabriquer un kilo de sucre. Tous les ateliers de production ne génèrent pas une pollution de même type ni de même importance. On distingue différents types d'activités industrielles. Par exemple, les industries lourdes, les industries chimiques et certaines industries de transformation des métaux peuvent être la source d'une pollution toxique et persistante. Certains produits rejetés ont une durée de vie longue avant de pouvoir être biodégradés. Les industries de fabrication des produits alimentaires rejettent principalement de la matière organique et des fertilisants [12].

□ La pollution domestique :

Les hommes utilisent l'eau tous les jours pour se désaltérer, se laver, cuisiner et accomplir un grand nombre de tâches domestiques. Dans les villes, après avoir été utilisée, l'eau dite « usée » est collectée par un réseau d'égouts. Les effluents urbains sont acheminés par ce réseau jusqu'à une station d'épuration où ils sont traités avant d'être rejetés à la rivière. Il existe différents types de stations d'épuration. Les effluents doivent respecter certaines normes avant d'être rejetés. Le couple « réseau d'égouts + station d'épuration » s'appelle un système d'assainissement. Seul un système d'assainissement en bon état (réseau bien conçu, non percé et station d'épuration performante) peut permettre un traitement correct de la pollution d'origine urbaine. Les eaux de pluies qui ruissellent sur des surfaces imperméabilisées (rues, stationnement, toitures) peuvent aussi être source de pollution. Il devient nécessaire de les prendre en compte dans les projets d'assainissement. Dans les campagnes, lorsque les habitations ne sont pas concentrées autour d'un centre-ville, les effluents ne peuvent pas être traités de façon collective. Chaque habitation doit alors être équipée d'une fosse septique et d'un système d'épandage souterrain qui permet d'infiltrer les eaux traitées dans le sol [12].

□ La pollution par les hydrocarbures (ou pollution pétrolière) :

L'homme gagne progressivement du terrain sur des régions restées intactes – ou presque – et inhabitées, s'étendant jusqu'aux contrées

autrefois considérées comme inaccessibles (figure 1.5). Des besoins en énergie sans cesse croissants conduisent à l'exploitation pétrolière des régions arctiques, mettant en péril le fragile équilibre des écosystèmes qui constituent la toundra (METICHE M, 2004).

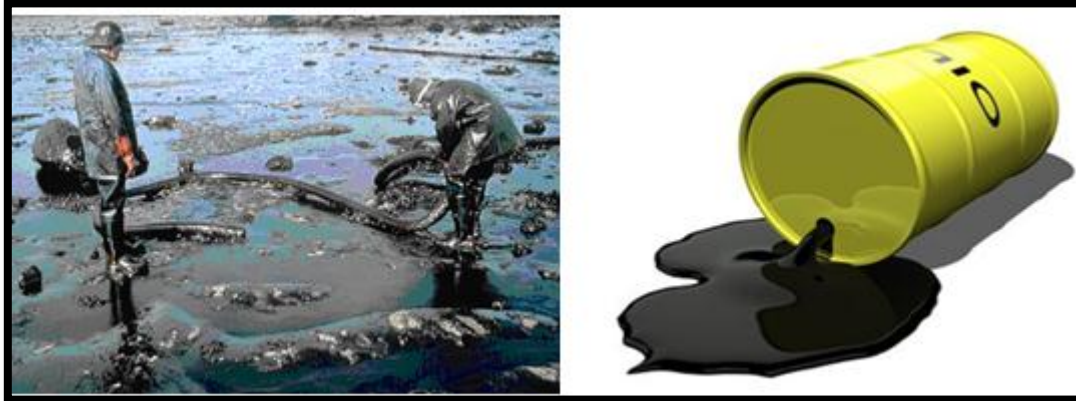


Figure 1-5: Pollution par les hydrocarbures (METICHE M, 2004), [08].

A.2. Selon la nature des polluants:

□ Pollution physique :

- Chaleur : Ce nouveau type de pollution est causé par les rejets d'eau chaude provenant des systèmes de refroidissement des centrales électriques classiques ou nucléaires. Le problème devient critique au moment où les centrales thermiques nucléaires se développent car l'échauffement qu'elles risquent de provoquer est sans doute incomparable avec celui des centrales classiques. Certaines centrales thermiques ou nucléaires sont équipées de tours de réfrigération qui évitent les inconvénients du rejet direct. Celle-ci a pour conséquence d'entraîner une modification plus ou moins importante du milieu et de détruire l'équilibre naturel qui s'y était instauré. Pour ces élévations importantes de température, la consommation d'oxygène est anormale, donc un approvisionnement du pouvoir autoépuration du cours d'eau.

Les changements des températures de l'eau peuvent entraîner des compositions d'espèces modifiées. La chaleur peut aussi désorganiser et modifier la chimie de l'environnement abiotique (Azzaoui A et Melis M, 2007).

La chaleur, par élévation de la température de l'eau, surtout de surface, provoque des effets écologiques sur la vie aquatique (développement des microorganismes comme les algues). Elle diminue la solubilité de l'oxygène (Castany G., 1980).

- Matières en suspension (MES) : Désignent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau et la troublent. Les MES diminuent la luminosité dans l'eau, donc freinent la photosynthèse. Les espèces végétales se développent plus difficilement, l'oxygène qu'elles produisent diminue dans le milieu, et les espèces animales en souffrent.

Les particules en suspension dans une eau de surface proviennent de l'érosion des terres et de la dissolution de substances organiques. A cet apport naturel, il faut ajouter les déversements d'eau d'égouts domestiques, industriels et agricoles (Emilian K. 2004).

- Radioactivité : L'utilisation des substances radioactives prend tous les jours plus d'ampleur tant dans le domaine industriel que dans le domaine agricole.

Les risques de pollution radioactive sont liés à d'éventuels accidents. La pollution radioactive est susceptible de provenir des différentes opérations du cycle du combustible : extraction et traitement du minéral, fonctionnement des réacteurs, transport et traitement des combustibles usés ainsi que du conditionnement et du traitement des déchets. La radioactivité est potentiellement la plus dangereuse des polluants physiques. C'est pourquoi tous les rejets sont sévèrement réglementés et contrôlés (CASTANY G, 1980).

□ Pollution chimiques :

- Pollution par les métaux lourds : Les polluants métalliques en zone urbaine sont présents en grande quantité. Quelle que soit leur source, ils sont entraînés par la pluie, dans un premier temps vers le réseau d'assainissement et dans un deuxième temps vers la rivière. Existant essentiellement sous la forme particulaire, les métaux se retrouvent dans le fleuve au sein des matières en suspension et des sédiments [4].

A l'état de traces, certains métaux comme le fer, le chrome ou le cobalt sont essentiels à la vie des organismes, mais ils deviennent toxiques en grande quantité.

- Pollution par le phosphore : la pollution par les phosphates enclenche un processus d'eutrophisation de l'eau, rendant les eaux eutrophiques, ou pour le moins hypertrophiques [20]. La présence du phosphore, sous ses différentes combinaisons chimiques stimule la croissance des algues, causant ainsi de

sérieux problèmes dans les cours d'eau et les eaux dormantes qui reçoivent.

L'eutrophisation s'accompagne d'une série de nuisances : désagrément esthétique d'une eau verte ou brune, odeurs, colmatage des filtres au cours de la préparation d'eau potable, perturbation de la vie aquatique.

L'excès des phosphates provient des rejets domestiques, mais aussi des rejets industriels, de l'élevage, des eaux et boues résiduaires des stations d'épurations.

- Pollution par les différentes formes d'azote : L'azote se trouve dans l'eau sous forme organique et sous forme minérale (nitrique, nitreuse, ammoniacale). Ses sources d'enrichissement naturel sont l'atmosphère par les précipitations, il est également fixé par certaines bactéries et certaines algues bleues. L'activité agricole d'une part compris l'emploi croissant de l'engrais, le cheptel élevé avec les grands effluents d'élevage (fumiers, lisiers) et d'autre part l'utilisation montante des pesticides sont les sources d'une charge considérable des eaux en nitrates et pesticides.

Quand ils ne sont pas assimilés par les plantes, les nitrates très solubles dans l'eau, sont entraînés par la pluie. Ils se retrouvent alors dans une rivière ou une nappe d'eau souterraine. Ajoutons encore que la présence des nitrites a été signalée dans les eaux de pluie et dans les eaux provenant de la fonte des neiges du fait de la pollution atmosphérique par les oxydes d'azote.

La dissociation de l'ammonium apporté par les engrais dans l'eau entraîne la formation d'ammoniac gazeux, toxique pour la faune aquatique.

□ Pollution organique :

La pollution organique constitue souvent la fraction la plus importante d'autant plus que dans son acception la plus large, cette forme de pollution peut être considérée comme résultant de diverses activités (urbaines, industrielles, artisanales et rurales). Dans les eaux usées urbaines, on peut trouver les matières organiques banales (protides, lipides, glucides), les détergents, les huiles et goudrons, les micropolluants organiques peuvent entraîner la modification des caractères organoleptiques de l'eau, ainsi que l'apparition des phénomènes toxiques [5].

Les polluants organiques évoluent dans le temps car ils sont constitués de matières vivantes qui ont besoin d'oxygène et dégageront des odeurs de putréfaction (Souikni N et Seghioyer N, 2006).

□ Pollution microbiologique :

L'eau d'alimentation lorsqu'elle est contaminée par les eaux résiduaires devient le véhicule potentiel de microorganismes dangereux d'origine fécale. Les contaminations fécales peuvent se présenter à la source ou à un endroit quelconque de système de distribution. Elles peuvent aussi survenir accidentellement dans le produit fini à la suite d'un traitement et d'une désinfection insuffisante. Il est habituel de dresser la liste des microorganismes pathogènes. En les classes d'un point de vue microbiologique, en bactéries, virus, protozoaires, métazoaires et champignons. Leurs natures et leurs propriétés biologiques tellement différentes conditionnent leurs évolutions qui polluent les milieux récepteurs (rivières, lacs, étangs) et même les nappes. Ce qui représente un danger lorsque ces eaux sont utilisées pour préparer une eau d'alimentation [5].

B. Conséquences de la pollution :

Les effets de la pollution des eaux sont multiples. On cite dans ce titre les effets sanitaires, les effets écologiques et les effets économiques.

B.1. Effets sanitaires :

L'eau non traitée ou polluée est responsable de maladies graves chez l'homme, bien souvent mortelles dans les pays en voie de développement. L'eau véhicule des virus, des bactéries, des parasites, des micro-organismes végétaux ou animaux, qui peuvent provoquer des maladies graves, voire mortelles pour être humain. Ces maladies liées à l'eau insalubre sont appelées maladies hydriques. Elles tuent environ 5 millions de personnes chaque année, et 2,3 milliards en souffrent.

Les maladies hydriques s'étalent par la contamination des systèmes de distribution d'eau potable par l'urine et les fèces des personnes ou animaux infectés. On dénombre de nombreuses maladies véhiculées par les micro-organismes présents dans l'eau :

- la schistosomiase: est une maladie hydrique considérée comme la deuxième infection parasitaire après le paludisme.
- les amibes: qui provoquent de fortes diarrhées entraînant une déshydratation qui peut s'avérer mortelle.
- la fièvre typhoïde : qui provoque des troubles digestifs et de fortes fièvres.

- la bilharziose: responsable de troubles du foie, des intestins et de la vessie, dues à un petit ver qui se développe dans les eaux stagnantes.
- le trachome: qui est une maladie infectieuse des yeux qui peut provoquer une cécité après des infections répétées.
- l'hépatite A et E: entraînent une infection et une inflammation du foie.
- le choléra.

La liste des maladies est longue, et la mortalité due aux maladies hydriques est très élevée. Dans le monde, environ 6 millions d'enfants meurent tous les ans de gastro-entérites hydriques ; 100 millions en souffrent en permanence ; 30 millions souffrent d'onchocercose ; 700 millions sont atteints du paludisme, dont 2 à 3 millions meurent chaque année.

B.2. Effets écologique :

C'est par les matières mises en suspension et en solution que l'eau (surtout dans les lacs et étangs) s'enrichit en éléments minéraux qui peuvent entraîner un développement trop important de phytoplancton.

L'augmentation de la turbidité qui en découle limite la pénétration de la lumière. Par apport de matières organiques. La couche de vase augmente et on observe une activité bactérienne de plus en plus intense avec appauvrissement en oxygène dans les eaux profondes.

L'eutrophisation est un enrichissement des eaux en substances nutritives qui aboutit généralement à des modifications symptomatiques telles que la production accrue d'aigues et autre plantes aquatiques, dégradation de la pêche, détérioration de la qualité de l'eau ainsi que tous les usages qui en sont fait en général.

Lorsque la quantité d'oxygène dissoute dans une eau diminue, la vie animale commence à souffrir ; ce sont les poissons qui requièrent le plus haut taux d'oxygène dissout ; les invertébrés un niveau moyen ; les bactéries le moins. Parallèlement, la vie végétale disparaît.

B.3. Effets économiques :

Il est en général moins coûteux de protéger les écosystèmes que de restaurer la qualité de l'eau ou des écosystèmes utiles, une fois que les dégâts ont été causés. La lutte contre la pollution nécessite des ressources financières considérables car les installations d'évacuation et de traitement des eaux usées coûtent plus cher que la fourniture d'eau potable et qu'on investit bien d'avantage dans l'alimentation en eau.

Les eaux souterraines étant généralement considérées comme la meilleure source d'eau potable, leur contamination menace souvent

l'approvisionnement en eau. Les méthodes de purification sont très onéreuses et très lente.

1.3.4.3. POLLUTION DES SOLS :

La dégradation du sol peut être considérée comme une accumulation de plusieurs effets (quelquefois opposés) provoqués par les polluants anthropologiques sur les diverses transformations physiques, chimiques et biologiques se déroulant dans le sol. La pollution des sols représente une menace nouvelle apparue progressivement : depuis l'essor de l'industrie chimique (on considère qu'entre 12 et 15 % de la surface totale dégradée sont dus à la dégradation chimique), on note une multiplication des sites contaminés par les dépôts de déchets toxiques ou d'anciens lieux de production, pollution qui auparavant n'était connue que dans les environs des sites miniers et métallurgiques.

On précise que les principaux responsables de la pollution et de la destruction des sols sont l'urbanisation et l'extension des infrastructures de transport, l'agriculture extensive, les émissions de l'industrie, de l'artisanat et du transport, et enfin les activités de loisir. De manière générale tout le système de gestion des déchets a abouti à charger le sol : émissions des usines d'incinération, décharges, mâchefers, etc.

Les substances sont qualifiées de polluants lorsqu'elles exercent une influence négative sur la fertilité du sol. C'est le cas notamment des métaux lourds et des composés organiques chlorés peu dégradables (polluants persistants).

En effet le sol peut être pollué par :

Des infiltrations continues, des fuites répétées ou des déversements accidentels à partir des dispositifs de stockage et de transport de matières premières ou de déchets. Les réservoirs de fuels, huiles de vidanges, les décharges, les canalisations, etc... sont autant de sources de pollutions organiques ou inorganiques.

Des épandages ou pulvérisations localisés dans le cadre de pratiques agricoles, l'entretien de voiries et de sites industriels. Ces activités représentent également des sources de pollution importantes, représentées par plusieurs familles de substances, voire des mélanges complexes de produits chimiques et d'agents microbiologiques.

Des retombées au sol d'émissions atmosphériques proches ou lointaines, notamment des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), HAM (Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques), dioxines, furannes, métaux lourds... [8].

A. Origine de pollution des sols :

A.1. Pollution d'origine humaine :

Les pollutions d'origine humaine, dites aussi anthropiques, ont de nombreuses formes en pouvant être locales, culturelles, ponctuelles, accidentelles, diffuses, chroniques, génétiques, volontaires, involontaires, etc. Cette pollution est une diffusion directe ou indirecte dans l'environnement de polluants. Ce sont souvent des sous-produits involontaires d'une activité humaine, comme les émissions des pots d'échappement. Les déchets de produits de consommation courante [9].

A.2. Pollution due à l'environnement :

Ces pollutions peuvent être :

- les conséquences directes ou indirectes de catastrophes naturelles, tels que le volcanisme.
- une pollution liée à des phénomènes naturels, tels que les éruptions solaires;
- une pollution d'un captage d'eau potable par un animal qui fera ses besoins à proximité, ou qui serait mort et en décomposition dans l'eau.

La nature et le degré de contamination d'un sol sont donc très variables selon l'origine de la pollution, les activités locales, la topographie du lieu, etc.... Les pollutions multiples sont courantes. Un polluant dans le sol devient dangereux s'il devient mobile et qu'il atteint sa cible (hommes, eaux souterraines ou superficielles, écosystèmes,...). Un sol pollué devient alors un problème de santé publique si le polluant atteint la nappe phréatique ou le cours d'eau avoisinant, si ceux-ci sont destinés à l'alimentation en eau potable [8].

On distingue 3 grandes catégories de sites pollués :

Les anciennes décharges réalisées sans respecter les règles techniques actuelles et notamment les décharges situées sur des sous-sols fragiles et pour lesquels une pollution des eaux souterraines a été constatée. A l'époque de l'exploitation de ces décharges, les connaissances techniques et scientifiques sur les nuisances et les risques engendrés par les stockages de déchets étaient réduites, voire inexistantes.

Les dépôts de déchets ou de produits chimiques abandonnés à la suite de faillites d'entreprises ou résultant de pratiques frauduleuses d'importation ou d'élimination de déchets (figure 1.6).

Les sols pollués par des retombées, des infiltrations ou des déversements de substances polluantes, liés à l'exploitation passée ou présente d'une installation industrielle ou à un accident de transport [09].



Figure I-6: pollution de sol par les décharges [09].

B. Normes de pollution du sol :

Pour les besoins de l'évaluation du caractère pollué ou non du sol, le décret prévoit l'utilisation des valeurs du décret :

La valeur de fond : valeur indicative concentration ambiante d'un polluant dans le sol, indicative de variations géologiques naturelles ou de l'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée. Les valeurs de fond seront cartographiées et accessibles au public ;

La valeur de référence : valeur indicative des concentrations de fond en polluants attendues dans le sol en l'absence de variations géologiques naturelles et en l'absence d'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée ;

La valeur seuil : concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel une étude de caractérisation doit être entreprise. La valeur seuil trouve à s'appliquer en fonction de la situation de fait et de droit, actuelle ou future, suivant les types d'usage naturel, agricole, résidentiel, récréatif ou commercial et industriel du terrain;

La valeur d'intervention : concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel une intervention est systématiquement entreprise (pollution nouvelle : assainissement au minimum ; pollution historique grave : mesures de sécurité et/ou de suivi). Cette valeur trouve à s'appliquer de manière identique à la valeur seuil ;

La valeur particulière : valeur constatée en polluants suite à une étude d'orientation, à une étude de caractérisation ou atteinte suite à un assainissement et déterminée dans le certificat de contrôle du sol [17].

C. Causes et conséquences de la pollution des sols :

Un sol pollué est un site présentant un risque ou des nuisances pérennes pour la santé de l'homme, les ressources biologiques, et les écosystèmes présents sur ce site. Les dépôts de substances polluantes, les pratiques sommaires d'élimination des déchets, les infiltrations, l'utilisation de pesticides, d'engrais chimiques pour la culture du sol, l'épandage de produits chimiques, les retombées dues à des rejets atmosphériques sont à l'origine de ces pollutions.

L'impact des sols pollués concerne principalement les eaux souterraines et nappes phréatiques. La contamination des eaux souterraines est très difficile, voire impossible à nettoyer. L'eau ne peut plus être traitée et devenir inutilisable.

En revanche, pour les agriculteurs-pollueurs, la législation demeure beaucoup plus floue. Les agriculteurs ont un énorme rôle à jouer dans la diminution des pollutions des sols. L'agriculture intensive et l'utilisation massive de produits phytosanitaires ont une responsabilité considérable dans ce domaine [15].

D. Les effets de la pollution des sols sur la santé humaine :

Les populations les plus exposées aux effets de la pollution des sols sont celles présentes sur les sites ou sols pollués ou à proximité. De nombreuses substances chimiques mesurées dans des sols pollués sont connues pour générer des effets multiples sur la santé.

Si la description d'effets sanitaires dans une population qui réside sur ou à proximité d'un site pollué est souvent possible, il est par contre difficile de déterminer si la pollution du site est bien responsable de ces effets. Au moins une raison à cela : la difficulté d'estimer l'exposition des populations aux polluants présents dans les sols, car le passage des polluants du sol dans l'organisme humain est très mal connu.

1.4. CONCLUSION :

A propos de pollution, il est de bon ton de se montrer pessimiste. La pensée dominante s'affiche dans ce domaine désespérée et désespérante. Le problème de la pollution n'est pas un problème de « tout ou rien », c'est un problème de « plus ou moins ». L'étude ce chapitre explique le pourquoi et le comment de la pollution. les principaux milieux où la pollution peut être touchée : l'air l'eau et le sol, avec échanges entre eux. Ces milieux sont pollués par les différentes origines de pollution. Ces polluants génèrent de graves conséquences sur les milieux écologiques et sur l'homme et sa santé. C'est pourquoi le terme « pollution » est un sujet très important à étudier.

CHAPITRE II

MOYENS DE PREVENTION ET DE DEPOLLUTION

L'eau est une ressource naturelle à la base de la vie et une denrée essentielle à la majeure partie des activités économiques de l'homme. Elle est également rare et constitue en fait une ressource dont la disponibilité est marquée par une irrégularité prononcée dans le temps et dans l'espace. Elle est enfin fortement vulnérable aux effets négatifs des activités humaines. La qualité de l'eau dans le milieu naturel se dégrade de manière continue, elle peut en effet être contaminée par des éléments provenant de rejets qui y sont déversés ou de polluants provenant de l'air ou des sols.

Le sol est une ressource non renouvelable. Les processus de formation et de régénération des sols sont extrêmement lents (plusieurs milliers d'années), certaines activités humaines peuvent dégrader les sols en quelques années ou décennies. Parmi les menaces les plus préoccupantes, on peut citer l'érosion, la diminution des matières organiques, la contamination par des substances polluantes, l'imperméabilisation, le tassement, la réduction de la biodiversité, la salinisation, les inondations et les glissements de terrain. Qu'elle provienne de sources diffuses et mobiles (ex : retombées atmosphériques, pratiques agricoles) ou de sources clairement confinées avec des pollutions très concentrées (ex : contamination locale ou ponctuelle liée à un site industriel, à un dépôt de déchets), la pollution du sol peut avoir des impacts néfastes sur la santé humaine et l'environnement, notamment par bioaccumulation, par émanations gazeuses et en contaminant les eaux souterraines.

Comment peut-on agir pour limiter la pollution des eaux et des sols ?

Pour faire face à cette situation, la question de la nécessité d'une dépollution peut être posée. L'action de «dépolluer» signifie que l'on va retirer la matière polluante. La dépollution est un traitement pour rendre ces sources propre pour satisfaire les besoins des populations. Le traitement des sources contaminées est coûteux. A cet effet, la prévention est le seul moyen efficace de lutte contre la pollution.

Dans ce chapitre, nous essayons dans un premier temps de décrire les différents moyens de prévention et dépollution des eaux (souterraines e superficielles). Nous établissons ensuite une étude sur les principaux moyens de prévention (généralement les déchets) et dépollution des sols.

2.1. PREVENTION ET DEPOLLUTION DES EAUX :

2.1.1. LES EAUX SOUTERRAINES:

La qualité des ressources en eau souterraines connaît une dégradation croissante ces dernières années sous l'effet de la présence des foyers de pollution engendrés par des activités anthropiques. Il est devenu, de ce fait, nécessaire de mettre en plan des mécanismes et des actions visant la préservation et la sauvegarde de ces ressources. Le traitement d'une eau souterraine contaminée est coûteux, voire

impossible dans certains cas. A cet effet, la prévention est le seul moyen de lutte contre la pollution de l'eau souterraine.

2.1.1.1. LA PREVENTION DES EAUX SOUTERRAINES CONTRE LA POLLUTION :

La prévention de la pollution des eaux souterraines, action d'autant plus nécessaire que la décontamination des nappes d'eaux souterraines polluées, est une entreprise longue et coûteuse, implique que soient élaborées et diffusées à l'attention des services publics responsables aussi bien que des particuliers, des informations décrivant l'existence ou l'absence de facteurs naturels protégeant les nappes d'eau souterraine contre les risques de pollution accidentelle ou due à des négligences, qu'elle soit d'origine atmosphérique ou superficielle, ponctuelle ou extensive. La notion de vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques et stables déterminant la mesure dans laquelle ces nappes se trouvent, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol (Albinet M. et Margat J., 1971), [33].

A. Principe de la prévention :

La législation sur la prévention des eaux vise à protéger les eaux souterraines contre toute atteinte nuisible et à permettre leur exploitation durable dans le respect des équilibres écologiques. Comme les eaux souterraines sont menacées de tous côtés et qu'elles sont omniprésentes, il faut autant que possible, respecter les objectifs écologiques qui s'y rapportent de manière générale. Il apparaît en outre nécessaire d'assurer leur protection en tenant compte de leur utilisation pour la production d'eau potable (Müller S. et Kozel R., 2004).

La protection générale des eaux souterraines est assurée, avant tout, par l'application du devoir de diligence, de l'interdiction de polluer et de l'obligation de protection au plan quantitatif. Il s'agit donc de veiller à ce que les eaux souterraines restent proches de leur état naturel et cela tant du point de vue de la qualité que de celui de la quantité, de manière à garantir une offre suffisante en eaux de bonne qualité. Cette philosophie vise à préserver les eaux souterraines, dans un sens très large, c'est-à-dire en tenant compte de leur environnement géologique et hydrogéologique, de leur régime hydraulique et de leurs propriétés chimiques et biologiques. Les objectifs à atteindre sont ainsi les suivants (voir figure 2.1) :

- Conservation des aquifères, des aquicludes et des couches de couverture, ainsi que du régime hydraulique des eaux souterraines ;
- Conservation de la qualité chimique naturelle des eaux souterraines ;
- Conservation des biocénoses naturelles des eaux souterraines (Müller S. et Kozel R., 2004).

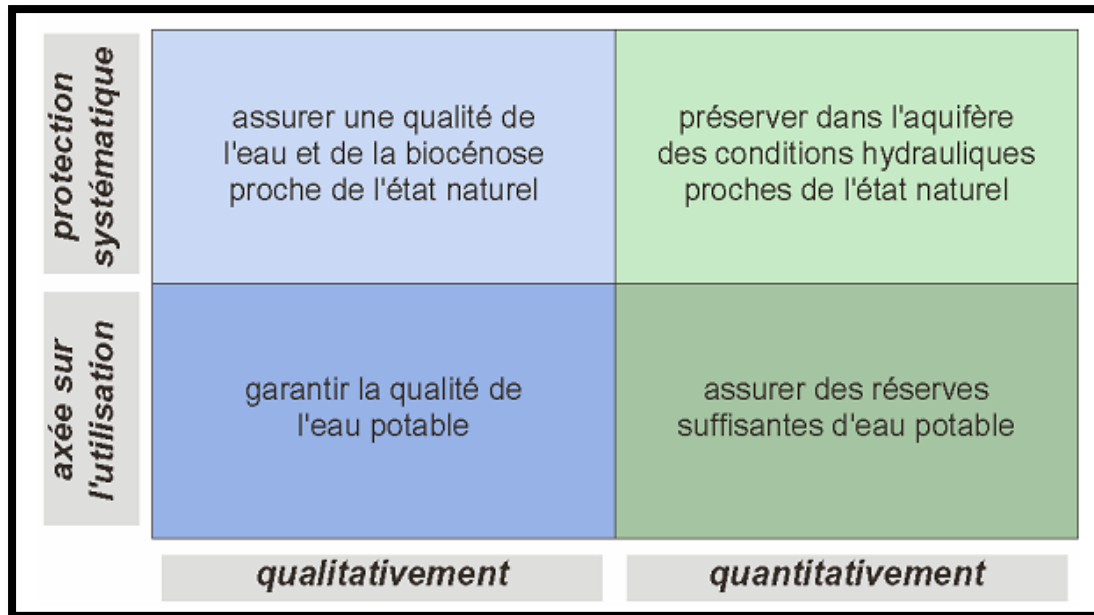


Figure 2-1: Objectifs de la protection des eaux souterraines

B. Moyens de prévention contre la pollution des eaux souterraines :

La prévention est le meilleur moyen de lutte contre la pollution de l'eau souterraine. Pour cela il existe différents moyens de prévention pour lutter contre la pollution des nappes souterraines, à savoir : l'élaboration des périmètres de protection, le mapping de la vulnérabilité et du risque.

B.1. Les périmètres de protection:

La réalisation des périmètres de protection des ressources en eau constitue un outil de prévention très efficace. La définition de ces périmètres nécessite la réalisation des études pluridisciplinaires très spécifiques (El Bennoury A., 2002).

Les périmètres de protection des eaux souterraines servent à protéger les eaux souterraines sur une certaine surface, en vue d'une utilisation future (exploitation ou alimentation artificielle). Ils correspondent à un zonage établi autour des captages utilisés pour la production d'eau d'alimentation en vue d'assurer la préservation de sa qualité. En complément aux indispensables actions générales de préservation du milieu, les périmètres de protection s'affirment comme l'outil privilégié pour prévenir et diminuer toute cause de pollution susceptible d'altérer la qualité des eaux prélevées. Ils sont définis sur la base de critères hydrogéologiques. Les périmètres de protection permettent également de réduire le risque de survenue de pollutions accidentelles de la ressource, situations dont les conséquences peuvent être importantes pour les collectivités (restriction des usages alimentaires de l'eau voire interruption de la distribution d'eau) [34].

□ Les objectifs et élaboration des périmètres de protection :

Les périmètres de protection sont établis au niveau des points de captage des eaux souterraines, afin de préserver les ressources contre

les éventuelles pollutions (accidentelles ou chroniques). La protection des ressources, via la mise en place de périmètres de protection, a plusieurs objectifs dont :

- la contribution à préserver la qualité des ressources et milieux aquatiques
- la préservation de la continuité du service d'alimentation en eau potable.

L'établissement de périmètres de protection suit une procédure très précise. La phase préparatoire comprend :

- une étude technique (enquêtes de terrain, analyse de la qualité de l'eau) ;
- la consultation d'un hydrogéologue agréé ;
- l'élaboration des dossiers réglementaires. Ces dossiers techniques, financiers et administratifs comprennent en particulier :
 - une description des caractéristiques des ouvrages et des contraintes de la situation,
 - un rapport géologique et des analyses de l'eau brute,
 - des informations sur la vulnérabilité des ressources et les risques de pollution,
 - une analyse des conséquences du prélèvement sur le milieu naturel (Veolia eau).

□ Les types de périmètre de protection :

La protection des points d'eau à usage public doit être réalisée par la mise en place de deux zones : l'une de protection immédiate, l'autre de protection rapprochée, complétées éventuellement par une troisième dite de protection éloignée (figure 2.2).

Ces trois zones se définissent comme suit :

- Une zone de protection immédiate englobant le ou les points de prélèvement ;
- Une zone de protection rapprochée qui doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration des substances polluantes ;
- Une zone de protection éloignée qui, si nécessaire, prolonge le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions.

Ces trois types de zones ont été hiérarchisés de cette manière selon trois types de risques :

- Le risque d'introduction directe de polluants dans l'ouvrage de prélèvement qui peut être prévenu par la création du « périmètre de protection immédiate ».
- Le risque de dépassement d'au moins une des limites de qualité réglementaire de l'eau à la suite d'une mise en place du « périmètre de protection rapprochée ».
- Le risque de dégradation de la qualité de l'eau sans que celle-ci soit rendue impropre à la consommation « périmètre de protection éloignée » comprenant la zone où un tel effet pourrait se faire sentir (El Bennoury. A, 2002).

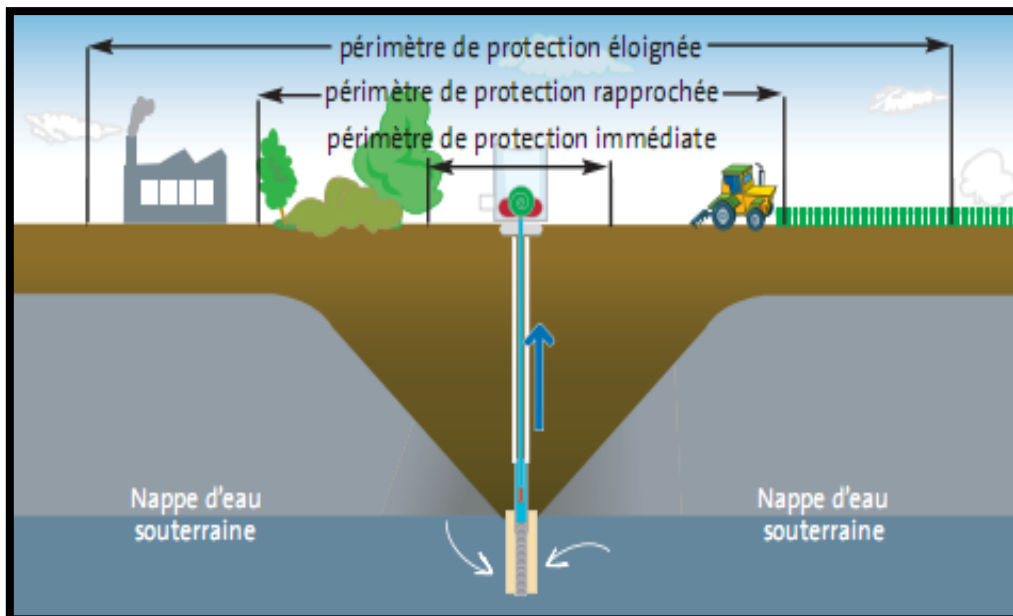


Figure 2-2: les types de périmètre de protection (Veolia eau).

□ Les Avantages:

Les périmètres assurent une prévention efficace pour assurer une protection organisée autour des points de captage :

- La qualité de l'eau est protégée dès la ressource : L'instauration de périmètres de protection autour des points de captage d'eau permet de réduire les risques de pollution chronique ou accidentelle. Cela contribue à sécuriser la source de captage.
- Des zones de protection clairement délimitées et reconnues : Les activités économiques, industrielles et agricoles sont réglementées dans les périmètres de protection et leur

surveillance, inscrite dans la durée, est effectuée régulièrement. De plus, les périmètres de protection offrent une garantie vis-à-vis d'activités futures ou de projets d'aménagement.

B.2. Les cartes de la vulnérabilité:

L'établissement de cartes de vulnérabilité est un moyen d'alerte efficace pour éviter la pollution des eaux souterraine.

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse (Gogu et Dassargues 1998 ; Lallemand Barres 1994 ; Lallemand barres et Roux 1989). Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface (Amharref M. et Bernoussi A., 2007).

La vulnérabilité des nappes à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables déterminant la mesure où elles sont, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation dans l'espace souterrain. Celle-ci est, en premier lieu, liée à l'autoépuration naturelle du sol, donc à la présence de conditions indispensables à son action. En second lieu, elle est favorisée par la circulation de l'eau (Castany G., 1980).

La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libre sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à 'rincer' les particules de la zones non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées.

Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage (ancien forage, fouille profonde...) (Beauchamp J., 2006).

□ Facteur de la vulnérabilité :

Les facteurs de la vulnérabilité, les plus importants, peuvent être résumés comme suit :

- état et caractéristiques physiques et chimiques du sol et du sous-sol. Le facteur principal est la lithologie ;
- profondeur de la surface piézométrique, laquelle impose le temps de séjour en zone non saturée.

- paramètres de l'écoulement de l'eau souterraine : coefficient de perméabilité ou transmissivité, direction et vitesse de déplacement (à défaut vitesse effective).
- conditions d'alimentation et d'écoulement, facteur du renouvellement de la réserve totale moyenne (Castany G., 1980).

□ Cartes de la vulnérabilité :

La vulnérabilité s'exprime par des cartes. Elles sont dressées, en France, à différentes échelles, adaptées aux utilisations : 1/1000000, 1/250000, 1/50000, parfois plus grandes pour des problèmes spécifiques. Ces cartes doivent répondre à deux préoccupations principales :

- la prévention par la localisation des zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement l'eau souterraines, la définition de la propagation des polluants et la situation des foyers de contamination actifs ou potentiels
- La protection par mise en place d'aménagements spéciaux (étanchéité des stockages et des canalisations de surface et souterrains, collecte des effluents, etc.), de périmètres de protection des eaux souterraines captées et des réseaux de qualité (Castany G., 1980).

B.3. Carte de protection des eaux souterraines :

Les cartes de protection des eaux souterraines sont des instruments de toute première importance pour l'application des dispositions légales. Elles sont établies par régions et comprennent au moins les éléments suivants :

- Secteurs A_U et A_O (voir figure 2.3) de protection des eaux
- Aires d'alimentation Z_U et Z_O (voir figure 2.3)
- Zones de protection des eaux souterraines
- Périmètres de protection des eaux souterraines
- Sources non captées, captages et installations d'alimentation artificielle (Müller S. et Kozel R., 2004).

Cette carte de protection ne s'applique pas en Algérie car notre législation n'a pas encore atteint ce point.

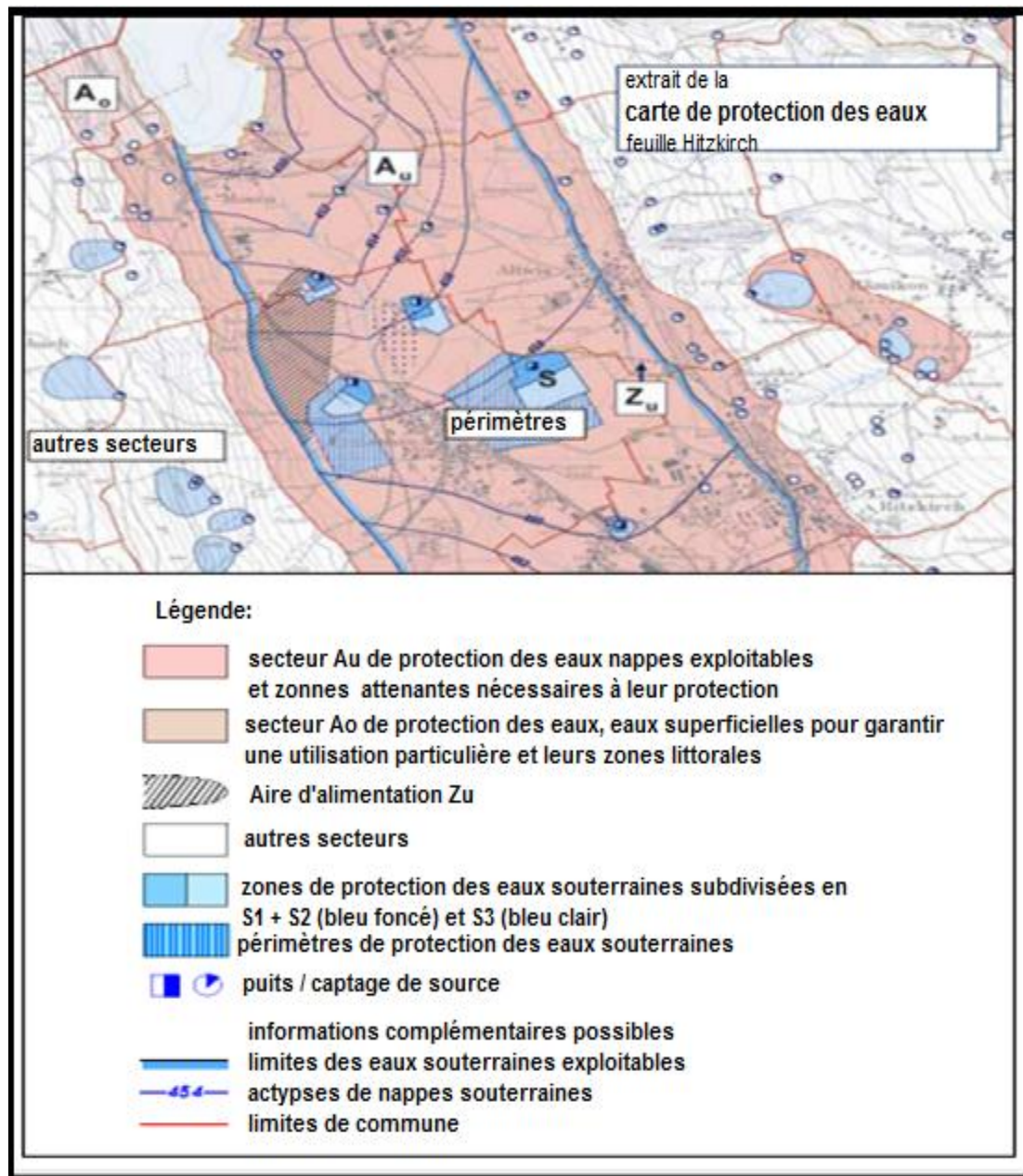


Figure 2-3: Exemple de carte de protection des eaux en Suisse (Müller S. et Kozel R., 2004).

2.1.1.2. LA DEPOLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES:

L'objectif de ce titre est de présenter les principales techniques de traitement d'un site pollué actuellement disponibles pour les eaux souterraines. La présentation de chaque technique considérée rassemble principalement les informations relatives à sa description, son efficacité, ses avantages et ses inconvénients.

A. Moyens de dépollution des eaux souterraines :

A.1. Méthodes hydrauliques :

□ Pompage-écrémage :

Le pompage-écrémage est la technique la plus utilisée pour récupérer le flottant dans les nappes phréatiques perméables dont le toit se situe à de faibles profondeurs (voir figure 2.4). Le pompage des eaux souterraines produit un cône de rabattement ; le surnageant (produit pur de densité inférieure à 1) suit le gradient hydraulique, migre gravitairement vers le(s) point(s) bas et s'accumule. Cette accumulation permet de récupérer plus rapidement le surnageant.

Le surnageant est alors pompé à l'aide d'écrémeurs vers les unités de stockage en surface (citerne) avant d'être éliminé (incinération, récupération des hydrocarbures...). Les écrémeurs sont positionnés au niveau du surnageant et permettent de récupérer spécifiquement les hydrocarbures en évitant au maximum de récupérer les eaux souterraines. Les systèmes les plus couramment utilisés sont les hydroéjecteurs pneumatiques, les skimmers (ou crépines flottantes) et les bandes oléophiles (Colombano S et *al.* 2010).

• Les avantages :

- technique fiable et éprouvée,
- mise en œuvre relativement simple et rapide,
- il génère peu de perturbation de sols,
- il est envisageable sous des bâtiments,
- afin d'améliorer les rendements épuratoires, on peut y associer des procédés chimiques (lavage),
- le procédé permet de stopper la migration des polluants en créant des points de fixation de la contamination (confinement hydraulique),
- la position des piézomètres et des crépines permet de cibler précisément les zones à traiter,
- les profondeurs de pompage peuvent être de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres si nécessaire,
- le fait d'éliminer la phase flottante permet d'éliminer la source de pollution et de diminuer les émissions associées (phase dissoute et gazeuse).

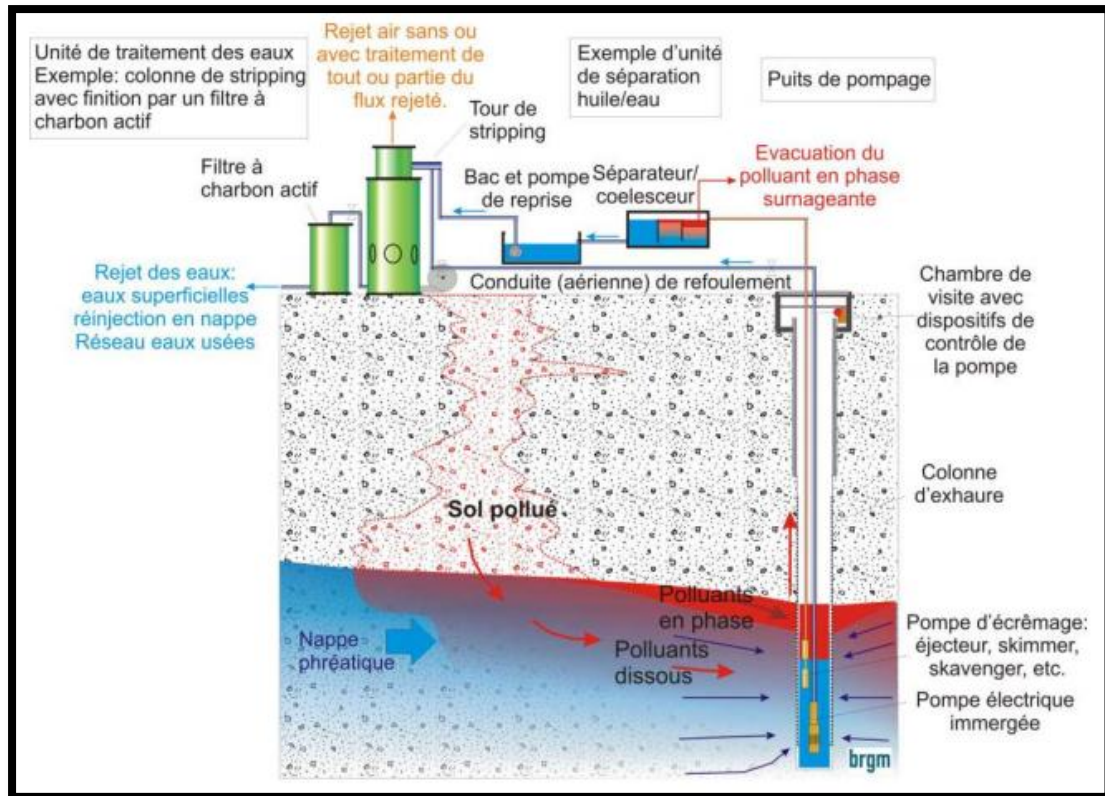


Figure 2-4: Schéma de principe du pompage-écrémage (Colombano S et al. 2010).

- Les inconvénients :

- le traitement n'est pas possible pour de petites épaisseurs de surnageant (inférieures à 1 cm),
- dans le cas des aquifères de grandes perméabilités (transmissivité importante), les débits à pomper pour le rabattement sont souvent importants. Il est donc primordial de bien optimiser le nombre et l'emplacement des points d'extraction ;
- son efficacité est limitée dans le cas d'aquifère de faible perméabilité (10^{-6} m/s), non homogène et/ou fracturé (passages préférentiels à travers les zones les plus perméables à l'eau),
- sans une maîtrise totale du sens d'écoulement des eaux souterraines, il y a un risque de dissémination de la pollution,
- une variation importante de la profondeur du toit de la nappe constitue un obstacle important au bon fonctionnement du procédé (Colombano S et al. 2010).

- Récupération des produits purs :

La récupération de produit pur n'est possible que lorsque le polluant n'est pas entièrement soluble dans l'eau. C'est le cas des

produits pétroliers, des hydrocarbures chlorés dont les solvants chlorés. Le composé non soluble flotte en surface de l'aquifère ou bien s'enfonce et s'étale à la base de l'aquifère selon la densité du composé (Lallemand B A., 1995). Les produits purs récupérés essentiellement lors des opérations de pompage/écrémage sont très peu miscibles à l'eau. Le principe de la séparation eaux souterraines/produit pur (free product ou produit en phase libre) repose sur le caractère non miscible de ces produits ainsi que sur la différence de densité (Colombano S et al. 2010). Le principe de base d'un débourbeur/déshuileur pour des hydrocarbures légers est le suivant (figure 2.5):

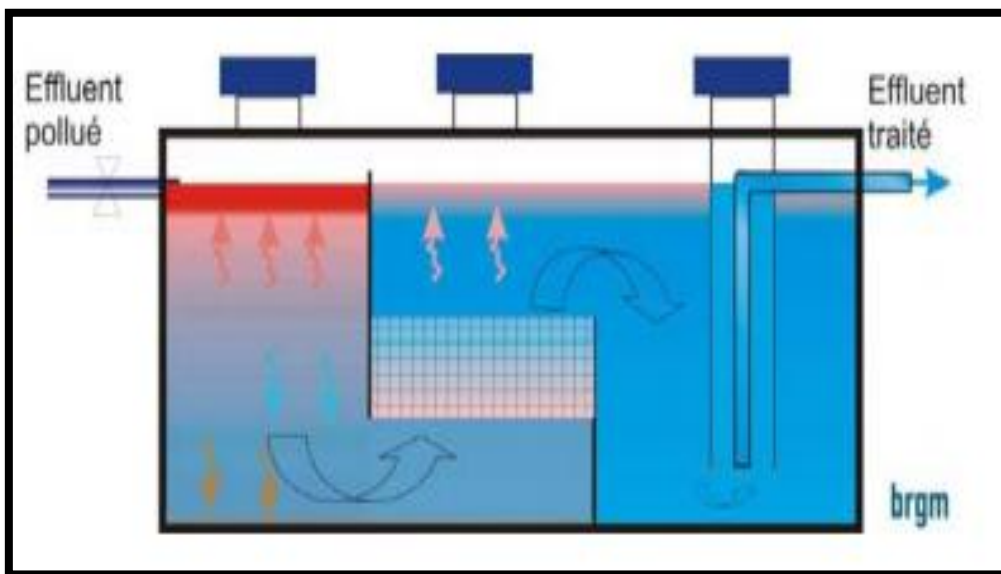


Figure 2-5: Schéma de principe de séparateur à hydrocarbures (Colombano S et al. 2010).

- i. injection des eaux souterraines dans une cuve à chicane par le haut,
 - ii. accumulation des produits purs (surnageant dans la première partie de l'ouvrage),
 - iii. enlèvement des hydrocarbures flottants par écrémage,
 - iv. évacuation de l'eau partiellement traitée par le bas de l'ouvrage puis rejets dans le milieu naturel, les réseaux d'eaux usées, les réseaux d'eau pluviale vers la filière de traitement si les concentrations en hydrocarbures dissous sont supérieures à celles définies pour ces rejets.
- Avantages et inconvénients :

Cette technique, bon marché, nécessite peu d'entretien. Elle est non destructrice et permet de séparer les hydrocarbures (phase pure) des eaux souterraines. La séparation des hydrocarbures en phase dissoute est partielle voire faible.

Les problèmes de fonctionnement rencontrés sont : encrassement dû au développement bactérien, volatilisation des hydrocarbures, diminution des temps de séjour liés à la décantation des matières organiques et/ou à l'accumulation des produits purs.

Un des problèmes majeurs consiste à la non formation de phase pure, dans ce cas, il convient de casser les émulsions par attaque acide, basique ou/et à l'aide de produits spécifiques.

Les hydrocarbures récupérés doivent être éliminés en centre agréé (le plus souvent en centre d'élimination agréé ou dans les centres de nettoyage des cuves d'hydrocarbures) (Colombano S et al. 2010).

□ La fixation :

La fixation consiste à dévier la pollution, afin de l'empêcher d'atteindre un ouvrage à protéger, par exemple en créant un contre-courant par pompage en un ou plusieurs points soigneusement situés à l'intérieur de la zone polluée. L'eau polluée peut être : soit rejetée sans traitement dans un cours d'eau de surface ou des égouts, si, compte tenu de la dilution, les teneurs sont suffisamment faibles pour que toute nuisance soit écartée au niveau du milieu récepteur ; soit après traitement dans le cas contraire.

Les pompes de fixation permettent par la même occasion d'éliminer une partie de la pollution qui se trouve dans le milieu souterrain. En ce sens ils sont d'autant plus efficaces qu'ils sont situés au cœur de la pollution. Lorsqu'on a affaire à une pollution biphasique, on emploie la plupart du temps un système de doubles pompes (pompage de l'eau et pompage du produit séparé). Les temps de récupération peuvent être très longs, et le simple pompage n'est généralement pas suffisant pour évacuer la pollution.

□ Le confinement :

Dans certains cas le confinement de pollutions, provenant par exemple de terrils ou de décharges, par une couche étanche à la surface du dépôt, et la réalisation d'une paroi étanche barrant la circulation des eaux souterraines, a été mise en œuvre, évitant ainsi la lixiviation et l'entraînement de substances indésirables dans les eaux souterraines (figure 2.6).

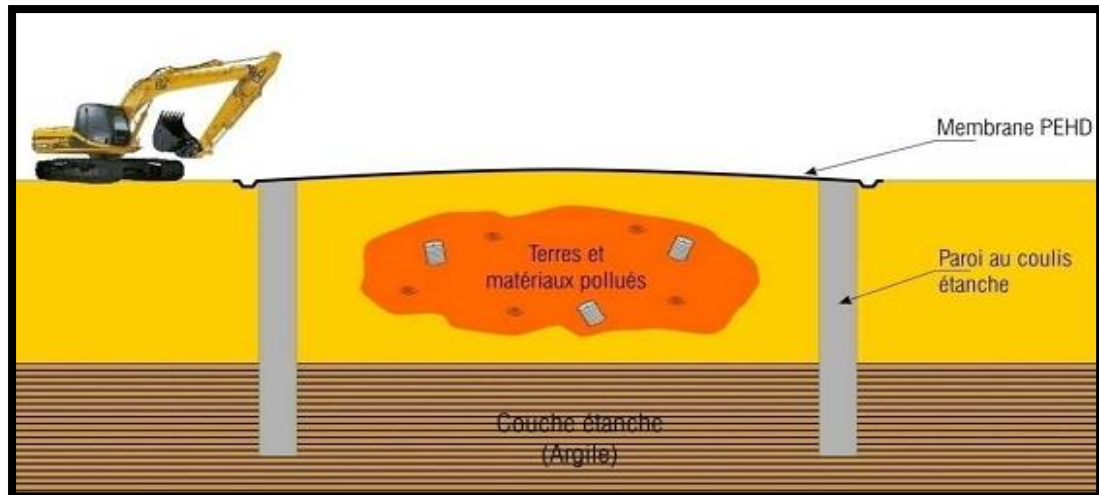


Figure 2-6:schéma de principe du confinement in situ (Claude C., 2008).

- Avantage :
 - Coût faible
- Inconvénient:
 - Maintien des terres non traitées sur le site => contraintes (Claude C., 2008).

□ Le traitement par barrières actives :

Ce procédé, tout récemment mis au point consiste à contribuer à l'élimination physico-chimique des produits polluants en mettant en place une barrière verticale, réalisée avec des moyens techniques équivalents à ceux utilisés pour créer des parois étanches souterraines. Les ouvrages sont disposés de telle façon qu'ils interceptent l'écoulement naturel des eaux souterraines, et le remplissage des parois est effectué avec des produits réactifs. La même technique peut être utilisée en employant des filtres biologiques.

- Les avantages :
 - le procédé permet de confiner un très grand nombre de polluants,
 - il est particulièrement bien adapté pour de grands volumes de pollution des composés inorganiques voire mixte,
 - technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
 - compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants,
 - fiabilité.

- Les inconvénients :
 - les pollutions ne sont pas détruites et restent en place : aucune action n'est réalisée sur le volume et la toxicité des déchets. La seule action est relative à réduction importante du transfert de pollution,
 - Il est primordial de garder la mémoire de la pollution et d'instaurer des restrictions,
 - il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme,
 - il est nécessaire d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement (endommagement du confinement du au gel/dégel, tassement différentiel, passage d'engins, dessiccation, attaque de rongeurs, végétation, ...),
 - la couverture permet seulement de limiter les transferts verticaux (eaux pluviales, gaz, contact, réenvols de poussières,) mais ne permet pas de contrôler les flux horizontaux,
 - la mise en place notamment au niveau des soudures doit être irréprochable,
 - il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitudes ...),
 - étant donné que les travaux n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.

A.2. Méthodes de dépollution à l'aide de circulation d'air :

□ L'injection d'air dans la zone saturée «sparging»:

L'injection d'un gaz dans l'eau souterraine pour volatiliser les composés volatils (l'air sparging) est une technique très utilisée depuis une dizaine d'années dans des cas où le sol présente une géologie simple (figure 2.7). Cette technique est souvent en concurrence avec le pompage de la nappe et d'autres traitements in situ de la nappe. L'air sparging est fréquemment couplé avec le venting [61].

L'air sparging est un procédé in situ permettant de traiter localement la zone saturée (dissoute, adsorbée). Cette technique consiste à injecter un gaz, le plus souvent de l'air, dans la formation par des puits verticaux ou horizontaux. Cette injection a lieu au-dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine à traiter. Ensuite, l'air se propage à travers la zone saturée en créant des canaux d'air. En instaurant cette interface air/phases du sol (air/eau, air/sol, air/produit) [61]. La technique consiste à former des bulles d'air dans la nappe qui activent la

volatilisation du polluant. Les vapeurs sont récupérées par un dispositif d'extraction dans la zone non saturée [38].

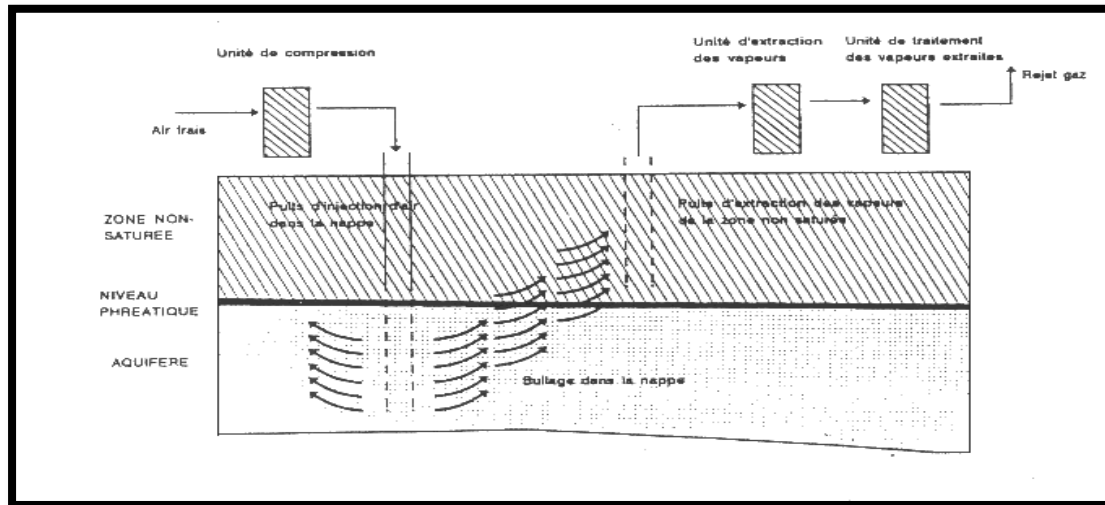


Figure 2-7: Injection d'air sous pression et bullage « sparging » dans la zone saturée [38].

La technique de stripping in situ a été développée en Allemagne au début des années 1980 et a été reprise plus récemment aux États-Unis et dans d'autres pays où elle connaît un nouvel essor sous l'appellation de « air sparging » pour la dépollution des nappes (Lallemand B A., 1995).

- Avantages et inconvénients :

Un avantage de la technique est qu'elle procède à la fois du stripping in situ et mobilise la phase dissoute et la phase adsorbée, et de la biodégradation naturelle en fournissant une source d'oxygène aux bactéries présentes.

Le temps nécessaire à une dépollution est moindre qu'avec d'autres techniques. Le temps de dépollution dépendra de la distribution du polluant entre les différentes phases (dissoute, adsorbée), de l'aptitude au stripping et à la biodégradation des polluants, de la densité des points d'injection, des caractéristiques hydrogéologiques.

Or, il y a de nombreuses possibilités pour que les gaz ne soient pas capturés dans la zone non saturée. La condition essentielle d'application du stripping in situ est donc que la technique du venting puisse être appliquée au sol, à moins que l'on puisse concevoir un système de biodégradation dans le sol.

L'efficacité du système « air sparging » est très dépendante de la lithologie et de la stratigraphie. Dans les sols très stratifiés, l'air peut se propager loin du puits et ne pas atteindre la cible polluée, ou entraîner une propagation du polluant.

La technique est limitée aux terrains grossiers, homogènes, la géochimie de l'eau souterraine est un facteur à prendre en compte. En cas de teneurs élevées en Fe et Mn, il faut s'attendre à la précipitation d'oxydes et d'hydroxydes qui peuvent colmater les pores et les massifs filtrants et compromettre l'efficacité du procédé.

En conclusion, cette technique très en vogue actuellement est intéressante, et peut être combinée avec d'autres techniques, comme dépollution hydraulique ou les procédés, hydrochoc, géochoc, ou encore la biodégradation, auquel cas on parle de biosparging. Elle demande à être mise en œuvre par des spécialistes (Lallemand B A., 1995).

□ Le stripping :

Le stripping consiste à extraire les polluants de la nappe. Pour ce faire, l'eau est pompée et mise en contact avec l'air dans une tour d'aération (aussi appelé « stripper », voir figure 2.8). Lors du mélange air / eau, les composés volatils contenus dans l'eau sont extraits en passant à l'état gaz. L'air ainsi chargé en polluant est ensuite traité [32]. Les débits d'air (conventionnellement entre 100 et 200 fois celui des eaux à traiter), les hauteurs des tours (de 2 à 10 m) ainsi que leur diamètre, le type de plateau ou matériel de remplissage dépendent des charges massiques à épurer. La plupart des dispositifs comprennent une tour de contact, des ventilateurs, des pompes, des conduites et des distributeurs (Colombano S et al. 2010).

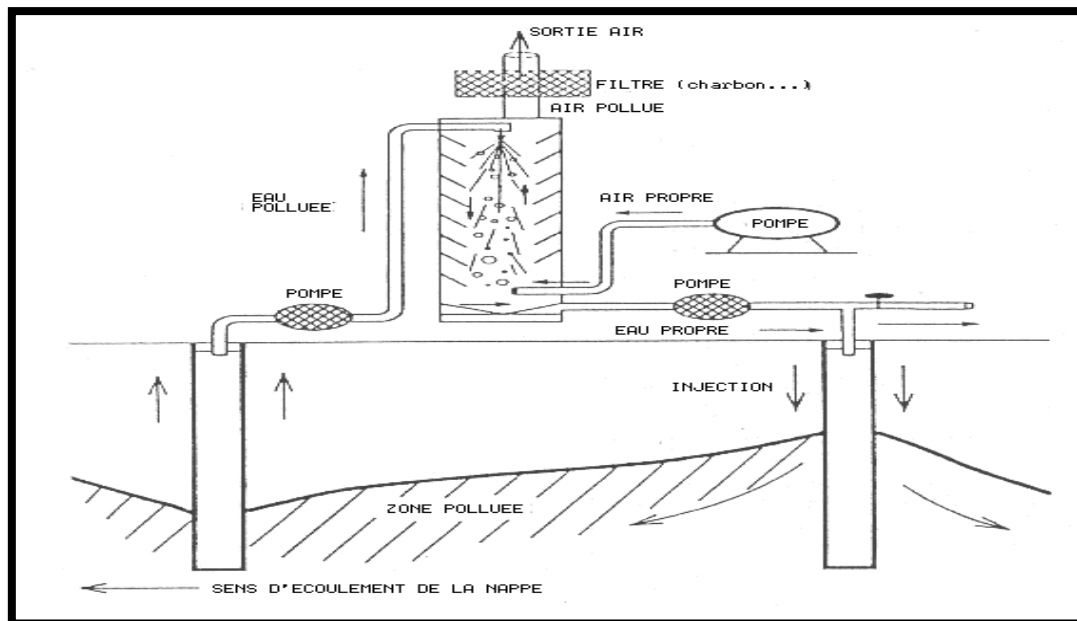


Figure 2-8: Schéma de principe du stripping (Lecomte P., 1998).

- Les avantages :
 - procédé non destructif,
 - rendements épuratoires élevés (en général plus de 90 %),
 - technique très répandue et procédé très bien maîtrisé,
 - nombreuses unités mobiles actuellement sur le marché (dont les capacités de traitement varient entre 10 à 20 m³/h, et exceptionnellement 50 m³/h),
 - les concentrations acceptées peuvent être importantes,
 - procédé peu sensible aux fluctuations de la concentration des contaminants,
 - applicabilité à une vaste plage de concentrations de contaminants dissous.

- Les inconvénients :
 - les MES ou la formation de précipités de fer et de manganèse peuvent colmater l'unité de stripping,
 - les concentrations importantes en calcium ou magnésium (eau dure) peuvent réagir avec le CO₂ de l'air et former des précipités qui peuvent colmater l'unité de stripping,
 - un développement bactérien important peut se développer dans les tours, ce qui peut nécessiter des entretiens réguliers,
 - les systèmes ne peuvent s'appliquer qu'à des composés volatils ou à défaut des composés semi-volatils lorsqu'ils sont préchauffés ou lorsque les temps de contact sont très importants,
 - les eaux traitées peuvent nécessiter un traitement supplémentaire, les concentrations résiduelles étant souvent supérieures aux critères d'eau potable,
 - l'air rejeté peut nécessiter un traitement préalable (Colombano S et al. 2010).

□ Ventilation du sol ou venting :

La méthode de ventilation, dite venting en anglais, est mise en œuvre pour déplacer les composés volatils de la zone non saturée. Le procédé est basé sur l'application d'une dépression dans la zone non saturée (figure 2.9). Il s'établit un courant d'air en direction des puits d'extraction. Les polluants volatils peuvent passer dans l'air et être ainsi extraits du sol (Lallemand B A., 1995).

Le venting est très utilisé pour la réhabilitation de sites pétroliers ou pétrochimiques présentant des pollutions de types hydrocarbures

pétroliers légers ainsi que pour des pollutions liées aux composés halogénés volatils et aux composés non-halogénés volatils. Cette technique est, dans certaines conditions, potentiellement applicable sur certains composés halogénés semi-volatils et certains composés non-halogénés semi-volatils.

- Les avantages :
 - cette technique est éprouvée et a démontré une grande fiabilité ainsi que des résultats extrêmement significatifs,
 - elle est compétitive en termes de coût et de performance,
 - elle est applicable à de nombreux polluants,
 - elle génère peu de perturbation des sols,
 - elle est utilisable préalablement à d'autres techniques de dépollution afin de limiter les émissions de polluants volatils,
 - elle est applicable sous des bâtiments (forages horizontaux) et dans le cas de pollutions à de grandes profondeurs (plusieurs dizaines de mètres).

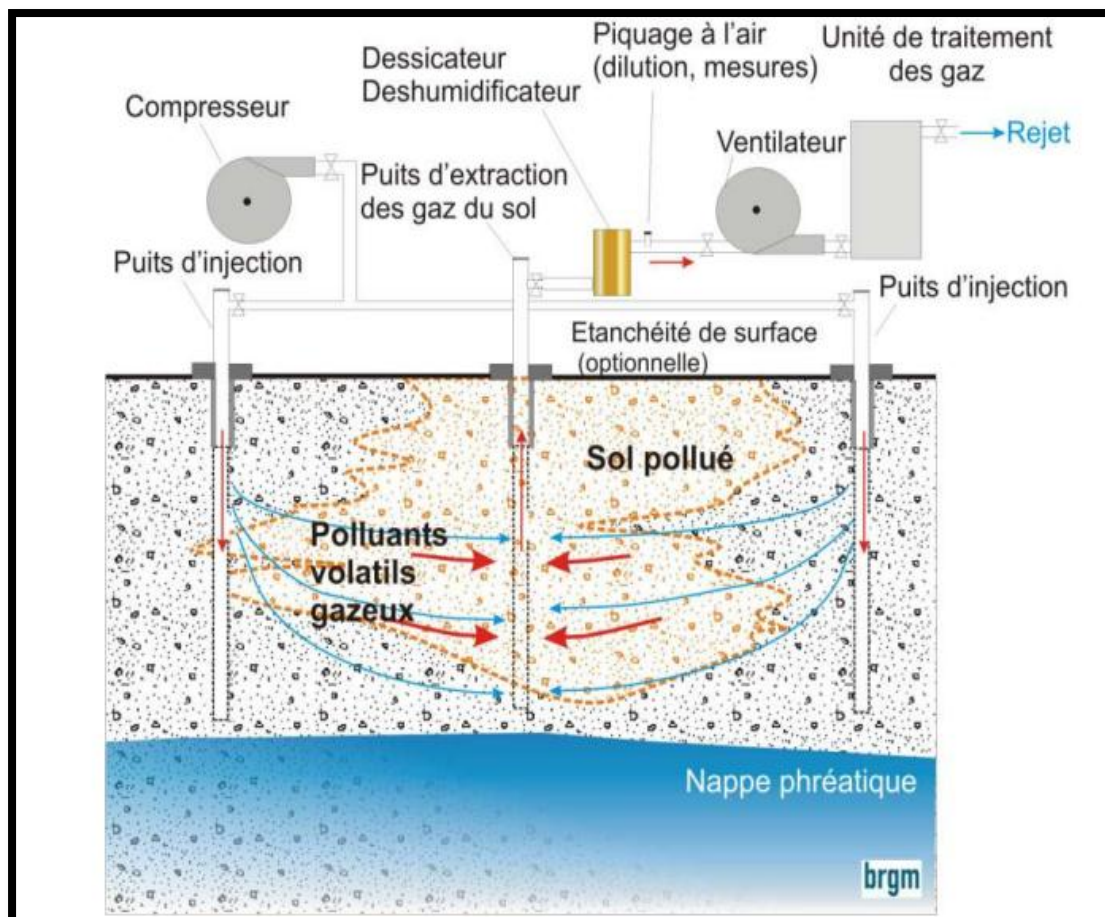


Figure 2-9: Schéma de principe du venting (Colombano S et al. 2010).

- Les inconvénients :
 - l'hétérogénéité des sols de subsurface peut interférer sur l'homogénéité de la distribution de la circulation d'air et donc sur l'efficacité du traitement,
 - la faible perméabilité des sols constitue un facteur limitant ($<10^{-5}$ m/s),
 - le maillage des puits d'extraction doit être très serré en cas de perméabilité plus faible,
 - la présence du toit de la nappe proche de la zone à traiter est pénalisante (<1 m)

□ Procédé de soutien hydrochoc :

Le principe de cette technique est la mobilisation dynamique des substances volatiles contenues dans l'aquifère saturé, par introduction d'énergie cinétique dans l'aquifère. Pour cela, on injecte dans un forage conçu à cet effet des ondes élastiques qui se propagent à des vitesses variées, ou bien sont absorbées. Ceci va ouvrir de nouvelles voies de transfert aux polluants, par suite de la réorganisation des grains constituant la matrice de l'aquifère. La source d'énergie peut être un compresseur à air. Ce procédé peut venir en appui à la dépollution hydraulique, ou à la technique de la dépollution par stripping in situ.

□ Procédé de soutien géochoc :

Ce procédé consiste à produire des ondes élastiques dans la zone non saturée, à partir d'un dispositif placé à la surface du sol. Comme dans le cas précédent, ceci provoque un nouvel arrangement des grains et peut faciliter la libération du polluant de la phase moins mobile, et son passage en phase gazeuse. Ce procédé est couplé au procédé de ventilation du sol.

□ Méthode UVB (dépression vaporisation dans un forage) :

La technique UVB (Unterdruck-Verdampfer-Brunnen) inventée en Allemagne par B. Bernhardt, a été initialement mise au point pour dépolluer l'eau souterraine polluée par des hydrocarbures chlorés. Elle a aussi été utilisée en Allemagne pour éliminer des pesticides dans l'eau souterraine.

La technique consiste à mettre en place un forage de gros diamètre, tubé et crépiné, d'une part au-dessus du plancher de l'aquifère, d'autre part au niveau du toit de la nappe. L'eau est aspirée à travers la crépine inférieure et remontée dans forage par air lift ou à l'aide d'une pompe. Elle rencontre l'air pur injecté dans le forage, dans

la zone de stripping, où elle débarrassée des polluants volatils. L'eau dépolluée est rejetée dans la nappe par la crépine supérieure.

Par application d'une dépression en tête du puits, l'air chargé en polluant, et l'air pollué provenant de la zone non saturée, sont aspirés vers une unité de traitement par adsorption sur charbon actif. Le circuit d'écoulement induit autour du puits dépend de l'écoulement naturel de la nappe, du débit d'eau à travers le puits, de l'épaisseur de l'aquifère, des longueurs des crépines, du diamètre du puits et des perméabilités horizontale et verticale de l'aquifère.

Pour plus de détail, on peut se référer au tableau II.1 en annexe A, qui donne une comparaison des techniques de dépollution par circulation d'air et au tableau II.2 donne un aperçu des coûts pour un foyer de pollution standard.

A.3. Méthodes de dépollution par voie biologique:

Au voisinage de la nappe, les conditions physico-chimiques sont relativement constantes. La température moyenne est de l'ordre de 10°C. Dans les espaces poreux de la matrice, des conditions de vie favorables aux micro-organismes peuvent se développer. Dans les sols, on trouve 10^7 à 10^8 cellules par gramme de sol, et 10^4 cellules par millilitre dans les eaux souterraines non polluées, 10^6 cellules/ml dans les eaux fortement polluées. Ces micro-organismes ont besoin de nutriments et d'énergie. Une cellule utilisant 50% de nutriment a besoin de $3 \cdot 10^{-13}$ g de carbone pour se doubler ; avec 3 mg/l de carbone, il peut donc se former 10^7 cellules dans cet espace. On a estimé qu'il fallait $1,2 \cdot 10^{-5}$ et $3 \cdot 10^{-5}$ g de carbone par milligramme de biomasse, par heure.

Les micro-organismes comprennent les bactéries, les champignons et les levures. Il existe dans les sols et dans les eaux des bactéries et des fongicides capable de dégrader les hydrocarbures. Les bactéries prédominantes sont Pseudomonas, Bacillus, Arthrobacter, Flovorbactérium, Micrococcus. Les fongicides principaux sont Trichoderma, Penicillium, Asperigillus.

Les indications sur la distribution des micro-organismes dans les eaux et les sols, les caractéristiques principales des milieux sols et eaux comme espaces de vie pour les micro-organismes sont synthétisées dans les tableaux II.3 et II.4 en annexe B.

□ *Dépollution de la zone non saturée :*

Cette technique a été testée dans des zones pilotes. Elle est basée sur les opérations suivantes :

- i. infiltration et répartition d'une culture adaptée de micro-organismes, et d'une suspension de nutriments dans la zone polluée. Pour cela des micro-organismes présents dans le foyer de pollution sont isolés puis enrichis en laboratoire dans les conditions du milieu.

- ii. Fourniture aux micro-organismes de l'oxygène nécessaire à la dégradation, par aération du sol. L'introduction des micro-organismes et des nutriments est réalisée par des puits d'infiltration reliés entre eux. L'air est introduit également par un puits d'infiltration.
- iii. Lors de l'opération il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas propagation de la pollution. Pour cela des quantités faibles de liquides seront introduites de façon à éviter des percolations en direction de la nappe d'eau souterraine. Le bilan d'eau dans la zone non saturée devra être contrôlé en permanence.
- iv. La fuite de l'air et des composés volatils sera évitée en couvrant la surface du sol.
- v. Le foyer de pollution devra être traité en directions verticale et horizontale, et de la périphérie vers le centre.

L'inconvénient principal de cette technique est que le transport des différents agents d'intervention au cœur de la pollution reste problématique.

L'oxygène est injecté par des lances dont le rayon d'action est faible, ce qui nécessite un réseau dense de points d'infiltration. La propagation des composants peut être difficile et peut entraîner un colmatage des pores. Enfin, les conditions du milieu évoquées antérieurement doivent être réunies pour que la dégradation soit optimale.

La dépollution biologique a été récemment combinée à la ventilation du sol pour former la technique dite du *bioventing* ou *bioventilation*. Cette technique permet d'éliminer les composants volatils tout en utilisant l'oxygène de l'air injecté pour contribuer à la biodégradation des polluants restants. Les éléments du dispositif de *bioventing* sont les mêmes que ceux d'un système de ventilation et de biodégradation (injection d'air et nutriments).

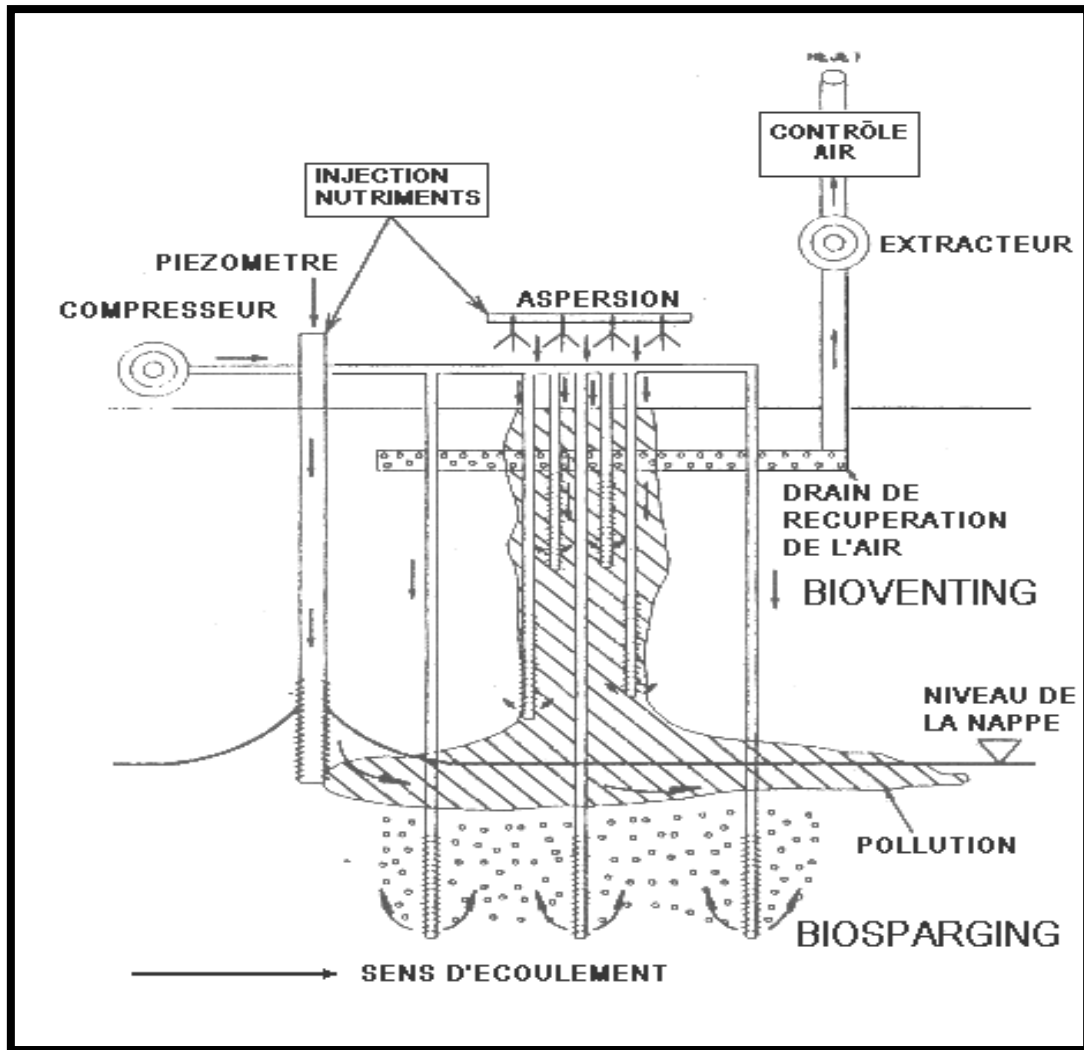


Figure 2-10: Décontamination in situ par biodégradation et ventilation (Lecomte P., 1998).

□ Dépollution de la zone saturée :

La mise en œuvre du procédé demande des conditions géologiques, hydrogéologiques, biologiques et physico-chimiques favorables. Le principe général consiste à implanter un seul puits ou une rangée de puits d'injection dans le foyer de pollution, et un puits de pompage en aval du foyer de pollution, pour pomper l'eau polluée, soumise aux différents éléments participant au traitement par dégradation du polluant. A la surface du sol, des analyses de l'eau pompée permettent de contrôler la concentration du polluant, la densité des micro-organismes, la teneur en oxygène et nutriments.

• Les avantages de la dépollution biologique in situ :

- Peut être utilisée pour traiter les sols et les eaux pollués par les hydrocarbures et d'autres composés chimiques plus particulièrement les polluants solubles dans l'eau et

des polluants présents à de faibles concentrations difficiles à éliminer par d'autres méthodes.

- Cette technique ne génère pas de déchets si elle est appliquée aux hydrocarbures.
- L'utilisation de la flore microbienne existante évite l'introduction d'organismes potentiellement toxiques.

- Les inconvénients de la dépollution biologique in situ :

La méthode présente un certain nombre de limites liées au type de polluant, à la répartition du polluant et aux conditions hydrogéologiques.

- La biodégradabilité du polluant doit être étudiée par des études en laboratoire et dans les conditions du milieu. Ces études peuvent être longues et coûteuses.
- La répartition du polluant nécessite une dégradation sur de grandes surfaces.
- Parmi les conditions hydrogéologiques, une condition importante est la possibilité du transfert des nutriments par l'eau. Cette condition n'est plus remplie pour les perméabilités inférieures à 10^{-4} m/s. il faudrait pouvoir s'assurer que les nutriments se répartissent rapidement dans toutes les zones polluées.
- Lors de la dégradation, il peut se former des produits plus solubles dans l'eau que le produit initial, qui peuvent être transportés à plus grande profondeur (Lallemand B A, 1995).

A.4. Méthodes de traitement en surface:

Les techniques de traitement en surface de l'eau polluée récupérée par pompage, ou dans des drains ou des tranchées font appel à des méthodes physiques, physico-chimiques, biochimiques ou chimiques. Elles sont fonction du type de polluant à éliminer. Le tableau 2.1 suivant résume l'aptitude des traitements aux catégories de polluants.

Tableau 2-1: Méthodes de traitement de l'eau en fonction du type de polluant (Lallemand B A., 1995).

Polluant	Organique volatil	Organique non volatil	Inorganique
Traitement			
Air stripping	Convient en générale	Ne convient pas	Ne convient pas
Adsorption sur charbon actif	Adéquat pour élimination mais décroisse. Rapide	Technique d'élimination efficace	Ne convient pas
Oxydation/réduction	convient	convient	convient
Biologique	Technique d'élimination efficace	Technique efficace	Peut convenir dans certains cas
Ajustement PH précipitation	Non applicable	Non applicable	Technique d'élimination efficace
Procédés par membranes	Peut ne pas convenir	Technique efficace	Technique d'élimination efficace
Electrodialyse	Non applicable	Non applicable	efficace
Echange d'ions	Non applicable	Peut être applicable opération difficile	applicable

□ Oxydation :

L'utilisation du processus d'oxydation pour détruire les polluants de l'eau existe depuis plus de cent ans. Le processus d'oxydoréduction implique le gain ou la perte d'électrons pour les produits concernés. L'échange d'électrons détruit les composés organiques en rompant les liaisons carbonées et en créant de nouveaux composés plus petits (Lallemand B A., 1995).

L'injection dans l'aquifère d'oxydants comme O_3 , H_2O_2 , ClO_2 permet d'oxyder les polluants organiques récalcitrants (figure 2.11). L'injection d'un réducteur comme le Fer réduit en particulier le Chrome en Chrome trivalent moins toxique [38].

• Les avantages :

- Ne laisse aucun résidu,
- Coûts d'exploitation et d'entretien peu élevés,
- procédé destructif,
- possibilité de traiter des débits importants,
- rendements épuratoires très élevés (en général plus de 98%).

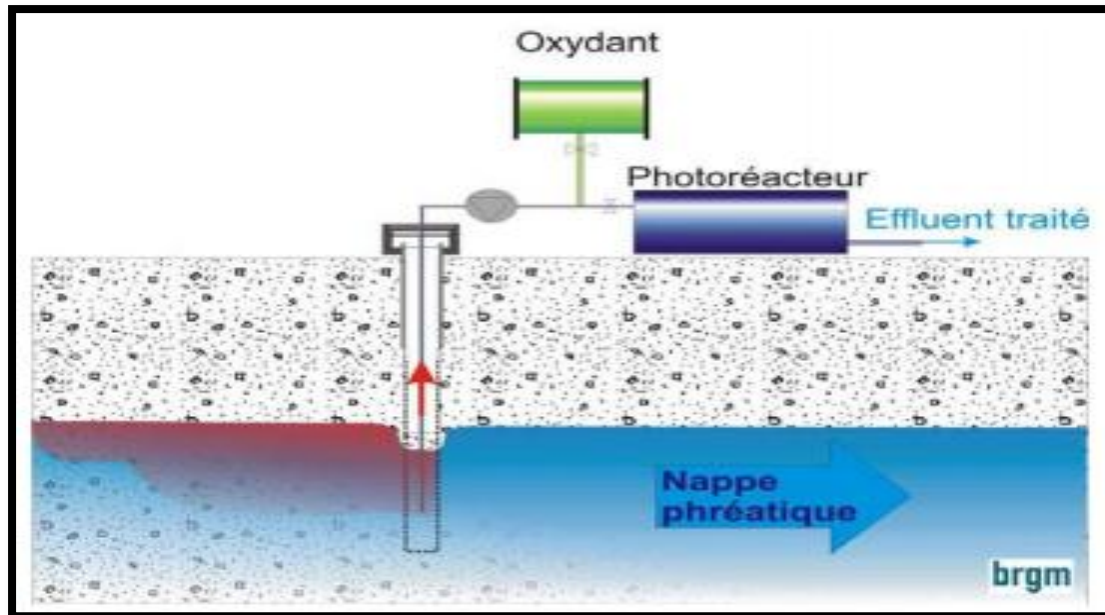


Figure 2-11: Schéma de principe de la photo-oxydation sous ultraviolets (Colombano S et al. 2010)

- Les inconvénients :

- les surfaces de traitement nécessaires peuvent être importantes (les temps de séjour hydraulique nécessaires sont parfois de 40 minutes),
- le procédé nécessite un personnel hautement qualifié,
- la présence de précipités de manganèse ou et de fer diminue aussi la performance de la technologie,
- la présence d'hydrocarbures en phase pure (graisse ...) diminue les rendements épuratoires,
- Les composés inorganiques et la matière organique du sol (d'origine naturelle) risquent de nuire au rendement du système,
- Coût élevé des investissements [31], (Colombano S et al. 2010).

- Adsorption sur charbon actif :

Cette technique, commercialisée depuis de longues années, est basée sur l'adsorption des polluants organiques sur un matériau positionné dans un container. L'adsorption au carbone est un processus qui consiste à pomper l'eau souterraine contaminée à travers une série de cellules de charbon actif (figure 2.12). Le charbon actif adsorbe les contaminants organiques dissous dans l'eau souterraine.

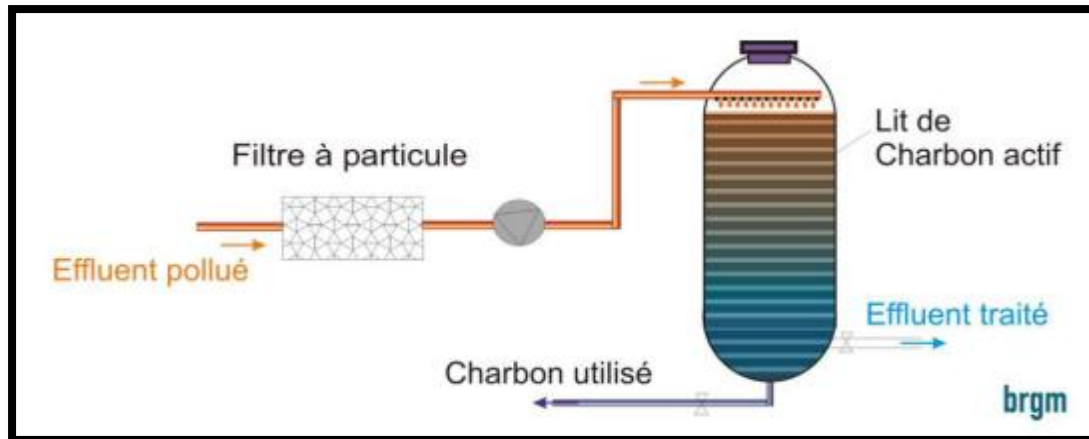


Figure 2-12: Schéma de principe du filtre à charbon actif (Colombano S et al. 2010).

- Les avantages :
 - Peut constituer une solution permanente.
 - Coût peu élevé des investissements.
 - Fort degré d'acceptation par les législateurs et par le public.
- Les inconvénients :
 - Le charbon actif nécessite une régénération ou une évacuation périodique.
 - Certains métaux pourraient obstruer les cellules de charbon actif.
 - Coûts d'exploitation et d'entretien élevés.
 - Parce qu'elle s'avère trop coûteuse pour traiter de fortes concentrations de contaminants, cette technologie est souvent utilisée à la suite d'une première opération de réduction des contaminants (stripping à l'air) [31].

□ Procédés par membranes :

Le procédé consiste en la séparation par diffusion à travers une membrane non poreuse, sélective du point de vue de la perméabilité à différents produits (figure 2.13). La diffusion à travers la membrane est obtenue avec un faible gradient de pression. La membrane est imperméable aux hydrocarbures, que l'on peut séparer de cette façon (Lallemand B A., 1995). Ces techniques, éprouvées dans le domaine de la potabilisation des eaux, sont en train de faire une apparition timide, limitée par leur coût, dans le domaine du traitement des eaux souterraines issues des sites et sols pollués.

Le principe de ces techniques est d'exercer une pression sur les eaux souillées afin que celles-ci traversent une membrane, les polluants présents en phase dissoute étant partiellement retenus (les composés de

faibles poids moléculaires traversent les membranes alors que ceux de poids moléculaires plus élevés sont retenus.

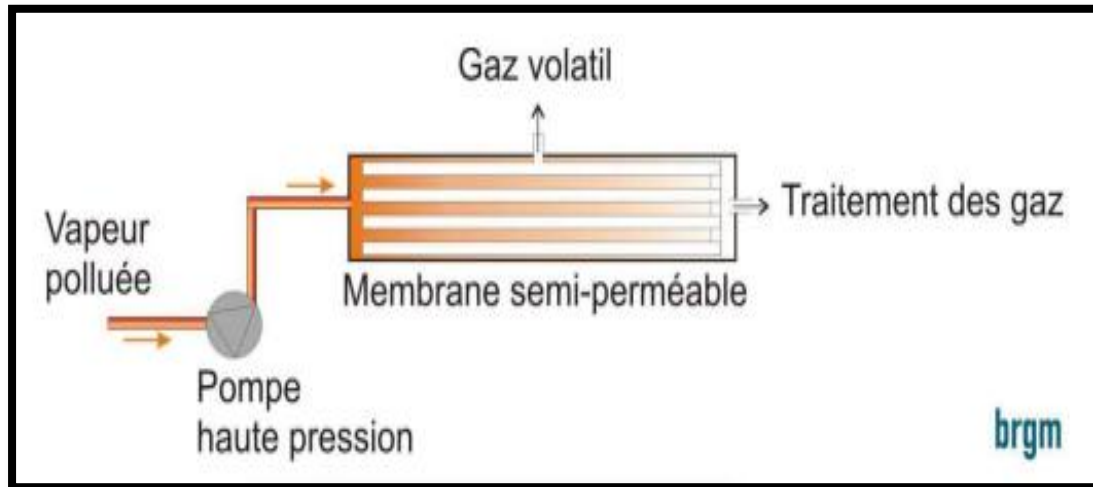


Figure 0-13: Schéma de principe de la séparation par membrane (Colombano S et al. 2010).

Ces procédés membranaires sont surtout efficaces pour traiter les hydrocarbures volatils et semi-volatils présents sous forme dissoute à de faibles concentrations (de préférence inférieures à 5 000 $\mu\text{g/l}$). D'une manière générale, l'ultrafiltration convient mieux pour les composés de poids moléculaires supérieurs à 1 000 g/mole, tandis que l'osmose inverse convient mieux pour des composés de plus de 200 g/mole.

- Les avantages :
 - les membranes permettent d'éliminer un large panel de contaminants organiques et inorganiques,
 - ce procédé est utilisé en traitement de finition, cette technique présente des rendements épuratoires élevés et des concentrations en sortie de traitement faibles.
- Les inconvénients :
 - cette technique nécessite un prétraitement,
 - les coûts d'investissement et de fonctionnement sont relativement élevés,
 - les fluctuations des concentrations en amont peuvent altérer les rendements épuratoires,
 - des prétraitements sont souvent nécessaires afin d'éviter l'encrassement et les pertes de charges ce qui augmente la consommation énergétique. Les prétraitements consistent à éliminer les matières biologiques, à réduire la dureté, à éliminer le fer et le manganèse et/ou à éliminer les huiles et les graisses (Colombano S et al. 2010).

□ Extraction triple phase « Slurping » :

L'extraction triple phase (ETP) ou *slurping* consiste à traiter simultanément les gaz du sol, le polluant en phase libre dans la frange capillaire et l'eau de la nappe. Cette technique est aujourd'hui couramment utilisée.

Le système de traitement est composé d'un puits de rabattement ou aiguille d'extraction et d'un tube rigide ou « canne » placé à l'intérieur de l'aiguille. Deux types sont à distinguer (figure 2.14): l'ETP en réseau unitaire et l'ETP en réseaux séparés [25]:

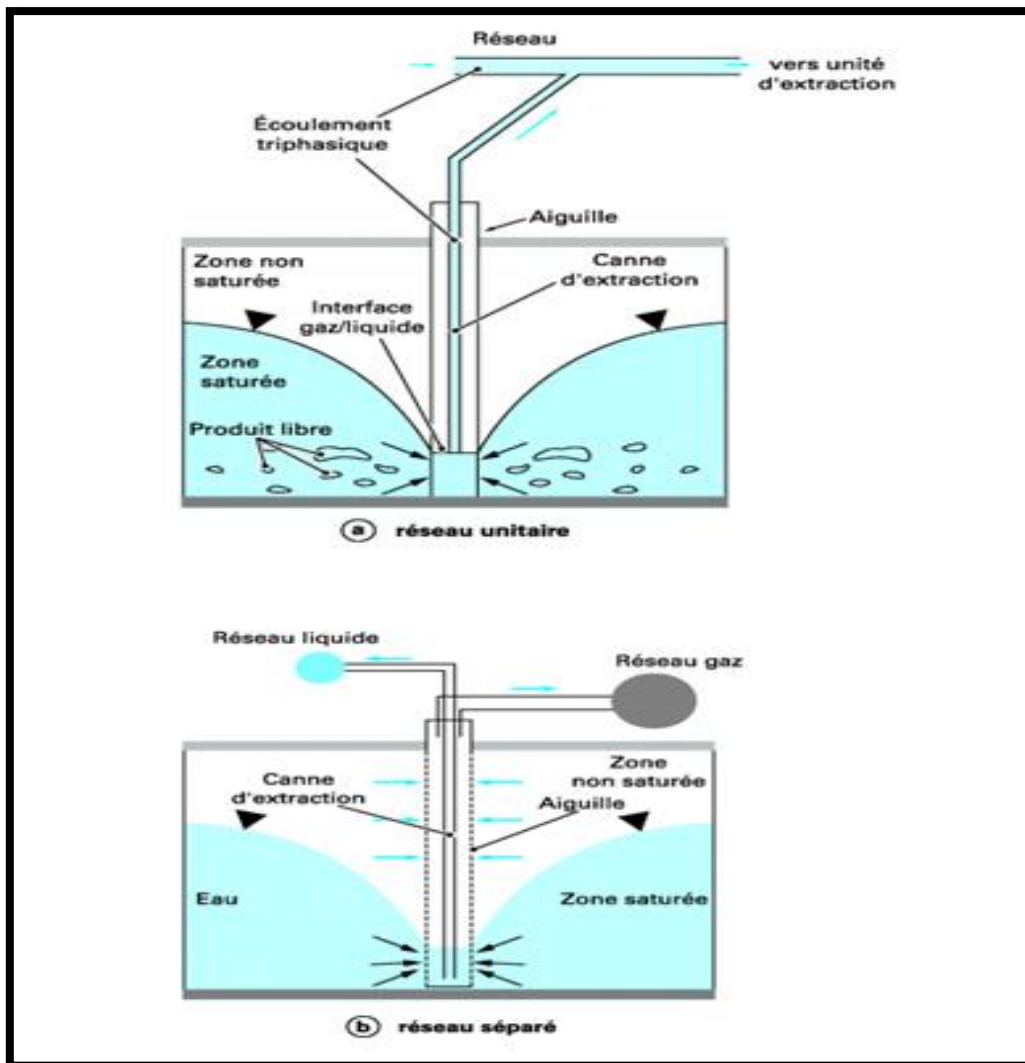


Figure 2-14: les types d'extraction triple phase [25].

□ Échange d'ions :

La méthode MRM (Metal Removal Media), mise au point par Hamon et al, (1990) pour purifier les eaux usées industrielles riches en métaux lourds, est basée sur l'échange d'ions (Lallemand B A., 1995).

Le traitement sur résines échangeuses d'ions consiste à substituer les polluants sous forme cationique ou anionique présents dans les eaux souterraines par des cations et des anions « inoffensifs » de la résine. Les échangeurs (figure 2.15) d'ions se présentent sous forme de substances granulaires insolubles qui comportent des radicaux acides ou basiques susceptibles de permuter, sans altération ou solubilisation, les cations ou anions fixés sur ces radicaux contre des ions de même signe se trouvant dans les eaux en contact. Les résines cationiques éliminent donc les cations et celles de type anioniques éliminent les anions.

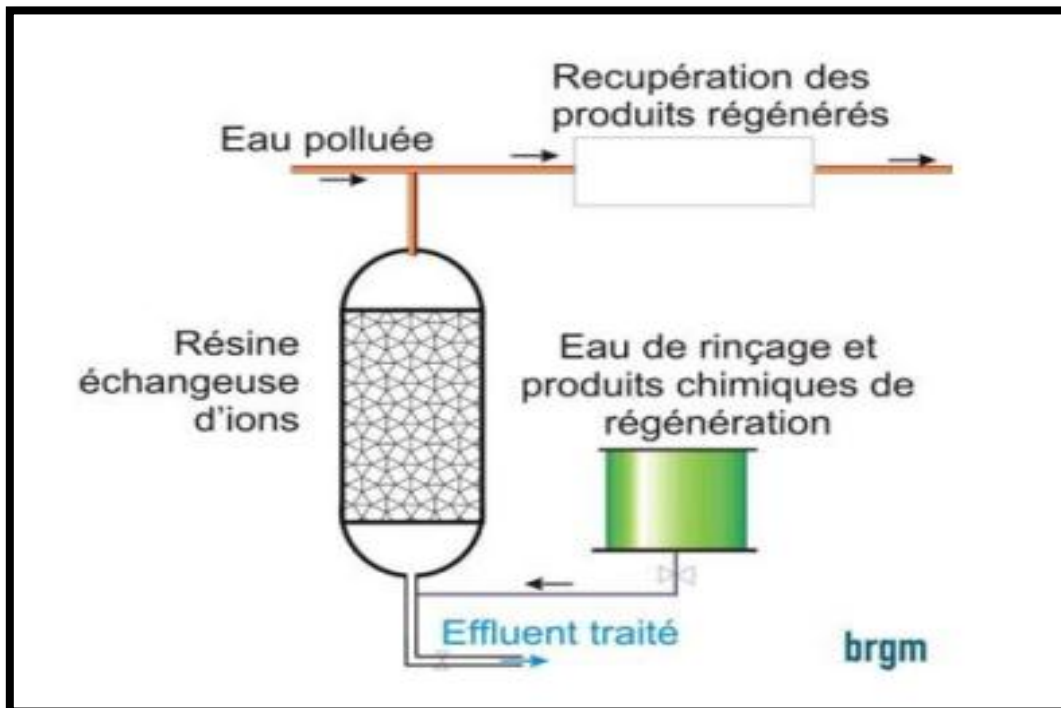
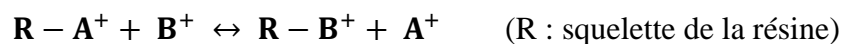


Figure 2-15: Schéma de principe d'une résine échangeuse d'ions (Colombano S et al. 2010).

Les réactions d'échange d'ions sont réversibles et sélectives :



Les métaux solubles, les halogénures, les sulfates, les nitrates et les cyanures sont les anions les plus communément enlevés. Dans une moindre mesure, le procédé est utilisé pour l'enlèvement de certains polluants organiques. Pour plus de détail sur les mesures des capacités d'échange de quelques métaux sur des résines se référer au tableau II.5. en annexe C.

- Les avantages :
 - temps de réaction rapides,
 - la technique peut s'attaquer à un large spectre de polluants,

- les rendements épuratoires sont élevés (parfois plus de 90 %).
- Les inconvénients :
 - il est souvent nécessaire de disposer de plusieurs types de résines pour enlever différents types de cations et anions,
 - la présence d'huiles, de graisses, de MES et de précipités de Fe et de Mn est non compatible avec le procédé, ce qui nécessite un prétraitement,
 - le pH des eaux affecte le traitement des eaux,
 - certains types d'oxydants présents dans les eaux souterraines nuisent au bon fonctionnement du procédé (Colombano S et al. 2010).

□ Ajustement du pH – précipitation:

L'ajustement de pH a pour objectif d'une part de ramener le pH de l'eau souterraine à un pH neutre, et d'autre part de faire précipiter les métaux lourds. Cet ajustement peut se faire soit par passage de l'eau acide dans un lit de calcaire, mélange avec des boues de chaux, ou ajout de soude et de carbonate de sodium. Pour une eau alcaline, l'ajustement se fait par barbotage de CO_2 dans l'eau ou ajout d'un acide fort HCl, H_2SO_4 .

Il faut noter que les méthodes de dépollution de la nappe utilisant l'air pour éliminer les polluants organiques volatils, telles que stripping, sparging, libèrent le CO_2 , donc il faut légèrement remonter le pH de l'eau souterraine.

Le temps de contact nécessaire pour rétablir la neutralité est variable suivant les eaux. Ce contact se fait dans un réservoir où l'eau est mélangée au réactif. Pour faire précipiter les métaux, il faut porter le pH à une valeur supérieure à 7. Les métaux peuvent aussi être précipités sous formes de sulfures. Tous les métaux ne précipitent pas à un pH élevé, c'est le cas des métaux chélatés, du Cr hexavalent, de l'arsenic. Ces composés nécessitent l'addition d'un produit chimique pour être précipités. Le Cr est réduit par SO_2 ou un sulfate de fer, ensuite le pH est élevé pour précipiter le chrome trivalent. La meilleure manière d'éliminer l'arsenic est d'ajouter du fer à un pH compris entre 5 et 6 puis d'élever le pH à 8 ou 9 avec de la chaux (Lallemand B A., 1995).

□ Electrodialyse :

L'électrodialyse est l'échange d'ions à travers une membrane. Les ions attirés par la charge électrique de signe opposé, traversent la

membrane est ainsi éliminée de l'eau. L'avantage de cette méthode est que le système peut fonctionner en continu sans qu'il soit nécessaire de régénérer le matériau. L'inconvénient est que l'eau doit supporter un courant électrique ; plus l'eau est propre, plus la résistance au courant est grande, ce qui augmente le coût de l'opération (Lallemand B A., 1995).

□ Bioréacteurs (procédés intensifs) :

Le principe repose sur la mise en contact des eaux polluées avec des microorganismes au sein de réacteurs afin d'assurer leur dépollution.

Les techniques de traitement biologique on site (ou bioréacteurs) sont des techniques éprouvées et approuvées et sont principalement issues du traitement des eaux usées (Colombano S et al. 2010).

On distingue deux types de bioréacteurs, parfois utilisés en ensemble:

- i. Les procédés à cultures libres (boues activées, figure 2.16 et figure 2.17), comportent une phase de mise en contact des eaux souterraines avec un floc bactérien généralement en milieu aérobie (apport d'oxygène) ; cette phase est généralement suivie par une phase de séparation des floccs (clarification).

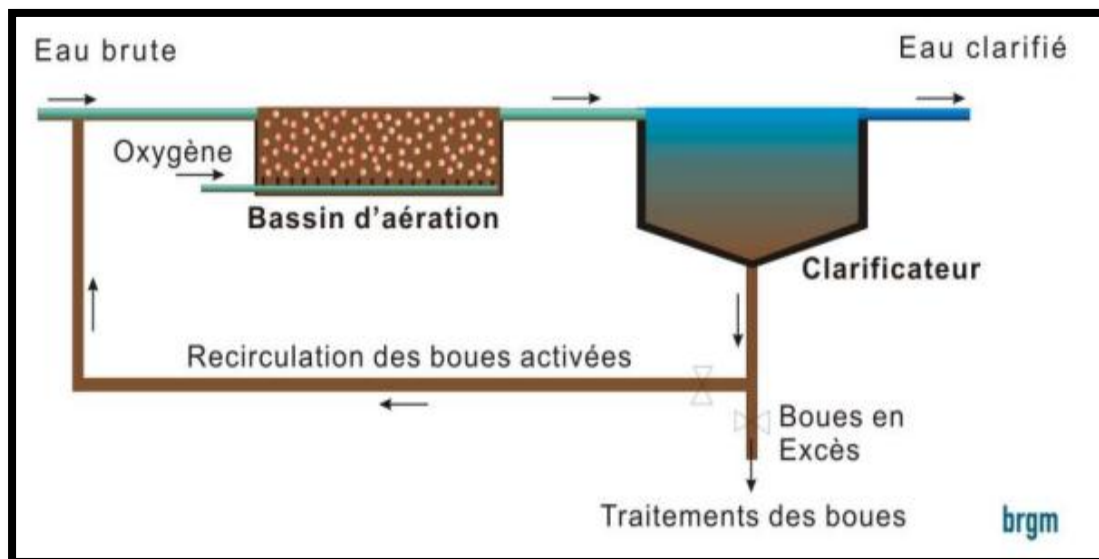


Figure 2-16: Schéma de principe de boues activées (Colombano S et al. 2010).

- ii. Les procédés à cultures fixées (lits bactériens ou disques biologiques, figure 2.18) mettent en jeu les microorganismes fixés sur un matériau inerte poreux très perméable et à grande surface spécifique. Tout comme pour le procédé de traitement par boues activées, les boues en

excès sont décantées et/ou filtrées et partiellement recerclées (Colombano S et *al.* 2010).

Les bioréacteurs sont principalement utilisés pour l'élimination des composés de faible poids moléculaire, très solubles (par exemple des composés aromatiques), à une concentration en carbone organique total (COT) de moins de 5 000 mg/l.

- Les avantages :
 - procédé éprouvé et fiable,
 - contrôle et gestion de la biodégradation plus simples que pour les procédés in situ ; systèmes de contrôle de pH, de température, de teneurs en nutriments simples à mettre en place et à contrôler,
 - mélange aisé entre les eaux souterraines et les microorganismes d'une part, et les nutriments d'autre part,
 - les conditions optimales de biodégradation peuvent être rapidement atteintes, ce qui augmente les taux de biodégradation et permet aussi de réajuster si nécessaire les temps de réaction,
 - il est plus aisé de déterminer le type de microorganismes le mieux adapté pour le traitement en fonction des polluants et du matériel,
 - rendements épuratoires importants (plus de 90 % parfois) (Colombano S et *al.* 2010).

- Les inconvénients :
 - procédé sensible aux fluctuations des concentrations en contaminants en amont,
 - ce procédé s'applique uniquement aux composés biodégradables en milieu aérobie (il existe une possibilité de traiter les composés plus « récalcitrants » en anaérobie),
 - il peut être nécessaire de traiter ou d'éliminer les boues,
 - les MES ou la formation de précipités de fer et de manganèse peuvent colmater l'unité de traitement, ce qui nécessite éventuellement un prétraitement,
 - dans le procédé à boues activées, des contaminants volatils peuvent s'échapper dans l'atmosphère durant le brassage ; le cas échéant, les émissions gazeuses devront être traitées ou recueillies,
 - à faible température, la biodégradation ralentit, ce qui prolonge la durée du traitement. Le cas échéant, il faudra

chauffer les eaux, ce qui augmente considérablement les coûts de traitement,

- les eaux traitées peuvent nécessiter un traitement complémentaire.

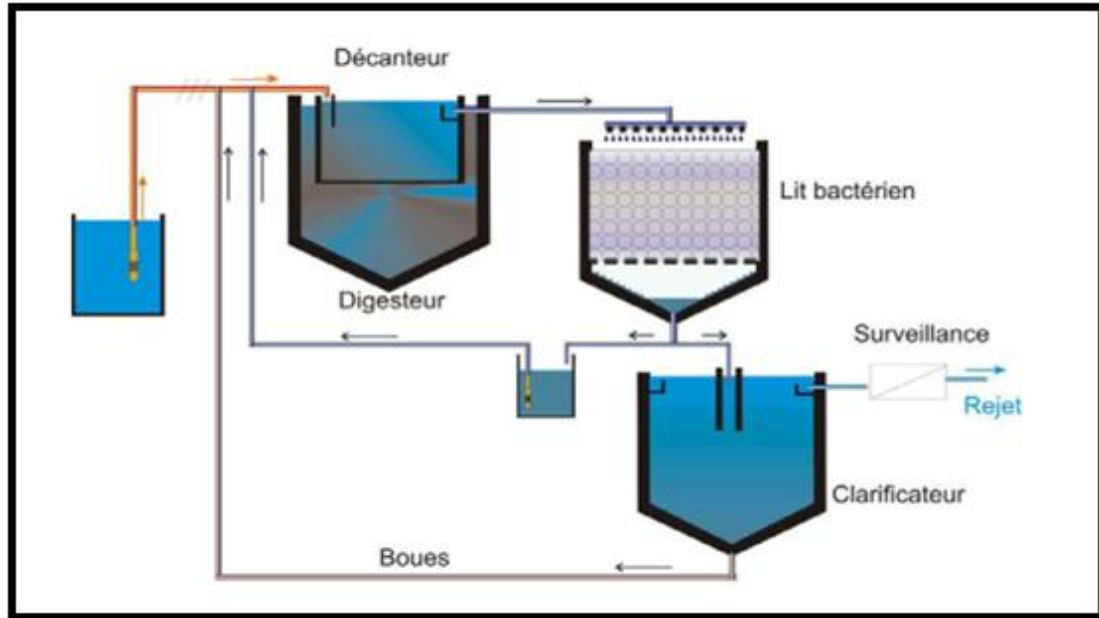


Figure 2-17: Schéma de principe des lits bactériens (Colombano S et al. 2010).

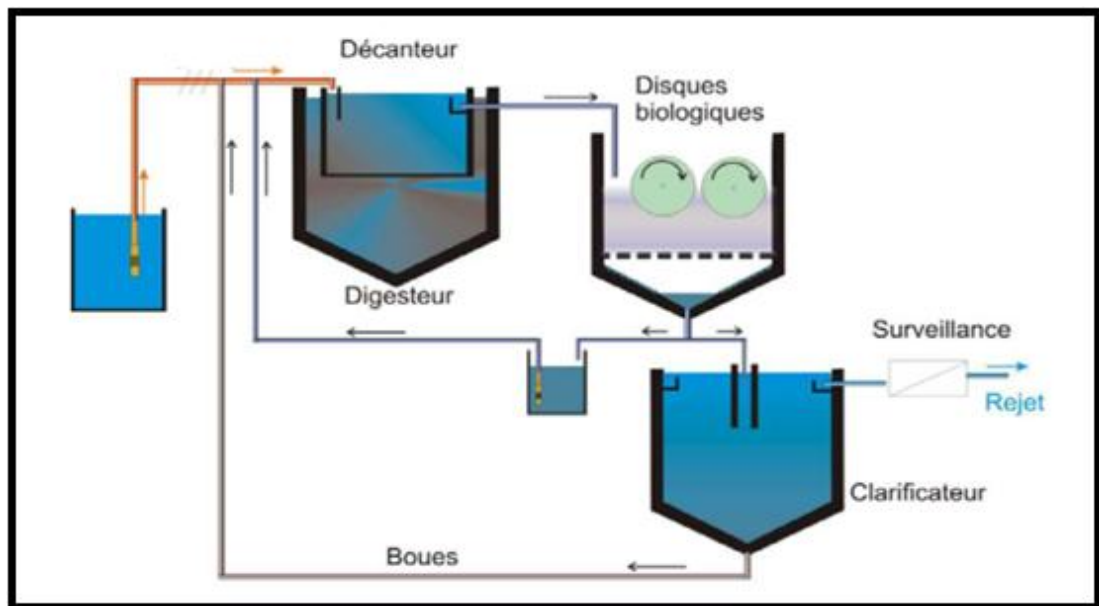


Figure 2-18: Schéma de principe des disques biologiques (Colombano S et al. 2010).

□ Bioréacteurs (procédés extensifs):

En dehors des techniques de traitement intensives précédentes, il existe également des techniques de traitement extensives, comme par exemple le lagunage. Cette technique repose sur une dégradation

naturelle des polluants par passages successifs dans différents bassins avec très peu d'intervention humaine, mécanique et chimique. Cette technique est largement utilisée dans le domaine du traitement des effluents domestiques usés mais, faute de place, est moins utilisée dans le domaine des sites et sols pollués.

Cette technique (figure 2.19) consiste à faire transiter les eaux contaminées dans plusieurs étangs de faibles profondeurs pendant une longue période durant laquelle les processus de dégradation naturels se mettent en place via l'action des microorganismes, des végétaux (microphytes et macrophytes), du vent et du soleil. Le processus est généralement aérobie ; l'apport d'oxygène est réalisé par échange avec l'atmosphère, par l'action chlorophyllienne des végétaux ou parfois artificiellement (aérateurs mécaniques flottants ou fixes, insufflation d'air) (Colombano S *et al.* 2010).

Le procédé s'accompagne aussi d'une décantation des MES.

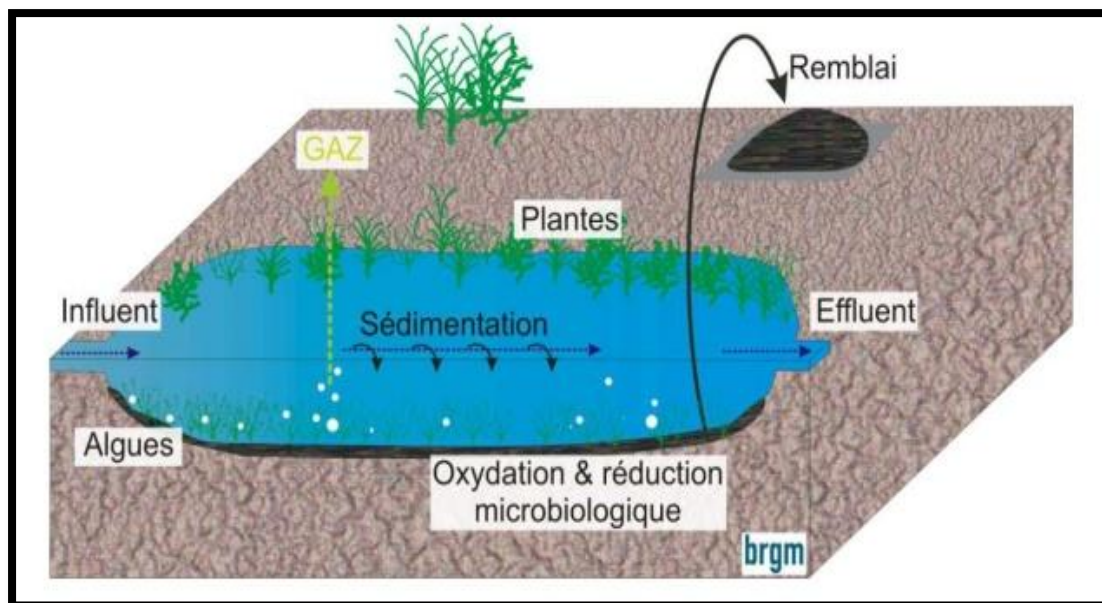


Figure 2-19: Schéma de principe du lagunage (Colombano S *et al.* 2010).

Les lagunages sont principalement utilisés pour le traitement des polluants organiques aisément biodégradables (faible poids moléculaire, solubles et présents à des concentrations modérées). Cette technique est aussi utilisée dans le domaine des mines afin de réaliser la précipitation (parfois biologique) de certains métaux (par oxydation).

- Avantages et inconvénients :

Les principales limites de cette technique sont des rendements épuratoires plus faibles que ceux généralement atteints dans des procédés de traitement biologiques intensifs (du fait du manque de maîtrise des conditions optimales de cet édifice biologique complexe) et

des besoins importants en surface. Le lagunage est peu onéreux (fonctionnement sans ou avec peu d'énergie) et relativement efficace pour certains composés organiques (facilement biodégradables) et inorganiques (traitement des effluents miniers acides et chargés en métaux lourds).

2.1.2. LES EAUX DE SURFACE:

L'eau douce de surface est une ressource vitale. Elle peut être utilisée par l'agriculture, l'industrie ou les particuliers. La qualité de l'eau dans le milieu naturel se dégrade de manière continue, elle peut en effet être contaminée par des éléments provenant de rejets qui y sont déversés ou de polluants provenant de l'air ou des sols. Cette ressource précieuse est mal protégée et la pollution de l'eau est responsable non seulement d'aggravation de maladies ou d'épidémies mais elle est aussi soupçonnée d'être impliquée dans la diminution de la fertilité. Comment peut-on agir pour limiter la pollution de cette l'eau ? [41].

Le traitement d'une eau contaminée est très coûteux, même impossible dans certains situations. A cet effet, la prévention est le moyen de lutte le plus efficace contre la pollution des eaux de surface.

2.1.2.1. LA PREVENTION DES EAUX DE SURFACE CONTRE LA POLLUTION:

Lorsque nous jetons quelque chose à la poubelle ou que nous tirons la chasse d'eau nous avons tendance à oublier les conséquences. Nous sommes responsables de plusieurs sources de pollution de l'eau non-précise et nous ne sommes pas assez conscients de notre très grande culpabilité à la contribution de polluer cette eau. C'est très facile de pointer du doigt, entre autres, les opérations agricoles, les industries et les mines. Cependant, chacun de nous contribue à la pollution de cette denrée vitale, d'une manière ou d'une autre sans en être conscient. A cet effet nous donnons ci-après quelques conseils :

- Économiser de l'eau; moins vous utilisez de l'eau moins il y aura d'évacuations d'eau par les gouttières et les drains ce qui réduira le risque de transporter des polluants
- Dégager votre gouttière de tout détrit.
- Utiliser des pesticides avec modération; habituellement les gens ont tendance à utiliser de 10 à 50 fois plus de pesticides pour leurs pelouses et jardins que ce qu'il est nécessaire pour la santé des plantes.
- Utiliser du composte pour fertiliser votre jardin.
- Garder votre véhicule en bonne état. Si vous avez une fuite d'huile réparez la immédiatement et si vous changez votre huile débarrassez vous de l'huile utiliser correctement.
- Utiliser des produits nettoyants naturels comme du bicarbonate de soude, du vinaigre et du borax.

- Utiliser du détergent qui contient le moins de phosphate possible; les stations d'épurations peuvent enlever seulement 30% des phosphates dans les déchets. Il est évalué qu'aux États-Unis entre 90,7 millions et 226,8 millions de kilogrammes de phosphate sont déversés dans les voies navigables chaque année.

A. Moyens de prévention contre la pollution des eaux de surface :

La prévention ou la réduction de la pollution doivent s'appuyer sur des moyens juridiques et sur un système régressif ; la législation destinée à prévenir et à réduire la pollution des eaux, dépendra des conceptions politiques admises par différents pays, mais, dans tous les cas elle devra répondre à certaines exigences (Wolfgang C., 1961), à savoir:

- Formuler une politique nationale de lutte contre la pollution des eaux qui mette en relief le caractère vital de la question,
- Définir certains termes, en particulier le terme « pollution », pour que toutes les personnes, firmes industrielles ou collectivités intéressées disposent d'un « cahier des charges ». Devront également être définies les expressions : « eaux usées », « déchets ou effluents industriels » et, d'une façon générale, les principaux termes employés dans la loi,
- Créer une agence de lutte contre la pollution des eaux,
- Fixer l'organisation et la structure de cette agence,
- Déterminer avec précision la compétence, les attributions, les pouvoirs et les tâches de l'agence,
- Prévoir, pour l'application de la loi, des procédures telles que des enquêtes publiques conduites au nom et par les soins de l'agence,
- Prévoir des sanctions en cas d'infraction et spécifier les actes qui seront considérés comme des infractions,
- Réunir un personnel qualifié pour s'occuper des problèmes techniques qui se posent pour les particuliers et pour l'industrie et donner des conseils appropriés.

A.1. Protéger les ressources d'eau potable:

□ Faire face à la dégradation chronique des ressources :

Il y a différentes méthodes et outils de diagnostic pour définir les priorités de prévention concernant les ressources d'eau. Ces outils servent à caractériser, quantifier et localiser les risques de pollution, puis à définir et à mettre en œuvre les mesures à prendre pour maîtriser ces risques, nous citons ci-après deux logiciels largement utilisés à nos jours :

- Le logiciel **Actipol** recense les activités industrielles et identifie la nature des rejets associés à chaque activité. Il

permet la maîtrise des risques de pollutions tant chroniques qu'accidentelles ;

- Le logiciel **Cryptogia** développé par Anjou Recherche évalue les risques de contamination d'un point d'eau par les parasites *Cryptosporidium* et *Giardia* (qu'il s'agisse de pollutions chroniques ou accidentelles).

- Des actions de prévention :

Grâce à l'évaluation des risques. L'ensemble des acteurs d'un bassin versant, doivent mettre en œuvre, avec les collectivités locales, des programmes de réduction et de prévention des pollutions chroniques de la ressource. Exemple :

- Eaux usées : assainissement et réduction des rejets industriels, ainsi que des rejets des collectivités par temps sec ou temps de pluie.
- Nitrates et pesticides : opérations concertées de maîtrise des excédents de nitrates avec les agriculteurs, les organismes agricoles, les pouvoirs publics. Adaptation des méthodes culturales, formation à un meilleur usage des engrais et produits phytosanitaires, implantation de cultures intermédiaires piégeant les nitrates ou de bandes enherbées le long des rivières...

- Les avantages :

- Des risques hiérarchisés et maîtrisés : L'évaluation et la connaissance des risques permettent aux collectivités, aux pouvoirs publics de les hiérarchiser. Les mesures de protection et de prévention sont ainsi centrées sur les véritables enjeux.
- La mise en relation des principaux acteurs d'un bassin versant pour une protection optimale : Travailler ensemble avec les acteurs d'un bassin versant, – agriculteurs, industriels, organismes professionnels, collectivités et pouvoirs publics – est l'une des conditions indispensables d'une vraie protection des ressources.

- Prévenir et combattre les pollutions accidentelles :

Par nature ou à cause de l'imperfection de ses techniques, l'activité humaine est souvent responsable de dangers et de nuisances : incendies, explosions, accidents de transports, ruptures de canalisations, négligences. Autant d'événements qui peuvent être à l'origine de graves pollutions accidentelles des ressources en eau.

- Des solutions pour prévenir contre la pollution accidentelle :

Il y a quatre types de mesures pour évaluer les risques de pollutions accidentelles et mettre en place des dispositifs de sécurité :

- Prévention des risques sur les bassins versants : L'étude des risques en amont des usines ressources d'eau vise à localiser les sources potentielles de pollution et à identifier les polluants susceptibles de contaminer les ressources. Par la suite, des démarches d'information et de prévention doivent être menées en liaison avec les services de l'État (construction de bassin de rétention chez un industriel, par exemple).
- Évaluation de l'impact des rejets accidentels : Les traçages et les modélisations de transfert de pollution en rivière permettent d'estimer l'impact d'un déversement accidentel sur la qualité des eaux. Ainsi, on pourra prévoir les conséquences d'une pollution et se préparer aux mesures à prendre.
- Surveillance en continu de la qualité de l'eau : Des stations d'alerte, équipées d'analyseurs automatiques de qualité de l'eau, constituent également une protection efficace. Situées en amont, ces stations suivent en permanence les paramètres-clés de l'eau brute et alertent les exploitants en cas de pollution. Ils peuvent alors adapter leurs traitements (usage de réactifs de crise) ou même interrompre les prélèvements en rivière.
- Dispositif de sécurité : Pour être efficace, un dispositif de gestion de crise doit comprendre un système d'astreinte du personnel, un plan d'alerte formalisé (qui prévoit en particulier la mobilisation des spécialistes et l'information des acteurs pour lutter contre la pollution), une panoplie d'équipements relatifs à la sécurité de la ressource d'eau (figure 2.20). S'y ajoutent la formation du personnel et les exercices d'alerte.

- Les avantages :

- Les crises détectées dès l'origine : Grâce aux stations d'alerte en continu installées sur les rivières, les pollutions sont détectées rapidement. Ainsi, on peut réagir sans perdre de temps dès le début de la crise. Les traçages et la modélisation des scénarios permettent de

déterminer le temps disponible avant l'arrivée de la pollution.

- La riposte préparée à l'avance : Détecter une pollution ne suffit pas. Encore faut-il pouvoir y faire face en disposant de moyens adaptés. Des solutions sont préparées pour traiter différents types de pollution.



Figure 2-20: Evaluation des risques de pollutions accidentelles et mettre en place des dispositifs de sécurité (Veolia eau, 2006).

A.2. Prévenir les risques par une meilleure gestion de la ressource :

□ Réduire l'impact des eaux résiduaires :

La collecte des eaux résiduaires urbaines avait initialement pour vocation de répondre à des impératifs sanitaires (« assainissement » des villes). Cependant, la conception moderne des outils épuratoires est désormais plutôt guidée par des considérations environnementales (abattement de la pollution organique globale, diminution des flux de nutriments rejetés au milieu). D'ailleurs, la désinfection de l'effluent avant rejet n'est pas fréquente (Ghislain M., 2006).

La nécessité de réinscrire les objectifs de santé publique comme priorité de l'assainissement, en plus des enjeux environnementaux, permet de décliner des axes de recherche cohérents :

- il apparaît indispensable d'intégrer les systèmes épuratoires dans la démarche d'analyse de risque. L'approche HACCP (Hazard Analysis, Critical Control Points) doit alors intégrer les déversements des réseaux de collecte, la pollution diffuse des installations de traitement autonomes, le rejet des stations d'épuration et les sous-produits de l'assainissement (notamment les boues qui peuvent faire l'objet d'une valorisation agricole).
- la compréhension et l'analyse du risque demandent alors une meilleure connaissance des concentrations et du devenir des différents polluants au sein des filières de traitement ainsi que des voies d'exposition des populations.
- la caractérisation des dangers devrait pouvoir s'appuyer sur des indicateurs de qualité sanitaire des effluents. Il y a là un besoin de méthodes de mesures opérationnelles, intégratrices des différents risques sanitaires, qui compléteraient efficacement les analyses parfois controversées de l'écotoxicité.
- la maîtrise des risques, enfin, nécessitera sans doute l'amélioration de l'efficacité des traitements actuels à l'égard de polluants émergents ou le développement de procédés de traitement appropriés : traitement tertiaire des effluents, conditionnement complémentaire des boues. En la matière, la définition d'indicateurs de qualité sanitaire permettant d'apprécier l'efficacité globale des procédés est aussi un facteur clé (on pense, par exemple à l'évaluation des bénéfices réels d'un traitement de désinfection occasionnant la formation de sous-produits nocifs).

□ Utiliser les processus hydrogéochimiques naturels :

La nature met à notre disposition des réacteurs naturels d'autoépuration des eaux qui, lorsqu'ils sont bien identifiés, peuvent être utilisés pour remplacer en partie le traitement en usine des eaux destinées à la consommation humaine. C'est le cas des berges de rivière, qui, suivant leur nature lithologique et les conditions biogéochimiques qui y prévalent, peuvent constituer des filtres efficaces contre certaines pollutions présentes dans les eaux de surface. L'intensité des phénomènes d'élimination des polluants dépend principalement de la vitesse d'infiltration des eaux et du potentiel d'oxydoréduction du milieu, lui-même gouverné par la quantité de matière organique biodégradable disponible.

Le premier rôle connu de la filtration sur berges est son rôle dans la protection des eaux souterraines contre les pollutions

microbiologiques des eaux de surface. Son efficacité a également été démontrée pour lutter contre la présence des nitrates dans les eaux de surface lorsque l'environnement de la berge est anoxique (absence d'oxygène) ou contre la présence d'ammonium lorsque cet environnement est du type suboxique (présence d'oxygène). De même le comportement de nombreux métaux est influencé par le passage des berges. Plus récemment des études ont montré que la filtration sur berges pouvait jouer un rôle significatif dans l'élimination de certains perturbateurs endocriniens (œstrogènes) ou médicaments tels que les antibiotiques (Ghislain M., 2006).

2.1.2.2. LA DEPOLLUTION DES EAUX DE SURFACE :

Cette section décrit et présente les principales techniques de traitement des eaux de surface actuellement disponibles. La présentation de chaque technique considérée rassemble principalement les informations relatives à son efficacité, ses avantages et ses inconvénients.

A. Les moyens de dépollution des eaux de surface :

Il existe différents moyens de dépollution des eaux superficielles (que se soient des eaux usées ou des eaux du barrage ou lacs)

Parmi les moyens on distingue les plus importants :

- L'épuration par l'épandage
- Les stations d'épuration classiques des eaux usées
- Les stations de lagunage
- L'épuration par les macrophytes....etc.

A.1. L'épuration par l'épandage :

Les effluents contiennent un grand nombre de molécules qui elles même contiennent des éléments utiles pour les végétaux. C'est pourquoi une des techniques très utilisées pour éliminer des effluents, est l'épandage. Elle est appliquée principalement pour les effluents d'origine agricole, des industries agroalimentaires et pour les boues de stations d'épurations. Elle n'est plus utilisée pour épandre directement les effluents urbains.

Elle consiste à répandre sur un sol agricole des effluents contenant des éléments nutritifs pour la culture envisagée avec le souci de ne pas accumuler de matière provenant de l'effluent dans le sol. C'est le pouvoir épurateur du sol qui est alors exploité. Il faut considérer que l'épandage bien réalisé apporte un plus à l'agriculture en économisant des engrais chimiques et en améliorant les qualités des sols via l'apport de matières organiques.

□ Contraintes de mises en œuvre :

Cette technique a des contraintes de mise en œuvre très strictes pour qu'elle ne pose pas elle-même de nuisance. Elle nécessite une étude de faisabilité concernant :

- Les volumes d'effluents à épandre par unité de surface et par an, sont calculés de telle manière à ce que l'on apporte la quantité désirée de l'élément nutritif principal.
- Ces effluents ne doivent pas contenir de produits indésirables qui peuvent poser des problèmes sanitaires (microorganismes pathogènes, molécules toxiques...) ou modifier les qualités des sols.
- On ne doit pas créer de nuisances et il y a donc des contraintes de distances minimales d'habitation et de cours d'eau, de pentes pour éviter le ruissellement.
- La nature du sol doit être apte à retenir les volumes apportés (pas d'épandage en temps de pluie, sous la neige, importance du type de sol....)
- Il doit y avoir obligatoirement exportation de la matière de la parcelle (pas de «parcelle poubelle »).
- Lorsque l'épandage est autorisé, et afin de s'assurer qu'il se passe dans de bonnes conditions techniques, un «cahier d'épandage » doit être tenu à jour et qui précise tout ce qui a été fait.

□ Techniques d'épandage :

La mise en œuvre de l'épandage se fait par deux techniques :

- Epandage par postes fixes. Il s'agit d'envoyer par une pompe sur des parcelles choisies les effluents qui auront subi un tamisage car ils seront répartis par des asperseurs en postes fixes.
- Epandage par une tonne à lisier. Il s'agit ici de transporter l'effluent par tracteur tirant une citerne qui répartira l'effluent sur les parcelles choisies grâce à des asperseurs. Cette stratégie nécessite l'intervention de personnel.

A.2. Les stations d'épuration classiques:

Une des solutions permettant de limiter l'impact des pollutions de l'eau est l'installation de stations d'épuration classiques (S.T.E.P.). Les stations d'épuration classiques ont des normes de rejet à respecter pour les matières carbonées, les matières azotées et les matières phosphorées. Dans l'annexe D on donne les normes de rejet pour ces matières et on explique leur fonctionnement et les limites de leur efficacité dans les sections suivantes.

□ Principes des traitements en station d'épuration :

Il faut enlever la matière polluante de la manière la plus simple et la moins cher possible. C'est pourquoi sur des stations d'épurations on trouve des procédés biologiques et des procédés physicochimiques.

L'action de «dépolluer » signifie que l'on va retirer la ou les matières indésirables présentes dans l'eau. Celle qui est plus difficilement séparable (la pollution soluble) va subir des transformations qui permettront de l'éliminer plus facilement. Ces transformations sont donc de natures physicochimiques et/ou biologiques. Elles conduiront à la production de matières insolubles ou gazeuses car le principe de Lavoisier² est toujours respecté :

La matière polluante de l'eau est composée de matières organiques et minérales qui peuvent être sous formes solubles ou insolubles. La stratégie employée pour les retirer de l'eau est résumée sur la figure 2.21. Ces matières subissent une première série de traitements physicochimiques qui permettront de retirer de l'eau les polluants facilement éliminables. Il reste des matières solubles (et aussi colloïdales) qui n'ont pu être piégées. Elles vont subir des transformations mettant en œuvre des transformations plus complexes (microbiologiques ou physico chimiques) qui vont les transformer en gaz (qui quittera naturellement l'eau) ou en matières insolubles qui seront séparées de l'eau par décantation. La matière polluante initiale aura donc quitté l'eau.

² « Dans la nature rien ne se créait, rien ne se perd, tout se transforme ».

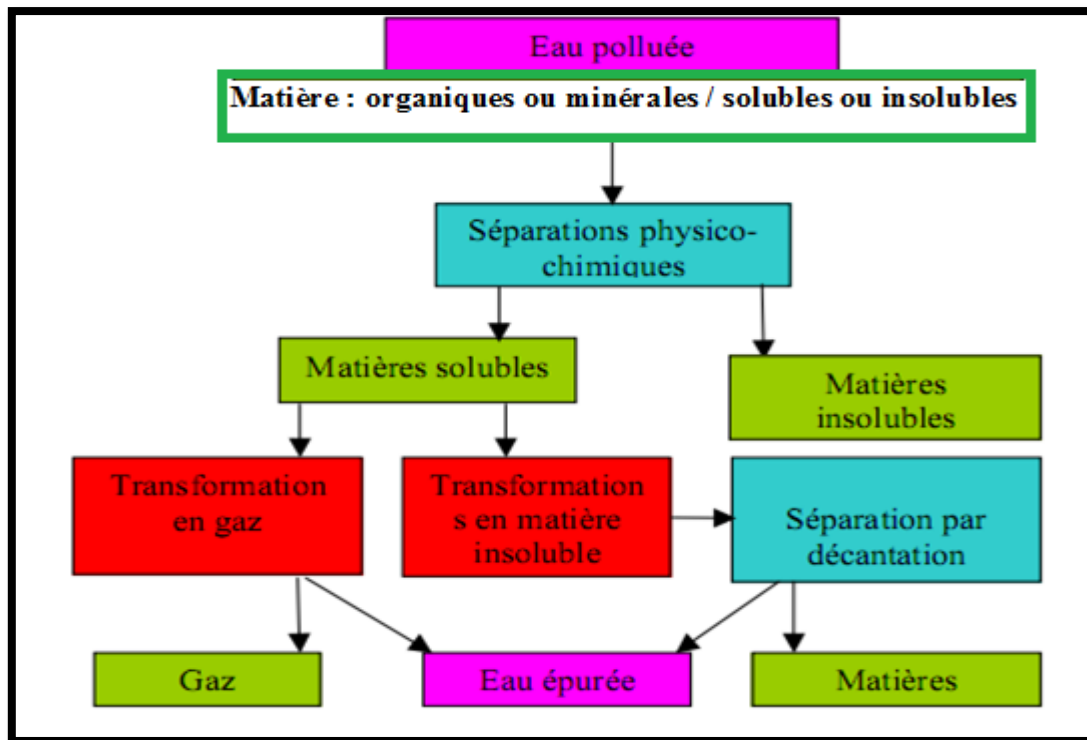


Figure 2-21: Schéma de principe des stratégies possibles utilisées pour une station d'épuration.

□ Les Procédés d'épuration :

Le traitement des eaux usées est devenu un des problèmes majeurs dans les pays en voie de développement, principalement dû à l'explosion démographique et à l'urbanisation (Seidl M. et Mouchel J., 2003).

Les projets de réutilisation concernent souvent les effluents de stations d'épuration existantes et le traitement primaire ou secondaire devra être complété par un traitement tertiaire. Les procédés d'épuration peuvent être classés en :

- Les traitements « classiques » :

Une station d'épuration comporte généralement :

- Les traitements physiques comporte (le prétraitement, la décantation primaire, la décantation secondaire).
- Les traitements biologiques par différentes méthodes (les traitements par boues activées, traitements sur lits bactériens, les biofiltres) (Baumont S).
- Nitrification pour l'oxydation de l'ammoniaque en nitrite, puis en nitrate par des bactéries nitrifiantes.
- Dénitrification consiste à dénitrifier ou dénitrater les nitrates résultants de la nitrification. Les nitrates sont réduits en diazote (N_2) qui s'échappe dans l'air.
- Déphosphatation pour enlever le phosphore [57].

Pour plus ample informations relatives aux performances des différents procédés biologiques, le lecteur peut consulter l'annexe E.

- Les traitements physico-chimiques:/**

Ils sont généralement utilisés dans les stations d'épuration de grande capacité, ou dans celles ayant à faire face à de grandes variations de charge dans l'année (zone touristique). Ils comportent classiquement deux phases :

- une phase de coagulation par des sels de fer ou d'aluminium ;
- puis une floculation des colloïdes formés.

Les traitements physico-chimiques permettent un bon abattement des virus. Cependant, leur utilisation, et notamment le dosage de sels de fer et d'aluminium, n'est pas toujours bien optimisée, sinon maîtrisée. Il y a donc un risque de surcoût lié à une mauvaise utilisation, voire un risque environnemental (Baumont S).

- Procédés extensifs :

Associés aux systèmes conventionnels de traitement secondaire, les traitements extensifs constituent d'excellents dispositifs tertiaires aptes à réduire les risques liés aux microorganismes pathogènes. Les avantages de ces techniques sont leur fiabilité, la simplicité de leur gestion et la modestie des coûts de fonctionnement. On distingue deux grandes catégories de systèmes extensifs : l'épuration par infiltration et le lagunage (Aviron V., 2000).

- Les procédés de désinfections :

A l'issue des procédés décrits précédemment, les eaux sont normalement rejetées dans le milieu naturel. Mais les eaux usées nécessitent des traitements supplémentaires, essentiellement pour éliminer les micro-organismes qui pourraient poser des problèmes sanitaires. Ce procédé comporte principalement :

- Les traitements chimique par le chlore, dioxyde de chlore, l'ozone, l'argent.
- Les traitements par ultraviolets, il s'agit d'exposée l'eau à des rayonnements ultraviolets à ondes courtes. Le rayonnement s'attaque directement aux microorganismes.

- Désinfection thermique de l'eau est également utiliser pour désinfecter les eaux usées issues des laboratoires de microbiologie et dans les secteurs dits critiques des établissements hospitaliers [56] & (A.F.D., 2011).
- Traitement par membranes pour filtrer et éliminer toutes les MES, tous les micro-organismes et toutes les substances qui s'y adsorbent. Seules subsistent les matières dissoutes (Baumont S.).

Le choix des filières de traitement pour l'épuration des eaux usées est une procédure délicate qui doit prendre en compte des aspects techniques (choix des procédés, évaluation des performances, infrastructures et équipements existants), réglementaires (normes), sociaux (spécificités culturelles, acceptabilité) et économiques (sources de financement des équipements et de l'exploitation) en vue de garantir une ressource alternative, à un coût économiquement acceptable, sans risques pour la santé publique et pour l'environnement (Aviron V., 2000).

A.3. L'épuration par le lagunage :

□ Définition de lagunage:

Le lagunage est une technique biologique d'épuration des eaux usées, où le traitement est assuré par une combinaison de procédés aérobies et anaérobies, impliquant un large éventail de micro-organismes (essentiellement des algues et des bactéries). Les mécanismes épuratoires et les micro-organismes qui y participent sont, fondamentalement, les mêmes que ceux responsables du phénomène d'autoépuration des lacs et des rivières (Tarmoul F., 2007).

□ Les organismes vivant :

Les organismes vivants qui conviennent dans la chaîne se développent ensemble sont d'autant plus abondant que l'oxygène est disponible. La plupart de ces organismes peuvent servir d'aliment aux larves et aux alevins de poisson (Ladjali M. A., 2005). Les espèces varient en quantité et en nature selon les caractéristiques du milieu : nature des effluents à traiter, charge organique, conditions climatiques, profondeur d'eau (Lebboukh A., 2003).

Parmi les organismes vivant on trouve les bactéries, les algues ou phytoplancton, les zooplanctons et les macrophytes.

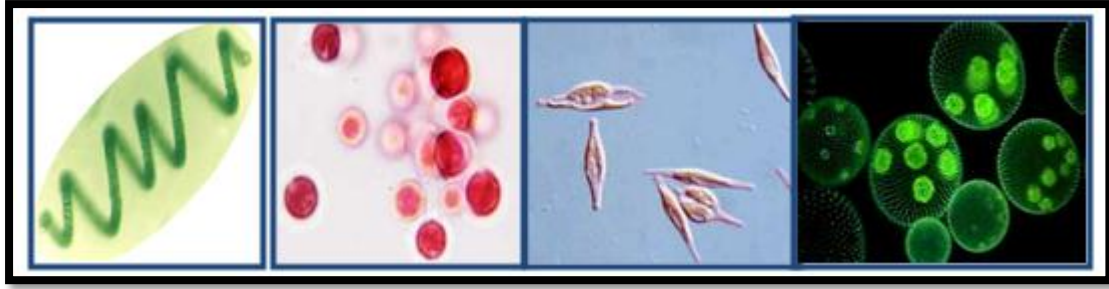


Figure 2-22: Les types des algues [43].

□ Principe d'épuration :

Le lagunage naturel est le procédé se rapprochant le plus du procédé d'autoépuration naturelle présent dans les rivières. Après prétraitements, les eaux usées transitent par une succession de 3 bassins peu profonds. En surface, l'oxygène de l'air permet le développement des microorganismes aérobies (vivant en présence d'oxygène) et la lumière favorise le développement des algues qui enrichissent également le milieu en oxygène grâce au phénomène de photosynthèse. Les matières solides les plus lourdes décantent dans le fond des bassins et sont transformées par des microorganismes anaérobies (vivant en absence d'oxygène). La microfaune et la flore qui se développent, contribuent à la dégradation de la pollution organique en favorisant la formation de boues minéralisées piégées dans le fond des ouvrages, ce qui nécessite un curage des bassins au bout d'une dizaine d'années environ.

La qualité des rejets est conditionnée par les saisons puisque l'ensoleillement impacte le développement des algues et contribue à la destruction des bactéries pathogènes [40].

□ Fonctionnement :

Le lagunage consiste en une succession des bassins peu profonds en séries (0,4 à 1,2 m) (minimum trois bassins), ce qui autorise l'étagement des phénomènes épuratoires dans lesquels l'eau s'écoule gravitairement de lagune en lagune (le plus souvent rectangulaires) où la pollution est dégradée par:

- L'activité bactérienne ;
- L'activité photosynthétique et l'assimilation des substances minérales ;
- Le pouvoir germicide de la lumière et de certaines algues (Tarmoul F., 2007).

Il peut s'avérer nécessaire d'utiliser des bassins de prétraitement (dégraisseurs, déshuileurs, déssableurs) qui sont chargés d'éliminer les particules solides et les graisses. Ces déchets extraits seront éliminés par incinération ou revalorisés (le sable pourra être utilisé en tant que remblais routier et les huiles pourront être soit régénérées soit incinérées) [45]. L'injection des eaux usées se fait par le fond des bassins et dans la partie centrale de la lagune. Les orifices de distribution sont multiples et toujours noyés [44].

Les lagunes de terre, pourvues de talus ayant une pente d'un tiers. Si une protection contre l'infiltration dans les eaux souterraines est nécessaire, les fonds et les remblais doivent être colmatés. Aussi, il convient de choisir un terrain imperméable (argile) pour le rendre étanche et enfin il faut grillager le pourtour de la lagune [44].

Les premiers bassins sont des bassins à micro-organismes, où est dégradée la matière organique contenue dans les eaux usées. On trouve dans ces bassins un écosystème constitué de végétaux qui, par photosynthèse produisent de l'oxygène qui nourrit le phytoplancton qui à son tour nourrit le zooplancton. L'action naturelle du soleil, qui fournit la chaleur et lumière, favorise une croissance rapide des microorganismes aérobies et anaérobies qui consomment la matière organique en suspension. Les matières en suspension de l'eau brute décantent dans le bassin de tête (Tarmoul F., 2007). Ce cycle s'auto-entretient tant que le système reçoit de l'énergie solaire et de la matière organique (Perera P. et Baudot B., 1991).

La dégradation se fait selon le schéma suivant:

Eaux usées + oxygène => boues + effluent traité

On peut observer une stratification en oxygène dans la lagune qui va déterminer l'activité microbienne mise en jeu :

- la zone supérieure en contact avec l'atmosphère où l'on observe une dégradation rapide de la matière organique en CO₂, H₂O, phosphates et sulfates
- la zone inférieure : la matière organique se stabilise dans une couche limite sous l'action des bactéries anaérobies avant d'être dégradée en éléments plus simples qui remonteront en surface [44].

Le premier bassin (de décantation) est le plus profond, et le volume global de l'ensemble doit être très important : soit de 60 à 80 fois plus que la quantité d'effluent reçu, ce qui permet une dilution considérable et d'assurer, le cas échéant, de fortes variations de charge à assainir.

L'eau transite ensuite dans des bassins moins profonds, à macrophytes. Ceux-ci absorbent les éléments minéraux issus de la dégradation de la matière organique pour leur croissance. Ce bassin est deux fois plus petit avec une profondeur moins importante (1,10 m en moyenne). Cette faible profondeur est importante pour permettre l'action du soleil : Rôle bactéricide des ultra-violets, mais surtout, ici, pour permettre la photosynthèse et donc favoriser les phénomènes aérobies. Les nutriments présents (sels minéraux, dérivés des lessives et dans une moindre mesure des engrais minéraux issus de l'agriculture) et le CO₂ (déchet de la respiration de certaines bactéries) vont être assimilés par les plantes pour permettre leur croissance.

Les micro-algues (phytoplancton) seront consommées dans les derniers bassins par le zooplancton (animaux microscopiques). A la fin de cette étape (80 jours environ après l'entrée dans le premier bassin). Le rôle du zooplancton est d'assurer la finition de l'épuration des eaux. Ils vont jouer un rôle important comme consommateur de micro-algues, et donc comme régulateur de ces populations phytoplanctoniques.

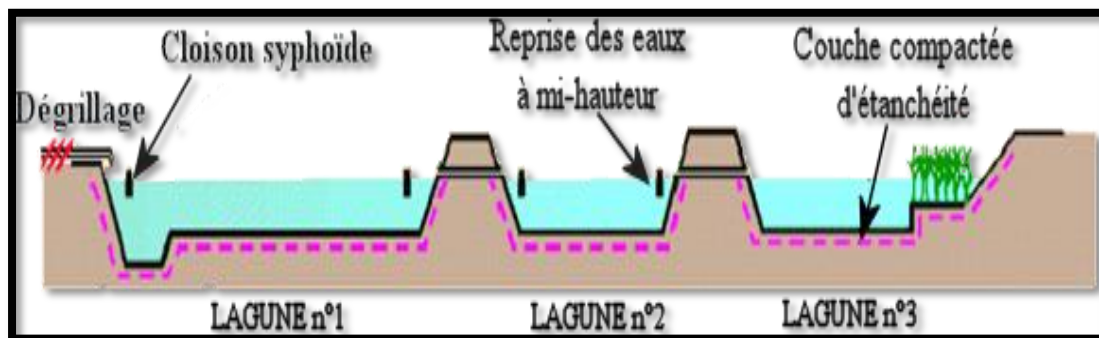


Figure 2-23: Le fonctionnement de lagunage [47].

En fond de bassin, où la lumière ne pénètre pas, ce sont des bactéries anaérobies qui dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Un dégagement de gaz carbonique et de méthane se produit à ce niveau (Perera P. et Baudot B., 1991).

Cette technique présente la caractéristique de nécessiter une surface importante, entre 15 et 20 m² pour un volume de 50 m³ d'eau, voilà pourquoi on lui attribue la propriété extensive. Le temps de séjour doit être élevé (minimum 30 jours, voire plus). Les lagunes assurent un rendement en dépollution de l'ordre de 80 à 90 % et plus particulièrement un taux d'élimination de l'azote d'environ 30 %. Deplus, les boues récupérées peuvent être valorisées comme amendement agricole (maraîchage,...) [44].

L'eau qui sort de ce système est conforme aux normes d'OMS concernant les paramètres d'épuration : DCO, DBO, MES. Les normes de qualité fixées par la législation en ce qui concerne le lagunage sont les suivantes :

- MES (Matières en suspension totales) : 120 mg/l
- DCO (Demande chimique en oxygène) : 120 mg/l
- DBO₅ (Demande biologique en oxygène sur 5 jours) : 40 mg/l

Tous les systèmes de lagunage permettent d'abaisser les valeurs de ces paramètres aux objectifs fixés par ces normes [45].

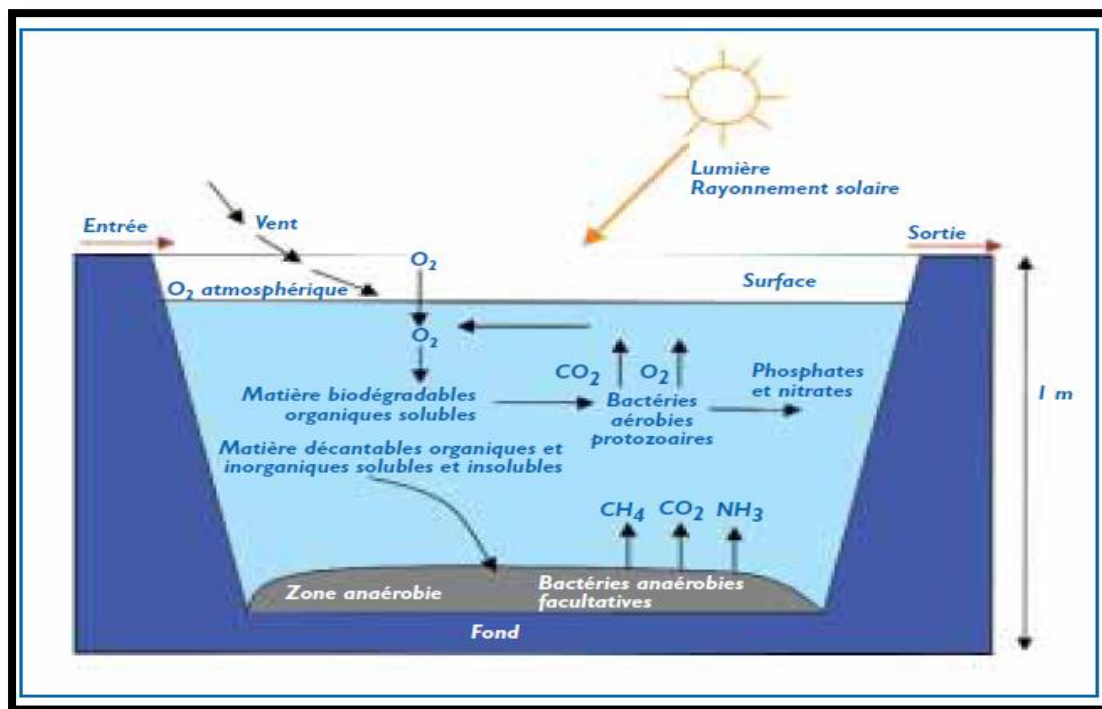


Figure 2-24: Les mécanismes en jeu dans les bassins de lagunage naturel.

□ Les types de lagunage :

• Lagunage anaérobie :

Les étangs anaérobies sont caractérisés par un manque d'oxygène dissous causé par une forte DBO₅ (100-400 g/m³/jour), et les solides en suspension s'y déposent facilement ; ils forment sur le fond une couche où les bactéries anaérobies décomposent la matière organique. Un des résultats est la production de gaz : l'hydrogène sulfuré (H₂S) et le méthane (CH₄) qui s'échappent vers la surface sous forme de bulles (Tarmoul F., 2007). Il peut être employé comme première étape de traitement (traitement primaire) ou placé après un

prétraitement. Il est caractérisé par une profondeur supérieure à 2m et par un temps de séjour réduit de 3 à 10 jours [48]. Ils reçoivent des effluents bruts et mènent à des réductions de la DBO₅ de 40 à 60 % et des solides en suspension de 50 à 70 %. En générale, on n'y trouve pas de micro-algues à cause des conditions défavorables à leur croissance (Tarmoul F., 2007).

Le lagunage anaérobie supporte les fortes charges polluantes, mais il présente l'inconvénient de risque de production d'odeurs (Habib R. et El Rhazi O., 2007).

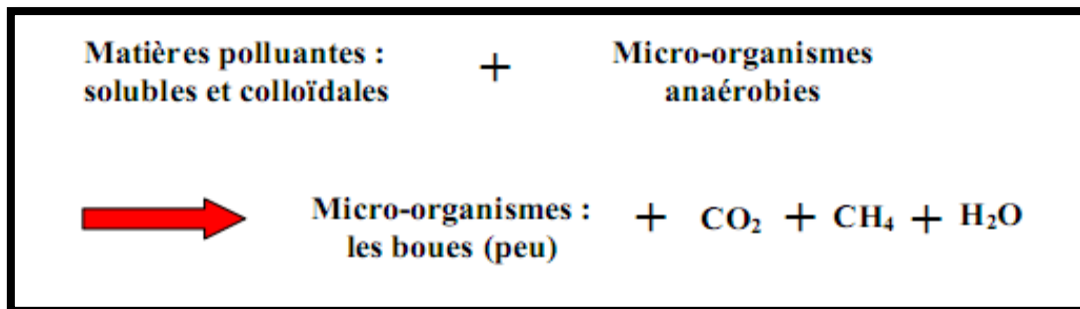


Figure 2-25: Schéma de principe de la mise en œuvre des micro-organismes en anaérobiose

- Lagunage aérobie :

Les étangs aérobies ou de maturation sont peu profonds (0,8 à 1,2 m) où la lumière peut pénétrer et favorisant le développement d'algues vertes. Par leur action photosynthétique, les algues produisent de l'oxygène qui permet le développement de bactéries épuratrices aérobies. Le temps de séjour dans ces étangs est beaucoup plus long, de 12 à 18 jours ou plus, et permet un traitement d'effluent déjà partiellement épuré. Ces étangs sont caractérisés par charge (Kg DBO₅/ha/jour) :

- Rendement (% de DBO₅) : 80 à 95 %
- Concentration en algues (mg/l) : 100 (Chaib A., 2004)

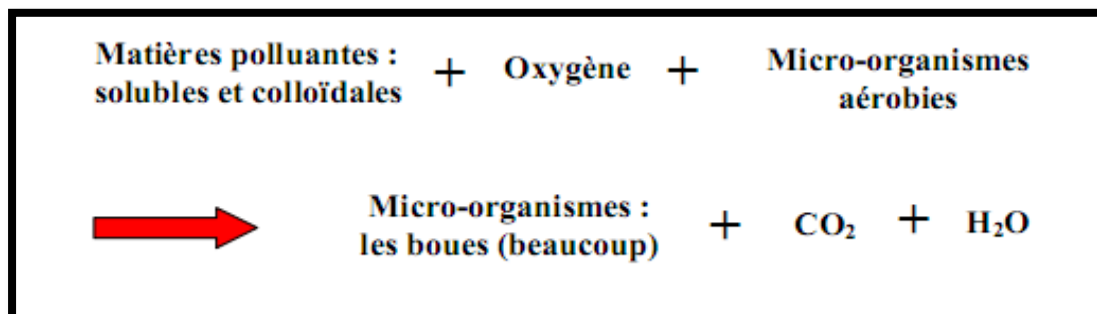


Figure 2-26: Schéma de principe de la mise en œuvre des micro-organismes en aérobie.

- Lagunage facultatif :

D'une profondeur de 1 à 2 m et un temps de séjour de 4 à 6 jours, ces étangs fonctionnent dans des conditions telle que la partie supérieure entretient un milieu aérobie, riche en algues et en micro-organismes aérobies, alors que le fond, couvert de sédiments organiques, est le siège de fermentation anaérobie ; entre ces deux zones règne un milieu de transition favorable aux bactéries facultatives.

Les fermentations benthiques donnent lieu à un dégagement de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2), d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'ammoniac, ainsi que de composés organiques de faible masse moléculaire. Ce produit alimente la flore des zones supérieures et les composés minéraux dégagés entretiennent les algues ; une certaine fraction de ces algues meurent et se sédimentent, venant s'ajouter au lit de boues (Tarmoul F., 2007).

Ils permettent l'élimination de 35 % à 55 % de DBO en plus d'une bonne réduction des coliformes fécaux et des parasites (Benallal H).

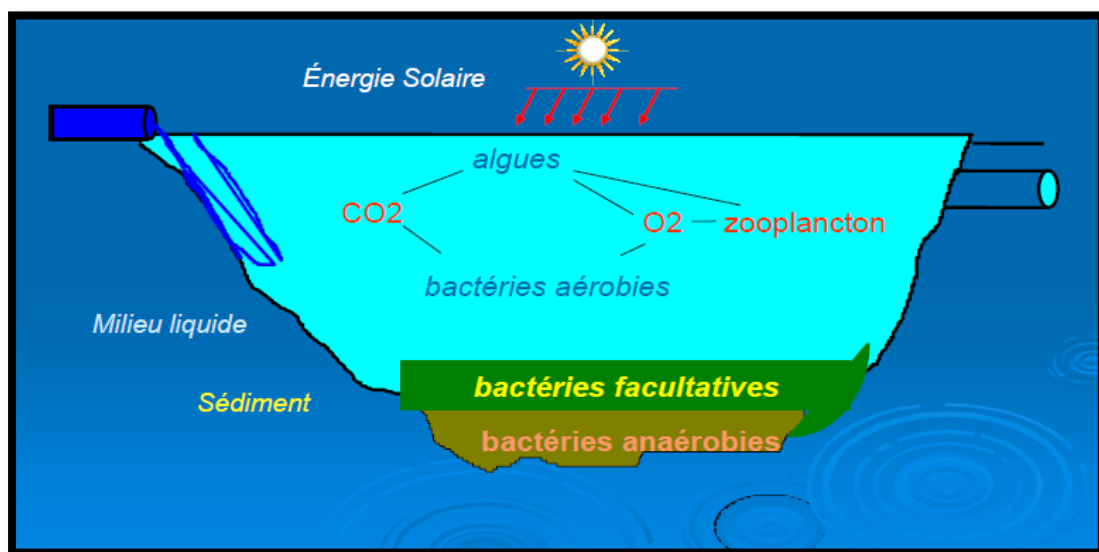


Figure 2-27: les 3 niveaux de traitement au niveau des bassins facultatifs (Benallal H).

- Lagunage à haut rendement :

L'épuration y est obtenue grâce à une production algale intensive. Dans des bassins peu profonds (30 à 60 cm), l'eau animée par des roues à aubes, circule lentement ce qui favorise l'homogénéisation et le développement des algues. Le temps de séjour est de 2 à 12 jours et la surface nécessaire est divisée par

5 par rapport au lagunage naturel. L'épuration est obtenue grâce à une production algale intensive.

Cependant, cette technique exige un rayonnement solaire et une température suffisante, et demande donc de prendre en compte les cycles saisonniers (Ladjali M.A., 2005).

D'autre part, la photosynthèse n'ayant lieu que le jour, il convient aussi de compter avec les cycles jour/nuit dans le lieu envisagé. En pays tempérés notamment, on pourrait coupler ce procédé à partir des mois de mars-avril avec des bassins de stockage plus profonds pendant l'hiver [45].

- Lagunage à macrophyte :

Il est caractérisé par la présence de ces plantes visibles à l'œil nu. Il est constitué de plantes immergées ou émergées, enracinées ou non, telles que les scirpes, les lâches, les roseaux, les massettes, les joncs, les jacinthes d'eau ou les lentilles d'eau. Les lentilles d'eau sont aussi efficaces pour l'épuration, de plus elles sont très riches en protéines (35 à 50% du poids sec) et constituent un bon aliment pour les animaux (UNESCO., 2008).

Ce sont des bassins à faible profondeur de 0.3 à 0.5 m [48]. Le canal ou le bassin est revêtu d'une barrière imperméable (argile ou géotextile) couverte de cailloux, de gravier et de terre et plantée avec la végétation indigène (par exemple massette, roseaux et/ou joncs) (F.A.O., 1996). Ils sont disposés comme dernière étape de traitement. Ils permettent la réduction du nombre d'algues, un abattement supplémentaire des éléments nutritifs, de la DBO₅, des métaux lourds et des parasites [48].

- Lagunage à microphytes :

Sous climat tempéré, le lagunage naturel à microphytes (micro algues) nécessite une superficie de 10 à 15 m² /Eh. On compte sur une station de 2 à 5 bassins disposés en série, profonds de 1 à 1,7 mètres où les effluents à traiter séjournent au total de 50 à 80 jours. Le premier bassin (de décantation) est le plus profond, et le volume global de l'ensemble doit être important : soit de 60 à 80 fois plus que la quantité d'effluent reçu, qui permet une dilution considérable et d'assurer, le cas échéant, de fortes variations de charge à assainir (Ladjali M. A., 2005).

- Lagunage de maturation :

Les bassins de maturation reçoivent un effluent très peu chargé provenant d'un bassin facultatif voire d'un autre bassin de maturation. Les bassins de maturation peuvent aussi être appelés bassins de polissage ou de finition lorsqu'ils sont utilisés en guise de traitement tertiaire (du lagunage facultatif, de boues activées...). La taille et le nombre de bassins de maturation dépend des normes de rejet ou de la qualité microbiologique souhaitée [49]. Généralement ce sont des bassins peu profonds ($\leq 1\text{m}$), aérés par la photosynthèse des microphytes et les phénomènes de diffusion de l'oxygène atmosphérique. Le séjour varie de 10 à 40 jours. La zone aérobie occupe une large fraction de la hauteur d'eau en raison de la faible charge organique. Son rôle principal est de réduire les germes pathogènes et un abattement supplémentaire des nutriments et de la charge organique [48].

Dans ces bassins, il n'y a pas de réelle stratification biologique et physico-chimique comme dans les lagunes facultatives. La faible profondeur des lagunes de maturation est indispensable afin de maintenir le bassin en conditions d'aérobiose et de permettre aux rayons du soleil de pénétrer jusqu'au fond du bassin. Le but premier des bassins de maturation est l'enlèvement des pathogènes (cela ne veut pas dire pour autant que la DBO n'est plus éliminée dans ce type de bassin).

- Lagunage aéré :

Le lagunage aéré est un procédé de traitement biologique, principalement aérobie, en cultures libres. L'effluent apporté par l'activité de l'entreprise constitue une source de carbone, d'azote, et de phosphore et donc nécessaires à la croissance de ces organismes. L'épuration de cet effluent est réalisée essentiellement par la présence de bactéries aérobies (qui ont besoin d'oxygène). L'oxygénation est essentiellement assurée de façon artificielle, dans le cas présent par des aérateurs de surface à axe vertical (turbines) [50].

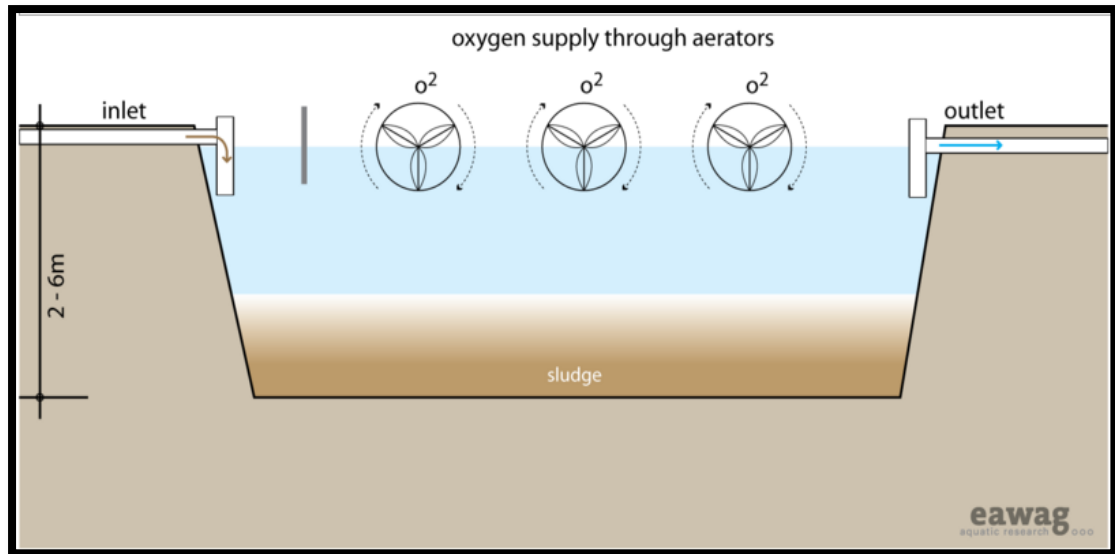


Figure 2-28: Lagunage aérés [51].

❑ Les avantages :

Le lagunage est un procédé rustique, écologique, faible et peu onéreux, avec des résultats hautement satisfaisants en matière de décantation.

Ses avantages par rapport aux procédés classiques sont nombreux :

- Généralement pour petites stations de taille inférieure à 2000 EH [52].
- Bien adapté au réseau unitaire (charge hydraulique_dilution)
- Coût d'investissement limité
- Faible cout d'exploitation : Le coût est faible comparé à une filière de traitement classique (entre 20 et 50 % du coût d'une station d'épuration) ; il est plus lié aux travaux de génie civil (terrassement) que cette technique nécessite qu'au fonctionnement à proprement parler (4 % du coût équivalent pour une station) [44].
- Bonne élimination des pathogènes
- Raccordement électrique inutile
- Bonne élimination de l'azote (70%) et du phosphore (60%).
- Peu d'entretien
- Pas de décantation primaire, ni recyclage

- Très Bonne intégration paysagère
- Système respectueux de l'environnement;
- Production de boues moins importante (qu'une station classique de type " boues activées "), très minéralisées et donc peu fermentescibles ;
- Curage peu fréquent (1 fois tous les 10 ans dans les premiers bassins) et boues plus facilement valorisables ;
- Bien adapté pour les petites communes ayant des fortes augmentations de population estivale ;
- Hormis les coûts fonciers pour l'achat des terrains, les coûts de fonctionnement sont faibles ;
- Bien adapté au réseau unitaire (les eaux pluviales jouant un bon rôle de dilution pour de fortes charges ponctuelles : vendanges par exemple) ;
- Faible technicité requise pour l'exploitant, surveillance régulière mais uniquement hebdomadaire du fait de la rusticité du système [53].
- Valorisations aquacole et agricole de la biomasse planctonique produite et des effluents épurés.

□ Les inconvénients :

Plusieurs inconvénients sont toutefois à noter :

- Emprise au sol importante(en France 10 m² par habitant) limitant l'installation aux grandes communes
- Contraintes de nature de sol et d'étanchéité
- Variation saisonnière de la qualité de l'eau traitée
- Elimination de l'azote et phosphore incomplète
- Difficultés et coût important d'extraction des boues
- Taille > 100 EH
- Pas de réglage possible en exploitation
- Sensibilité aux effluents septiques et concentrés [54].

- Matière en suspension importante en rejet (organismes planctoniques) problématique pour de petits milieux récepteurs;
- Adapté pour un type de pollution organique : n'apprécie pas les grandes concentrations ponctuelles, et les pollutions chimiques;
- Faucardage au moins une fois par an pour les lagunages à macrophytes;
- En cas de mauvais fonctionnement ou de mauvais entretien : risque d'odeurs, de développement d'insectes (moustiques), de dysfonctionnement (perforation des digues par les rongeurs) [53] [52].

A.4. L'épuration par les plantes de macrophytes :

Le traitement des eaux usées domestiques par les filtres plantés de Macrophytes a été amélioré ces dernières années pour répondre aux besoins de communautés de tailles réduites ou moyennes. L'eau traitée peut être réutilisée pour l'irrigation, voir même pour les besoins du bétail. Il s'agit d'un ensemble de mécanismes de traitement biologique naturel à macrophytes qui arrivent à réduire les taux de coliformes fécaux et la DBO₅. L'épuration par les filtres plantés de macrophytes a pu démontrer son efficacité dans les pays développés, notamment en Europe.

□ Le principe de l'épuration par les plantes :

Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épurateur des végétaux aquatiques : algues, hydrophytes (plantes d'eau libre) et héliophytes (plantes du bord des eaux). Les eaux usées séjournent simplement dans une série de bassins à ciel ouvert peuplés de ces végétaux. Le roseau (ou phragmite) et autres plantes vigoureuses ont été largement utilisés à cet effet sous le nom de « macrophytes ». Ces dernières consomment les composés polluants dissous dans l'eau – azote et phosphore –, qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques –algues et bactéries– qui font le gros du travail [42].

Certains systèmes se bornent à mettre en œuvre l'épuration par «microphytes» ou algues unicellulaires. Quant aux hydrophytes, elles absorbent les nutriments en excès à travers les parois cellulaires de leurs tiges et feuilles très ramifiées et produisent de l'oxygène nécessaire à la décomposition des matières organiques et à l'oxydation de l'azote ammoniacal [42].

□ Historique :

L'utilisation des végétaux aquatiques pour le traitement des eaux usées est relativement ancienne ; ses premières applications à petite échelle datent des années 60 du dernier siècle.

Il existe deux types de filtres, les filtres à écoulement horizontal et les filtres à écoulement vertical. La première version des filtres horizontaux utilisés en traitement complet a été développée en Allemagne en 1964 par Mr *Kickuth* de l'Université allemande de Kassel ; c'est pourquoi ce système est souvent appelé « *système Kickuth* » (S.Q.A.E., 1993). Il est aussi connu sous le vocable « *Root Zone Method* » (Hans B., 1987). A l'origine les dispositifs utilisaient le sol en place, éventuellement amendé avec des ajouts (argiles, chaux). Ce procédé a fait l'objet d'un brevet américain en 1989 (S.Q.A.E., 1993). Le premier système mis en exploitation date de 1974 (Grison C., 1999). Exporté vers les pays européens (notamment le Danemark et le Royaume Uni), le système a fait l'objet de nombreuses critiques de la part de scientifiques qui ont contesté le dimensionnement et l'aptitude des roseaux à augmenter la perméabilité des sols en place utilisés comme substrat (Hans B., 1987).

Les premières recherches, du Pr. De biologie Käte SEIDEL, furent faites à partir d'une observation rigoureuse de la vie des plantes des marais et des marécages (Daloz A., 2007).

L'utilisation de ce procédé pour des collectivités de plusieurs centaines d'habitants est très récente. En effet, les systèmes en rupture avec les technologies intensives (comme le lagunage, l'infiltration-percolation et les systèmes plantés de macrophytes), ont eu un démarrage difficile et particulièrement lent et cela dans tous les pays d'Europe. Ce n'est que vers le milieu des années 80 que le nombre de stations réalisées à commencer à augmenter d'une manière considérable (tableau 2.2).

Tableau 2-2: Evolution de la mise en place de filtres plantés de macrophytes dans quelques pays Européens. (H = horizontal, V = vertical) (Grison C., 1999).

Pays	Nombre d'installations (1999)	Année de démarrage	Type de filtre	Type de réseau
Allemagne	400	1988	H et V	Surtout unitaire
Royaume Uni	400	1985	H et puis V	Surtout unitaire
Autriche	300	1993	H et V	Unitaire et séparatif
Danemark	100	1984	H (sol) puis H et V	Unitaire et séparatif
République Tchèque	80	1993	H	Unitaire et séparatif
France	40	1993	Surtout V	Unitaire et séparatif

□ Les filtres plantés de roseaux :

C'est un concept de station de type extensif. Le principe consiste à faire passer les eaux usées à travers un massif granulaire plantés des macrophytes généralement comme typha (figure 2.29). Les racines des végétaux permettent une bonne circulation des fluides et ils supportent comme le massif granulaire, les microorganismes épurateurs. Des cycles d'alimentations suivis de cycles de repos permettent la minéralisation de la matière organique entrante. Deux stratégies sont appliquées : les flux verticaux et les flux horizontaux.

L'épuration est réalisée selon le principe de l'épuration biologique principalement aérobie dans des milieux granulaires des différentes dimensions. On ne procède pas au renouvellement régulier du massif filtrant ou à son lavage pour l'évacuation des boues produites au sein des filtres. En revanche, les boues produites en amont des filtres (sur les filtres ou dans un dispositif de décantation doivent être évacuées) (Daloz A., 2007).

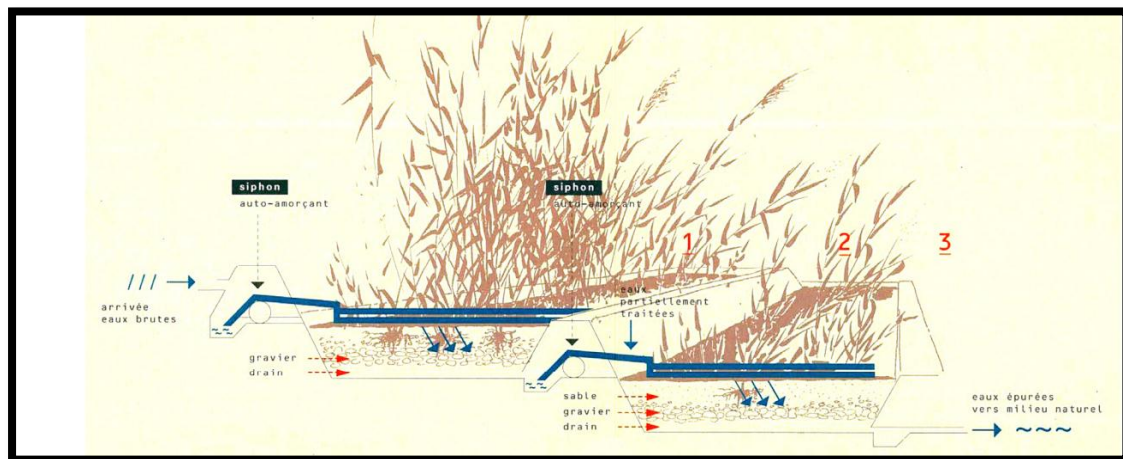


Figure 2-29: Schéma du Phragmifiltre (Daloz A., 2007)

1 – Le traitement physique des eaux usées s'effectue dès des filtres plantés de roseaux (phragmites). Les effluents perdent par filtration jusqu'à 90% (contre seulement 50% par décantation classique) de leurs matières en suspension (MES) en traversant un massif de granulats. Les MES ou boues retenues sont déshydratées et compostées sur place grâce à l'action conjuguée des bactéries et des plantes.

2 – Au deuxième étage, le traitement de la matière organique dissoute se poursuit et les composés azotés réduits (toxiques pour les poissons) sont oxydés.

3 – Un troisième étage et/ou une recirculation des eaux permettent d'effectuer un traitement tertiaire de finition, afin d'obtenir un taux d'épuration supérieur aux normes requises habituellement (Daloz A., 2007).

- Les filtres à écoulement vertical :

Les filtres sont des excavations étanches remplies de couches de graviers et/ou de sable de différentes granulométries (figure 2.30). L'effluent brut est épandu directement, sans décantation préalable, à la surface du filtre. En s'écoulant à travers ces filtres, ce derniers subit un traitement physique (filtration), chimique (adsorption...) et biologique (fixation de la biomasse sur les supports fins). Les eaux épurées sont drainées sous les différentes couches. Les filtres sont alimentés en eaux usées brutes par bâchées. Pour un même étage ; la surface de filtration est séparée en plusieurs unités permettant d'instaurer des périodes d'alimentation et de repos (Commission Européenne., 2001).

- La période de repos pendant laquelle se fait la dégradation de la matière organique accumulée dans les filtres (substrat filtrant et racines des macrophytes) prendra en général 07 jours, tandis que la période d'alimentation ne requerra que la moitié (environ 03 jours) ce qui nous amène à utiliser 3 lits en parallèles dans le premier étage de façon à ce que la période de repos d'un lit permettra l'alimentation des deux restants. Pour le deuxième étage les deux périodes sont équivalentes ce qui donne deux lits en parallèle (Brouillet J. L. et *al.*, 2008). Ces deux périodes dépendent de l'espèce utilisée pour le traitement, par exemple une plante appelée *C. esculenta* testée au laboratoire peut suivre a une période d'alimentation équivalente à 20 jours (Bindu T. et *al.*, 2008).
- Le principe épuratoire repose sur le développement d'une biomasse aérobie fixée sur un sol reconstitué. L'oxygène est apporté par convection et diffusion. L'apport d'oxygène par les radicelles des plantes est négligeable par rapport aux besoins.
- La capacité d'oxygénation est telle que les filtres du premier étage contribuent essentiellement à la dégradation de la fraction carbonée, mais une nitrification partielle est également notée. Le deuxième étage vient alors affiner la dégradation de la fraction carbonée et complète la nitrification en fonction des conditions d'oxygénation, de la température et du pH (G.M.T.E., 2005).

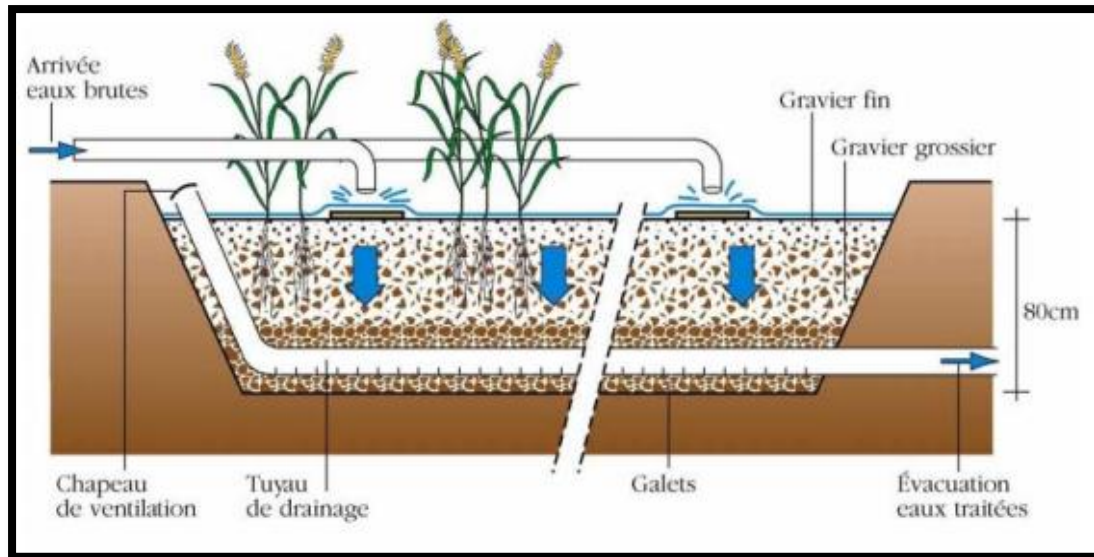


Figure 2-30: Coupe représentative d'un filtre à écoulement vertical (Herlemont B., 2003).

- Les filtres à écoulement horizontal :

Dans les filtres à écoulement horizontal, le massif filtrant est quasi-totalement saturé en eau (figure 3.31). L'effluent est réparti sur toute la largeur et la hauteur du lit par un système répartiteur situé à une extrémité du bassin ; il s'écoule ensuite dans un sens principalement horizontal à travers le substrat. La plupart du temps, l'alimentation s'effectue en continu car la charge organique apportée est faible puisque ces filtres sont nécessairement alimentés par des eaux préalablement débarrassées de leurs matières en suspension.

L'évacuation se fait par un drain placé à l'extrémité opposée du lit, au fond et enterré dans une tranchée de pierres drainantes. Ce tuyau est relié à un siphon permettant de régler la hauteur de l'eau dans le lit, de façon à ce qu'il soit saturé pendant la période d'alimentation. Le niveau d'eau doit être maintenu environ à 5 cm sous la surface du matériau. En effet, l'eau ne doit pas circuler au-dessus de la surface du filtre afin de ne pas court-circuiter la chaîne de traitement et d'éviter la prolifération d'insectes (Commission Européenne., 2001).

L'apport relativement faible en oxygène limite la croissance des bactéries aérobies hétérotrophes et autotrophes et, par voie de conséquence, la dégradation des matières carbonées et surtout l'oxydation des composés azotés. Toutefois des mécanismes anaérobie et aéro-anaérobie interviennent au contact des racines des macrophytes (effet rhizosphère) et participent à la dégradation des matières carbonées et à la transformation des formes réduites de l'azote.

L'expérience concernant ces filtres est encore limitée en France mais leur nombre augmente, surtout en aval d'un premier étage vertical (G.M.T.E., 2005).

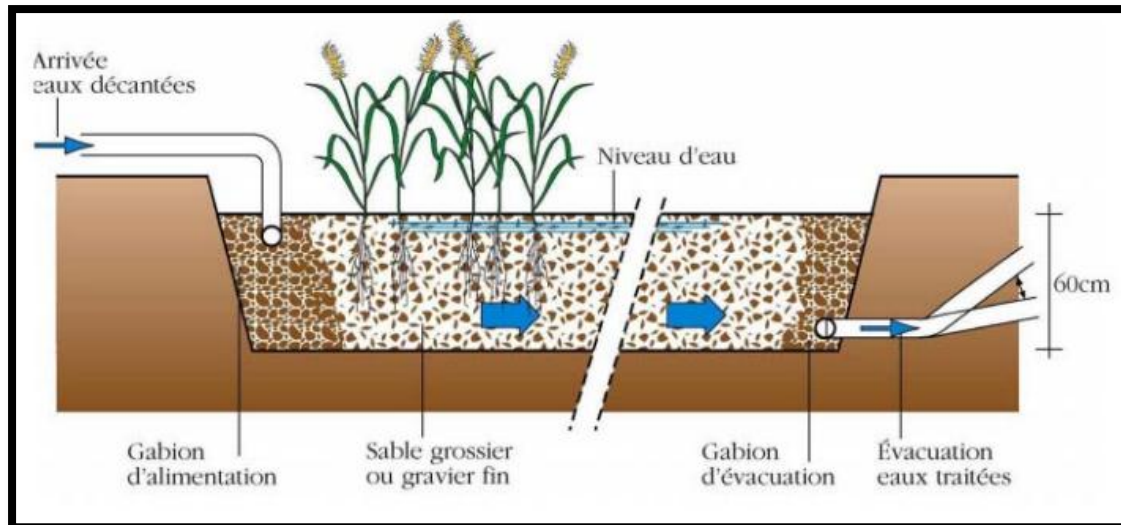


Figure 2-31: Coupe représentative d'un filtre à écoulement horizontal (Poulet J. B. et al., 200)

□ Le rôle des macrophytes :

Au-delà de l'aspect esthétique et de leur rôle mécanique primordial sur le premier étage des filtres verticaux, les macrophytes contribuent indirectement à la dégradation des matières organiques de l'effluent brut. Ces plantes disposent d'un système racinaire très dense qui améliore l'oxygénation des filtres. Poursuivant leur croissance même en hiver les rhizomes assurent enfin le fonctionnement permanent de la station d'épuration limitant le colmatage des surfaces filtrantes (Daloz A., 2007).

Particulièrement proliférantes en milieu humide, les bactéries se nourrissent des matières dont sont chargées les eaux usées. Véritables « ciseaux biologiques » elles les transforment en molécules inoffensives. La croissance des racines et des rhizomes permet un maintien ou une régulation de la conductivité hydraulique initiale. Le développement racinaire limite le colmatage des filtres grâce à la formation de pores tubulaires le long des racines qui permet d'accroître la surface de fixation pour le développement des micro-organismes. Le processus épuratoire dépend en grande partie de l'activité, de la densité et de la diversité des micro-organismes impliqués, c'est ce qu'on appelle l'effet rhizosphère (figure 2.32).

Le métabolisme des plantes, c'est-à-dire l'assimilation des nutriments, contribue également à l'épuration des eaux, mais est fonction des plantes utilisées et de la surface mis en œuvre. Pour les filtres verticaux l'assimilation est faible, en revanche pour les filtres

horizontaux l'accumulation des éléments comme le phosphate ou l'azote n'est pas négligeable (figure 2.33).

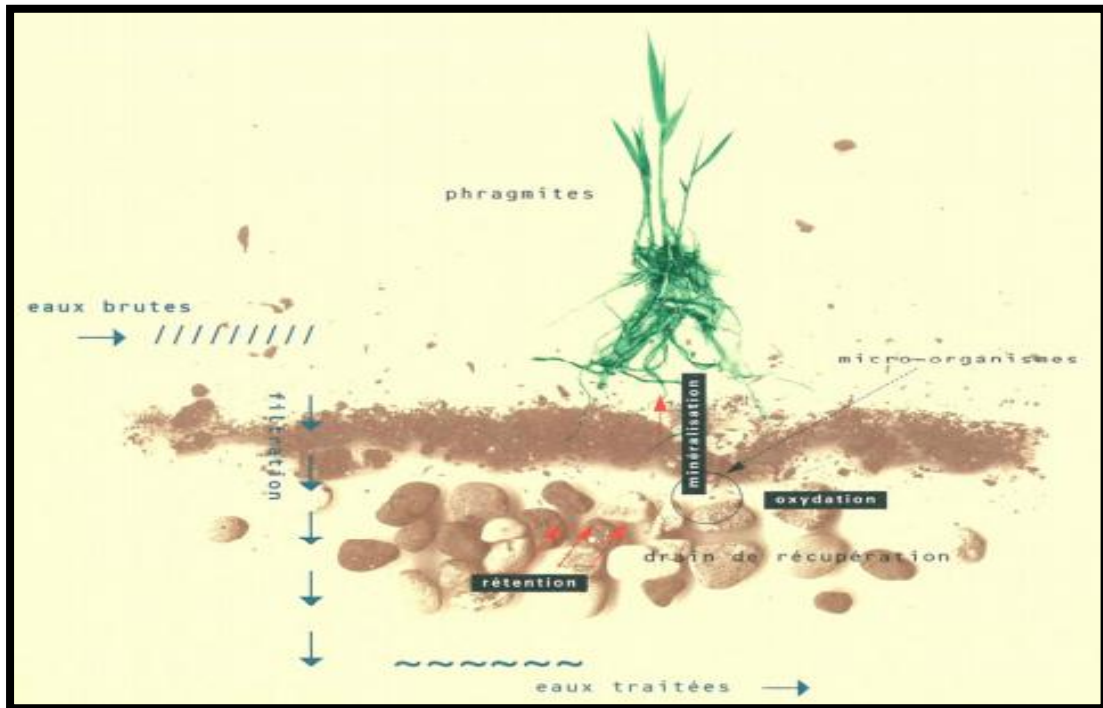


Figure 2-32: Schéma de l'activité des macrophytes (Daloz A., 2007).

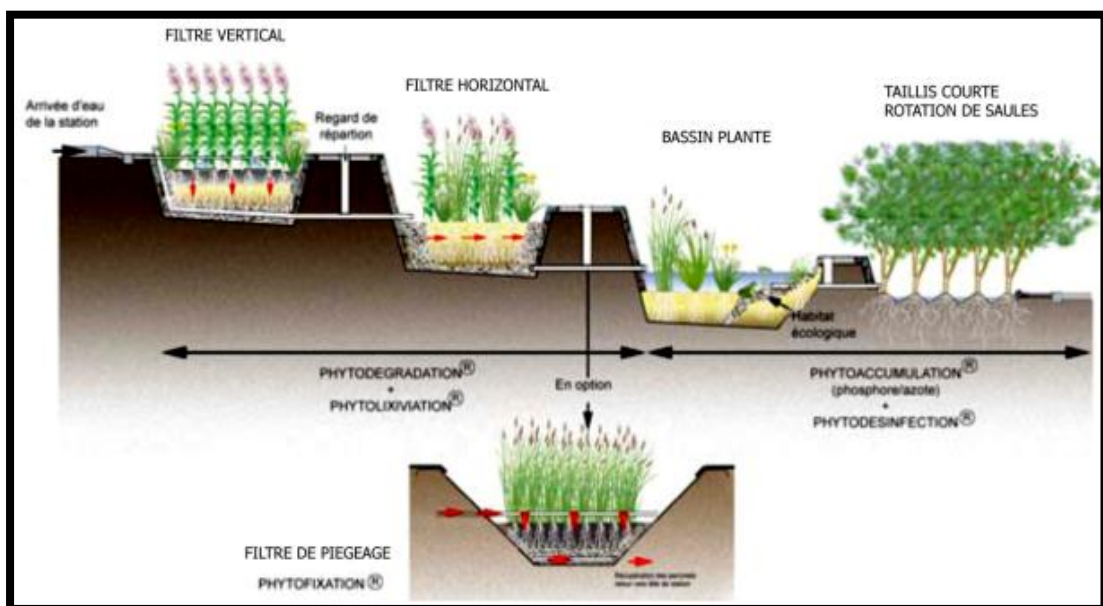


Figure 2-33: Schéma du principe des Jardins filtrant (Daloz A., 2007).

□ Avantages et inconvénients :

Les stations d'épuration à macrophytes rentrent dans le cadre du développement durable ; c'est d'ailleurs l'intérêt majeur de ce type d'installations. Ces stations d'épuration sont conçues à la manière de jardins d'eau, avec une grande diversité de plantes vivaces, et des

étagements en terrasses respectant la déclivité du terrain naturel dans la mesure du possible et l'intégration harmonieuse dans le paysage.

L'entretien de telles stations est de même nature que le jardinage courant, et le personnel technique d'une collectivité peut aisément s'en occuper. Ces stations assurent une exploitation fidèle aux préconisations (comme l'alimentation alternée, le coup d'œil régulier sur le circuit hydraulique), aussi, les problèmes des odeurs et d'insectes comme les moustiques ne se posent pas : l'aération-oxygénation en est la clé.

Il est possible, et souvent préférable, de traiter les eaux usées brutes en tête de station, sans décantation préalable : les matières filtrables amenées par les eaux (papier, matières fécales, etc.) se déposent en surface des lits du 1^{er} étage et constituent ainsi une couche de filtration fine, qui se composte et se minéralise progressivement.

A la différence des systèmes conventionnels, il n'y a pas de production de boues, mais qu'un résidu peu volumineux, sableux et minéralisé, à l'aspect de terreau sur le 1^{er} étage de traitement (1,5 cm par an). Il n'y a donc pas de problème de stockage ou de traitement de déchets (un simple raclage de surface du 1^{er} étage tous les 10 ans suffit). L'application d'une filière plantée de macrophytes, du fait de la diversité des facteurs de dégradation mis en jeu, est adaptée à un large éventail d'effluents toujours avec une épuration écologique c.-à-d. sans produit chimique. Les stations d'épuration plantées de macrophytes s'adaptent facilement aux regroupements d'habitations isolés.

En raison de sa rusticité, ce procédé réduit grandement le coût de la maintenance et la consommation d'énergie, permet éventuellement une revalorisation des eaux usées par l'irrigation des terres agricoles si le traitement est optimal et le type de culture le permet.

En été, moment de l'année où les milieux récepteurs doivent être particulièrement protégés, les zones tampons plantées d'arbres offrent la possibilité de réduire sensiblement le volume et l'impacte des rejets (Hamza Cherif C., 2011).

2.2. PREVENTION ET DEPOLLUTION DES SOLS :

Les trente dernières années ont montré à de nombreuses reprises la nécessité de protéger les sols contre les pollutions. Cependant, les réglementations sur la protection des sols, si elles existent, ne sont venues qu'après celles sur l'air ou l'eau. La pollution des sols n'a été prise en considération qu'après le constat qu'un sol ne peut pas indéfiniment absorber et détoxifier des quantités illimitées de déchets de l'agriculture, de la ville, de l'industrie et plus généralement des activités humaines. Cette limitation du pouvoir épurateur des sols peut avoir pour

conséquences des flux de polluants vers les eaux de surface ou souterraines et vers la chaîne alimentaire (Christophe S., 2009).

La nécessité de la dépollution des sols est un problème mondial, consiste à rendre le sol apte à un nouvel usage. Mais vu le coût et la difficulté de la dépollution des sols, la question de prévenir la pollution plutôt que d'y réagir. La prévention de la pollution représente le moyen le plus efficace de protéger l'environnement, d'éliminer le gaspillage coûteux et de favoriser le développement durable. Par la prévention de la pollution du sol, on s'efforce de ne pas produire de polluants plutôt que de chercher à s'en débarrasser après coup.

2.2.1. LA PREVENTION CONTRE LA POLLUTION DES SOLS :

La prévention de la pollution vise à anticiper et à prévenir la pollution, plutôt que d'y réagir. La prévention de la pollution n'est pas un concept unique; elle fait partie d'une approche permanente de gestion de la pollution qui comprend la prévention et les mesures de contrôle. En réduisant et en évitant la production de polluants ou de résidus, non seulement nous faisons des économies mais nous assurons une meilleure protection de sol que si nous devions traiter ou éliminer des polluants après les avoir produits. Cette démarche est nécessaire si l'on veut jouir d'un environnement sécuritaire et en santé et d'une économie saine et prospère. C'est un élément clé de la protection de l'environnement et du développement durable, qui s'inscrit dans une démarche globale de gestion de la pollution [69].

Le secteur des déchets a des impacts directs sur la santé humaine (production de pollution), les ressources naturelles comme les eaux de surface (lessivage des décharges en amont des barrages), les eaux souterraines (infiltration des lixiviats provenant de la décomposition des déchets et du lessivage par les eaux de pluie), la qualité de l'environnement (maîtrise de la gestion des décharges, protection des sols).

Pour protéger le sol à tous les risques de pollution, il faut bien maîtriser la gestion des déchets. La problématique des déchets est devenue incontournable. Selon la définition, les déchets «tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné, ou que son détenteur destine à l'abandon».

On distingue différents types de déchets :

- les déchets ménagers (**OM**),
- les déchets industriels banals (**DIB**),
- les déchets industriels spéciaux (**DIS**),
- les déchets d'activité de soins à risques infectieux (**DASRI**).

Une décharge, ou décharge publique ou terrain de décharge, est un lieu public où l'on déverse débris et déchets divers, situé le plus souvent en dehors des grandes villes. En France, il existe trois types de décharges :

- *Site de classe I* : déchets industriels spéciaux (produits dangereux)
- *Site de classe II* : résidus urbains et/ou des déchets industriels banals
- *Site de classe III* : résidus inertes du bâtiment ou des travaux publics par exemple [75].

Les anciennes carrières ou celles mal gérées peuvent avoir de forts impacts sur l'environnement, comme l'éparpillement des déchets par le vent, l'attraction des vermines et les polluants comme les lixiviats qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières [74]. Le lixiviat est le liquide résiduel qui provient de la percolation de l'eau à travers les déchets. Celle-ci se charge de polluants organique, minéraux et métalliques, par extraction des composés solubles (lixiviation facilitée par la dégradation biologique des déchets) [73].

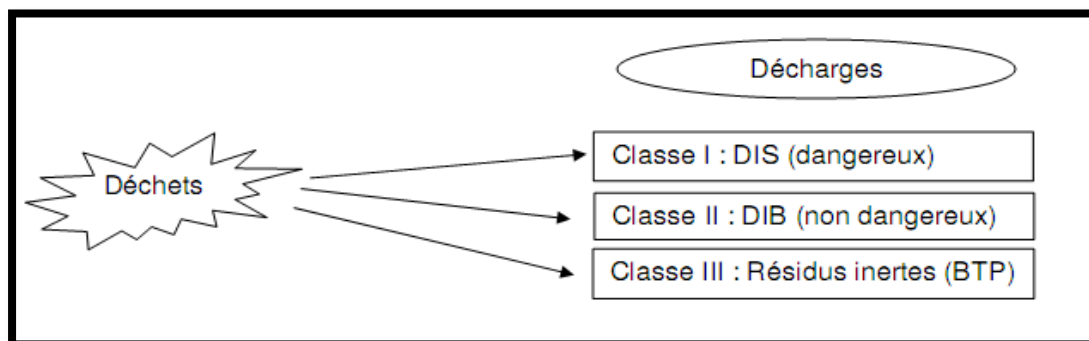


Figure 2-34: Les types des décharges [75].

Les déchets peuvent être classés selon leur origine ou selon leur nature, le tableau II.8 qui se réfère dans l'annexe F donne l'origine et nature des déchets.

La quantité de déchets produits ne cesse d'augmenter chaque année. Cependant, la place pour la stocker, ne peut pas croître indéfiniment, ainsi l'idée de réduire les déchets s'impose. Aujourd'hui, des solutions existent pour améliorer notre quotidien et protéger notre environnement. La gestion des déchets est une solution pour prévenir la pollution des sols.

2.2.1.1. GESTION DES DECHETS :

Traditionnellement, la gestion des déchets urbains, industriels et commerciaux consistait à les récupérer puis à les stocker. Une fois collectée, divers traitements peuvent être appliqués aux déchets. Le but de ces traitements peut être de

réduire la dangerosité des déchets, de revaloriser les matériaux par le recyclage, de produire de l'énergie à partir des déchets, ou encore réduire leur volume, pour pouvoir en disposer plus facilement [77]. Une gestion moderne des déchets repose sur trois axes qui sont, dans l'ordre des priorités :

- La prévention des déchets,
- La valorisation qui comprend la réutilisation, le recyclage, la valorisation matière et la valorisation énergétique,
- Traitement des déchets qui comprend notamment les traitements mécano-biologiques (compostage, méthanisation,...), les traitements thermiques (l'incinération, co-incinération, pyrolyse/thermolyse, gazéification, vitrification, oxydation hygrothermique,...) et la mise en décharge (CET).

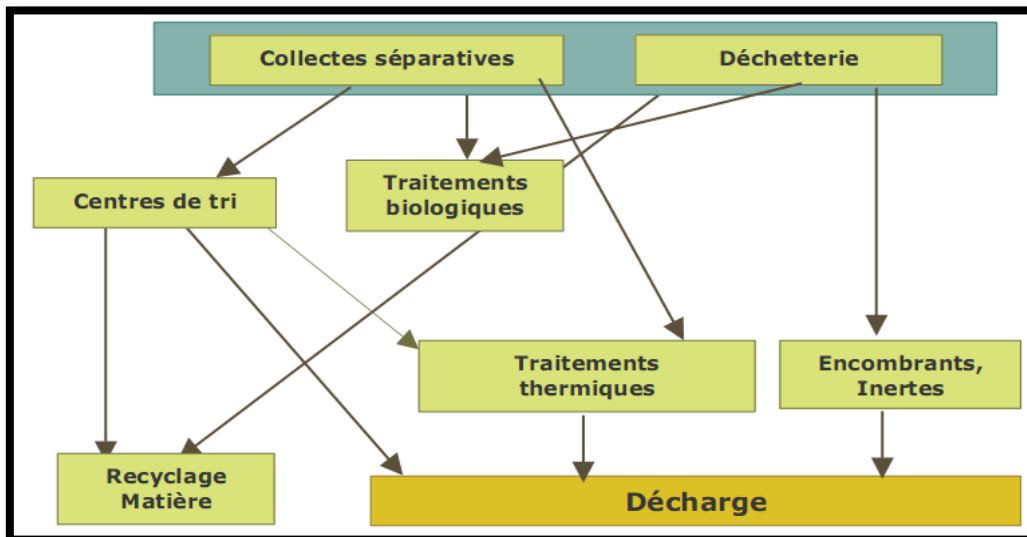


Figure 2-35: Schéma simplifié du cheminement des déchets (Oudjaoudi G. et Dulac G., 2005).

A. La prévention des déchets :

La prévention consiste en toute mesure ou opération tendant à prévenir ou à réduire la production ou la nocivité de déchets ou de leurs composants. Elle peut comprendre également certaines mesures de gestion des déchets lorsque celles-ci sont opérées chez le producteur lui-même. Toutefois, la prévention se fait en principe à la source c'est à dire au niveau de la production de biens de consommation (qui deviendront un jour déchets) en modifiant ceux-ci afin par exemple de pouvoir mettre en œuvre de nouveaux intrants qui permettront d'atteindre les objectifs retenus. On parlera également de prévention qualitative (exemple : le secteur automobile qui utilise désormais trois sortes de plastique plutôt qu'une vingtaine afin d'améliorer le recyclage des véhicules hors

d'usage) ou quantitative (les bouteilles en plastique qui sont passées de 57 gr à 36 gr en une dizaine d'années) [71].

Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un terme : « Repenser ». Certaines solutions "repensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile : afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source [77].

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. Plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées (Paye ce que tu jettes : *Pay As You Throw* - PAYT) qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains.

L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets. Une autre approche, plus controversée, est de considérer la réduction de l'utilisation de substances toxiques. On s'intéresse ici à réduire l'utilisation de substances toxiques, alors même que la tendance est plutôt à la hausse. Cette approche, dans laquelle c'est le principe de précaution qui est mis en avant, rencontre une vive opposition des industries chimiques. Ils accusent cette démarche de stigmatiser les produits chimiques. Certains états américains, comme le Massachusetts, le New Jersey et l'Oregon ont mis en place des politiques de réduction des déchets toxiques [77].

B. La valorisation :

Après la prévention, la valorisation constitue la seconde priorité de la politique des déchets. Dans les limites des contraintes techniques et économiques, les déchets doivent ainsi rejoindre, par ordre de préférence, les filières de récupération, de recyclage ou d'utilisation comme source d'énergie [72].

La valorisation recouvre toutes les actions visant à isoler et à récupérer dans les déchets des matières premières dites "secondaire", ou de l'énergie : on parle de valorisation matière ou de valorisation énergétique [78]. La valorisation matière est d'abord source d'économie en termes de matières premières. Elle permet notamment de réduire l'émission de gaz à effet de serre et autres polluants atmosphériques et diminue la consommation d'énergie (selon le matériau valorisé) (Nièvre., 2002). La valorisation énergétique est l'exploitation du gisement d'énergie que contiennent les déchets. Cette énergie sert à produire de l'électricité et/ou de la chaleur et/ou

de la vapeur. Elle est utilisée, par exemple, pour chauffer des immeubles (A.D.E.M.E., 2010).

Le choix de l'une ou l'autre valorisation va dépendre de la nature du déchet qui dépend de son mode de collecte (flux mélangé ou trié), de ses caractéristiques (bois, papier,...), de son volume ainsi que de sa disponibilité [71].

Ils existent différents procédés pour valoriser les déchets :

B.1. Tri sélectif (collecte sélective) :

Le tri sélectif consiste à séparer et récupérer les déchets selon leur nature. La mise en pratique du tri des déchets connaît de nombreuses variations :

- Tri dans un centre de tri,
- Conteneurs spécifiques installés en différents points,
- Mises à la disposition des habitants de plusieurs bacs pour trier les déchets,
- La collecte mixte : apport volontaire et collecte séparative en porte à porte.

La suite est classique : la commune se charge de la collecte en respectant les différentes filières qui serviront à éliminer les déchets non recyclables, et à valoriser les autres [76].

Une gestion des déchets basée sur le tri sélectif implique des coûts supplémentaires dus à la complexification des étapes de la collecte et du traitement. Pourtant, dans la plupart des cas, les communes peuvent réussir à tirer un bilan financièrement positif grâce à la valorisation des déchets recyclables.

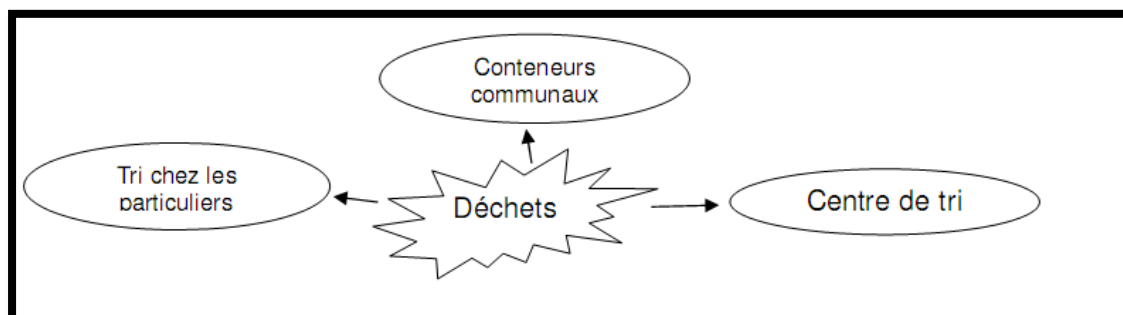


Figure 2-36: Les différentes étapes de tri sélectif [75].

B.2. Recyclage :

Le recyclage est la réintroduction d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première [71]. Le sens courant du recyclage, dans la plupart des pays développés, fait référence à la récupération et la réutilisation des divers déchets ménagers.

Ceux-ci sont collectés et triés en différentes catégories pour que les matières premières qui les composent soient réutilisées (recyclées) [77].

Certains matériaux secs, tels les papiers-carton, et le verre sont directement recyclables. Il en est de même des déchets fermentescibles propres c'est-à-dire non pollués. Les matières secondaires, tels les métaux, les plastiques, peuvent aussi être recyclées. Tel est le cas du fer (et donc de l'acier), et de l'aluminium. Les prix des matières premières augmentant, du fait de leur rareté croissante (Aluminium : 900€/tonne, Plastique : 230€/tonne, Acier 100€/tonne, Papier carton : 108€/tonne, etc.), le recyclage des métaux rares tels le chrome, le nickel, le platine, etc., devient économiquement rentable (Dietmann D. et *al.*, 2007). Le recyclage des ordinateurs obsolètes et des équipements électroniques est important mais plus coûteux à cause des problèmes de séparation et d'extraction des composants. Le marché du recyclage des épaves d'automobiles est aussi dépendant du cours du métal de récupération sauf si la législation l'impose (comme en Allemagne).

Cependant la plupart des systèmes économiques ne prennent pas en compte l'impact sur l'environnement du recyclage des matériaux lorsque qu'on le compare à l'extraction de matériaux vierges. En général beaucoup moins d'énergie, d'eau et d'autres ressources sont nécessaires pour recycler les matériaux que pour en produire de nouveaux [75].

B.3. La régénération :

Est un procédé physique ou chimique qui consiste à redonner au déchet son état et la plupart de ses qualités initiales, permettant de l'utiliser en remplacement d'une matière première vierge. Cette technique concerne essentiellement les déchets spéciaux tels que solvants, peintures, acides et huiles. Elle fait appel à des procédés chimiques complexes de distillation, d'extraction, de filtration ou encore d'absorption. Toute la filière est réglementée, la collecte, le transport et les centres de regroupement et unités de régénération sont soumis à autorisation au titre de la législation des Installations classées pour la protection de l'environnement [78].

C. Traitements des déchets:

Le choix d'un procédé de traitement des déchets dépend principalement de la nature du déchet à traiter (contenu en polluants, caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques) et des objectifs de valorisation matière et énergétique.

C.1. Procédés mécano-biologiques :

Le traitement mécano-biologique correspond à une stabilisation de la fraction organique par compostage ou méthanisation dans le but de produire du compost ou simplement avant son enfouissement en centre de stockage (C.G.L., 2008).

□ Le compostage :

Le compostage est un traitement biologique aérobie en présence d'oxygène des matières fermentescibles (organiques) dans des

conditions contrôlées (contrôle de la température et du taux d'humidité, arrosage et retournements réguliers des tas...) (C.G.L., 2008). Le compostage est une solution très efficace pour réduire sa production de déchets. Simple, efficace, écologique, le compostage des déchets présente bien des avantages ! Les déchets biodégradables ont la particularité de bénéficier d'un réel potentiel de valorisation qu'il est regrettable de ne pas exploiter [79].

- Les étapes de compostage :

Le compostage se fait en plusieurs étapes :

- broyage et mélange des déchets organiques
- phase de fermentation aérobie (~1 mois) → augmentation naturelle de la T°
- phase de maturation (~2 à 3 mois) → diminution de la T° et contrôle de l'humidité
- criblage et stockage du compost en attente de sa valorisation agronomique.
- Les produits générés par le compostage sont :
- Du compost qui peut être valorisé (agriculture, espaces verts, vente...),
- Du gaz carbonique et de la chaleur,
- Des refus de tri (amont) et de criblage (aval),
- Des effluents provenant du ruissellement des eaux de pluie sur les andains (cas d'un stockage à l'air libre),
- La génération d'odeurs → air vicié à traiter (lavage acide + biofiltre).

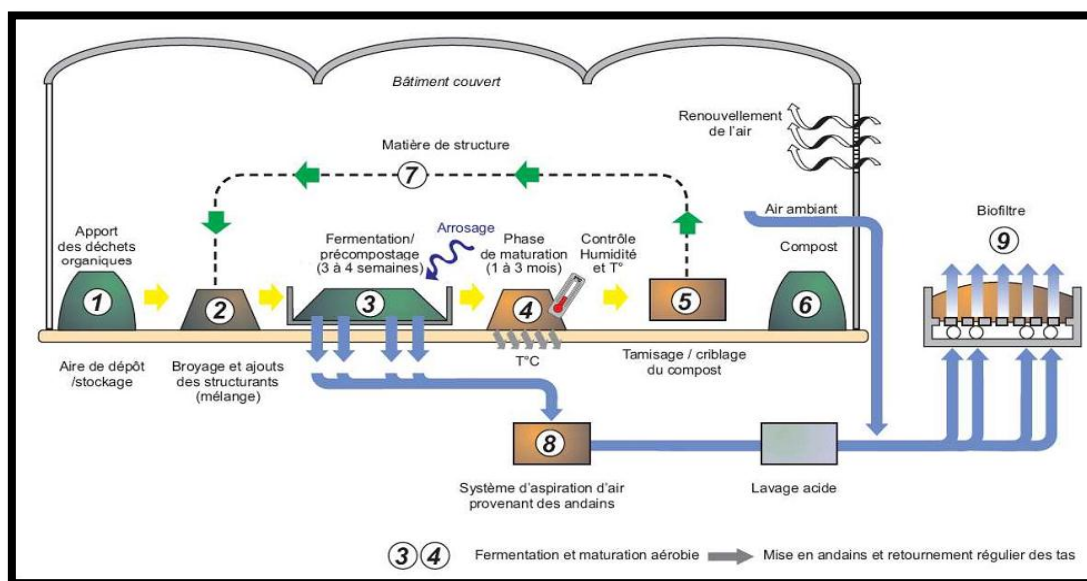


Figure 2-37: Les différentes étapes de compostage (C.G.L., 2008).

La capacité d'une station de compostage est variable entre 5000 à 100 000 t/an de déchets, les déchets concernés pour le compostage sont les déchets organiques solides (FFOM, déchets verts...) ou liquides (boues, lisiers...) (C.G.L., 2008). Il faut en particulier veiller à l'absence d'éléments chimiques indésirables qui peuvent être associés aux déchets, tels que métaux dits « lourds » (cadmium, plomb, mercure, etc.), nitrates, pesticides, hormones, antibiotiques, autres contaminants. Il est donc essentiel que les ordures ménagères organiques qui constituent avec les déchets verts un matériau de choix pour le compostage soient correctement triées.

Bien que les boues d'épuration soient considérées être des déchets non dangereux, il n'est pas licite au plan sanitaire de les utiliser pour l'épandage des sols et comme matériau de compostage, compte tenu de leur contamination par de très nombreuses substances indésirables telles qu'envisagées précédemment (Dietmann D. et *al.*, 2007).

- Les différents procédés de compostage :

Ils existent deux procédés de compostage :

- Procédé traditionnel (compostage lent) avec des retournements réguliers des andains.
- Aération forcée (compostage accélérée c'est-à-dire insufflation ou aspiration d'air dans la masse à composter) à ciel ouvert ou en milieu confiné (bâtiment fermé) (C.G.L., 2008).
- Les avantages de compostage :
- Diminution de la teneur en matière organique des Ordures Ménagères Résiduelles, pour respecter les impératifs réglementaires.
- Réduction des tonnages d'ordures ménagères résiduelles par dégradation de la matière organique et valorisation éventuelle du compost en amendement organique
- Possibilité de maîtrise des impacts sur l'environnement direct (usine relativement compacte pouvant être confinée)
- Hygiénisation par élévation de la température des déchets traités.
- Possibilité de valorisation matière du stabilisât.
- Pas d'excédent hydrique en installation couverte.

- Les inconvénients de compostage :
 - Pas de valorisation énergétique
 - Nécessité de maîtriser la composition des entrants (régularité, ratio C/N/P)
 - Importance de la préparation des déchets (criblage, broyage, tri, malaxage...)
 - Dans une moindre mesure que la méthanisation, maîtrise du process (taux d'oxygène, température, teneur en eau) (Isère C. G., 2005).
 - les déchets concernés pour le compostage sont les déchets organiques solides (FFOM, déchets verts...) ou liquides (boues, lisiers...).

□ La méthanisation :

La méthanisation est une option de valorisation. La production de méthane peut être valorisée en chaleur, en électricité ou en carburant (Dietmann D. et *al.*, 2007). La méthanisation est une opération de fermentation anaérobie réalisée dans des digesteurs, enceintes confinées et chauffées à 35° C ou 55° C, à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation assurent la décomposition de la matière organique (Mancini F., 2006). Elle s'applique préférentiellement aux déchets organiques riches en eau et à fort pouvoir fermentescible (fraction fermentescible des ordures ménagères, boues de station d'épuration, graisses et matières de vidange, certains déchets des industries alimentaires, certains déchets agricoles). Cette fermentation ou digestion produit d'une part un résidu solide, ou digestat, qui représente entre 60 et 65% des tonnages traités, et d'autre part, du biogaz composé majoritairement de méthane (60 à 65%) et de CO₂ (35 à 40%) [71].

L'objectif de ce mode de traitement est d'obtenir la stabilisation des déchets organiques tout en produisant du méthane valorisables énergétiquement. Il s'agit d'un procédé de dégradation de la matière organique par une flore bactérienne en mode anaérobie, analogue au processus de digestion animale (Chevrier B. et *al.*, 2008).

- Les étapes de méthanisation :

Les étapes de processus de méthanisation peuvent être résumées comme suit :

- Broyage et mélange des déchets organiques
- Phase de fermentation anaérobie au sein du digesteur
- Déshydratation et criblage du digestat
- Phase de maturation du digestat (stabilisation aérobie) afin de produire du compost valorisable (C.G.L., 2008).

- De plus, du fait de la présence de bactéries sulfatoréductrices au sein du digestat, les sulfates et composés soufrés sont réduits en H₂S et mercaptans (Chevrier B. et *al.*, 2008).
- Les produits générés sont :
 - Du digestat qui peut être valorisé après maturation (amendement organique)
 - Du biogaz qui peut être valorisé énergétiquement (production d'électricité et/ou de chaleur)
 - Des refus de tri (amont) et criblage (aval)
 - Des effluents provenant de la déshydratation du digestat (à recycler dans le procédé et/ou à traiter en STEP)
 - Plus d'odeurs → air vicié à traiter (lavage acide + biofiltre) (C.G.L., 20080).

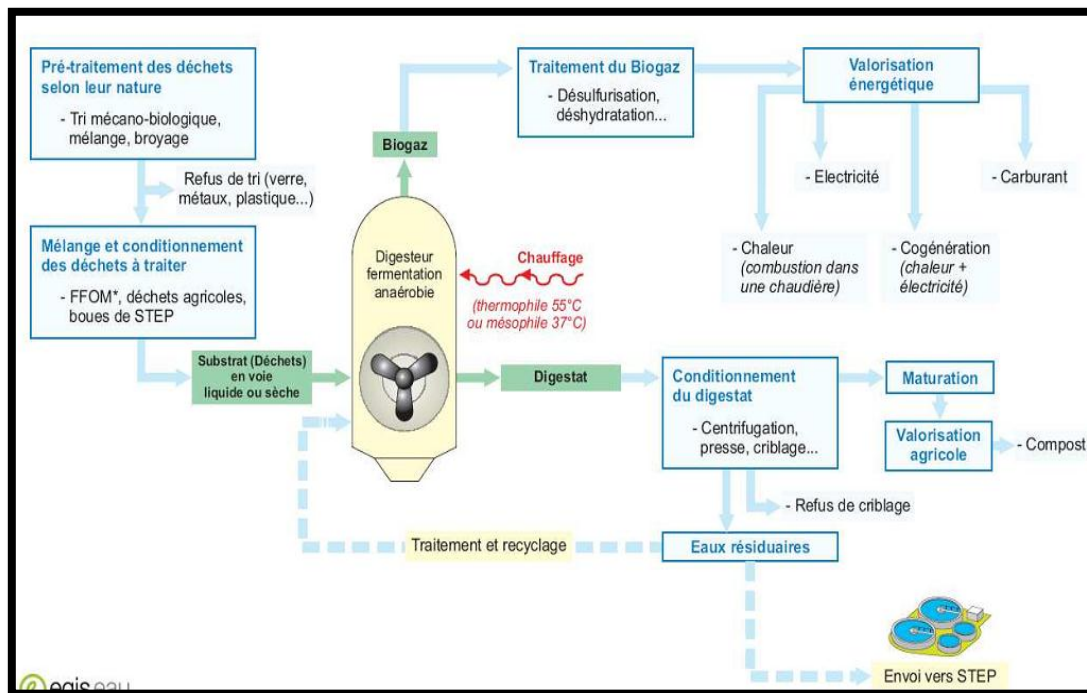


Figure 2-38: Les différentes étapes de méthanisation (C.G.L., 2008).

La capacité de traitement par méthanisation est de 30 000 à 200 000 t/an, plus rentable que le compostage pour une capacité > à 30 000 t/an. Les déchets concernés pour ce procédé sont : les déchets organiques solides (FFOM, déchets verts...) ou liquides (boues, lisiers...).

- Les différents procédés de méthanisation :
 - Voie sèche (taux de matière sèche entre 20% et 50%) ou voie liquide (taux de matière sèche < à 20%)

- Température mésophile (37°C) ou thermophile (55°C) (C.G.L., 2008).
- Avantages de méthanisation :
- Impact minimum sur l'environnement direct (usine compacte facilement confinée).
- Diminution de la teneur en matière organique des Ordures Ménagères Résiduelles, qui permet de respecter les impératifs réglementaires.
- Réduction des tonnages d'ordures ménagères résiduelles par dégradation de la matière organique.
- Valorisation des ordures ménagères résiduelles avec la production d'énergie sous forme de biogaz.
- Possibilité de valorisation matière du stabilisât avec un compostage de finition ou pas (Isère C. G., 2005).
- Inconvénients de méthanisation :
- Maîtrise de la composition des entrants (régularité, ratio C/N/P)
- Préparation des déchets (criblage, broyage, tri, malaxage, chauffage...)
- Maîtrise du process (température, potentiel Red-Ox, pH, teneur en eau)
- Gestion de l'excédent hydrique
- Maturation aérobie éventuellement nécessaire en fonction du procédé de méthanisation et des contraintes des débouchés (hygiénisation, stabilisation complémentaire) (Isère C. G, 2005).

Les tableaux suivants apportent des éléments de comparaison, en termes de technique et de coût, des procédés de compostage et de méthanisation.

Tableau 2-3: contraintes et avantages spécifiques des procédés biologiques de traitement des déchets (A.D.E.M.E., 1999 in Chevrier B. et al., 2008).

Paramètre	Compostage	Méthanisation
Nature des déchets	Tous déchets organiques à condition de disposer de d'un mélange équilibré (rapport C/N, porosité...)	Tous déchets organiques sauf ligneux (essentiellement déchets humides)
Dimension de l'installation	Possible à toutes les échelles de capacité, pas de taille minimum, et donc adapté à une gestion de proximité	Taille minimum du fait du coût des investissements (la capacité moyenne des installations existantes est de 20000 t/an de déchets. Il existe des installations de 5000 t/an)
Produits issus du traitement	Compost Gaz carbonique	Digestat Biogaz à fort pouvoir calorifique
Atouts spécifiques	Coûts d'investissement et de traitement réduits Gestion de petites quantités et de proximité	Traitement de déchets difficiles à composte (riches en eau et très fermentescibles) Meilleure maîtrise des conditions d'hygiénisation du substrat Meilleure dégradation des composés organiques volatils responsables d'odeurs Possibilité de produire de l'énergie
Contraintes spécifiques	Surface importante en cas de compostage en tas à l'air libre Risque d'odeurs	Technicité de l'installation Couplage à une unité de compostage pour traiter le digestat Recherche de débouchés pour le biogaz Gestion des eaux excédentaires et des nitrates
Atouts communs	Réduction des déchets à traiter thermiquement et à stocker Recyclage organique avec production d'amendements organiques Complémentarité possible entre différents déchets organiques	
Exigences communes	Qualité de l'amendement organique produit pour assurer les débouchés, et suivi par le biais d'un club d'utilisateurs des amendements	

Tableau 2-4: Eléments de coût des procédés biologiques de traitement des déchets (A.D.E.M.E., 1999 in Chevrier B. et al., 2008).

Compostage	Méthanisation
<p>Compostage lent : Pour les déchets verts : Coûts d'investissement : 106,7 à 198,2€ HT/tonne (700 à 1300 F) Coûts de fonctionnement : 22,9 à 45,7€ HT/tonne (150 F HT à 300 F) Dans le cadre de la FFOM (à titre indicatif) : Coûts d'investissement : 152,5 à 274,4€ HT/tonne (1000 à 1800 F) Coûts de fonctionnement : 45,7 à 76,2€ HT/tonne (300 F HT à 500 F) Compostage accéléré : Coûts d'investissement : 182,9 à 304,9€ HT/tonne (1200 à 2000 F) Coûts de fonctionnement : 53,4 à 99,1€ HT/tonne (350 F HT à 650 F) <i>Ces coûts ne sont pas représentatifs pour les petites installations (moins de 2000 tonnes/an)</i></p>	<p>Peu de références en France pour la méthanisation des ordures ménagères ; Par contre pour les boues : Les coûts d'investissement seraient de l'ordre de 6,1 à 7,6 M€ (40 à 50 MF) pour une capacité de 20000 tonnes/an. Ceux de traitement seraient de l'ordre de 61 à 152,5 € HT/tonne (400 à 1000 F) de déchets traités.</p>

C.2. Les Procédés thermiques :

Les procédés de traitement thermique de déchets sont généralement utilisés pour réduire sensiblement le volume et la toxicité des déchets, avec une production possible d'énergie et éventuellement d'une fraction à valoriser. Les principaux procédés sont l'incinération et la co-incinération, la thermolyse et pyrolyse et la gazéification. D'autres procédés thermiques sont utilisés avec des finalités spécifiques comme la vitrification, pour réduire le potentiel polluant des déchets, l'oxydation hydrothermale, pour éliminer la matière

organique des déchets liquides (boues), ou le séchage, pour réduire l'humidité des déchets [88].

□ L'incinération :

L'incinération est un traitement thermique des déchets en excès d'air et à haute température (autour de 850°C) ce qui conduit à la dégradation des déchets sous l'effet de la chaleur pour réduire leur volume et leur masse (C.G.L., 2008). L'objectif de l'incinération des déchets est de traiter les déchets de manière à réduire leur volume et dangerosité, tout en capturant (et donc en concentrant) ou en détruisant les substances potentiellement nocives qui sont, ou peuvent être, rejetées lors de l'incinération (B.R.E.F., 2006).

Aujourd'hui 90% des déchets incinérés font l'objet d'une valorisation énergétique, parmi lesquels on retrouve environ 50% de biomasse. Au cours de leur combustion, les déchets libèrent de l'énergie qui peut être utilisée sous forme de chaleur ou transformée en électricité (Mancini F., 2006) L'incinération des déchets dans des grosses installations permet de récupérer la chaleur dégagée sous forme de vapeur par le passage des fumées au travers des tubulures d'une chaudière. La vapeur produite peut :

- alimenter un réseau de chauffage urbain ou d'entreprises,
- être utilisée dans un processus de fabrication, stérilisation, etc.
- produire de l'électricité par l'intermédiaire des turboalternateurs. Les besoins de chauffage étant par nature saisonniers, une technique de valorisation énergétique produisant à la fois chaleur et électricité s'est développée : la cogénération [78].

L'incinération occupe une place ou moins importante dans le traitement des déchets. Forte en France (40 % des déchets ménagers ainsi éliminés) et dans de nombreux pays européens ou au Japon, elle l'est beaucoup moins au Québec (4 %) ou aux Etats-Unis.

Tableau 2-5: Elimination des déchets ménagers par incinération dans le monde (en % des volumes traités) (Dron,D., 1997 in Zmirou D., et al., 2003)

Japon	73	Allemagne	34
Danemark	60	Etats-Unis	15
Suède	55	Italie	6
Suisse	47	Royaume-Uni	5
France	40	Canada	4
Pays-Bas	37	Québec	4

En règle générale, la part de l'incinération est d'autant plus importante que la densité de population est forte. Cette règle connaît

cependant de nombreuses exceptions (ainsi, par exemple, de la tradition britannique d'éliminer certains déchets en haute-mer alors que le Royaume-Uni constitue le berceau de la technologie de l'incinération, apparue dès 1865). L'incinération tend toutefois à progresser de par le monde, y compris au Royaume-Uni et en Amérique du Nord (Zmirou D. et al., 2003).

- Les sous-secteurs de l'incinération :

Bien que les approches varient considérablement, le secteur de l'incinération peut être grossièrement subdivisé en plusieurs grands sous-secteurs, comme suit:

- *Incinération des déchets municipaux en mélange :* en règle générale traitement des déchets ménagers mixtes et dans une large mesure non traités, mais contenant parfois certains déchets industriels et commerciaux (les déchets industriels et commerciaux étant aussi incinérés séparément dans des incinérateurs spécialisés pour déchets industriels ou commerciaux non dangereux).
- *Incinération des déchets municipaux prétraités ou d'autres déchets prétraités :* installations qui traitent des déchets ayant fait l'objet d'une collecte sélective, d'un prétraitement ou d'une préparation quelconque, de sorte que les caractéristiques des déchets diffèrent de celles des déchets en mélange. Les incinérateurs de combustibles issus de déchets ayant fait l'objet d'une préparation spécifique relèvent de ce sous-secteur.
- *Incinération des déchets dangereux :* comprend l'incinération sur les sites industriels et l'incinération dans les installations commerciales (qui reçoivent généralement des déchets très divers).
- *Incinération des boues d'épuration :* dans certains endroits, les boues d'épuration sont incinérées séparément des autres déchets, dans des installations spécialisées, alors que dans d'autres, elles sont associées à d'autres déchets (par exemple, déchets municipaux).
- *Incinération des déchets hospitaliers :* des installations spécialisées dans le traitement des déchets hospitaliers, c'est-à-dire générés par les hôpitaux et autres centres de soins de santé, sont implantées sur le site des hôpitaux ou autres. Certains déchets hospitaliers sont parfois traités dans d'autres installations, par exemple avec les déchets municipaux en mélange ou dangereux (B.R.E.F., 2006).

- Les produits générés par l'incinération sont :
 - Des mâchefers résultant de la combustion et récupérés en sortie de four qui sont envoyés en CSDU de classe II.
 - Des fumées de combustion qui doivent être épurées (neutralisation des gaz acides, traitement des dioxines et furanes).
 - Des REFIOM provenant du traitement des fumées qui doivent être stabilisés avant leur envoi en décharge de classe I.
 - Des métaux ferreux et non ferreux valorisables provenant du déferraillage des mâchefers.

Les principaux polluants rejetés par les stations d'incinération ayant un impact sanitaire, leur effet ainsi que les principales valeurs de VTR utilisées sont synthétisées dans le tableau II.9 en annexe G.

- Les procédés d'incinération :

Il existe diverses technologies d'incinération. La nature des déchets à traiter influence directement le choix des installations (déchets domestiques, déchets industriels, déchets solides, déchets liquides) (Bicocchi S. et Antonini G., 1998). Le procédé d'incinération comporte généralement les étapes suivantes :

- l'approvisionnement des déchets, le stockage intermédiaire des déchets et éventuellement un prétraitement,
- l'enfournement,
- la combustion et la postcombustion,
- le traitement des fumées,
- la récupération énergétique,
- l'évacuation des résidus.

La capacité de traitement des stations de l'incinération est de 20 000 à 500 000 t/an, mais peu flexible par rapport aux variations une fois l'installation créée. Le procédé de l'incinération a une possibilité de traiter une large gamme de déchets (solides ou liquides, dangereux ou non dangereux).

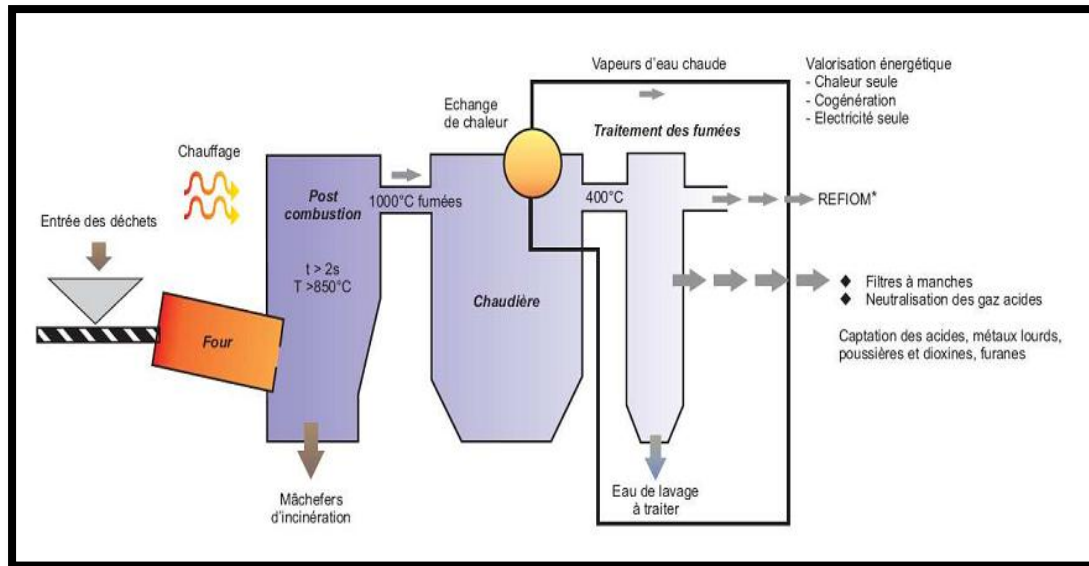


Figure 2-39: Les procédés de l'incinération (C.G.L., 2008).

- Les types de fours pour incinérateur :

Plusieurs technologies sont actuellement disponibles en ce qui concerne les types de fours d'incinération des déchets : les fours à grilles, les fours tournants et/ou oscillants et les fours à lit fluidisé, dense, rotatif, circulant [83].

- Les fours à grille : Il s'agit des fours des plus anciennes technologies qui dégagent une quantité très importante de rejets toxiques (dioxines), cendres et mâchefers, et résidus de fumées (REFIOM) [75].
- Four à « lit fluidisé dense » : Dans cette technique, les particules minérales et l'air sont injectés à la base du four. Le mélange avec les déchets, préalablement broyés avec une granulométrie de 150 mm, est concentré en partie inférieure. Les déchets sont portés à 700°. La combustion est très bonne. Il s'agit de la technologie la plus simple techniquement, adaptée à des installations de petites capacités (2 à 10 tonnes/heure), et à une large gamme de déchets (après broyage), avec une plage de PCI comprise entre 1500 kcal/kg et 6000 kcal/kg [84].
- Four à « lit fluidisé rotatif » : Le principe est le même que dans le cas précédent, avec deux modifications. D'une part, à la différence du procédé classique où l'air suit un mouvement ascendant, le lit fluidisé rotatif opère avec des injections d'air latérales réparties sur la hauteur du four. L'écart de densité du lit entre la zone centrale et les zones extérieures crée des mouvements rotatifs. D'autre part, la géométrie du four présente une sorte de goulot

d'étranglement en son milieu qui accélère la circulation du lit. Ces deux modifications permettent d'avoir un meilleur brassage et, par conséquent, une meilleure combustion. La température de combustion est d'ailleurs un peu plus faible que dans le four classique de l'ordre de 650 à 700°. Cette technique est spécialement adaptée aux déchets. Tous les types de déchets peuvent être traités (ordures ménagères, déchets industriels banals, boues, pneumatiques...). Le déferraillage et le broyage sont moins exigeants (la préparation est ramenée à une granulométrie de 300 mm). En revanche, les performances concernant les gaz polluants sont moins bonnes, et l'économie sur le prétraitement des déchets est compensée par une dépense plus importante sur le traitement des gaz [84].

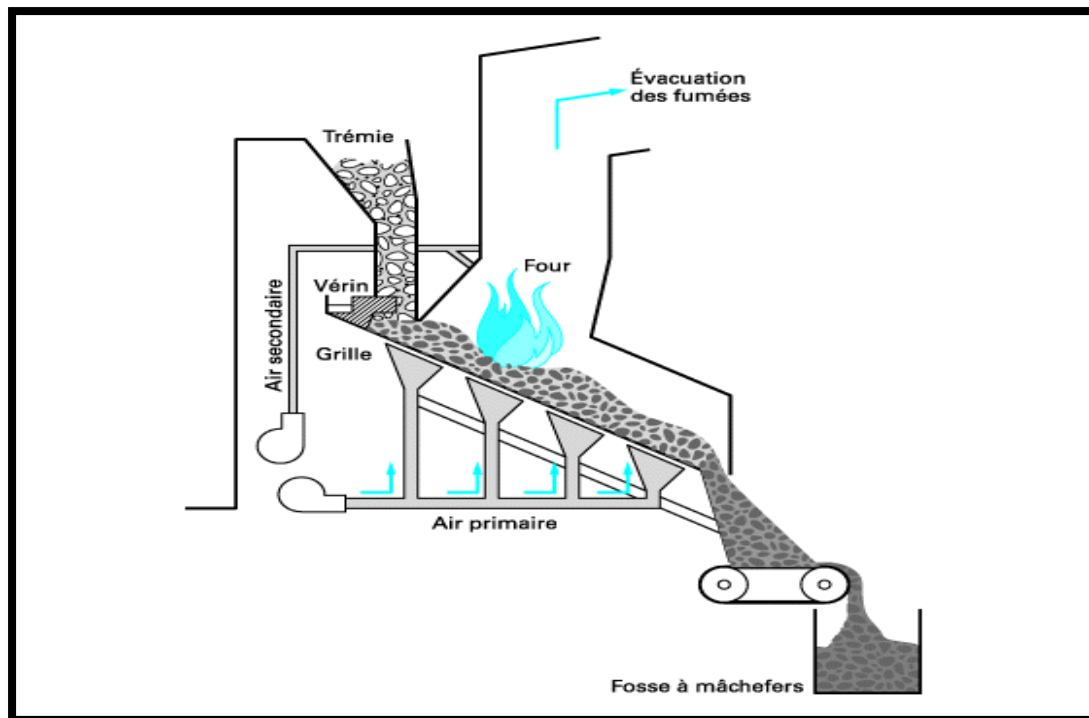


Figure 2-40: Schéma de principe d'un four à grille [83].

- Le four à " lit fluidisé circulant " : Ce troisième procédé, dit aussi " lit ascendant " présente deux caractéristiques. D'une part, l'injection d'air à la base du four se fait à une vitesse supérieure, de façon à ce que les particules soient en suspension sur l'ensemble de la hauteur du four. D'autre part, les particules de sable (auxquelles est ajoutée une injection de calcaire -carbonate de calcium-

afin de traiter en même temps le SO₂ et le HCl) qui sont évacuées avec les gaz de combustion en partie haute du four, sont récupérées dans un cyclone, puis réinjectées dans le foyer de combustion jusqu'à ce que tous les déchets soient brûlés. Cette technologie nécessite un déferraillage et un broyage fin (50 à 100 mm), ainsi qu'une extraction du verre (pour limiter l'érosion) et une température élevée (850°). Elle est adaptée aux installations d'assez forte capacité (10 à 15 tonnes/heure). Le rendement est cependant élevé avec une bonne production d'électricité, et il y a peu de mâchefers (10 %) et d'imbrûlés (3 %) [84].

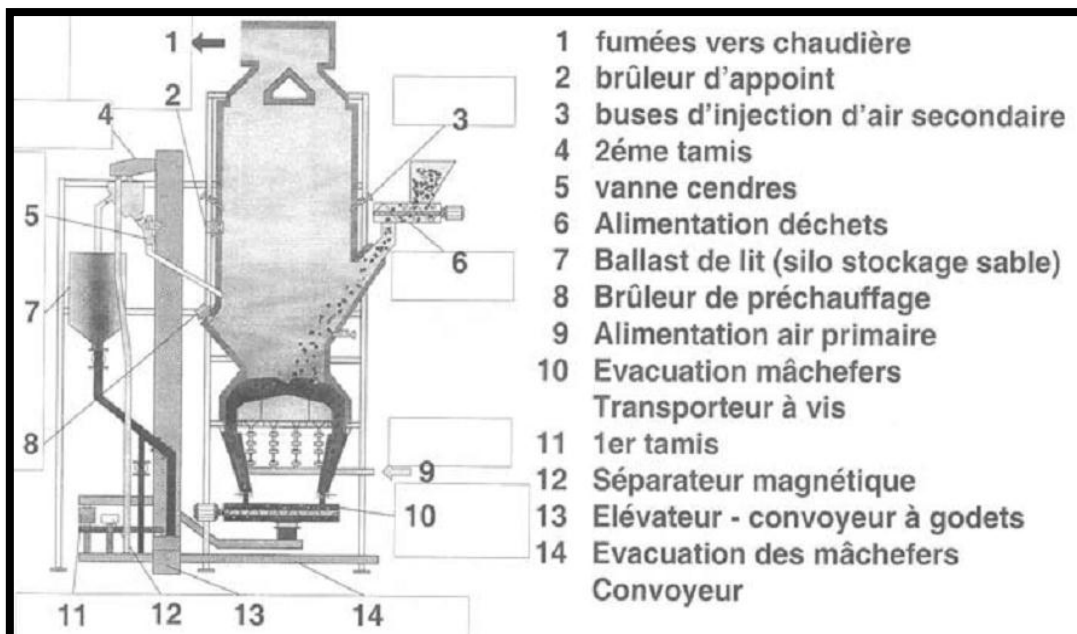


Figure 2-41: Schéma de four à lit fluidisé (Isère C. G., 2005).

- Four oscillant – rotatif : La technique du foyer oscillant présente des avantages non négligeables comparée aux foyers à grille. La diminution importante des imbrûlés gazeux et solides et la combustion sans échange de chaleur avec le milieu extérieur réduisent très sensiblement la formation de dioxines et furanes dans les gaz de combustion. La rotation alternée de la cellule de combustion assure un bon mélange des produits à incinérer et une combustion complète des déchets. L'insufflation d'une quantité d'air de combustion largement supérieure au minimum réglementaire maintient les gaz de combustion à une température voisine de 1000 °C. On constate une diminution presque totale des

imbrûlés que ce soit dans les gaz de combustion ou dans les mâchefers. Grâce à une chambre de postcombustion entièrement revêtue d'un béton réfractaire, il n'y a pas ou peu d'échange thermique avec le milieu extérieur. La disparition de parois froides assure l'homogénéité de la température des gaz en tous points et minimise la formation des dioxines [75].

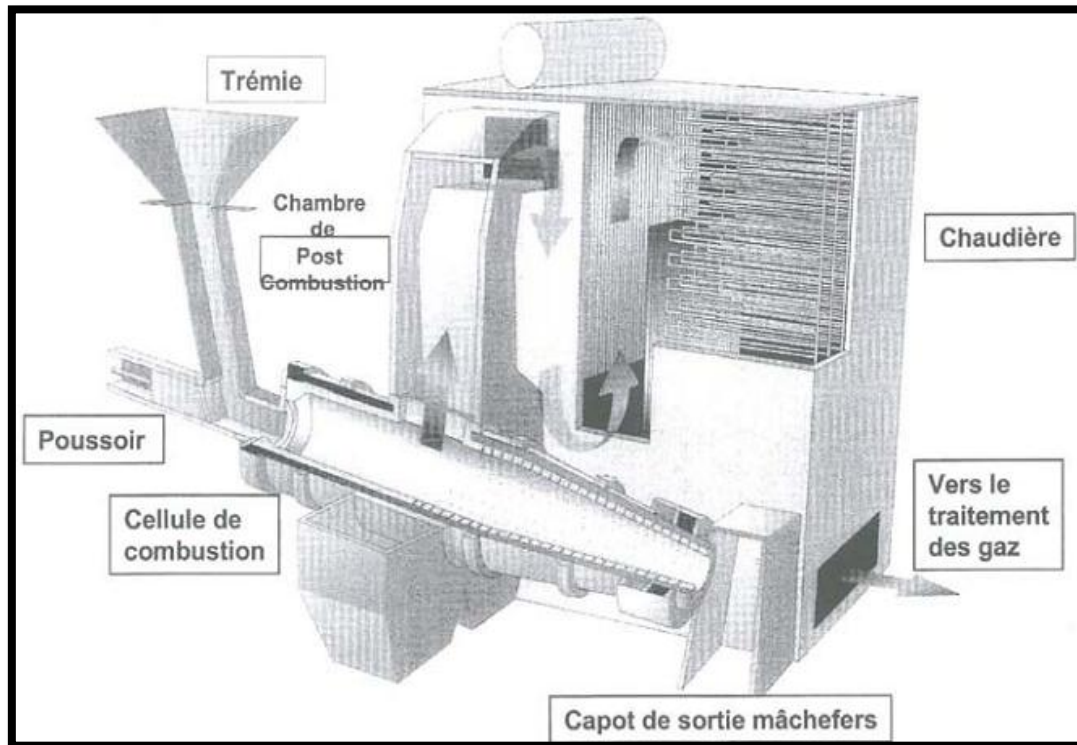
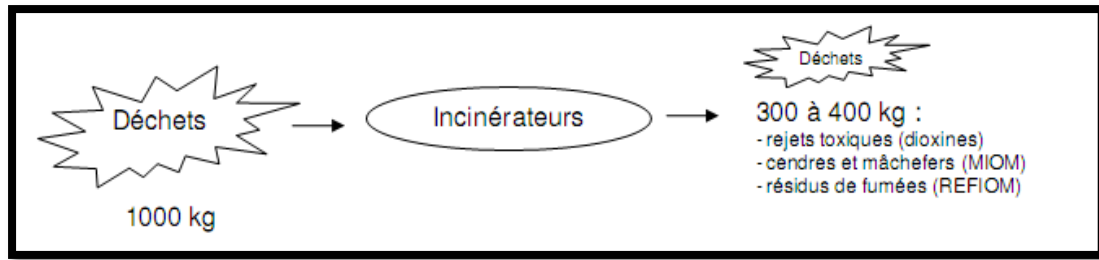


Figure 2-42: schéma de four oscillant (Isère C. G., 2005).

- Avantages et inconvénients de l'incinération [84]:

Avantages	Inconvénients
Réduction des volumes de 90%	Cendres, résidus polluants
Rapidité de traitement	Problème des seuils de rentabilité pour les petites unités
Pas de prétraitement	Production d'énergie électrique peu efficace dans la plupart des cas
Adaptation aux gros gisements	Investissements élevés
Ne produit pas de méthane	Coûts de fonctionnement en forte croissance
Possibilité de récupérer et valoriser l'énergie (économie d'énergie possible)	Empêche toute inflexion de la politique des déchets
Possibilité de récupérer les métaux	Oppositions sociales croissantes
Garantie de long terme	

Les incinérateurs ne détruisent donc pas tous les déchets car ils en produisent eux-aussi. L'incinération transforme les déchets mais ne les élimine pas [75].



□ La co-incinération :

Certains déchets industriels spéciaux peuvent être co-incinérés en substitution d'autres sources d'énergie. Il s'agit essentiellement de certains fours de cimenteries équipés de dépoussiéreurs et de traitement des gaz évacués [78].

La co-incinération n'est pas réalisée dans un incinérateur mais dans une installation dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels. La co-incinération n'est possible que dans certaines installations de production ou de combustion. En effet, l'utilisation de déchets en tant que combustible de substitution ne doit pas modifier les caractéristiques ou la composition des produits fabriqués. Elle nécessite aussi de disposer d'installations de combustion atteignant des températures suffisamment élevées pour répondre aux normes fixées. Des traitements complémentaires des fumées et des systèmes de contrôle des émissions atmosphériques sont également souvent nécessaires afin de limiter les émissions de polluants atmosphériques aux seuils légaux prescrits [71].

Les déchets utilisés sont surtout les huiles usées, les pneus usagés et, dans une moindre mesure, les résidus de bois, de boues de curage, de plastique... [84].

□ Thermolyse ou pyrolyse :

La thermolyse consiste en un traitement thermique à température modérée (450 à 750 °C) en absence d'air ou d'oxygène (Mancini F., 2006). Ce procédé produit :

- Un gaz combustible (200 à 300 kg par tonne de déchets traités) composé d'un mélange complexe d'hydrogène, de méthane, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures gazeux divers.
- Un solide appelé "coke" ou "charbon" (150 à 300 kg/tonne de déchets) où se concentrent tous les métaux lourds.
- Parfois des hydrocarbures ou goudrons (40 à 200 kg/tonne déchets).

- Des résidus ultimes à mettre en décharge (100 kg/tonne déchets).
- Des inertes formés de verre, de ferrailles, de gravats (200 kg/tonne déchets) [80].

Si la vitesse de dégradation pyrolytique dépend du type de déchet, la répartition des produits de cette réaction peut être estimée à partir du niveau de température, de la vitesse de chauffe ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) imposés par le chauffage externe ainsi que du temps de séjour de la matière dans le réacteur.

La pyrolyse peut être un procédé intéressant pour valoriser certains déchets et résidus agricoles (pailles et rafles de maïs, bagasse, écorces, déchets de bois, coques de noix de coco, d'anacarde, de cacahuètes, tourteaux, etc.) [82].

- Avantages de thermolyse :
 - Valorisation énergétique,
 - Installation de traitement des fumées plus simple et volume émis plus faibles (moitié de la combustion),
 - Moindre production de Dioxines et NO_x ,
 - Meilleure valorisation des métaux non oxydés,
 - Adaptation à des unités de taille moyenne,
 - Possibilité de traiter d'autres déchets que les OM.
- Inconvénients de thermolyse :
 - Préparation préalable des déchets,
 - Devenir de la fraction carbonée non identifié,
 - Avantages limités, si la fraction carbonée doit être incinérée sur le site,
 - Coût final encore mal maîtrisé (cas du lot, où les réponses des candidats dépassaient fortement le coût d'objectif),
 - Investissement lourd,
 - Fonctionnement économiquement intéressant pour de grosses capacités uniquement,
 - Procédés énergivores (Isère C. G., 2005).

□ Gazéification :

La gazéification est un traitement thermique en défaut d'air et à haute température (850°C à 1000°C). Résulte en deux étapes : une étape de pyrolyse suivie d'une étape de gazéification. Ces deux étapes peuvent être réalisées dans la même enceinte thermique ou dans deux

réacteurs séparés. L'étape de pyrolyse produit des matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux (goudrons) et du coke, essentiellement constitué de carbone fixe. Les hydrocarbures et le carbone fixe sont convertis en gaz combustible (CO , H_2), dans la seconde étape, dite de gazéification, par réactions thermo-chimiques, en présence d'un agent gazeux de gazéification (air, O_2 , H_2O).

Les procédés actuels de gazéification des déchets visent essentiellement, non pas la production de gaz de synthèse, considérés comme matière première pour l'industrie chimique, mais la destruction thermique de ces déchets, avec valorisation du contenu énergétique des gaz combustibles produits [81]. Le PCI du gaz produit dépend évidemment du type de déchet mais aussi et surtout de l'agent gazéifiant et de la température [82].

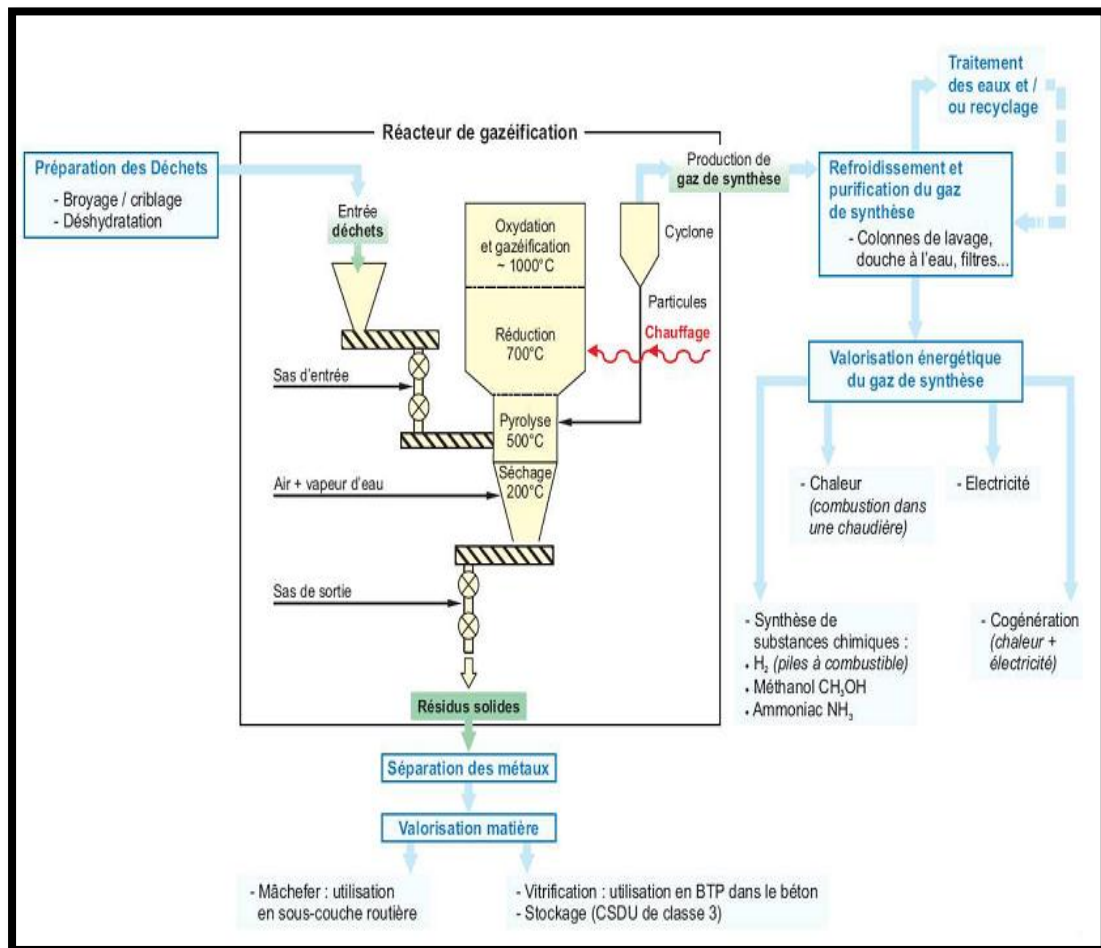


Figure 2-43: les procédés de gazéification (C.G.L., 2008).

La capacité variable de 10 000 à 200 000 t/an, ce procédé peut traiter des déchets solides contenant une fraction combustible (refus de tri combustibles, DIB, biomasse, OM, ...).

□ Vitrification :

La vitrification consiste à chauffer les déchets à traiter jusqu'à leur fusion (classiquement, à partir de 1400°C). La fusion à haute température des composants propres du déchet et d'éventuels ajouts complémentaires conduit à une fixation physico-chimique des polluants dans une matrice vitreuse. La définition d'un vitrifiat peut-être donnée comme suit : « Un vitrifiat est un solide obtenu par refroidissement d'un liquide surfondu, et pouvant contenir une proportion plus ou moins importante de phases cristallisées. La proportion entre phases vitreuses et phases cristallisées dépend de la composition et du mode de refroidissement du liquide » [89].

La vitrification des résidus d'incinération par torche à plasma est une fusion du déchet qui est alors transformé en verre (Borderes A., 2000). La torche à plasma peut être utilisée pour porter à haute température des déchets ayant peu ou aucun pouvoir calorifique tels que les déchets dangereux d'amiante ou les Résidus REFIOM. La température atteinte permet de fondre les déchets qui, après refroidissement, se présentent sous forme d'un vitrifiat. L'enjeu est d'obtenir un déchet non dangereux, soit par destruction de la dangerosité du déchet (fusion des fibres d'amiante), soit par immobilisation dans le verre de constituants dangereux tels que les métaux lourds. Une caractérisation de cette absence de danger est néanmoins nécessaire afin de définir l'exutoire final : valorisation ou stockage [88].

• Les produits générés par la vitrification :

- Du vitrifiat résultant de la fusion des déchets et formé après refroidissement brutal du liquide en fusion, c'est un produit inerte qui peut être envoyé en décharge de classe III ou utilisé comme matériau de remblai ou agrégat pour le BTP.
- Des fumées de combustion qui doivent être épurées (neutralisation des gaz acides,...).
- Des résidus provenant du traitement des fumées qui doivent être stabilisés avant leur envoi en décharge de classe I (C.G.L., 2008).

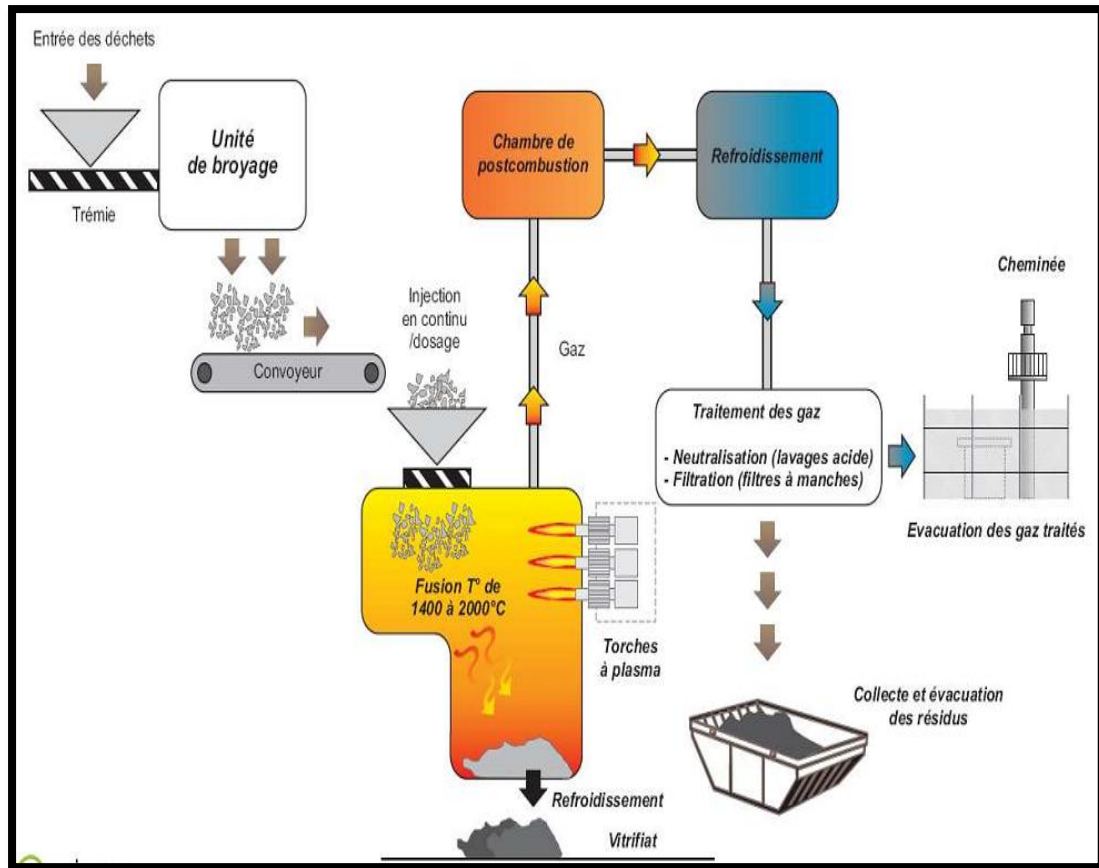


Figure 2-44 : les procédés de vitrification (C.G.L., 2008).

La vitrification peut traiter les déchets dangereux de type REFIOU, déchets d'amiante, déchets radioactifs/résidus de gazéification.

- Les avantages de vitrification :
 - La vitrification assure également la garantie totale de destruction des dioxines et furanes présentes dans ces résidus.
 - Le verre obtenu est une matière première secondaire intéressante notamment dans le domaine du bâtiment et des travaux publics de voirie (Borderes A., 2000).
 - Réduction de volume (15% du volume initial pour les REFIOU)
 - Les inconvénients de vitrification :
 - Consommation d'énergie
 - Emissions gazeuses lors du traitement
 - Coût très élevé (350 à 650 €/t) (Isère C. G., 2005).

□ Torches à plasma :

L'incinération produit un grand nombre de cendres qui nécessitent un entreposage sécurisé pour ne pas contaminer les couches aquifères souterraines. Jusqu'à récemment l'entreposage en lieu sûr des cendres était un problème important. Au milieu des années 90, des expériences en France et en Allemagne ont été conduites en utilisant des torches plasma pour faire fondre les cendres d'incinérateur en blocs vitreux inertes, cette application est réalisable en production. Les cendres d'incinérateur ont aussi été chimiquement séparées en lessive et en d'autres produits chimiques utiles. Ce procédé de fusion plasma des déchets est maintenant commercialisé et est utilisé pour transformer les déchets existants et les décharges en gaz et en gravats pour construction [85].

Le plasma thermique consiste en un milieu gazeux, partiellement ionisé, réducteur ou oxydant, porté à températures élevées (3 000-8 000 ° C) par décharge d'arc appliqué dans un gaz en mouvement, à partir d'une électrode (torche à arc transféré), ou entre deux électrodes (torche à arc soufflé). Cette technique de traitement de déchets par torche à plasma, par les températures élevées mises en œuvre, et la forte réactivité thermochimique du gaz plasmagène utilisé en atmosphère oxydante, permet la destruction thermique poussée de molécules organiques particulièrement récalcitrantes, telles que les composés organochlorés [86].

• Applications de la technologie plasma au traitement des déchets :

Les possibilités offertes par la technologie plasma (hautes températures, fort pouvoir oxydant ou réducteur, ...) ouvrent sur un large éventail de traitement des déchets. Les systèmes à plasmas d'arc pouvant être utilisés sont de type arc soufflé (adaptés au traitement des liquides et des gaz), ou de type arc transféré (adaptés au traitement des solides et des liquides). De nombreux procédés destinés au traitement de déchets non radioactifs sont arrivés à maturité :

- destruction de déchets chimiques et plus particulièrement les déchets organohalogénés : PCB, gaz de combat, défoliant, pesticides (Bruce K. R. et *al.*, 1998).
- incinération de déchets spéciaux tels certains déchets hospitaliers contaminés (Springer M. D. et *al.*, 1995).

- vitrification des résidus d'épuration des fumées issues de l'incinération des ordures ménagères) (Cerqueira N. et *al.*, 2002), (Guihard B., 2002).
- extraction des platinoïdes des pots d'échappements catalytiques usés (Barthelemy B., 2003).
- vitrification des sols contaminés par action in-situ (Circeo L. J. et *al.*, 1994).
- recyclage des métaux nobles des poussières d'aciérie électrique (Barcza N. A. et *al.*, 1993).
- inertage des déchets très réfractaires contenant de l'amiante (isolants thermiques, joints hautes températures, ...) (Guihard B., 2002).
- valorisation de l'aluminium contenu dans les crasses de l'industrie de l'aluminium (Meunier J. et *al.*, 1996).

- Les inconvénients :

Les principaux inconvénients que l'on peut rencontrer dans le domaine du traitement des déchets par voie plasma sont dus à leurs caractéristiques particulières, paradoxalement les mêmes qui apportent les avantages de leur utilisation :

- les hautes températures atteintes peuvent occasionner une volatilité importante de certains métaux ou éléments contenus dans le bain lors de l'utilisation des plasmas en vitrification ou en chauffage des répartiteurs de coulée d'aciéries,
- La formation de certains composés indésirables est également possible du fait de la très grande réactivité chimique du milieu, ce sont par exemple les oxydes d'azote formés dans un plasma contenant de l'azote et de l'oxygène (Barthelemy B., 2003).

- Les avantages :

Les températures atteintes dans les plasmas thermiques sont très élevées et les enthalpies massiques des gaz sont grandes. Les vitesses des réactions chimiques sont donc extrêmement rapides et les efficacités des procédés sont considérablement accrues.

Parce que les mélanges sont très réactifs, les débits de gaz utilisés sont faibles, les réacteurs plasmas sont donc de petites tailles et les dimensions des unités aval de traitement des gaz sont réduites. Ceci est un atout majeur pour certaines applications, notamment dans le domaine des déchets

radioactifs où les tailles des installations doivent être minimales. La petite taille des réacteurs diminue également leur inertie thermique. Pour ces raisons, les débits traités, rapportés à la taille des réacteurs plasmas, peuvent être importants.

Parce que le choix des gaz plasmagènes, qui peut être le réactif chimique, est quasiment illimité (classiquement : argon, hélium, azote, hydrogène, oxygène, ... mais aussi vapeur d'eau), tous les types de traitement chimique peuvent être envisagés (nitruration, réduction, combustion, ...).

La température du plasma est indépendante de sa composition ; on peut donc par exemple générer des milieux réducteurs à très haute température.

Le plasma est aussi un procédé allothermique, c'est-à-dire que l'énergie est apportée au sein même du milieu réactionnel et non pas au travers d'une paroi.

Toutes ces particularités physiques confèrent aux procédés plasmas une grande souplesse d'utilisation et une importante flexibilité. La gamme de déchets susceptibles d'être concernés par un traitement plasma est très large. De plus, plusieurs étapes du traitement des déchets peuvent être envisagées dans un unique réacteur contrairement aux procédés conventionnels, c'est par exemple le cas de la combustion/vitrification de déchets radioactifs dans un réacteur à plasma d'arc transféré sur un bain de verre (Barthelemy B., 2003).

□ Oxydation hydrothermale (OHT) :

L'oxydation hydrothermale est une réaction d'oxydation à l'état liquide sous haute pression et température élevée qui s'apparente à une combustion sans flamme, la matière organique contenue dans les déchets est oxydée en CO_2 et H_2O (C.G.L., 2008).

• Les différents types d'oxydation hydrothermale :

Ils existent deux types d'oxydation hydrothermale

- Oxydation sous-critique : Les procédés d'oxydation sous-critique se déclinent en deux sous familles : les procédés d'oxydation diphasique (ou Oxydation par Voie Humide OVH) dans les domaines de température : $150 \leq T \leq 325^\circ\text{C}$ et de pression : $2 \leq P \leq 20$ MPa. Et les procédés d'oxydation homogène avec des températures $<$ à 370°C et des pressions $>$ à la pression d'équilibre liquide-gaz. Ils se distinguent par la présence ou non

d'une phase gazeuse (contenant en particulier l'oxydant) en équilibre avec la phase aqueuse contenant la matière organique à oxyder (Mancini F., 2006).

- Oxydation supercritique : Le procédé d'oxydation supercritique consiste en une oxydation de la charge organique dans des conditions de température et de pression dites supercritiques : $P \geq 22,1 \text{ MPa}$ et $T \geq 374^\circ\text{C}$. Les domaines de pression et de température classiquement utilisés sont respectivement de $23 \leq P \leq 35 \text{ MPa}$ et $380 \leq T \leq 600^\circ\text{C}$. Dans ces conditions, une seule phase fluide existe dans l'enceinte réactionnelle, les transferts de masse ne sont plus ainsi un facteur limitant. Par ailleurs, la température élevée assure des cinétiques de réaction d'oxydation rapides. Tout cela conduit à des taux de destruction de l'ordre de 99% pour des temps de séjour inférieurs à la minute (Mancini F., 2006).

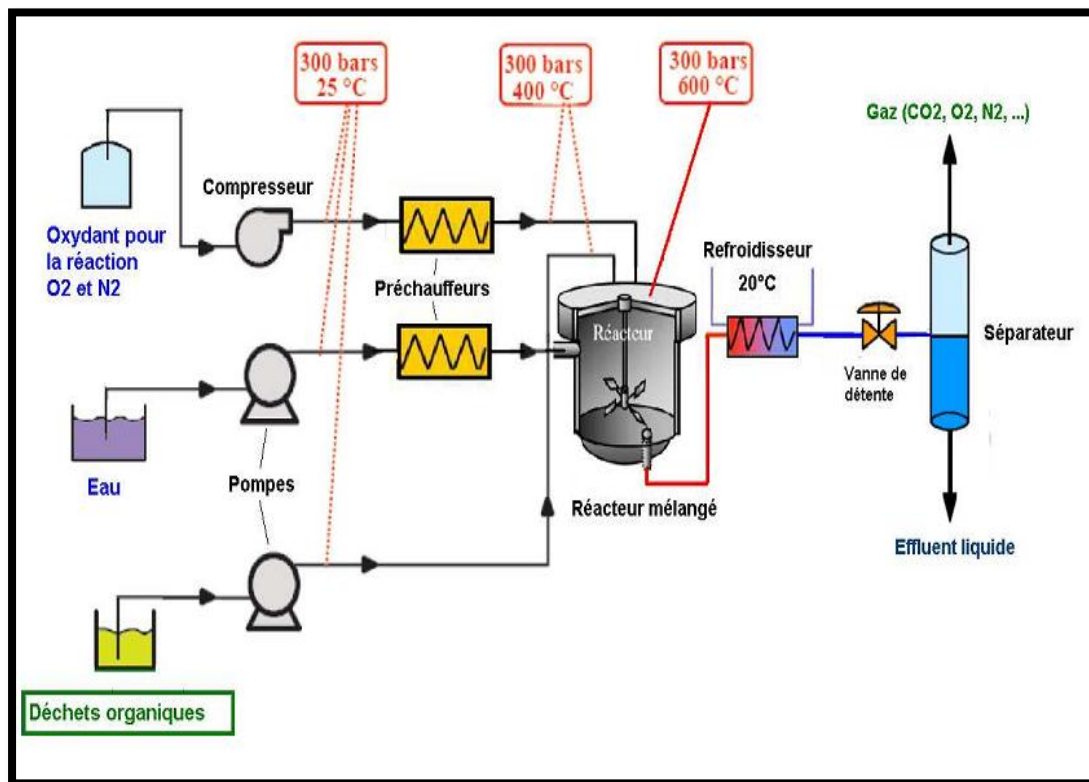


Figure 2-44: Les différentes étapes d'OHT (C.G.L., 2008).

Les déchets concernés par ce procédé sont les déchets ou les effluents contenant une forte proportion d'eau et de matière organique :

- Boues urbaines et industrielles
- Eaux de procédés
- Effluents liquides (aqueux)

- Certains déchets dangereux liquides
- Déchets organiques très aqueux
- Avantages et Inconvénients d'OHT :

L'OHT est un nouveau procédé de destruction de composés organiques qui donne à priori des résultats intéressants. En moins d'une minute, le déchet organique (dilué entre 2 et 15% dans l'eau) est totalement oxydé. Néanmoins, c'est un procédé consommateur d'énergie (haute pression + haute température) (C.G.L., 2008).

Le tableau II.10 en annexe H apporte des éléments de comparaison, en termes de technique des traitements thermiques.

C.3. Stockages aux Centres d'Enfouissement Techniques (CET):

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de s'en débarrasser, et encore la plus courante dans la plupart des pays. Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets ; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront.

Les anciennes carrières ou celles mal gérées peuvent avoir de forts impacts sur l'environnement, comme l'éparpillement des déchets par le vent, l'attraction des vermines et les polluants comme les lixiviats qui peuvent s'infiltrer et polluer les nappes phréatiques et les rivières. Un autre produit des décharges contenant des déchets nocifs est le biogaz, la plupart du temps composé de méthane et de dioxyde de carbone, qui est produit lors de la fermentation des déchets.

Pour plus des détails sur la qualité des lixiviats dans les décharges d'ordures ménagères et déchets industriels on se réfère au tableau II.11 en annexe I.

Les caractéristiques d'une décharge moderne sont des méthodes de rétention des lixiviats, tels que des couches d'argile ou des bâches plastiques. Les déchets entreposés doivent être compactés et recouverts pour éviter d'attirer les souris et les rats et éviter l'éparpillement. Beaucoup de décharges sont aussi équipées de systèmes d'extraction des gaz installés après le recouvrement pour extraire le gaz produit par la décomposition des déchets. Ce biogaz est souvent brûlé dans une chaudière pour produire de l'électricité. Il est même préférable pour l'environnement de brûler ce gaz que de le laisser s'échapper dans l'atmosphère, ce qui permet de consommer le méthane, un gaz à effet de serre encore plus nocif que le dioxyde de carbone. Une partie de ce biogaz peut aussi être utilisé comme carburant.

Certains futurologues ont déclaré que les décharges seront les « mines du futur » : comme certaines ressources s'appauvrissent, on pourra justifier

qu'il est nécessaire de les extraire des décharges où elles avaient été enfouies considérée alors comme non valorisable [77].

Le stockage des déchets en décharges contrôlées (ou centres d'enfouissement technique [CET]) représente l'étape finale de toute filière de traitement des déchets ménagers ou industriels (Zmirou D. et *al.*, 2003).

❑ Les étapes à faire dans CET :

- Le stockage se fait dans des casiers « imperméables », recouverts en fin d'exploitation d'argile et de terre.
- Récupération obligatoire des lixiviats provenant de la décomposition des déchets et du passage des eaux de pluie à travers le massif de déchets, ce lixiviats doit être traité dans les STEP.
- Récupération des biogaz produits par la fermentation des déchets et brûlage en torchère ou valorisation énergétique (ex : production d'électricité dans des moteurs, cogénération,...)

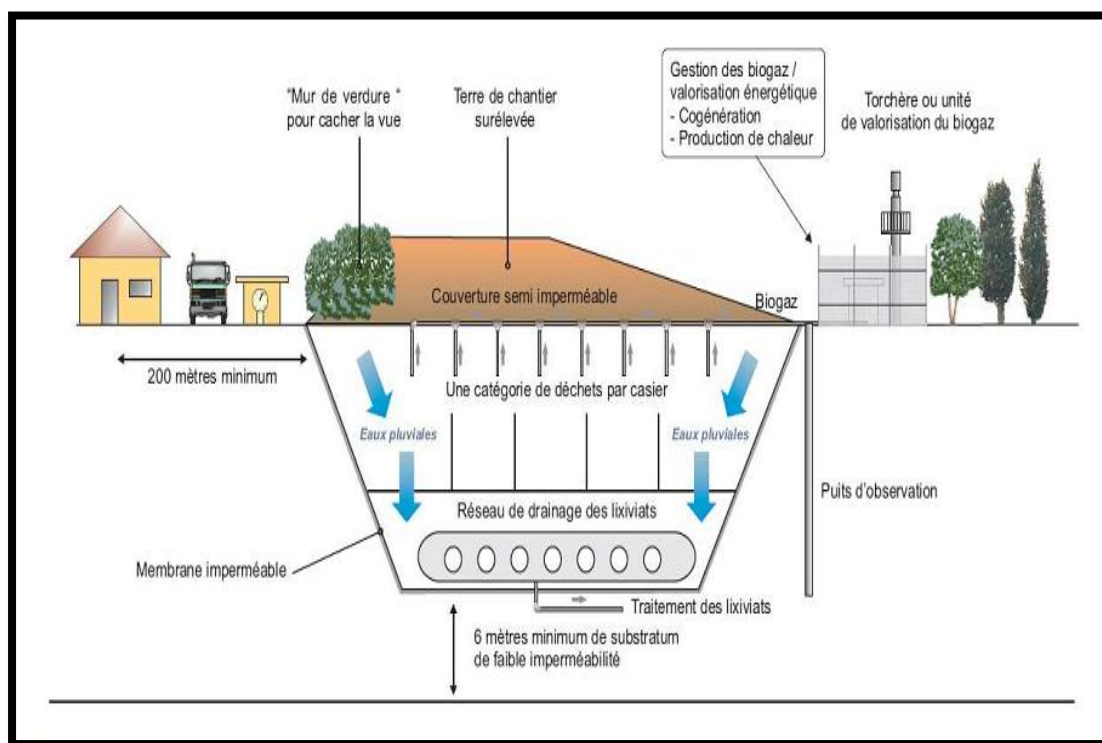


Figure 2-45: Le stockage dans un Centre d'Enfouissement Technique (C.G.L., 2008).

La capacité de stockage est variable entre 20 000 à 100 000 t/an (voire plus) et durée d'exploitation ~20 ans.

□ Les types de centres de stockage :

Ils existent 3 classe de CET sont déterminées selon la nature des déchets :

- Les sites de classes I : imperméables (5 m de sol à perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s), sont autorisés pour des résidus ultimes et stabilisés de traitement des déchets (REFIOM, résidus de traitement physico-chimique de déchets industriels spéciaux).
- Les sites de classes II sont imperméables (la définition étant une percolation de l'eau à une vitesse inférieure à 10^{-9} m/s sur au moins un mètre de sol de type argileux) et sont autorisés pour le dépôt d'ordures ménagères et déchets assimilés (y compris mâchefers).
- Les sites de classes III, perméable, ne sont autorisés que pour des matériaux inertes (gravats).

Dans tous les cas, l'exploitant d'une décharge doit s'assurer que les déchets qu'il reçoit répondent aux spécifications techniques de sa catégorie de site (avec contrôle d'échantillons en laboratoire à l'entrée du site), l'utilisateur de la décharge ayant dû au préalable obtenir une autorisation d'envoi des déchets et assurer la traçabilité des déchets apportés. Toutes ces informations sont enregistrées par l'exploitant du site et communiquées aux services administratifs de contrôle (Zmirou D et al., 2003).

□ Avantages des CET :

Parmi les avantages on peut citer :

- Une solution d'élimination qui reste souvent la moins coûteuse.
- Un procédé très souple concernant les flux d'entrées (les casiers se remplissent plus ou moins vite sans conséquences importantes sur la technique) [90].

□ Inconvénients de CET :

Au titre des inconvénients figurent notamment :

- Une surface d'occupation de terrain importante.
- Des impacts à long terme encore souvent mal connus.
- L'absence de valorisation matière.

- Une valorisation possible du biogaz mais souvent sous forme électrique car les sites sont éloignés des centres urbains et donc la valorisation thermique est difficile [90].
- Les installations de stockage des déchets impactent de façon notable sur l'environnement :
 - Sur la qualité de l'air : émissions de gaz à effet de serre, particules solides, COV, bio aérosols....
 - Sur la qualité de l'eau, en cas de fuite ou de mauvais traitement des lixiviats.
 - Sur les ressources locales : occupation à long terme de terrain.
 - Elles présentent également des nuisances (odeurs, trafic, bruit, envol de déchets...) et peuvent entraîner des risques sanitaires pour les riverains et les travailleurs sur le site (Nièvre., 2002).

Pour de plus amples informations, nous donnons, en annexe J, des graphes pour la comparaison des coûts de différentes méthodes utilisées pour la gestion des déchets.

2.2.2. LA DEPOLLUTION DES SOLS :

La dépollution des sols ou décontamination des sols consiste principalement à rendre le sol et le sous-sol d'une zone apte à un nouvel usage industriel ou un usage résidentiel, voire dans les cas extrêmes apte à un retour à la nature ou à un usage agricole, après qu'il eut été pollué par une activité ou un accident industriel. En effet, la présence de polluants dans le sol pose un problème de toxicité dès lors que ces polluants migrent (sous l'effet de l'écoulement des eaux, de la manipulation de la terre, de plantations) et se retrouvent dans la chaîne alimentaire ou entrent en contact avec l'homme. Par ailleurs, même si le danger pour l'environnement lié à la pollution d'un site n'apparaît pas comme immédiat, on peut vouloir le dépolluer pour le valoriser (en zone constructible par exemple) en réduisant le risque qu'il fait courir aux futurs utilisateurs.

Il existe différentes méthodes permettant d'extraire les polluants présents dans le sol. Elles dépendent du type de polluant (hydrocarbures, métaux lourds, produits chimiques divers, etc.) et de la nature du terrain (perméable ou non, granuleux, présence d'eau, etc.)[58].

2.2.2.1. CRITERES DE CHOIX D'UNE METHODE DE DEPOLLUTION :

Une fois le site bien caractérisé du point de vue hydrogéologique et de concentration de polluant, les alternatives à mettre en œuvre pour la dépollution de sol

peuvent être choisies [5]. L'étude de faisabilité et la proposition d'une filière de décontamination représentent une démarche complexe, faisant intervenir de nombreux facteurs souvent contradictoires et qui consistera à résoudre les difficultés suivantes :

- Choisir la solution technique la mieux adaptée pour résorber la pollution constatée,
- En se basant sur un diagnostic préliminaire le plus exhaustif possible et sur une analyse de risque précise,
- En combinant dans la plupart des cas, plusieurs techniques en séquence pour tenir compte de la variabilité pouvant être observée à tous les niveaux (produits, concentration, milieu...),
- Et « last but not least », en faisant prendre conscience à toutes les parties impliquées que les opérations de dépollution représentent toujours des coûts élevés, et demandent le plus souvent des temps d'intervention relativement longs [65].

Les différents procédés, qui font appel à des traitements thermiques, biologiques ou chimiques impliquent de coûts dont une estimation est fournie dans le tableau suivant (Emilian K., 2004).

Tableau 2-6: Coût de différentes méthodes de dépollution (Emilian K., 2004).

Procédé	Coût (\$ / m ³)
Sur / hors sites	
Lavage	150 à 200
Extraction	100 à 175
Solidification	100 à 150
Vitrification	200 à 300
Incinération ou pyrolyse	100 à 400
Bio terre (andains)	75 à 100
Mise en décharge contrôlée	100 à 350
Bioréacteurs	50 à 100
In situ	
Lavage	60 à 100
Traitement biologique aérobie	25 à 30
Venting	10 à 40
Confinement	
Enceinte de confinement	80 à 170
Barrière électrocinétique	75 à 300
Phytoremédiation	
Phytoextraction	0,03 à 2,2

2.2.2.2. TECHNIQUES DE DEPOLLUTION DES SOLS :

La sélection de la méthode de dépollution la plus appropriée dépend du type de pollution, mais aussi des caractéristiques du site, des concentrations en

contaminants, et surtout du devenir du site. (Mulligan. et *al.*, 2001). La décontamination et la réhabilitation des sols pollués doit donc passer par une définition des objectifs, de la faisabilité et des risques du ou des traitements (Bourrelier et Berthelin., 1998). En fonction de la pollution et des caractéristiques du site, trois variantes de mise en œuvre existent pour les différentes catégories de traitement :

- *les traitements in situ* : les sols sont traités en place sans être excavés ou pompés,
- *les traitements sur site* : les sols pollués sont traités, après excavation ou pompage, dans une installation présente sur le site,
- *les traitements hors site* : les sols pollués sont enlevés et traités dans une installation extérieure au site (centre de traitement).

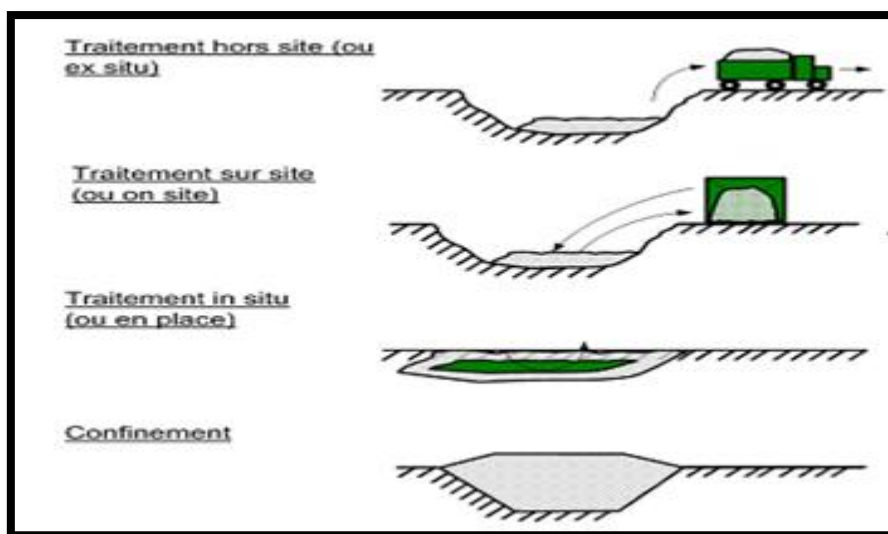


Figure 2-46: Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (Colombano S et al. 2010).

Les techniques de dépollution peuvent être classées en trois catégories principales :

- les traitements physico-chimiques,
- les traitements thermiques,
- les traitements biologiques [59].

A. Les traitements physico-chimiques :

A.1. Excavation des sols :

L'excavation de sols contaminés, et plus généralement de matériaux solides, reste la méthode la plus simple à mettre en œuvre qui permet de supprimer rapidement une source de pollution sur un site. Outre sa rapidité d'exécution, elle offre aussi l'avantage d'être radicale, l'opération s'arrêtant lorsque la totalité de la pollution a été évacuée (Lecomte P., 1998). L'excavation ne constitue pas un procédé de traitement en tant que tel ; elle doit être accompagnée d'actions complémentaires afin de traiter et/ou stocker

les terres excavées. Elle ne constitue donc qu'une phase préliminaire de traitement/réhabilitation (Colombano S et *al.*, 2010).

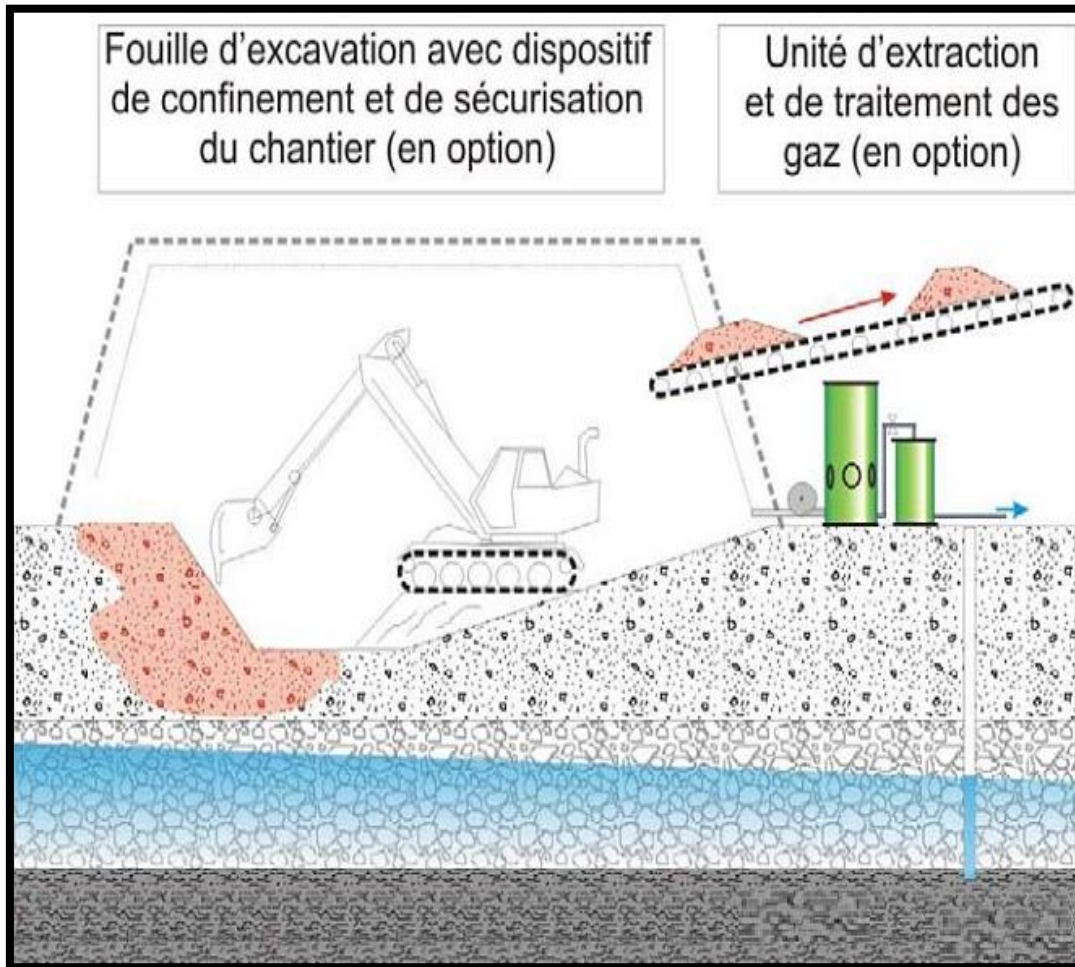


Figure 2-47 : Schéma de principe de l'excavation (Colombano S et *al.* 2010).

Tous les types de sols pollués peuvent faire l'objet d'excavation (quelque soit la granulométrie et la teneur en polluants). D'une manière générale, seules les sources de pollution situées en zone vadose font l'objet d'une excavation. L'excavation des sols, surtout en zone saturée, doit s'accompagner de mesures adéquates (suivi des eaux souterraines, piège hydraulique, confinement ...) afin de ne pas générer une remobilisation de la pollution. La technique est radicale et présente une garantie de résultats. Son efficacité est très dépendante de la précision des investigations de terrain (Colombano S et *al.* 2010).

□ Objectifs :

La dépollution des sols par excavation vise un objectif double :

- l'élimination des terres contaminées ;
- le remblaiement avec du matériau sain [67].

A.2. Solidification/Stabilisation :

Les procédés de solidification et de stabilisation ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. Les polluants sont soit liés physiquement, soit inclus dans une matrice stabilisée, soit liés chimiquement. Il convient de distinguer la solidification et la stabilisation qui sont deux procédés distincts et qui ont pour but de diminuer la fraction mobile des sols :

- La solidification : la solidification consiste à lier physiquement ou à emprisonner les polluants au sein d'une masse stable, dure et inerte. La solidification doit être appliquée sur l'ensemble de la matrice polluée. L'objectif est de réduire le contact eau/polluants en agissant principalement sur la diminution de la porosité (réduction de la perméabilité).
- La stabilisation : il existe deux modes de stabilisation :
 - la transformation chimique d'un polluant lessivable en un composé peu ou non soluble,
 - l'augmentation des capacités de sorption du polluant avec les matériaux par mélange avec différents adjuvants afin de les rendre moins mobilisable.

Dans tous les cas, les polluants ne sont pas détruits, mais leur impact potentiel sur l'environnement est fortement diminué.

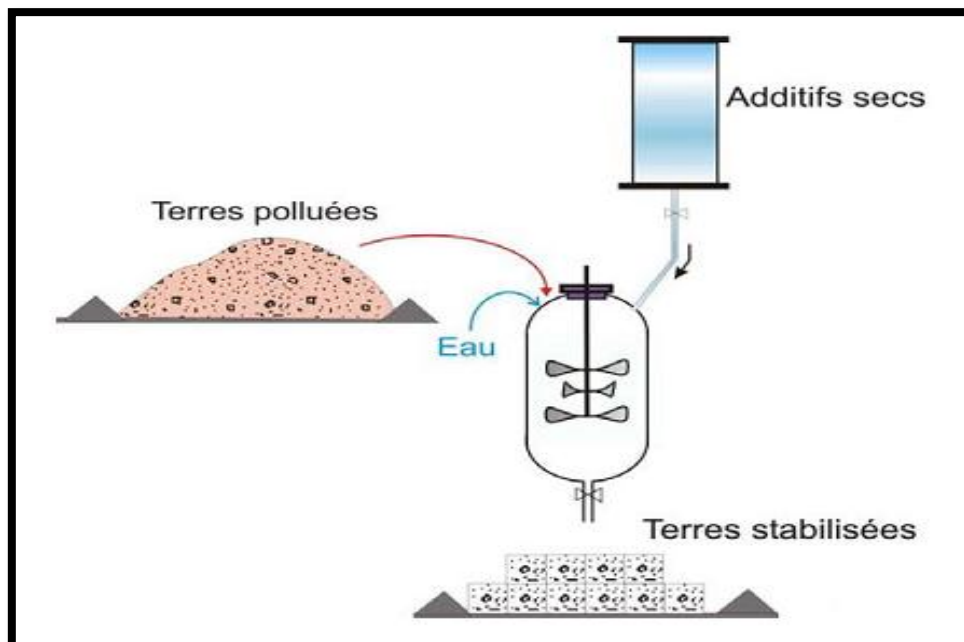


Figure 2-48 : Schéma de principe de la solidification/stabilisation on site ou ex situ (Colombano S et al. 2010).

Le procédé nécessite donc l'excavation des sols. La mise en contact entre les sols pollués et les différents réactifs (liants minéraux, additifs, eau ...) est réalisée à l'aide d'un malaxage à des conditions opératoires spécifiques (bétonnières, mélange à la pelle, malaxeurs). Une fois le mélange réalisé, les

sols en cours de stabilisation/solidification sont conditionnés dans des big-bags, des caissons spécifiques, des containers ou dans des alvéoles de confinement spécifiques. L'opération nécessite la plupart du temps un prétraitement : criblage, trémie. Dans le cas de composés volatils, il convient de mettre en place un système de captage, de contrôle et de traitement des gaz (Colombano S et al. 2010).

Ces techniques sont essentiellement utilisées sur les polluants de type métaux/métalloïdes (chrome, arsenic, plomb, cadmium, cuivre, zinc et mercure) ainsi que sur certains polluants radioactifs (U.S.E.P.A., 1991). On les utilise, dans une moindre mesure, sur certains composés organiques non/peu biodégradables (polluants organiques persistants - POP de type PCB, créosotes et pesticides).

L'efficacité de la solidification/stabilisation ex situ ou on site est, d'une manière générale, plus importante que celle réalisée in situ. Les concentrations dans les lixiviats après traitement peuvent être diminuées de 95 % et peut, dans certains cas, permettre d'atteindre des concentrations dans les lixiviats inférieures à quelques microgrammes par litre et donc à certains critères légaux (Colombano S et al. 2010).

A.3. Oxydation et Réduction chimique :

L'oxydation chimique permet de dégrader les polluants dans le sol entièrement ou partiellement par l'ajout d'agents oxydants tels que le peroxyde d'hydrogène, l'ozone, le permanganate et le persulfate de potassium ou sodium. Les réactions chimiques entre les polluants et les oxydants s'effectuent en phase dissoute [59].

Les premières étapes du traitement par oxydation/réduction sont très proches du lavage ex situ. Le principe repose sur l'élimination des polluants par frottement ainsi que sur une réduction du volume de matériau à traiter. Le procédé d'oxydation/réduction est composé de deux étapes distinctes et complémentaires :

- concentration des polluants dans un petit volume de sols (les plus pollués) grâce à des séparations et des attritions utilisées dans la séparation granulométrique : pré-criblage ou calibrage, séparation magnétique, unité de désagrégation ou compacteur, criblage, tamisage, hydro-cyclonage, séparation en spirales, unité de flottation, séparation gravitaire par sédimentation, filtration... Tout comme pour le tri granulométrique, le but est de séparer, autant que faire se peut, les fractions fines contenant la plus grande partie de la pollution,
- oxydation ou réduction des polluants. L'oxydation/réduction a lieu dans des cuves agitées ayant pour but de mettre en contact les sols pollués, l'eau et les réactifs (oxydants ou réducteurs). Les réactifs usagés peuvent être dirigés vers une filière de traitement appropriée ou récupérés et réutilisés sur site.

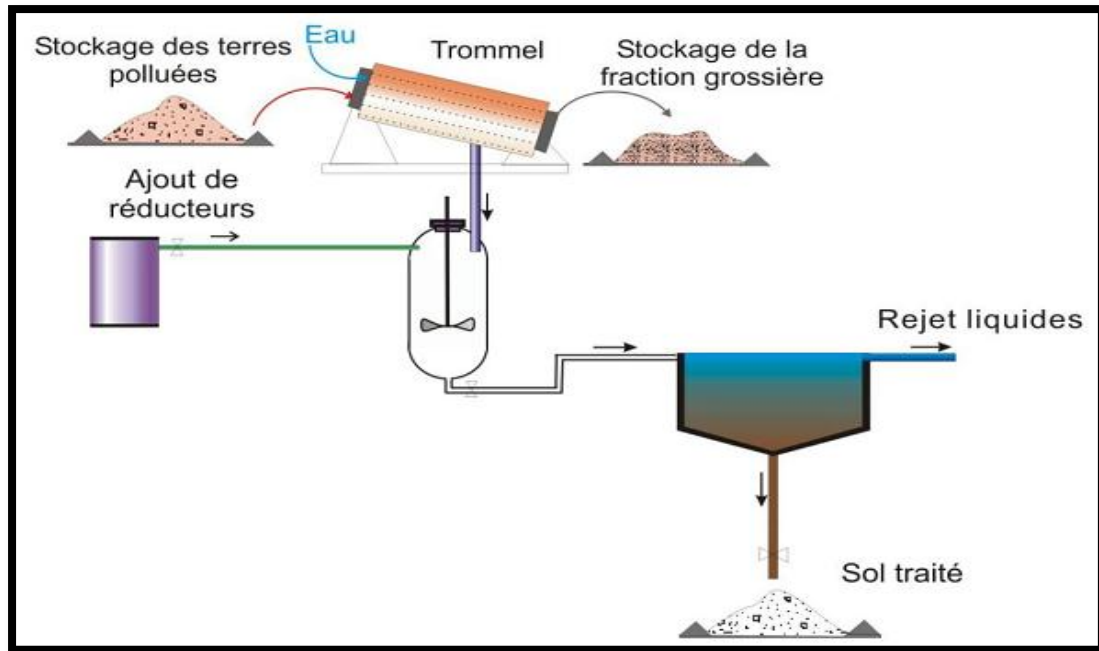


Figure 2-49 : Schéma de principe de la réduction on site (Colombano S et al. 2010).

Les sols traités sont par la suite lavés et déshydratés dans des unités similaires à celles du traitement des boues classiques. Il faudra par la suite disposer des sols (décharge, réutilisation sur site). Préalablement à leur élimination, les sols peuvent faire l'objet d'un traitement complémentaire afin d'éliminer les traces de solvants résiduelles (circulation d'eau chaude, circulation de vapeur...). Les eaux de lavage sont pro parte recyclées (dans l'unité de lavage) et pro parte traitées avant rejet (le type de traitement dépend alors des normes de rejets imposées). Si nécessaire, les rejets gazeux devront être traités.

Il existe plusieurs catégories de réactions selon les additifs : oxydation des polluants et réduction des polluants.

□ Oxydation des polluants :

Les oxydants les plus couramment utilisés sont l'ozone, le peroxyde d'hydrogène, l'hypochlorite, le chlore et le dioxyde de chlore (il s'agit donc d'oxydants liquides et gazeux). Ce procédé permet d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables ou moins toxiques.

□ Réduction des polluants :

La réduction est souvent employée pour traiter les composés inorganiques. Les solvants chlorés peuvent être traités par déhalogénéisation (réduction par enlèvement des radicaux halogénés). Ces techniques peuvent être utilisées pour les composés fortement chlorés (PCB, pesticides ...). Pour ce faire, il existe deux techniques distinctes :

- La substitution via le polyéthylène glycolate : les sols sont chauffés et mélangés avec du polyéthylène glycolate, le plus souvent de potassium, afin de substituer les atomes halogénés des polluants. Ceci a pour effet de rendre les polluants moins toxiques, de former des éthers de glycol et des sels métalliques alcalins. Les eaux usées contaminées par ces sous-produits sont par la suite traitées (précipitation, biodégradation, adsorption sur charbon actif, oxydation chimique).
- La décomposition catalytique (Based Catalyzed Decomposition) : les sols sont mélangés dans un réacteur avec du bicarbonate de sodium puis chauffés à plus de 330°C afin de volatiliser et de décomposer partiellement les polluants. Les contaminants volatilisés sont capturés, condensés et traités.

Le type de pollution adaptée pour le traitement par oxydation/réduction chimiques est la pollution de type inorganique. Le procédé est particulièrement adapté pour traiter les cyanures (oxydation) et le chrome (réduction). Le procédé peut aussi être utilisé sur les COV, les COHV les SCOV, les SCOHV, les HAP, les PCB, les hydrocarbures de types pétroliers et les pesticides (Colombano S et *al.* 2010).

A.4. Lavage de terres

Le lavage est un procédé couramment employé. Les contaminants adsorbés sur les particules fines, préalablement séparés des particules grossières, sont transférés vers la phase aqueuse (ou la solution extractante). Cette solution polluée est par la suite traitée. Afin d'augmenter les transferts des polluants des particules fines vers les eaux, il est couramment fait usage d'ajouts des agents chélatants, d'ajustement de pH, d'ajouts de surfactants (on parle alors d'extraction chimique) (Colombano S et *al.* 2010).

La technique du lavage de terres polluées consiste à mobiliser les polluants :

- par solubilisation à l'eau, aux solvants ou avec des acides-bases,
- par la formation d'une émulsion avec des tensio-actifs (ou surfactants),
- par transformation chimique avec des oxydants ou des réducteurs (oxydation / réduction chimique).

Cette technique peut être utilisée pour des pollutions minérales ou organiques grâce à un large éventail d'agents qui sont sélectionnés selon la nature du sol et de la pollution. Le lavage de terres peut être mis en œuvre in situ, sur site ou hors site [59].

Deux principes de fonctionnement peuvent être appliqués à cette technique ; on excave le sol souillé qui sera lavé sur le site, ou on opère in situ, en entraînant la phase polluante par injection de liquide et en repompant l'ensemble liquide/polluant. Pour améliorer la récupération, deux systèmes sont possibles, soit en ajoutant des détergents ou des surfactants à l'eau de lavage, soit on utilise de l'eau chaude, ou même de la vapeur (Lecomte P., 1998).

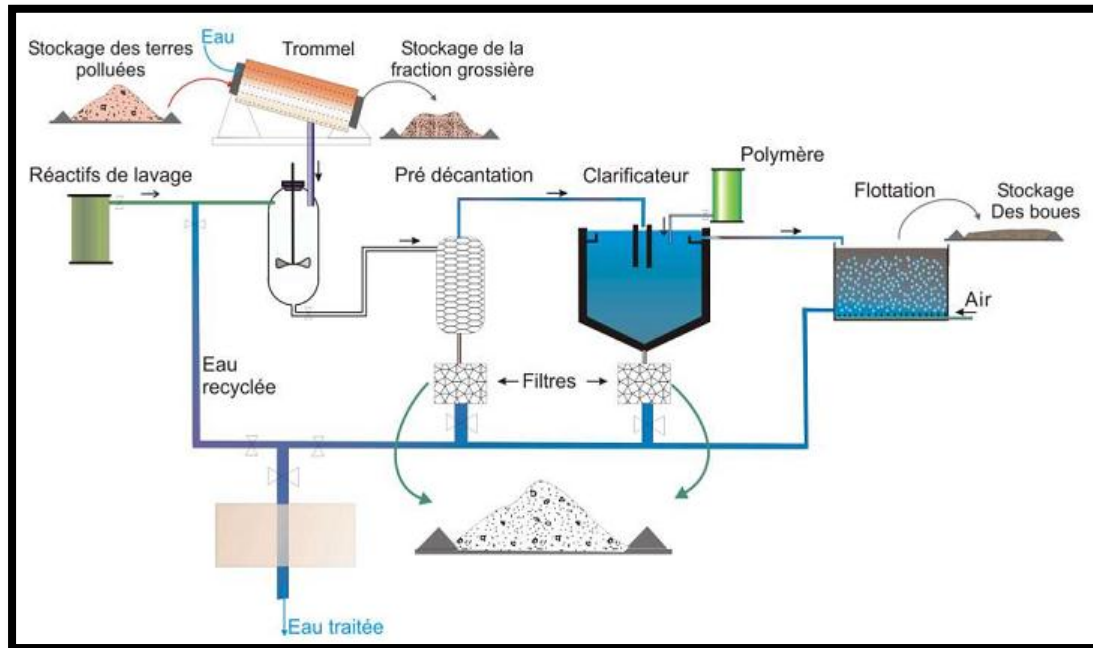


Figure 2-50 : Schéma de principe du lavage ex situ (Colombano S et al. 2010).

A.5. Encapsulation et élimination en centres de stockage des déchets:

Ce titre est consacré à l'encapsulation et la mise en centre de stockage de déchets hors site. A l'inverse du confinement vertical et du recouvrement, cette technique nécessite d'excaver l'intégralité des sols pollués. Le procédé d'encapsulation consiste à enfermer physiquement sur site les sols par un dispositif de parois, couverture et fonds très peu perméables. Hors site, la mise en décharge consiste à diriger les terres polluées dans des centres de stockage des déchets en fonction de leur degré de pollution et de leur potentiel de lixiviation. Le procédé consiste à :

- isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation,
- contrôler, c'est-à-dire s'assurer du maintien des mesures mises en place,
- suivre, c'est-à-dire s'assurer de l'efficacité de ces mesures.

Les mesures à mettre en place seront choisies et modulées en fonction des conditions particulières de chaque cas, telle la nature et l'ampleur de la contamination, les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du terrain, l'usage qui en est fait (nappe d'eau souterraine utilisée comme source d'eau

potable...) et, le cas échéant, les spécificités du projet envisagé (maisons, jardins...) (Colombano S et al. 2010).

□ Encapsulation :

L'encapsulation sur site consiste à confiner totalement les sols pollués dans une alvéole afin de limiter :

- les infiltrations d'eaux de pluie et la migration latérale et en profondeur des polluants dans les eaux souterraines,
- la migration verticale des gaz.

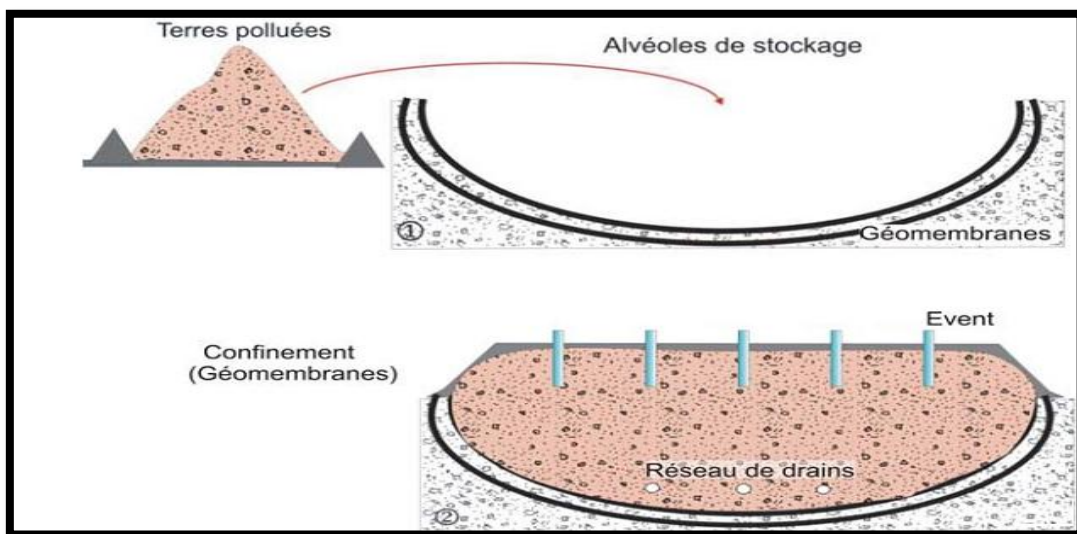


Figure 2-51 : Schéma de principe de l'encapsulation sur site (Colombano S et al. 2010).

Le recouvrement des alvéoles doit être de type couche/multicouche imperméable. Les parois et le fond des alvéoles doivent avoir un dispositif spécifique présentant une étanchéité maximale et permettant une récupération des eaux (Colombano S et al. 2010).

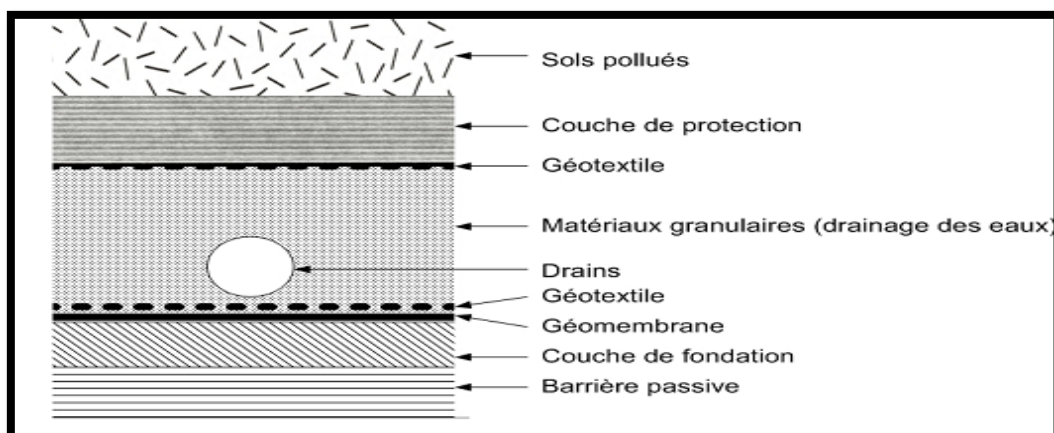


Figure 2-52 : Exemple de couche de fond d'encapsulation (Lecomte P., 1998).

□ Centres de stockage des déchets :

Hors site, la mise en décharge consiste à diriger les terres polluées dans des Installations de Stockage des Déchets en fonction de leur degré de pollution et de leur potentiel de lixiviation :

- Installation de Stockage des Déchets Dangereux (ISDD – classe 1) recevant les déchets industriels dangereux (avec ou sans stabilisation/solidification préalable),
- Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDN - classe 2) recevant les déchets ménagers et assimilés,
- Installation de Stockage des Déchets Inertes (ISDI - classe 3) recevant les déchets dits inertes,

Ce type de traitement peut être appliqué à presque tous les types de pollution (COV, COHV, SCOHV, SCOV, PCB, HAP, métaux/métalloïdes) et à presque tous les types de sols.

□ Mesures de contrôle :

Pour être efficace, toute mesure d'encapsulation doit être accompagnée de mesures de contrôle qui permettent d'en assurer l'intégrité. Il existe de nombreuses méthodes de détection et de localisation de défauts : géo-membrane conductrice, jet d'eau, sonde mobile, système fixe de détection de localisation et d'alarme, cloche à vide, mise en pression du canal central, test à la pointe émoussée (au tournevis), spectrométrie infrarouge, liquide coloré sous pression, thermographie infrarouge, ultrasons... (Comité Français Géosynthétiques., 2003).

□ Mesures de suivi :

Le suivi devra être obligatoirement à long terme et devra permettre de vérifier son fonctionnement et de suivre l'évolution de son efficacité. Le but est de pouvoir caractériser autant que faire se peut qualitativement et quantitativement le flux de matière échangée avec l'extérieur (B.R.G.M., 1996).

Le suivi doit permettre de s'assurer de l'efficacité des mesures de confinement mises en place. Le plus souvent, il consistera à prélever des échantillons dans l'eau souterraine ou dans l'eau de surface afin d'en vérifier la qualité et de suivre son évolution (conditions du milieu, sous-produits de dégradation...). Des prélèvements d'eau au droit de la source de pollution sont aussi recommandés. Un programme de suivi des émissions atmosphériques (poussières, émissions gazeuses ou

autres) ou /et une programme de suivi des lixiviats peuvent être, le cas échéant, également appropriés.

Par ailleurs, il est nécessaire de réaliser le suivi des servitudes, citons par exemple : absence de culture potagère, absence d'arbre à racines profondes. De plus, lorsque les mesures de confinement le requièrent, un contrôle des mouvements physiques du terrain, du système de pompage ou de collecte des eaux, de l'état des infrastructures en place (clôtures, barrières, fossés de drainage...) doit être effectué (Colombano S et al. 2010).

A.6. Confinement :

Le confinement consiste à laisser les terres polluées sur le site et à empêcher la propagation des polluants grâce à une barrière étanche. Cette technique permet d'éviter l'érosion des sols, la percolation de l'eau vers la nappe et le ruissellement sur les terres polluées. Le confinement est mise en œuvre in situ et sur site [59]. Elle s'applique à tous les types de polluants et sont particulièrement intéressantes pour les contaminations multi-produits et complexes, où les niveaux de concentrations sont élevés. Pour des raisons techniques et financières, elles sont mieux valorisées sur des volumes ou des surfaces relativement restreintes, et, lorsqu'on l'applique in situ, à condition que la zone contaminée soit parfaitement définie et circonscrite au préalable (Lecomte P., 1998).

□ Les types de confinement :

Les différents types de traitement par confinement sont les suivants.

- Enceinte de confinement :

La construction d'une enceinte fermée destinée à empêcher la dissémination des produits dangereux est la méthode universelle pour toute pollution complexe, toute pollution en grande quantités et toute pollution à grande profondeur. Les polluants en faible quantité peuvent être stockés dans une alvéole étanche spécialement aménagée en surface (Emilian K., 2004).

- Barrière hydraulique :

Les standards de sécurité peuvent être renforcés par l'utilisation de barrières hydrauliques qui consistent en la modification du gradient d'écoulement par combinaison de puits d'injection et d'extraction. Si le niveau extérieur, alors il est certain que l'eau souterraine peut s'écouler de l'extérieur vers l'intérieur mais en aucun cas elle ne peut être contaminée par le lessivât échappé éventuellement de la zone recelant les

polluants. Le dimensionnement du système est fonction de l'hydrogéologie locale. Traitement d'urgence, parfois utilisé à titre provisoire, avec de grands volumes d'eau mis en jeu, la barrière hydraulique concerne toute pollution de nappe (Emilian K., 2004).

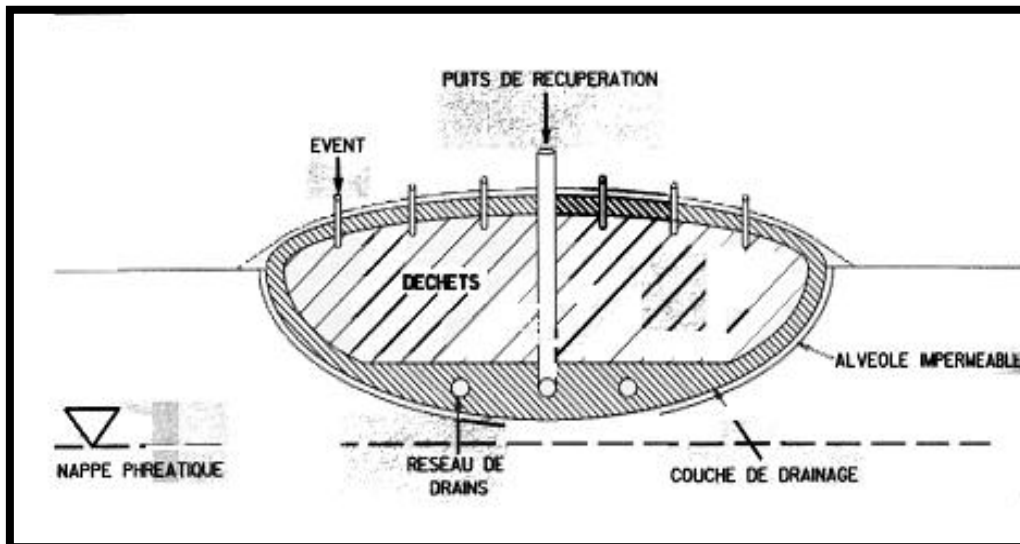


Figure 2-53 : Schéma de principe du confinement des sols sur site (Claude C., 2008).

- Barrière réactive :

Cette technique consiste à implanter une barrière perméable depuis la surface du sol jusqu'à la base de l'aquifère pour intercepter un panache de pollution. La barrière est remplie d'un réactif permettant la dégradation des polluants dissous dans l'eau. Deux types de barrières existent : les barrières perméables classiques et les barrières « système porte ».

Une barrière réactive est une tranchée réalisée entre la surface du sol et le substratum, orientée perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe phréatique. Cette tranchée est entièrement remplie par un principe actif de traitement, adapté au type de pollution traité. Le panache de pollution qui passe à travers le principe actif de traitement est dépollué [55].

A.7. Venting :

La technique du venting consiste à aspirer dans le sol l'air chargé des gaz polluants. Cette « ventilation forcée des sols » peut être complétée par l'injection d'air dans le sol en périphérie de la zone polluée. Elle s'applique exclusivement aux polluants organiques volatils ou semi-volatils, tels que les essences, les solvants chlorés, les composés aromatiques légers (BTEX), les phénols ou le naphthalène [59]. C'est une technique appliquée « in situ » qui peut traiter la partie saturée du sol (au dessus de la nappe phréatique).

Le principe consiste à envoyer dans le sol un flux d'air par l'intermédiaire d'une série de forages crépinés, habituellement localisés en bordure de la zone à traiter, et à pomper au sein de la zone contaminée l'air chargé des gaz polluants. Le flux d'air est généré par un système de pompe pulsante en entrée et d'extracteur en sortie. Les produits volatils sont ainsi entraînés par la circulation d'air au sein du sol et extraits par les forages d'aspiration. En sortie, les gaz polluants seront traités à leur tour, avant la diffusion de l'air pompé dans l'atmosphère (Lecomte P., 1998).

Des produits organiques volatils déversés dans un sol ont tendance à saturer les vides par évaporation ; ainsi, pour de l'essence, le sol contient à saturation jusqu'à 25000 ppm du produit sous forme gazeuse. Une fois cette phase extraite, le flux d'air pur injecté va favoriser la volatilisation de la phase liquide résiduelle. Au démarrage de l'opération, la quantité de gaz extraite est importante et la teneur en gaz du sol élevée, va rapidement diminuer de façon exponentielle avec le temps. Si on stoppe la circulation d'air, on observe une augmentation des teneurs en gaz du sol, correspondant à la volatilisation d'une partie du polluant liquide restant. A la reprise du venting, la quantité de gaz extraite est à nouveau plus élevée et diminue rapidement. Après un deuxième arrêt, on extraira une nouvelle quantité de gaz moins élevée que la précédente, et ainsi de suite jusqu'à obtention, par une série de cycles d'extractions, d'une teneur résiduelle très faible stable, marquant la dépollution complète du milieu (Lecomte P., 1998).

B. Les traitements thermiques :

D'une utilisation courante à ce jour, les méthodes thermiques représentent une option majeure dans les filières de décontamination ; ainsi à l'USA, pour près d'un tiers des sites, l'incinération constitue la méthode choisie pour traiter les matériaux pollués. Ces techniques peuvent être appliquées sur site ou hors site ; c'est le cas le plus fréquent. Actuellement, des méthodes in situ sont développées à titre expérimental. On décrira successivement :

- Les techniques d'incinération,
- La désorption thermique,
- La pyrolyse,
- La vitrification (Lecomte P., 1998).

B.1. L'incinération :

L'incinération est la technique la plus ancienne et repose sur la combustion des déchets du sol. Les hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent. Notons que les métaux demeurent dans les cendres ou les vapeurs. En élevant fortement la température du sol pollué, les polluants sont convertis en dioxyde de carbone et vapeur d'eau, ainsi qu'en différents résidus de combustion. La transformation des polluants en molécules inoffensives simples permet de classer cette méthode parmi les plus efficaces.

L'incinération s'applique aux sols contaminés par toute substance incinérable, c'est-à-dire principalement les polluants organiques. Préalablement à l'incinération, les sols sont prétraités (tamisage, séchage ...) ; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four. Plusieurs techniques sont disponibles :

- dispositifs à lit fluidisé,
- dispositifs à circulation,
- technique infrarouge,
- four rotatif... [30].

Les rendements épuratoires sont les plus élevés (plus de 99,99 % pour les hydrocarbures pétroliers) et les concentrations finales en polluants sont négligeables pour les composés organiques. Ces rendements dépendent des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils) (Colombano S et al. 2010).

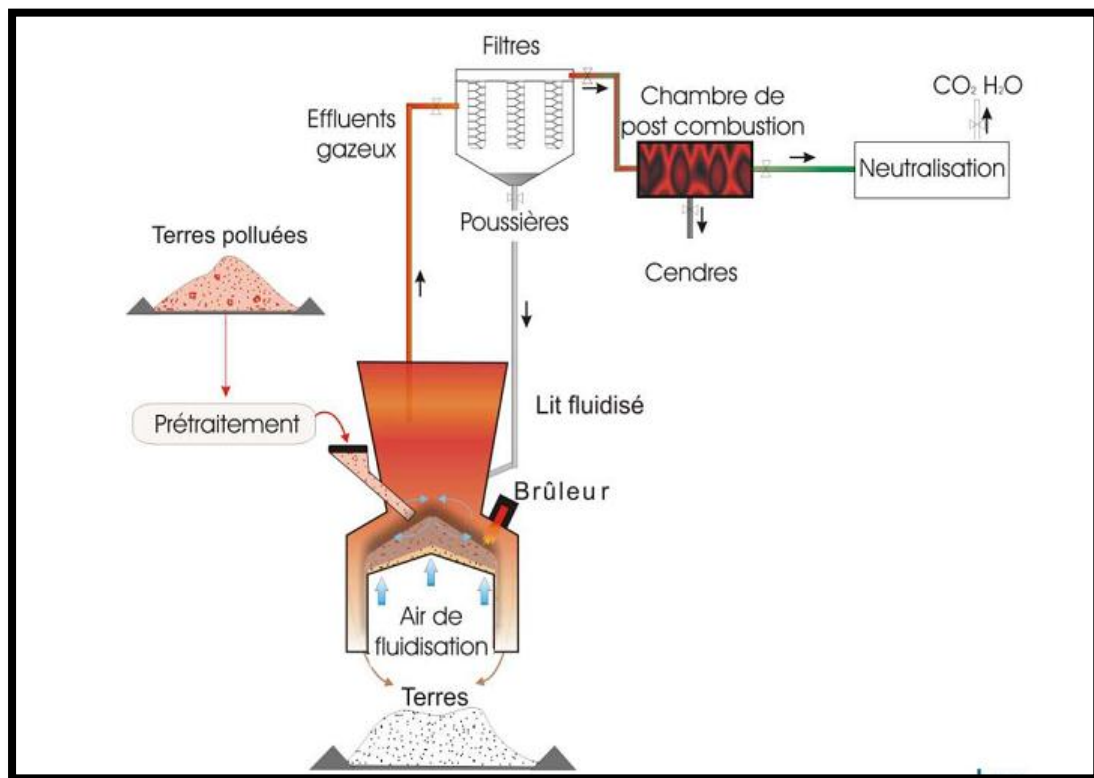


Figure 2-54 : Schéma de principe de l'incinération à lit fluidisé (Colombano S et al. 2010).

B.2. Désorption thermique :

La désorption thermique est l'application de chaleur pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils. Cette technique est de plus en plus concurrentielle face à l'incinération. Elle consiste, une fois les

terres contaminées excavées, à les introduire dans une unité de désorption (communément appelée « four ») où elles seront chauffées jusqu'à des températures comprises généralement entre 150 et 540 C. Cette augmentation de température a deux buts :

- favoriser la désorption des contaminants fortement adsorbés sur les particules du sol,
- augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de pouvoir les volatiliser et les extraire en phase gazeuse [35].

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Les particules sont au préalable récupérées dans des filtres, des dépoussiéreurs humides ou des dépoussiéreurs électrostatiques ; par la suite, les composés organiques sont éliminés par destruction (brûlage, oxydation catalytique) ou fixation (charbon actif, condenseur).

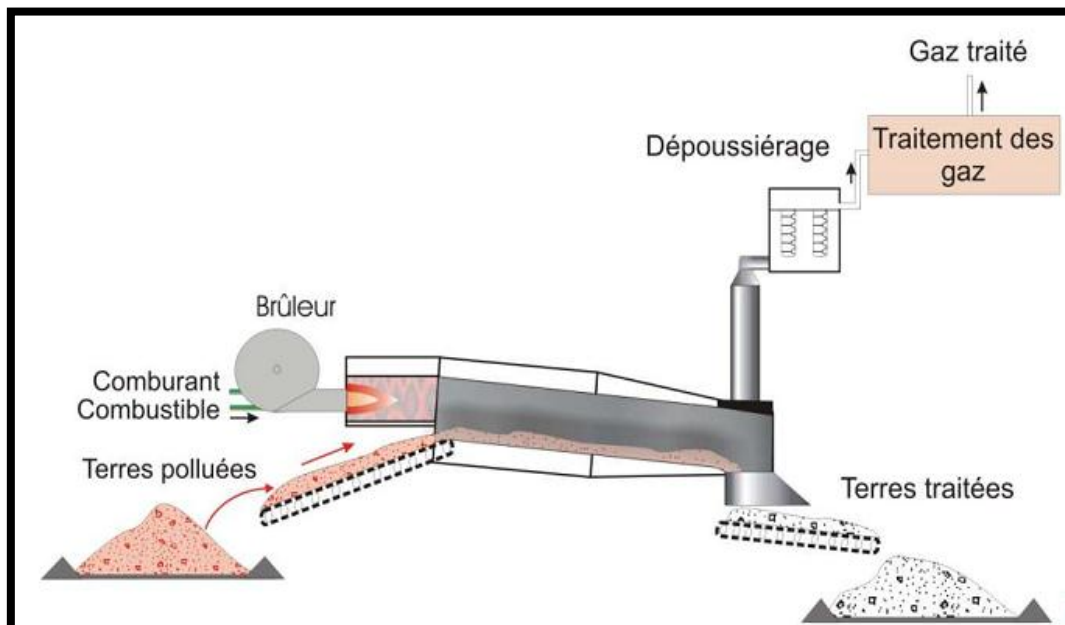


Figure 2-55 : Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site (Colombano S et al. 2010).

La désorption thermique est utilisée pour de nombreux polluants organiques (volatils, semi-volatils voire peu volatils) : hydrocarbures pétroliers (essences, gasoils, kérosènes ...), fractions plus lourdes d'hydrocarbures, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP.

Les rendements épuratoires sont élevés (plus de 95 à 98 % pour les hydrocarbures pétroliers) et les concentrations finales en polluants sont faibles (inférieures à 5 mg/kg). Ce rendement dépend des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils) (Colombano S et al. 2010).

B.3. La pyrolyse :

La pyrolyse est l'application de chaleur en l'absence d'oxygène pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils. La technique consiste, une fois les terres contaminées excavées, à les introduire dans une unité de pyrolyse où elles seront chauffées en l'absence d'oxygène jusqu'à des températures comprises généralement entre 150 et 540 °C. L'absence d'oxygène lors de l'élévation de température permet d'éviter la formation de sous-produits toxiques (par exemple, les dioxines) [26].

Les sols pollués sont ainsi transformés en gaz et en un résidu solide. La pyrolyse provoque le « cracking » des polluants organiques en composés plus simples. Les gaz sont constitués de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures divers. Ils sont récupérés en vue d'un traitement : élimination des particules (filtres, scrubbers) puis élimination des composés organiques et du monoxyde de carbone (brûleur, oxydation catalytique, seconde chambre de combustion, condenseur ou charbon actif).

La pyrolyse est particulièrement adaptée pour traiter les sols riches en matière organique contaminés par des composés semi-volatils ou peu volatils : fractions lourdes d'hydrocarbures, huiles, pesticides, PCB, dioxines, furannes, HAP, résidus de raffinerie, produits de traitement du bois (pentachlorophénols), certains métaux lourds (mercure), mais aussi des sols pollués par des hydrocarbures plus légers mais fortement adsorbés sur certains types de sols (taux de matière organique très élevés) : essences, gasoils, kérosènes, solvants chlorés (Colombano S et al. 2010).

Dans de bonnes conditions, des rendements épuratoires supérieurs à 90 % ont été obtenus. Ces rendements dépendent des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils). Par exemple, les rendements sont inversement proportionnels au taux d'humidité des sols (Colombano S et al. 2010).

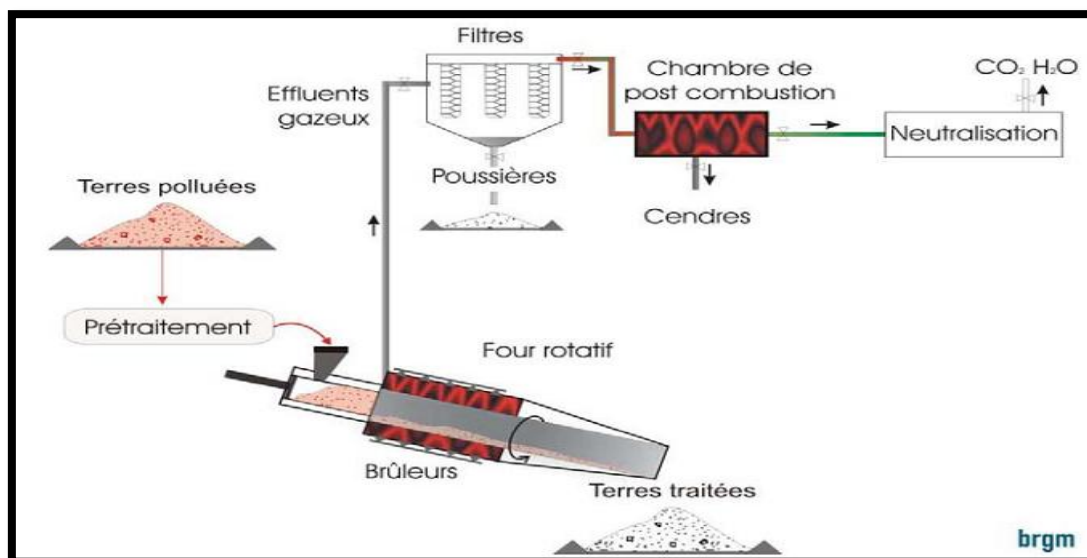


Figure 2-56 : Schéma de principe de la pyrolyse (Colombano S et al. 2010).

B.4. La vitrification :

La vitrification est la transformation du sol (partie non saturée en eau) par la chaleur en un matériel fondu qui après refroidissement devient un verre encapsulant les polluants. La technique est fonctionnelle mais peu utilisée car elle engendre des coûts importants du fait de la consommation énergétique du procédé. La vitrification a des applications intéressantes dans le cas de sols contaminés par des métaux ou certains radionucléides. Cependant, au final, les métaux restent dans le sol mais sont immobilisés [24]. Cette technique est applicable à de nombreux composés organiques (destruction des COV, SCOV, dioxines, PCB...) (Evariste., 2007).

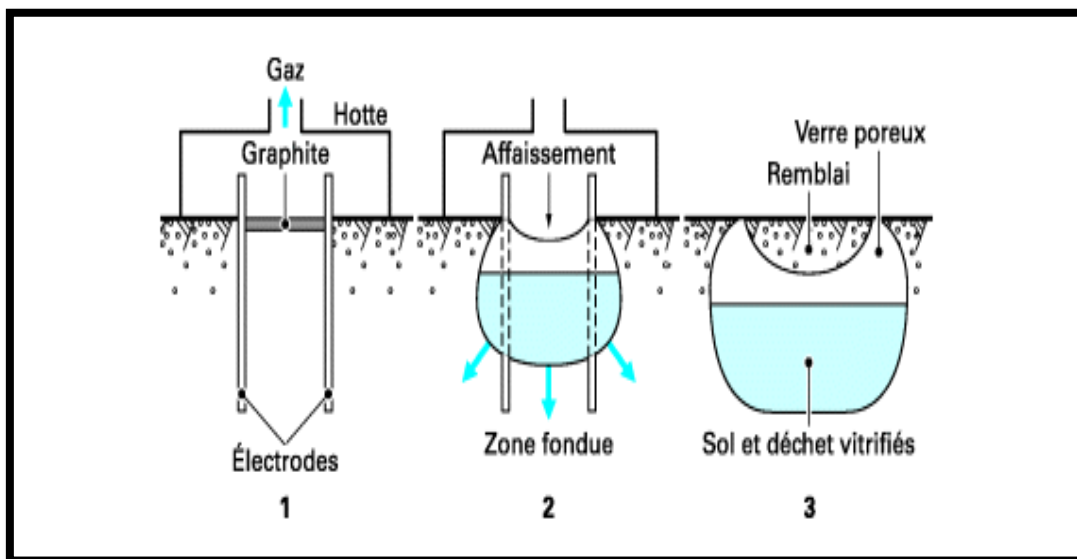


Figure 2-57 : Schéma de principe de la vitrification thermique [24].

C. Les traitements biologiques :

Le traitement biologique des sols pollués repose sur le principe de la dégradation des polluants, notamment des hydrocarbures, soit par des bactéries, soit par des champignons. Cette technologie peut être appliquée sur site ou hors site. La dégradation biologique des polluants contenus dans les terres est optimisée par la mise en tertres (biotertres) et par le contrôle des paramètres limitants (oxygène, humidité, teneurs en nutriments...) au sein des tertres.

Souvent, ce mode de traitement nécessite une étape préalable de prétraitement qui consiste à enlever les gros éléments (cailloux, blocs, fragments de béton) non adaptés au traitement biologique et à obtenir un matériau relativement homogène [59].

On distingue plusieurs types de traitement biologiques des sols :

C.1. Bioréacteur :

Le bioréacteur représente une technique de décontamination par voie biologique qui peut être utilisée pour de nombreuses applications (Lecomte P., 1998). Le principe consiste à mélanger les sols pollués avec de l'eau et divers additifs afin de mettre les particules de sols en suspension dans l'eau et de

former un mélange boueux. Les boues sont traitées par voie biologique dans des bioréacteurs puis sont déshydratées.

Les sols sont triés, émottés, criblés avant traitement ; d'une manière générale, ne sont conservés que les sols de granulométrie très fine. Si nécessaire, un lavage peut être réalisé. Par la suite, les sols sont mélangés avec de l'eau en quantité suffisante pour maintenir les matières solides en suspension (typiquement 10 à 40 % de solides) ; ce qui permet donc un meilleur contact polluants/micro-organismes et facilite aussi le fonctionnement enzymatique. Le ratio du mélange eau/solide dépend de la concentration en polluants, du taux de biodégradation et de la nature des solides.

Parfois, divers additifs sont ajoutés afin de favoriser la biodégradation (tensioactifs afin de rendre les polluants plus bio-disponibles, nutriments, acides ou bases afin de maîtriser le pH ...). Ensuite, les boues sont mélangées dans le bioréacteur ; de l'oxygène est ajouté par simple brassage ou si nécessaire par bullage (la majorité des bioréacteurs est aérobie). Les bioréacteurs sont de divers types : alimentation en continu ou en batch, procédés à cultures libres ou fixes, procédés aérobies ou anaérobies (le moins courant), procédés extensifs ou intensifs. La filière de traitement et sa complexité peuvent varier d'un simple lagunage à un procédé proche d'une station d'épuration performante.

Les matières solides et les eaux sont séparées une fois que la dégradation biologique est finalisée. Les sols sont déshydratés dans des unités similaires à celle du traitement des boues classiques. Il faudra par la suite disposer des sols (décharge, réutilisation sur site). Les eaux sont pro parte recyclées (pour réensemencer le bioréacteur) et pro parte traitées avant rejet (le type de traitement dépend alors des normes de rejets imposées) (Colombano S et al. 2010).

Si nécessaire les rejets gazeux devront être traités.

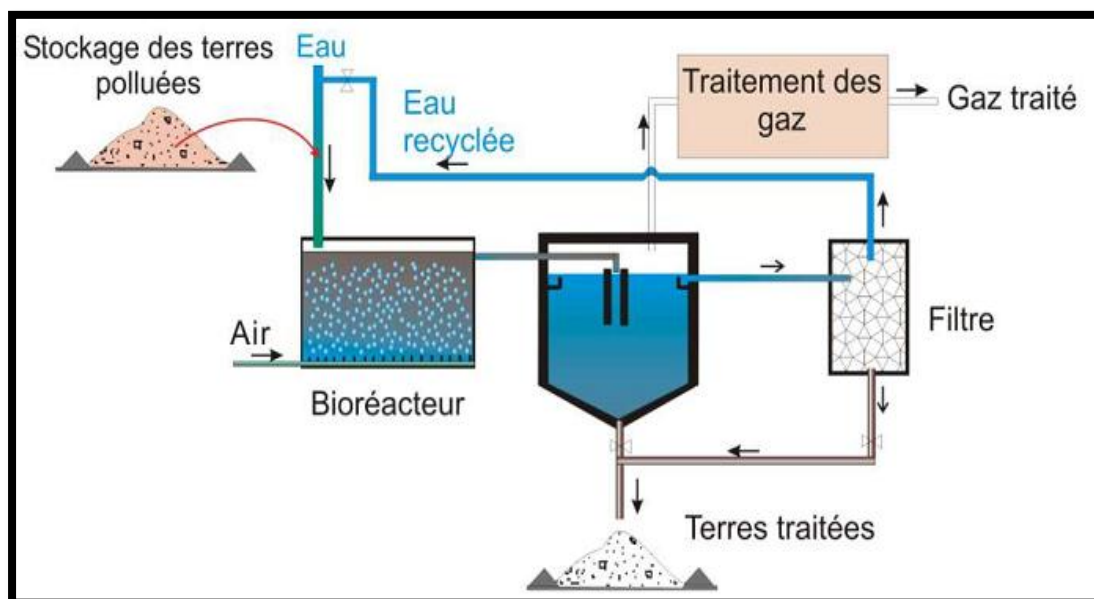


Figure 2-58 : Schéma de principe d'un bioréacteur (Colombano S et al. 2010).

Cette technique est plus adaptée que les autres technologies biologiques pour le traitement des polluants peu biodégradables et à des concentrations importantes. Elle est aussi plus applicable à des sols fortement argileux et hétérogènes. Il s'applique à des sols pollués par les produits pétroliers (de type gasoils, fuels, kérosène), COV, SCO, COHV, pesticides, certaines coupes pétrolières lourdes (HAP, huiles organiques ...), solvants, PCB, conservateurs du bois (PCP) et explosifs peuvent aussi être traités. Cette technique n'est pas destinée à traiter les métaux/métalloïdes sauf dans certains cas (par exemple pour la biolixiviation de certains métaux/métalloïdes dans le drainage acide minier).

Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu ; il peut dans certains cas atteindre plus de 98-99 % si le temps de traitement est suffisamment long et si les conditions sont favorables (Colombano S et al. 2010).

Le tableau suivant illustre par quelques résultats, les rendements obtenus en réacteur.

Tableau 2-7 : Exemple de résultats obtenus par bioréacteur (Vogel T. M., 1993).

Composé	Concentration initiale (en mg/kg)	Taux de réduction (en %)	Temps du traitement (en jours)
Organiques volatils	500	99	
Phénanthrène HAP	46	58	10
COT	159 000	27	10

C.2. Bioterre :

La technique consiste en la mise en tas du sol puis en son traitement biologique. Cette technique est fortement utilisée pour les sols hétérogènes facilement biodégradables et permet une meilleure organisation du traitement que les techniques *in situ*. Cette technique est très utilisée malgré le faible coût des techniques *in situ* et l'accroissement de leurs performances. Elle a pour objectif la biodégradation des composés organiques présents sous forme d'imprégnation dans les sols. D'une manière générale, cette technique consiste à utiliser des micro-organismes pour dégrader des composés organiques [46].

Le procédé nécessite au préalable une excavation. Les sols pollués sont mélangés avec un amendement (agent structurant) et sont par la suite dirigés vers une aire de traitement contenant à minima un système de collecte de lixiviats et des unités d'aération (extraction ou insufflation d'air) afin d'optimiser le transfert de l'oxygène et la stimulation de la biodégradation. La biodégradation est contrôlée (température, taux d'humidité, nutriments, oxygène, pH).

Les biotertres sont le plus souvent recouverts par une géomembrane imperméable afin de limiter les infiltrations d'eaux pluviales, la volatilisation des polluants, le maintien/l'augmentation de la température. Les lixiviats sont en partie recyclés et en partie traités sur site avant d'être rejetés. Les rejets atmosphériques sont traités si nécessaire.

Le biotierre s'applique à des sols pollués par les produits pétroliers de type gasoils, fuels, kérosène. Les COHV, SCO, pesticides, certaines coupes

pétrolières lourdes (HAP, huiles organiques ...) peuvent aussi, dans certaines conditions, être traités mais avec des rendements épuratoires plus faibles (Colombano S et al. 2010).

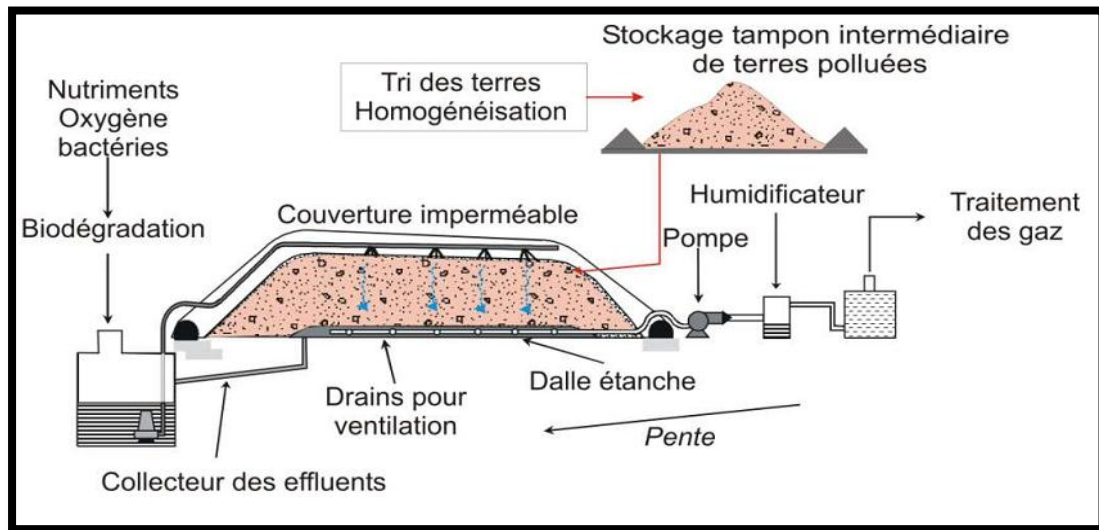


Figure 2-59 : Schéma de principe du biotertre (Colombano S et al. 2010).

C.3. Compostage :

La technique est basée sur l'ajout de compost au sol pour favoriser la biodégradation des polluants. Elle repose sur trois points :

- le besoin de structurant pour mieux aérer le sol,
- les besoins en nutriment des micro-organismes,
- la croissance des micro-organismes.

La nature des composts varie énormément en qualité et tous les composts ne fonctionnent pas de manière identique, enfin, certains ont des actions spécifiques. Cette technique est souvent utilisée pour les sols contaminés par des hydrocarbures [39].

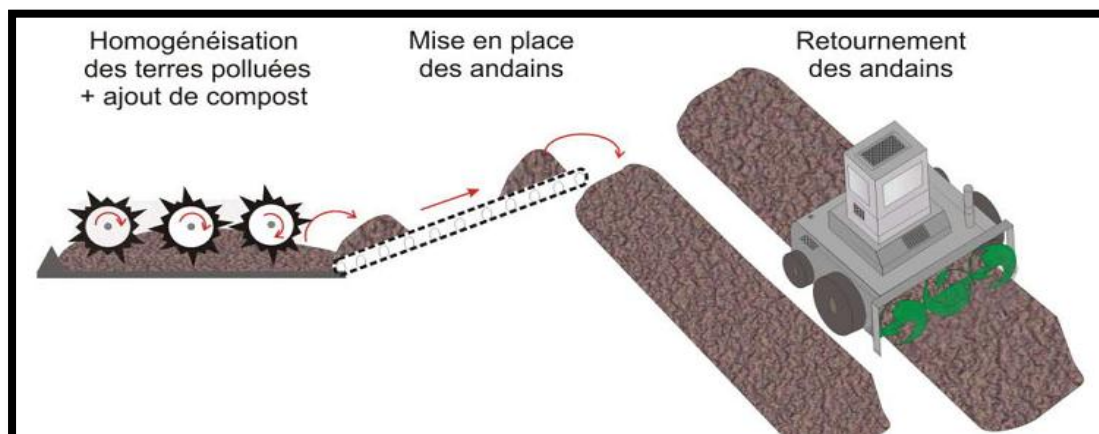


Figure 2-60 : Schéma de principe du compostage (Colombano S et al. 2010).

Les sols doivent être préparés avant leur mélange avec le compost (élimination des fractions grossières non biodégradables et émottage). Le mélange est par la suite stocké sous forme d'andains de forme trapézoïdale étudiée afin de conserver la chaleur en son sein.

Le compostage est efficace pour traiter les sols souillés par les composés mono-aromatiques (BTEX), phénols, HAP (les plus légers de type naphthalène et phénanthrène), hydrocarbures pétroliers (essence, diesel, lubrifiant, huiles), herbicides/pesticides (par exemple, l'atrazine) mais aussi PCB, PCP, chlorobenzène et certains explosifs (trinitrotoluène...) (Colombano S et *al.* 2010).

A la décharge du compostage, la volatilisation de certains polluants et leur libération dans l'atmosphère provoquent un impact négatif sur l'environnement. Aussi, ce type de technique ne peut être appliqué que pour des pollutions concernant des contaminants peut volatils (gasoil par exemple) (Lecomte P., 1998).

C.4. Landfarming :

Une technique plus élaborée est le landfarming, qui consiste, comme son nom indique, à traiter le matériau pollué comme un sol agricole pour en faciliter la décontamination. Cette méthode, un peu plus complexe que le compostage (Lecomte P., 1998).

Le principe est simple et consiste à étaler des sols pollués (on site ou ex situ) sur une faible épaisseur (30 cm) et de grandes surfaces, ce qui permet une interaction entre la matrice polluée et l'atmosphère. Le but est de favoriser l'aération et donc la dégradation aérobie. Le labour des sols permet l'aération régulière. La biodégradation est aussi favorisée par l'ajout de compléments nutritionnels (minéraux et engrais).

Comme tout traitement biologique, les paramètres essentiels à prendre en compte et à maîtriser sont essentiellement l'humidité, les nutriments, le pH et la température. Une fois mélangés avec les agents structurants (paille..) et divers amendements, les sols sont généralement retournés une à deux fois par semaine afin d'améliorer l'aération qui est le facteur limitant principal. Le taux d'humidité requis se situe entre 40 et 85%. Il peut être régulé via la recirculation des lixiviats. La température optimale se situe entre 10 et 25 °C, son contrôle est difficile à réaliser notamment en période hivernale. Le pH doit être compris entre 6 et 8°C.

Les contaminants organiques et la matière organique des sols constituent un apport en carbone non négligeable ; l'apport des autres nutriments classiques (N, P, K) est souvent requis pour un traitement efficace. Pour ce faire, on a recours à des apports de compost ou à des engrais liquides ou solides.

Le landfarming est efficace pour traiter les sols souillés par les composés mono-aromatiques (BTEX), phénols, HAP (les plus légers de type naphthalène et phénanthrène), hydrocarbures pétroliers (essence, diesel, lubrifiants légers, huiles) (Colombano S et *all.* 2010).

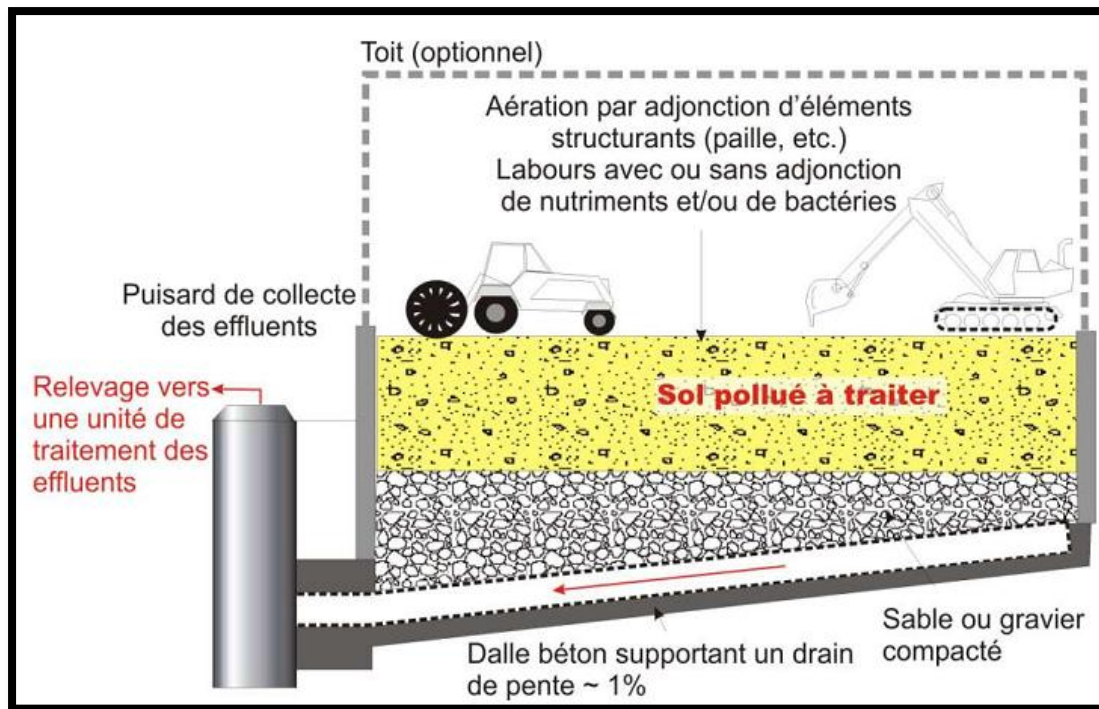


Figure 2-61 : Schéma de principe du landfarming (Colombano S et all. 2010).

Le tableau suivant présente des exemples de résultats obtenus par landfarming sur des hydrocarbures et du PCP; en fonction de temps passé, on constate que les taux de réduction varient de 75 à 90 %, avec un temps toutefois beaucoup plus long pour les huiles lourdes (un an et demi). Pour les PCP, le rendement est relativement plus faible que pour les hydrocarbures, puisque à taux de réduction et temps équivalents, les concentrations au départ sont environ de 10 à 1000 fois moins élevées.

Tableau 2-8 : traitement par landfarming et compostage : exemple de résultats (Vogel T. M., 1993).

Composé	Concentration initiale (en mg/kg)	Taux de réduction (en %)	Temps du traitement (en jours)
Huile lourde	20 000	75	423
Huile légère	1 500	74	150
Hydrocarbure	139 000	90	240
Pentachlorophénol	100	80	140
Compostage			
Huile		60	12

C.5. Bioventing :

Cette technique consiste à amener l'oxygène nécessaire à la biodégradation et est souvent confondue avec le venting basé sur la volatilisation des polluants. Le bioventing présente des coûts très faibles (traitement très réduit des gaz en sortie et matériel de pompage plus petit que pour le venting classique). Cette technique est utilisée depuis une vingtaine d'années et reste très employée pour les sites pollués par les hydrocarbures biodégradables [36].

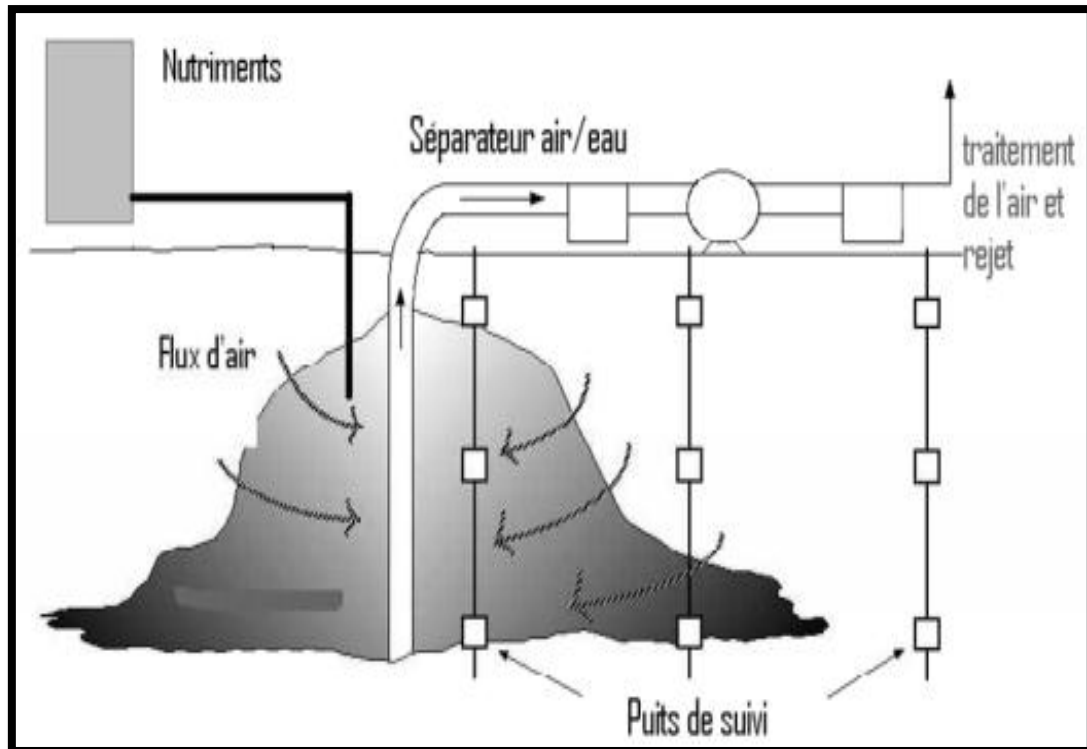


Figure 2-62 : Technologie de traitement par bioventing [60].

Le bioventing est un procédé in situ permettant d'aérer la zone insaturée afin que les micro-organismes du sol puissent mieux respirer et dégrader les polluants. Cette technique consiste à renouveler l'air par dépression ou injection dans la zone insaturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction. La circulation d'air engendrée par le système de bioventing assure l'apport d'oxygène gazeux aux micro-organismes.

Ce procédé est utilisé de préférence dans la zone vadose lorsque celle-ci se compose de matériaux perméables à semi-perméables comme le sable, le gravier, le limon grossier. Les polluants potentiellement concernés par le bioventing sont les COV et les SCOV [36].

D. Dépollution des sols par les plantes « phyto-dépollution » :

La phyto-dépollution, utilise les plantes pour dégrader, assimiler, métaboliser ou détoxifier des polluants de natures diverses. Les plantes peuvent agir de façon directe en absorbant le polluant ou de façon indirecte en activant sa dégradation dans la rhizosphère. Cette technologie émergente et prometteuse peut être appliquée aux métaux ; aux hydrocarbures, aux pesticides, aux composés nitroaromatiques et aux solvants chlorés (Susarla S., 2002).

La recherche, le développement et l'application de la phyto-dépollution ont fortement augmenté à la fin des années 1980 à cause de son faible coût, de sa polyvalence et de son image positive auprès de l'opinion publique. Cette technologie fut d'abord utilisée pour décontaminer les sols des contaminants de l'agriculture tels que les engrais et les pesticides. L'agence américaine de protection de l'environnement, US Environmental Protection Agency (US

EPA) estime qu'il y a actuellement plus de 100 sites dans le monde où est utilisée la phyto-dépollution pour dépolluer divers contaminants (minéraux ou organiques) (Vila M., 2006).

D.1. Principe de la phyto-dépollution :

La phyto-dépollution est une technologie de dépollution qui semble efficace pour un large spectre de polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée sur des substrats solides, liquides ou gazeux (Pilon-Smits., 2005). Les plantes peuvent être utilisées comme un filtre à air, en intérieur ou en extérieur, elles absorbent des polluants comme le NO_x, le SO₂, le CO₂, l'ozone, les mauvaises odeurs ou encore les hydrocarbures volatils halogénés (Jeffers P. M. et al., 1998). Dans le cas de substrats solides ou liquides, la dépollution est envisagée pour des produits organiques (HAP, pesticides, explosifs, produits pharmaceutiques) mais aussi des métaux lourds (plomb, cuivre, zinc...) et des radionucléides.

Les végétaux ont un système racinaire très étendu qu'ils utilisent pour extraire l'eau et les minéraux du sol nécessaires à leur croissance. Lors de cette extraction, ils absorbent aussi d'autres composés dissous dans la phase aqueuse. Cette caractéristique est importante dans le processus de phyto-dépollution car les végétaux sont capables d'absorber de grandes quantités d'eau qu'ils puisent à des profondeurs de 2 à 5 mètres voire plus pour certaines plantes comme la luzerne ou les plantes phréatophytes (Vila M., 2006).

Les organismes vivants sont cesse soumis à des contraintes environnementales. Dans le cas des végétaux, leur immobilité constitue un facteur important de pression dans leur adaptation au cours de l'évolution. Beaucoup de plantes ont développé des systèmes biochimiques pour l'adaptation aux conditions géochimiques locales mais aussi pour la modification de leur environnement direct. Elles sont capables par exemple de croître sur des sols pollués en les détoxiquant. A l'origine, cette toxicité était majoritairement due à des composés phytotoxiques synthétisés par d'autres organismes vivants, des micro-organismes ou des plantes. Les plantes ont donc utilisé leur équipement enzymatique classique pour dégrader ces composés et survivre dans ces milieux. Ces mécanismes sont aussi mis en œuvre pour les composés xénobiotiques présents dans l'environnement. Après absorption d'un polluant, les plantes peuvent soit le séquestrer dans un compartiment cellulaire pour limiter son interaction avec le fonctionnement cellulaire normal, soit le dégrader pour le détoxiquer (Vila M., 2006).

Les plantes étant des organismes photoautotrophiques, elles utilisent la photosynthèse pour fixer le dioxyde de carbone qui servira ensuite de source d'énergie et de carbone. Ainsi, elles ne dépendent pas de composés organiques pour leur survie. Elles ne possèdent sans doute pas un très large spectre d'enzymes spécialisées dans la dégradation de composés exogènes. Toutefois, lors de la détoxification des xénobiotiques, ces derniers remplacent les substrats naturels d'enzymes impliquées dans le métabolisme secondaire (Komoba D. et al., 1995). De rares plantes qui se développent sur des sols pauvres en nutriments semblent être capables d'utiliser des contaminants organiques en nutriments pour subsister (Meagher R. B., 2001).

La phyto-dépollution exploite ces caractéristiques des végétaux pour diminuer la contamination du sol. Elle repose sur les capacités des plantes à extraire et transformer le contaminant du sol ou d'augmenter la participation des micro-organismes du sol dans le processus de dégradation du polluant.

D.2. Mécanismes de phyto-dépollution :

Au cours d'un processus de phyto-dépollution, l'action des plantes sur le polluant intervient à différents niveaux. Les polluants peuvent être stabilisés ou dégradés dans la rhizosphère, séquestrés ou dégradés ou encore rendus volatiles et éliminés dans l'air environnant. Divers mécanismes sont mis en œuvre en fonction de la nature du polluant et de ses caractéristiques physico-chimiques. Ces mécanismes ont été largement décrits (McCutcheon S. et Schnoor J., 2003) (Pilon-Smits., 2005). Les classifications de ces mécanismes varient en fonction des auteurs, c'est pourquoi nous proposons un classement basé uniquement sur le devenir de la pollution. Quatre mécanismes principaux peuvent être retenus : la phyto-extraction, la phyto-transformation, la phyto-dégradation et la phyto-stabilisation (figure 2.63). Cette classification permet de limiter la multiplication de terminologies définissant spécifiquement les différents mécanismes de la phyto-dépollution tels que la bioconcentration, la phyto-assimilation, la phyto-oxydation, la phyto-évaporation, la phyto-séquestration, la dendrorémediation, (utilisation d'arbres pour la phyto-dépollution) (Schoenmuth B. et Pestemer W., 2004) ou d'autres termes définissant plus précisément les processus comme la phyto-photolyse (activation de la photolyse par l'adsorption par la plante) (Just C. et Schnoor J., 2004).

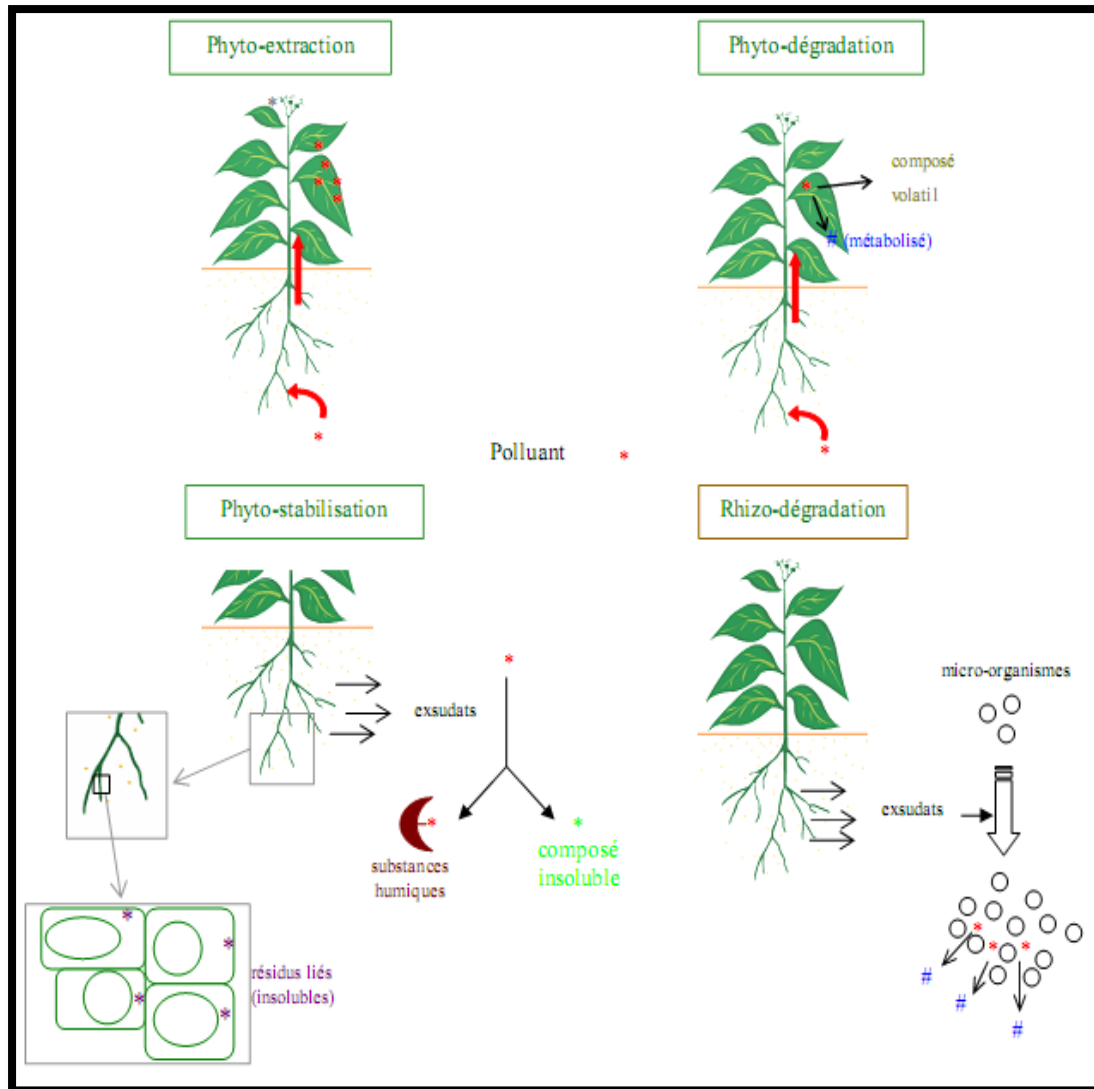


Figure 2-63 : Principaux mécanismes de phyto-dépollution: phyto-extraction, phyto-dégradation, Phyto-stabilisation et rhizo-dégradation (Vila M., 2006).

□ Phyto-extraction ou phyto-accumulation ou phyto-filtration :

Ce mécanisme est basé sur la capacité des plantes à extraire et accumuler des polluants présents dans les sols. Il en résulte une absorption et une accumulation des polluants dans les tissus aériens sans impliquer leur dégradation. A la fin de ce processus, il est alors nécessaire de récolter les parties aériennes des plantes. La destruction des polluants peut alors se faire par incinération mais aussi par compostage.

Ce mécanisme peut aussi entrer en jeu avec des plantes aquatiques ou semi-aquatiques dans des systèmes hydriques tels que des lagunes naturelles, des petits lacs, des sorties de station d'épuration, des bassins de décantation (lagunage). La phyto-filtration est basée sur l'absorption, la concentration et la précipitation du polluant par l'intermédiaire de plantes (Arthur E. et *al.*, 2005). La luzerne est ainsi capable d'absorber

les nitrates en grandes quantité mais il faut que le flux d'eau ne soit pas trop rapide pour optimiser cette absorption (Russelle M. P., 2001).

□ Phyto-transformation ou phyto-dégradation :

Après avoir absorbé un contaminant, certaines plantes peuvent être capables de le dégrader. Exposés à divers xénobiotiques, végétaux et animaux ont dû développer des systèmes de détoxification mais contrairement aux animaux, les plantes ne disposent pas de système d'excrétion permettant d'éliminer les composés toxiques. Pour les détoxifier, les végétaux sont donc capables de séquestrer ces composés dans des compartiments cellulaires. Chez les animaux, les xénobiotiques insolubles ou peu solubles sont transformés majoritairement dans le foie en composés solubles par deux phases successives. En fonction du composé, ces premières phases ne sont pas indispensables. Lors de la phase I, la molécule est biotransformée ce qui aboutit à l'apparition de groupements fonctionnels. Cette phase est principalement réalisée par des enzymes à cytochrome. La phase II aboutit à la conjugaison de molécules endogènes à cette molécule. La molécule est rendue beaucoup plus polaire et inactive, elle sera ensuite excrétée, principalement par les urines ou la bile (Blaauboer B. M., 1996) (Timbrell J. A., 1982). Chez les végétaux, le métabolisme des xénobiotiques peut être divisé en trois phases aboutissant à la neutralisation du polluant : la transformation ou phase I, la conjugaison ou phase II et la compartimentation ou phase III (Sandermann H., 1992) (figure 2.64). Les deux premières phases sont similaires à celles mises en œuvre par les animaux. Les enzymes impliquées dans les deux premières phases ne sont pas spécifiques des xénobiotiques, ce sont des enzymes du métabolisme secondaire de la plante (Komoba D. et al., 1995). Les enzymes de phase I transforment le composé par réduction, oxydation ou hydrolyse créant ainsi un ou plusieurs groupements fonctionnels sur la molécule (Komives T. et Gullner G., 2005). Les réactions les plus rencontrées sont les oxydations réalisées par des mono-oxygénases à cytochrome ou par des peroxydases. D'autres enzymes telles que les carboxylesterases peuvent aussi agir. Les enzymes de phase II catalysent la fixation d'un ou plusieurs substituant endogènes sur des sites actifs existants ou formés au cours de la phase I. Les principales réactions incluent la conjugaison aux glucosides, au glutathion, aux acides aminés ou à l'acide malonique. Les enzymes impliquées sont les *O*-glucosyltransférases, les *N*-glucosyltransférases, les glutathione *S*-transférases ou encore les *N*-malonyltransférases. Lors de la phase III, les composés solubles sont soit stockés dans la vacuole, soit incorporés dans la lignine ou dans les autres constituants de la paroi cellulaire devenant ainsi non extractibles. De par sa similitude avec les

mécanismes hépatiques de détoxication chez les animaux, le terme de « green liver » a été adopté pour le fonctionnement des cellules végétales vis-à-vis des xénobiotiques (Sandermann H., 1994).

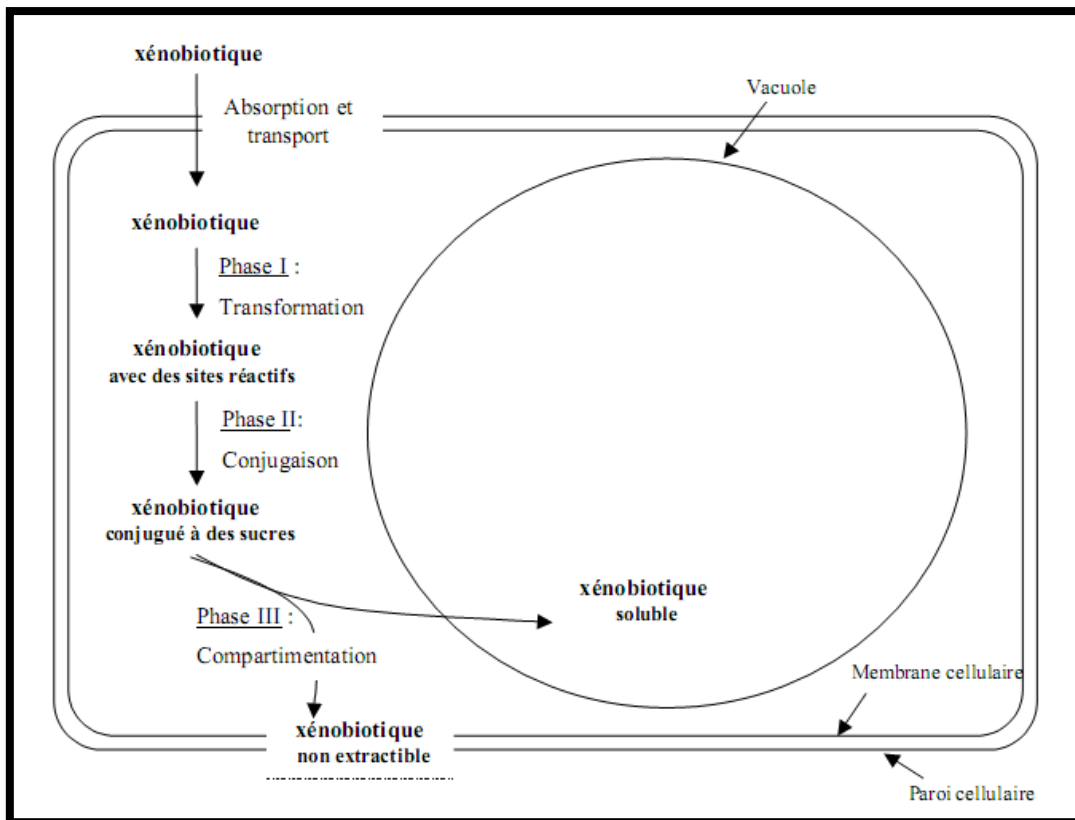


Figure 2-64 : Métabolisme des xénobiotiques chez la plante (Sandermann H., 1992).

Ces processus enzymatiques sont mis à profit pour la dépollution. Certaines enzymes végétales sont particulièrement impliquées dans la phyto-dépollution pourtant, leurs substrats naturels dans la plante sont mal connus : les déhalogénases (composés chlorés), les peroxydases (composés phénoliques), les nitroréductases (composés nitroaromatiques), les nitrilases (composés aromatiques cyanilés) et les phosphatases (pesticides organophosphorés).

Certaines plantes peuvent convertir un contaminant en composé volatil qui sera rejeté dans l'atmosphère par les stomates des feuilles (Yu X. Z. et Gu J. D., 2006). Ce processus est plus particulièrement appelé phyto-volatilisation. Dans ce cas, le composé volatil néoformé peut être toxique mais il sera dilué dans l'air pour diminuer l'exposition et ainsi le risque.

❑ Rhizo-dégradation ou phyto-stimulation :

Dans ce cas, les plantes ont une action indirecte sur le polluant. Elles agissent en activateur de la dégradation microbienne. La rhizosphère, zone de sol à proximité des racines, est une zone de haute densité et

d'activité microbiennes. Les plantes peuvent moduler l'environnement géochimique de la rhizosphère ce qui fournit des conditions plus adaptées à la croissance des bactéries et des champignons. 10 à 20 % des photosynthétats des plantes sont sécrétés par celles-ci sous forme d'exsudats racinaires qui favorisent la croissance et l'activité métabolique des communautés fongiques et bactériennes de la rhizosphère (Newman L. A. et Reynolds C. M., 2005). La composition chimique des exsudats racinaires et les taux d'exsudation varient considérablement selon les espèces (Rao A.S., 1990). Certains composés organiques des exsudats racinaires (phénols, acides organiques, alcools, protéines) peuvent être utilisés comme sources de carbone et d'azote pour la croissance et la survie des microorganismes. L'activité des microorganismes est favorisée par la présence des plantes qui créent un environnement physico-chimique approprié favorisant ainsi la dégradation microbienne des polluants organiques. Par exemple, les taux de biodégradation du phénanthrène sont plus élevés quand il est situé à moins de 3mm de racines de *Lolium perenne* (Corgie S. C. et al., 2004).

Cette interaction entre les plantes et les microorganismes permet de limiter, dans certains cas, l'utilisation de fertilisants au cours de la bio-dépollution grâce aux déchets végétaux et aux exsudats racinaires.

□ Phyto-stabilisation :

Certains polluants sont récalcitrants aux précédents mécanismes. Dans ce cas, la phyto-stabilisation fournit une alternative au problème de contrôle de la contamination. Elle repose sur l'immobilisation du polluant pour limiter sa dispersion dans l'environnement et sa biodisponibilité. Elle peut consister en une simple revégétalisation du site qui évite l'érosion et la dispersion du contaminant dans l'air et dans l'eau. Les plantes peuvent aussi être utilisées comme des pompes organiques pour absorber de grands volumes d'eau. Bien que le polluant ne pénètre pas dans la plante, il reste alors localisé dans la zone polluée initialement. Cela ne permet pas de diminuer la pollution dans le sol mais cela réduit la migration des contaminants vers les nappes phréatiques. Les racines des plantes ont aussi la capacité de modifier les conditions environnementales comme le pH ou l'humidité du sol. Certains contaminants peuvent être sensibles à ces variations et la présence de plantes peut ainsi permettre une diminution de la biodisponibilité du polluant. Ainsi, une expérience de revégétalisation a été menée avec des plantes mycorhызées sur trois sites contaminés par des métaux ou des polluants organiques et a permis la réimplantation d'une activité biologique (Oliveira R. S. et al., 2001).

Enfin, certains composés peuvent être absorbés par la plante mais ne pas être transférés vers les parties aériennes. Ils peuvent donc être incorporés dans les parois racinaires après une métabolisation. Le polluant sera immobilisé dans la paroi par des liaisons covalentes irréversibles. Certains micro-organismes sont capables de dégrader les parois végétales et ils seraient donc capables de dégrader le polluant (Aust S. D., 1995) (Broda P. et *al.*, 1994).

La combinaison de plusieurs mécanismes peut permettre d'optimiser la phyto-dépollution. Dans certains cas, les microorganismes peuvent, dans un premier temps, dégrader un composé récalcitrant pour permettre dans un deuxième temps l'absorption par la plante du ou des métabolites ainsi produits. L'utilisation de la phyto-dépollution peut être limitée par la taille des plantes présentant des potentiels intéressants de dépollution ou une trop faible capacité des plantes à tolérer, détoxiquer et accumuler les contaminants. Le choix des plantes était jusqu'à présent basé sur un processus de tolérance aux polluants et sur leur efficacité en matière de dépollution des sols (Sun W. et *al.*, 2004). Plus récemment, une approche transgénique a été proposée pour optimiser la capacité des plantes qui présentent un intérêt en phyto-dépollution (Peuke A. D. et Rennenberg H., 2005). Le premier choix se fait en fonction de la capacité de croissance et de production de biomasse mais aussi de l'adaptation au type du site à dépolluer. Les biotechnologies incluent le transfert de gènes d'intérêt chez les plantes (Karavangeli M. et *al.*, 2005) (Kawahigashi H., 2006) (Wang L. et *al.*, 2005). Le transfert de gènes se fait généralement d'un microorganisme vers la plante mais il peut aussi se faire à partir d'un animal ou d'une autre plante. Actuellement, ces approches restent limitées au stade expérimental car elles sont difficilement acceptées du grand public à cause de l'image négative des organismes génétiquement modifiés (OGM).

L'action des plantes se faisant naturellement lors de la phyto-dépollution, les sites pollués ayant un couvert végétal naturel ont tendance à être dépollués sans intervention humaine. Cette atténuation naturelle est la forme la plus simple de phyto-dépollution car elle ne nécessite pas d'autre intervention qu'un suivi du niveau de pollution au cours des années.

Dans le cas des métaux lourds, la phyto-dépollution est principalement basée sur une extraction ou sur une inactivation dans le sol pour limiter la dispersion (Lombi E. et *al.*, 2001). Ainsi, certaines plantes sont capables d'accumuler jusqu'à 0,1 % de leur poids sec en

métaux lourds et une extraction ultérieure permet de réutiliser le métal. La phyto-dépollution peut aussi réduire la biodisponibilité des métaux lourds. Beaucoup d'exsudats racinaires causent la spéciation des métaux (modification du degré d'oxydation des métaux lourds). La précipitation et l'adsorption des métaux ce qui forme des dépôts minéraux stables sur les acides humiques dans le sol. Cela limite leur biodisponibilité dans le sol pour les plantes et les autres organismes. Des amendements d'agents complexant tels que l'acide Ethylène Diamine Tétra Acétique (EDTA) peuvent être réalisés pour rendre les métaux plus solubles (Lombi E. et *al.*, 2001). Ils permettent alors d'augmenter la biodisponibilité des métaux et donc une phyto-extraction. Cette méthode est très controversée car elle augmente aussi les risques de lessivage et de dispersion des métaux dans l'environnement. Lors de l'utilisation de chélateurs, il est donc essentiel d'effectuer un suivi complet et à long terme.

D.3. Optimisation de l'efficacité de la phyto-dépollution :

La compréhension des mécanismes influant sur la biodisponibilité des polluants peut aider à optimiser l'efficacité des processus de phyto-dépollution. Par exemple, l'ajout de matière organique peut permettre de diminuer la biodisponibilité des composés hydrophobes en cas de phyto-toxicité nuisant à la mise en place des végétaux. Dans le cas inverse, l'ajout de surfactants va pouvoir augmenter leur biodisponibilité. Cette méthode est très utilisés pour les produits phytosanitaires, les pesticides peu solubles sont formulés avec des surfactants et sont ainsi plus solubles et davantage disponibles pour la plante (Komives T. et Gullner G., 2000). Pour les polluants organiques plus ou moins protonés, la modification du pH du sol va modifier leur solubilité et leur capacité à être absorbé par les plantes. L'ajout d'eau peut aussi être optimisé pour faciliter la migration du polluant tout en contrôlant son lessivage.

D.4. Critères de choix des plantes pour la phyto-dépollution :

Les plantes envisagées pour la dépollution doivent avoir une croissance rapide, une forte production de biomasse et être compétitives vis-à-vis des plantes endogènes du site, elles doivent aussi être tolérantes à la pollution pour permettre une extraction optimum du polluant. Les plantes seront choisies en fonction de leurs propriétés (densité du couvert racinaire) en relation avec le type de mécanisme envisagé pour dépolluer. Dans le cas d'une phyto-extraction de métaux lourds, les plantes envisagées sont celles qui ont les niveaux d'absorption les plus forts, de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltés (Meagher R. et Heaton A., 2005). Pour les mécanismes de phyto-dépollution en général, les plantes ayant un système racinaire large et dense sont privilégiées car elles ont une plus grande capacité d'absorption et elles explorent une plus vaste zone de sol. Pour un mécanisme de phyto-dégradation, il est préférable que les plantes synthétisent de grandes quantités d'enzyme de dégradation (Pilon-Smits., 2005).

D.5. Les avantages de la phyto-dépollution :

La phyto-dépollution présente de nombreux avantages. Tout d'abord, un faible coût de mise en place et de maintenance présente un intérêt non négligeable dans la dépollution de sites. Procédé biologique captant l'énergie du soleil, la phyto-dépollution est environ 1 à fois moins chère que les technologies classiques comme l'excavation et l'incinération des sols ou des systèmes d'extraction et de traitement chimique. Cette technologie étant mise en place *in situ*, son coût est nettement diminué en comparaison aux autres méthodes *ex situ*. Le travail *in situ* réduit aussi les risques de dispersion et d'exposition de l'homme, de la faune et de l'environnement au polluant (Vila M., 2006).

La phyto-dépollution devrait permettre aussi d'améliorer la qualité des sols. En effet, la croissance du système racinaire permet une aération des sols ce qui stimule l'activité microbologique, de même que l'apport de nutriments au travers des exsudats racinaires (Suresh B. et Ravishankar G., 2004). Les végétaux participent également à la diminution de l'érosion. Ils diminuent aussi l'infiltration des eaux de surface polluées vers les nappes phréatiques en freinant le ruissellement.

La phyto-dépollution a un impact positif sur l'opinion publique en tant que « dépollution verte ». En effet, elle respecte et restaure l'environnement et représente une alternative aux méthodes classiques trop destructrices et polluantes. Elle tend surtout à être utilisée pour les composés chimiques présentant un risque pour l'environnement (Meagher R., 2001).

Elle peut être utilisée seule ou couplée à des technologies plus agressives. Dans de nombreux projets de dépollution, les forts niveaux de contaminations doivent d'abord être maîtrisés par des traitements chimiques. La phyto-dépollution est alors envisagée comme une étape finale perfectionnée pour l'élimination des traces de contaminants. Quand la concentration en polluants est faible, la phyto-dépollution reste la stratégie de dépollution la plus envisageable économiquement. Il existe de nombreux sites avec une légère contamination en polluants qui peuvent être traités par cette technique en tant que solution à long terme (Vila M., 2006).

D.6. Les inconvénients de la phyto-dépollution :

La phyto-dépollution présente cependant des inconvénients non négligeables. Les plantes doivent être en contact avec le polluant pour pouvoir agir. Par conséquent, les propriétés du sol, les niveaux de toxicité et le climat doivent permettre la croissance des plantes envisagées. Si la toxicité est trop élevée, elle peut cependant être diminuée par dilution du sol avec des sols non contaminés mais cela augmente les coûts de mise en œuvre (Vila M., 2006).

De plus, les contaminants doivent être accessibles aux tissus absorbants. La phyto-dépollution est donc limitée par la profondeur des racines des plantes utilisées. Celles-ci peuvent atteindre 2m de profondeur dans le cas des herbacées et plus de 5m pour les arbres, même si certaines racines de phréatophytes peuvent atteindre des profondeurs de 15 m dans des zones arides (Negri M. et *al.*, 2003). Dans le cas de nappes phréatiques contaminées, une

alternative peut être le pompage de l'eau et l'utilisation de celle-ci pour irriguer les plantes.

Un autre inconvénient de la phyto-dépollution est qu'il s'agit d'un traitement à long terme, limitant son application aux cas d'utilisation non urgente des sites, i.e. sans pression économique, ou aux cas présentant aucun risque de dissémination dans l'environnement, i.e. sans pression environnementale. La vitesse de dépollution varie de l'ordre de quelques années pour la rhyzo-dégradation à quelques dizaines d'années pour la phyto-accumulation. D'autre part, la majorité des recherches a été effectuée en laboratoire dans des conditions très contrôlées, il est probable que la mise en place sur un site diminue l'efficacité de la dépollution à cause des conditions climatiques et environnementales du site (arrosage, présence de nuisibles...) non maîtrisées (Vila M., 2006).

L'histoire du site à dépolluer est importante car elle renseigne sur les composés qui peuvent être rencontrés sur le site. En effet, un autre facteur limitant la phyto-dépollution est la présence sur les sites de plusieurs contaminants, souvent à des concentrations variables et de répartition hétérogène. Le sol peut alors devenir phyto-toxique pour les plantes choisies alors que le seul contaminant de référence ne l'était pas. L'âge de la contamination peut aussi jouer un rôle important sur la biodisponibilité du polluant dans le sol et sur sa toxicité (Alexander M., 2000). En effet, le temps favorise la liaison des polluants aux substances humiques ce qui diminue la quantité de polluant dans la phase aqueuse. Le temps par l'alternance de lumière et d'obscurité et de périodes sèches et humides peut aussi modifier ces paramètres par la photo-décomposition, l'hydrolyse, les réactions avec la matière organique du sol, l'adsorption sur les particules du sol, la précipitation, la transformation microbienne et d'autres mécanismes pouvant entrer en jeu dans les sols (Vila M., 2006).

Si malgré tous ces facteurs limitants, les plantes arrivent à croître et à absorber de grandes quantités de polluant, elles représentent toujours un risque environnemental important dans le cas d'un site non suivi. En effet, après absorption du polluant, elles peuvent entrer dans la chaîne alimentaire et induire la dispersion de la pollution. Elles peuvent aussi atténuer naturellement la pollution en dégradant le polluant (Vila M., 2006).

2.3. CONCLUSION :

L'objectif du chapitre est de présenter les principaux moyens de prévention et de dépollution d'un site pollué actuellement disponibles pour les sols et les eaux. Les principaux traitements in situ, on site et ex situ ont été abordés qu'il s'agisse de procédés physico-chimiques, biologiques ou thermiques.

Vue le coût et la difficulté de la dépollution, la question de prévenir la pollution plutôt que d'y réagir. La prévention de la pollution représente le moyen le plus efficace de protéger l'environnement, d'éliminer le gaspillage coûteux et de favoriser le développement durable. Par la prévention de la pollution, on s'efforce de ne pas produire de polluants plutôt que de chercher à s'en débarrasser après coup.

La présentation de chaque technique de dépollution rassemble les informations relatives à sa description, son domaine d'application, son efficacité, ses coûts, ses avantages et ses inconvénients.

Notons qu'il est très difficile d'associer une technologie à un type de pollution, la dépollution est délicate puisque chaque site est spécifique. En effet, chaque site est une combinaison unique de caractéristiques environnementales, de polluants et d'usages présents ou futurs. Il conviendra donc, si nécessaire, de valider les options choisies par des essais d'orientation et d'évaluation ainsi que des études de dimensionnement plus détaillées.

Par ailleurs, pour répondre aux exigences de temps, de coûts, d'efficacité et d'espace, le traitement mis en œuvre est souvent une combinaison :

- De différentes techniques de dépollution,
- De mesures constructives,
- Et de restrictions d'usage.

CHAPITRE III

SYNTHESE SUR LES TEXTES LEGISLATIFS CONCERNANT LA PREVENTION CONTRE LA POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS

La législation concernant la prévention contre les différents types de pollution a pour objet la mise en disponibilité d'une vie propre pour le citoyen. Dans ce chapitre on va passer en revue les principaux textes législatifs nationaux et internationaux relatifs à la protection de l'environnement, en particulier des eaux et des sols, contre tous types de pollution. Les lois et décrets, entre autres, concernés par la lutte contre la pollution sont cités et les passages importants sont mis en reliefs dans le but d'une étude comparative entre les textes nationaux et internationaux. Des recommandations sont enfin faites en vue de compléter les lacunes algériennes dans le domaine de la protection contre toute sorte de pollution affectant directement ou indirectement les eaux et le sol.

3.1. LEGISLATIONS ALGERIENNES :

L'Algérie depuis son indépendance a adopté plusieurs politiques en établissant des textes législatifs concernant majoritairement la mobilisation et la gestion des eaux au détriment de la protection de l'environnement. Malgré ces réglementations, l'Algérie reste un pays très en retard dans le domaine de la protection de l'environnement contre les différents types de pollutions. Dans ce qui suit, on synthétise les principaux textes en vigueur concernant la protection des eaux et des sols en vue de les comparer avec la réglementation étrangère dans le but de déduire d'éventuelles lacunes.

3.1.1. INVENTAIRE DES TEXTES LEGISLATIFS CONCERNANT LA PROTECTION DES EAUX ET DES SOLS EN ALGERIE :

La législation en Algérie concernant la protection des eaux et des sols est assurée de manière exclusive ou conjointe par les lois sur la protection de l'environnement, le code des eaux, les lois sur la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets et parfois sur la santé publique. Depuis l'indépendance, l'Algérie a promulgué plusieurs textes législatifs concernant le secteur de pollution, on cite dans ce qui suit les tous textes en vigueur à nos jours.

1. Loi n° 83-03 du 5 février **1983** relative à la protection de l'environnement.
2. Loi n° 83-17 du 16 juillet **1983** portant code des eaux.
3. Loi n° 87-17 du 1er aout **1987** relative à la protection phytosanitaire.

4. Loi n° 01 - 19 du 12 décembre **2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
5. Loi n° 03-10 du 19 Joumada el Oula 1424 correspondant au 19 juillet **2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable.
6. Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août **2005** relative à l'eau.
7. Décret n° 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et du traitement des déchets solides urbains.
8. Décret n° 87-182 du 18 août 1987 relatif aux huiles à base de polychloro-biphényle (P.C.B.), aux équipements électriques qui en contiennent et aux matériaux contaminés par ce produit .
9. Décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet **1993** réglementant les rejets d'effluents liquides industriels.
10. Décret exécutif n° 93-161 du 10 juillet **1993** réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel.
11. Décret exécutif n° 93-162 du 10 juillet **1993** fixant les conditions et les modalités de récupération et de traitement des huiles usagées.
12. Décret exécutif n° 93-163 du 10 juillet **1993** portant institution d'un inventaire du degré de pollution des eaux superficielles.
13. Décret exécutif n°02-175 du 20 mai **2002** portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence nationale des déchets.
14. Décret exécutif n°07-399-du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre **2007** relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau.
15. Le décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février **2010** relatif à la protection quantitative des nappes aquifères.
16. L'ordonnance n° 09-02 du 29 Rajab 1430 correspondant au 22 juillet 2009 modifiant et complétant la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août **2005** relative à l'eau.

3.1.2. SYNTHÈSE DES GRANDES LIGNES CONCERNANT LA PROTECTION DES EAUX ET SOLS CONTRE LA POLLUTION :

Parmi les seize textes législatifs, inventoriés ci-haut, qui visent la protection de l'environnement seul neuf textes prévoient la protection des eaux et des sols, à savoir :

1. Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement
2. Loi n° 83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux
3. Loi n° 01 - 19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets
4. Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau
5. Décret n° 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et du traitement des déchets solides urbains
6. Décret n° 87-182 du 18 août 1987 relatif aux huiles à base de poly-chloro-biphenyle (P.C.B.), aux équipements électriques qui en contiennent et aux matériaux contaminés par ce produit
7. Décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels
8. Décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau
9. Décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères.

Les principaux passages, cités dans ces textes, qui prévoient la protection des eaux et des sols contre toute sorte de pollution sont rappelés ci-après.

A) Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement.

La loi n° 83-03 suscitée comporte VI titres. Dans notre étude le titre III qui nous intéresse '**protections des milieux récepteurs**' se compose de quatre chapitres. Le deuxième chapitre sur 'la protection de l'eau' contient 12 articles de 36 à 47.

Les articles 36 à 41 concernent les dispositions pour objet la lutte contre la pollution des eaux superficielles, cours d'eau, lacs et étangs, Ces dispositions s'appliquent aux déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects,

de matières de toute nature et, plus généralement, à tout fait susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux en modifiant leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou bactériologiques.

Les eaux superficielles, cours d'eau, lacs et étangs font l'objet d'un inventaire établissant leur degré de pollution. Des documents sont établis pour chacune de ces eaux d'après des critères physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques pour déterminer l'état de chacune d'elles. Ces documents font l'objet d'une révision générale et d'une révision immédiate chaque fois qu'un changement exceptionnel ou imprévu affecte l'état de ces eaux.

Les installations de déversement établies postérieurement à la promulgation de la présente loi doivent, dès leur mise en service, fournir des effluents conformes aux conditions qui leur sont imposées. Les prélèvements et déversements de ces installations sont subordonnés :

- A une approbation préalable, par le ministre chargé de l'environnement, du projet technique relatif aux dispositifs d'épuration correspondant auxdites installations ;
- A une autorisation de mise en service délivrée par le ministre chargé de l'environnement après érections effectives des dispositifs d'épuration conformes au projet technique préalablement approuvé.

Dans les articles 43 et 44 concernent les dispositions du code de la santé publique et en vue d'assurer la protection de la qualité des eaux, l'acte portant déclaration d'utilité publique des travaux de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines détermine autour du point de prélèvement:

- un périmètre de protection immédiate dont les terrains sont à acquérir en pleine propriété,
- un périmètre de protection rapproché à l'intérieur duquel doivent être interdits ou réglementés toutes activités et tous dépôts ou installations de nature à nuire, directement ou indirectement, à la qualité des eaux,
- un périmètre de protection éloigné à l'intérieur duquel peuvent être réglementés les activités, dépôts ou installations précités.

Art. 47 : tout déversement ou rejet d'eaux usées ou de déchets de toute nature dans les eaux destinées à la réalimentation des nappes d'eaux souterraines, dans les puits, Forages ou galeries de captage désaffectés est interdit.

Les puits, Forages ou galeries de captages désaffectés font l'objet d'une déclaration et sont soumis, sans préjudice des droits des tiers, à la surveillance de l'administration.

Un décret pris sur rapport du ministre chargé de l'environnement fixe les conditions d'application du présent article.

Le troisième chapitre sur 'la protection de la mer' contient 07 articles de 48 à 54. Les articles 48 à 52 contiennent des textes réglementaires sur la protection de

la mer, interdit le déversement, l'immersion et l'incinération en mer de matières de toute nature susceptibles :

- De porter atteinte à la santé publique et aux ressources biologiques,
- D'entraver les activités maritimes, y compris la navigation et la pêche,
- D'altérer la qualité de l'eau de mer, du point de vue de son utilisation,
- De dégrader les valeurs d'agrément de la mer.

Le ministre chargé de l'environnement peut, après enquête publique, proposer des règlements et autoriser le déversement, l'immersion ou l'incinération en mer, dans des conditions telles que ces opérations garantissent l'innocuité et l'absence de nuisance du déversement, de l'incinération ou de l'immersion.

Dans le cas d'avaries ou d'accidents en mer territoriale survenus à tout navire, aéronef, engin ou plate-forme transportant ou ayant à son bord des substances novices, dangereuses ou des hydrocarbures et pouvant créer des dangers graves et imminents susceptibles de porter atteinte au littoral ou aux intérêts connexes, le propriétaire dudit navire, aéronef, engin et plate-forme peut être mis en demeure de prendre toutes les mesures nécessaires pour mettre fin à ces dangers.

Le titre IV '**protection contre les nuisances**' se compose de 6 chapitres. Le deuxième chapitre sur 'des déchets' contient 12 articles de 89 à 101.

Un déchet au sens de la présente loi, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.

Toute personne physique ou morale qui produit ou détient de déchets, dans les conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination conformément aux dispositions de la présente loi, dans des conditions propres à éviter lesdits effets.

L'élimination des déchets comporte notamment: les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération de l'énergie ou des éléments et matériaux réutilisables, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances mentionnées à l'alinéa précédent.

Art. 91 : les déchets de ménages sont traités conformément à la présente loi.

Les producteurs ou importateurs doivent justifier que les déchets engendrés, à quelque stade que ce soit, par les produits qu'ils fabriquent ou importent sont de nature à être éliminés dans les conditions prescrites à la présente loi.

Il est fait obligation aux producteurs, importateurs et distributeurs de ces produits ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication de pourvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets qui en proviennent.

Les entreprises qui produisent, importent, transportent ou éliminent des déchets appartenant aux catégories définies par décret pris sur le rapport du ministre chargé de la protection de l'environnement et des ministres concernés comme pouvant soit en l'état, soit lors de leur élimination, causer des nuisances telles que celles qui sont mentionnées auparavant de la présente loi sont tenues de fournir au ministre chargé de l'environnement toutes informations concernant l'origine, la nature, les caractéristiques, les quantités, la destination et les modalités d'élimination des déchets qu'elles produisent, remettent à un tiers ou prennent en charge.

L'élimination des déchets doit être assurée, aux stades correspondant à toutes les opérations mentionnées auparavant de la présente loi dans les conditions propres à faciliter la récupération des matériaux ou formes d'énergie réutilisable.

Des décrets pris sur rapport du ministre chargé de l'environnement et des ministres concernés réglementent les modes d'utilisation de certains matériaux et celles des matériaux qui leur sont associés dans certaines fabrications.

La réglementation peut porter notamment sur l'utilisation de certains traitements, mélanges ou associations avec d'autres matériaux ou sur l'obligation de se conformer à certains modes de fabrication et de réutilisation.

B) Loi n° 83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux :

Cette loi comporte 10 titres. Dans notre étude le titre VI qui nous intéresse 'lutte contre la pollution et protection des ressources en eau' se compose de deux chapitres une sur 'la lutte contre la pollution' et l'autre sur 'les périmètres de protection'.

Le chapitre 1 contient 12 articles de 96 à 108, ils définissent comment on doit protéger les eaux contre toute forme de pollution. Les principaux points dans ce chapitre concernant notamment :

- La protection de la eau s'apprécie ressource en en termes qualitatifs et quantitatifs.
- l'interdiction d'évacuer, de jeter ou d'injecter dans les fonds du domaine public hydraulique des matières qui sont de nature à nuire :
 - à la capacité de régénération naturelle des eaux,
 - aux exigences de l'utilisation des eaux réceptives,
 - à la protection de la santé publique,
 - à la protection de la faune et de la flore,
 - à l'écoulement normal des eaux,
 - aux loisirs.
- Tout établissement et notamment toute unité industrielle dont les rejets sont reconnus polluants doit prévoir des installations d'épuration.

- L'interdiction d'abandon de cadavres d'animaux dans le domaine public hydraulique.
- L'interdiction tout dépôt, épandage ou pulvérisation de matières susceptibles de polluer le domaine public hydraulique.
- Les ressources en eau susceptibles d'être polluées sont soumises aux contrôles périodiques de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologique.

Le chapitre 2 abordé la protection des eaux souterraines à travers les articles 109 jusqu'à l'article 124. La protection en eau est assurée par des périmètres de protections qualitatives et quantitatives. Elles a défini le périmètre de protection comme un contour délimitant un domaine géographique dans lequel sont interdites ou réglementées toutes les activités à l'intérieurs des périmètres de protection qui peuvent polluer les ressources en eaux souterraines concernant notamment :

- L'exécution des puits et forages.
- L'exploitation des carrières.
- L'installation de canalisation, réservoirs et dépôts d'hydrocarbure.
- L'installation de canalisations des eaux usées de toutes natures.
- L'établissement de toutes constructions.
- L'épandage de fumier, engrais et tous produits destinés à la fertilisation des sols et à la protection des cultures.
- Les dépôts d'ordures, immondices, détritux radioactifs, d'une manière générale, tout produit et matière susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.
- La protection des ressources en eaux souterraines doit faire l'objet aussi bien d'une protection qualitative de tous les captages de sources, puits ou forages ainsi que toutes les parties vulnérables des nappes souterraines que d'une protection quantitative des nappes surexploitées ou menacées de l'être, à l'intérieur desquelles sont :
- Interdites toutes réalisations de travaux de fonçage de puits ou forages ou toute modification des installations existantes destinées à augmenter les débits prélevés.
- Soumis à autorisation, les travaux de remplacement de réaménagement des installations hydrauliques existantes, sans augmentation des volumes d'eau prélevés.

Dans les zones où les ressources en eaux souterraines sont surexploitées et en vue d'assurer la conservation des débits d'exploitation ou à la mise hors service d'un certain nombre de points de prélèvement, le comptage de l'eau est obligatoire.

C) Loi n° 01 - 19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets :

La présente loi a pour objet de fixer les modalités de la gestion, de contrôle et de traitement des déchets, comporte 9 titres. La gestion, le contrôle et l'élimination des déchets reposent sur les principes suivants:

- la prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets à la source;
- l'organisation du tri, de la collecte, du transport et du traitement des déchets;
- la valorisation des déchets par leur réemploi, leur recyclage et toute autre action visant à obtenir, à partir de ces déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie;
- le traitement écologiquement rationnel des déchets;
- l'information et la sensibilisation des citoyens sur les risques présentés par les déchets et leur impact sur la santé et l'environnement, ainsi que les mesures prises pour prévenir, réduire ou compenser ces risques.

Les dispositions de la présente loi s'appliquent à tous les déchets à l'exception des déchets radioactifs, des effluents gazeux, des eaux usées, des explosifs déclassés, des épaves d'aéronefs et des épaves maritimes.

Les déchets au sens de la présente loi sont classifiés comme suit:

- les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux;
- les déchets ménagers et assimilés;
- les déchets inertes.

Dans le titre II '**déchets spéciaux**' se compose de deux chapitres une sur 'Obligations des générateurs et détenteurs' et l'autre sur 'Mouvement des déchets'.

Le premier chapitre a déterminé les règlements et les interdictions pour les générateurs et détenteurs des déchets spéciaux, on site parmi les obligations :

- Les déchets spéciaux ne peuvent être traités que dans des installations autorisées par le ministre chargé de l'environnement.
- Le mélange de déchets spéciaux dangereux avec d'autres déchets est interdit.
- Les déchets issus des activités de soins doivent obéir à une gestion spécifique. Leur élimination est à la charge des établissements qui les génèrent et doit être pratiquée de manière à éviter toute atteinte à la santé publique et/ou à l'environnement.
- Le dépôt, l'enfouissement et l'immersion des déchets spéciaux dangereux dans des lieux autres que les sites et les installations qu'ils leurs sont réservés sont interdits.
- Les générateurs et/ou les détenteurs des déchets spéciaux dangereux sont tenus de déclarer au ministre chargé de l'environnement les informations relatives à la nature, la quantité et aux caractéristiques des déchets. Ils sont

également tenus de fournir périodiquement les informations ayant trait au traitement de ces déchets, ainsi qu'aux mesures pratiques prises et à prévoir pour éviter autant que faire se peut la production de ces déchets.

Le troisième titre '**déchets ménagers et assimilés**' se compose de deux chapitres une sur 'organe de gestion' et l'autre sur 'dispositions générales'.

La gestion des déchets ménagers et assimilés relève de la responsabilité de la commune conformément à la législation régissant les collectivités locales.

La commune organise sur son territoire, un service public en vue de satisfaire les besoins collectifs des habitants en matière de collecte, de transport et, le cas échéant, de traitement des déchets ménagers et assimilés.

Le groupement de deux ou plusieurs communes peut décider de s'associer pour une partie ou la totalité de la gestion des déchets ménagers et assimilés.

Les services publics comprennent :

- la mise en place d'un système de tri des déchets ménagers et assimilés en vue de leur valorisation;
- l'organisation de la collecte séparée, le transport et le traitement approprié des déchets spéciaux générés en petite quantité par les ménages, des déchets encombrants, des cadavres d'animaux et des produits du nettoyage des voies publiques, des halles et des marchés;
- la mise en place d'un dispositif permanent d'information et de sensibilisation des habitants sur les effets nocifs des déchets sur la santé publique et l'environnement et sur les mesures destinées à prévenir lesdits effets;
- la mise en œuvre de mesures incitatives visant le développement et la promotion de systèmes de tri des déchets ménagers et assimilés.

Le quatrième titre '**déchets inertes**' a déterminé les obligations et les interdictions pour les générateurs et détenteurs des déchets inertes, on site parmi les principaux points dans ce titre :

- La collecte, le tri, le transport et la mise en décharge des déchets inertes sont à la charge de leurs générateurs.
- Le dépôt, le rejet et l'abandon des déchets inertes sont interdits sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique.
- La commune initie toute action et mesure visant l'implantation, l'aménagement et la gestion des sites des décharges désignés pour recevoir les déchets inertes.
- Les déchets inertes non valorisables ne peuvent être déposés que dans des sites aménagés à cet effet.

Ce qui concerne les installations de traitement des déchets, l'état fixe des réglementations sur les conditions de choix de sites d'implantation, d'aménagement, de réalisation, de modification de process et d'extension de ces installations. Dans le cas où l'installation de traitement est à implanter sur un terrain en location ou en jouissance, la demande tendant à l'obtention de la

décision de prise en considération de l'étude d'impact sur l'environnement comporte obligatoirement une pièce attestant que le propriétaire du terrain connaît la nature des activités projetées.

Toute installation de traitement des déchets est soumise, préalablement à sa mise en service, à :

- une autorisation du ministre chargé de l'environnement pour les déchets spéciaux;
- une autorisation du wali territorialement compétent pour les déchets ménagers et assimilés;
- une autorisation du président de l'assemblée populaire communale territorialement compétent pour les déchets inertes.

En cas de fin d'exploitation ou de fermeture définitive d'une installation de traitement des déchets, l'exploitant est tenu de réhabiliter le site en vue de le remettre dans son état initial ou dans l'état fixé par l'autorité compétente.

L'exploitant est tenu d'assurer la surveillance du site pendant une période fixée par la notification de fin d'exploitation afin d'éviter toute atteinte à la santé publique et/ou à l'environnement.

La mise en activité des installations de traitement des déchets est conditionnée par la souscription d'une assurance couvrant tous les risques y compris les risques d'accidents de pollution.

Le titre VII '**Disposition Pénales**' est chargée de la recherche et de la constatation des infractions aux dispositions de la présente loi, la police chargée de la protection de l'environnement et ce, conformément aux dispositions de la loi 83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement. Les infractions aux dispositions de la présente loi sont constatées par des procès verbaux conformément aux règles prévues par le code de procédure pénale. On site quelques exemples :

- Toute personne physique qui jette, abandonne des déchets ménagers et assimilés ou refus d'utiliser le système de collecte et de tri mis à sa disposition par les services publics communaux est punie d'une amende de cinq cent (500) à cinq mille dinars (5.000). En cas de récidive, l'amende est portée au double.
- Toute personne physique exerçant une activité industrielle, commerciale, artisanale ou toute autre activité, qui jette, abandonne des déchets ménagers et assimilés, ou refus d'utiliser le système de collecte et de tri mis à sa disposition par les services publics communaux, est punie d'une amende de dix mille (10.000) à cinquante mille dinars (50.000). En cas de récidive, l'amende est portée au double.
- Quiconque dépose, jette ou abandonne des déchets inertes sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique est puni d'une amende de dix mille (10.000) à cinquante mille dinars (50.000). En cas de récidive, l'amende est portée au double.

- Quiconque remet ou fait remettre des déchets spéciaux dangereux en vue de leur traitement, à une personne exploitant une installation non autorisée pour le traitement de cette catégorie de déchets, est puni d'un emprisonnement de six(6) mois à deux (2) ans et d'une amende de quatre cent mille (400.000) à huit cent mille (800.000) dinars ou de l'une de ces deux peines seulement. En cas de récidive, les peines sont portées au double.
- Quiconque dépose, jette, enfouit, abandonne ou immerge des déchets spéciaux dangereux dans des lieux non réservés à cet effet, est puni d'un emprisonnement de un (1) an à trois (3) ans et d'une amende de six cent mille (600.000) à neuf cent mille (900.000) dinars ou de l'une de ces deux peines seulement. En cas de récidive, les peines sont portées au double.

D) Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau :

Cette loi a pour objet de fixer les principes et les règles applicables à l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale.

Concernant les ressources en eaux, l'objectif de la loi vise à assurer la protection et la préservation des ressources en eaux.

Les articles 32 à 52 concernent la protection en eaux souterraines soit qualitative ou quantitative. Il est établi autour des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau souterraine ou superficielle ainsi que de certaines parties vulnérables des nappes aquifères et des oueds, une zone de protection qualitative. La loi a spécifié les règlements et les interdictions de toutes activités à l'intérieur de cette zone, à savoir:

- Le déversement ou rejet d'eaux usées de toute nature dans les ouvrages de captages des eaux souterraines.
- Le dépôt ou enfouissement de matières insalubres susceptibles de polluer les eaux souterraines.
- L'introduction de toutes matières insalubres dans les ouvrages de captage des eaux souterraines.
- Le dépôt et/ou l'enfouissement de cadavres d'animaux dans les oueds, lacs, étangs et à proximité des ouvrages de captages des eaux souterraines.

Aussi, tout établissement et toute unité industrielle dont les rejets sont reconnus polluants doit impérativement :

- Prévoir des installations d'épuration appropriées.
- Mettre en conformité leurs installations ou les procédés de traitement de leurs eaux résiduaires par rapport aux normes de rejet telles que fixées par voie réglementaire.

Les retenues d'eau superficielle ainsi que les lacs et les étangs menacés d'eutrophisation par suite de déversements d'effluents polluants font l'objet de plans de restauration et de protection de la qualité des eaux.

Ce plan comporte des mesures et des actions ayant pour objectif :

- La suppression des sources de pollution chronique, notamment à travers la réalisation de systèmes d'épuration des eaux usées urbaines et industrielles.
- La prévention des risques de pollution accidentelle et la mise en place de dispositifs de lutte appropriés.
- La mise en œuvre de toutes opérations techniques permettant de restaurer la qualité des eaux.
- L'installation des dispositifs d'observation et de suivi des paramètres significatifs de la qualité des eaux et d'un système d'alerte anti-pollution.

E) Décret n° 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et du traitement des déchets solides urbains :

Le présent décret a pour objet de déterminer les conditions dans lesquelles il sera procédé au nettoyage, à l'enlèvement et au traitement des déchets solides urbains.

Les déchets solides urbains s'entendent aux termes du présent décret des déchets domestiques et ceux qui leur sont assimilables par la nature et le volume. Il s'agit notamment:

- des ordures ménagères individuelles ou collectives,
- des produits provenant du nettoyage tels que balayage, curage des égouts,
- des déchets encombrants, objets volumineux, ferrailles, gravats, décombres, carcasses automobiles,
- les déchets anatomiques ou infectieux provenant des hôpitaux, cliniques ou centre de soins,
- les déchets et issues d'abattoirs,
- les cadavres de petits animaux,
- des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales.

En matière de déchets solides générés par les établissements hospitaliers et assimilés, les déchets non contaminés sont assimilables aux déchets ménagers.

Les déchets contaminés sont éliminés par les moyens propres aux établissements hospitaliers et centres de soins et à leurs frais par incinération:

- les déchets anatomiques, cadavres d'animaux, fumiers putrescibles,
- tout objet, aliment, matériau souillé, milieu de culture porteur de germes pathogènes tels qu'objets à usage unique, plâtres, textiles souillés de caractère non putrescible,

- les produits liquides et déchets d'autopsie.

Un procédé de collecte sélective est un procédé de récupération de matériaux et déchets réutilisables pour la valorisation matière. Cette collecte sélective est mise en œuvre, en fonction du volume des déchets solides recyclables et des avantages inhérents à chacun des systèmes, soit:

- par collecte spéciale en porte à porte venant en supplément ou en substitution de la collecte ordinaire,
- par collecte simultanée, également effectuée en porte à porte, mais dans le cadre de la collecte normale, ou de celles des déchets encombrants.

Le troisième chapitre '**traitement des déchets solides urbains**' de ce décret, assure des différents moyens de traitement des déchets. Le traitement est effectué au moyen des procédés suivants :

- la décharge surveillée,
- la décharge contrôlée,
- la décharge compostée,
- la décharge broyée,
- le compostage,
- l'incinération,

Le choix du mode de traitement des déchets doit rechercher le procédé le plus indiqué au plan de la préservation de l'hygiène, de la facilité d'exploitation et de la récupération des déchets.

Outre les dispositions générales et particulières en matière de protection de l'environnement prévues par les lois et règlements en vigueur, tout choix de site pour le traitement des déchets solides. Quel que soit le type de traitement, l'emplacement choisi devra satisfaire aux conditions suivantes :

- être le plus rapproché possible du centre du secteur de collecte de manière à réduire les charges de transport, mais cependant, assez éloigné des habitations les plus proches;
- la distance minimale à respecter entre le site de traitement et l'habitation la plus proche devra obligatoirement être supérieure à deux cents (200) mètres;
- la distance d'éloignement du lieu de traitement par rapport au cours ou plans d'eau est fixée par l'étude hydrogéologique;
- tenir compte aussi bien du projet d'extension et d'aménagement de l'agglomération tels qu'ils sont définis dans les documents du plan directeur d'urbanisme, ou le cas échéant, du plan provisoire d'urbanisme, que de la nécessité de réduire au minimum et en tout lieu les nuisances que peuvent engendrer les déchets;
- tenir compte de l'impératif et des possibilités de récupération et du traitement des déchets recyclables;

- procéder à une enquête hydrogéologique pour s'assurer que les eaux de ruissellement ou d'infiltrations ne pourront rejoindre une nappe souterraine;
- proscrire l'utilisation de caractères souterraines puits gouffres comme décharges de déchets et résidus urbains;
- proscrire la décharge des déchets et résidus urbains dans les points d'eau de toute nature.

F) Décret n° 87-182 du 18 août 1987 relatif aux huiles à base de poly-chloro-biphenile (P.C.B.):

Le présent décret a pour objet de réglementer les conditions d'exploitation, d'utilisation, de manipulation, de transport, de stockage des huiles à base de Poly-Chloro-Biphenile (P.C.B), des équipements qui en contiennent et des matériaux contaminés par ce produit.

Dans notre étude, on intéresse sur l'Annexe VI 'Prescription relatives aux conditions de récupération des huiles à base de «P.C.B.»'

Dans le cas d'un déversement d'huiles à base de «P.C.B.» :

- aviser les services de la protection civile, de l'environnement et de la santé de wilaya,
- prendre des mesures pour éviter que des personnes soient contaminées,
- récupérer le produit dans des fûts; dans le cas ou ceci s'avère impossible, verser des produits absorbants, tels que la sciure, charbon activé, terreau, sable sur le produit pour éviter sa dispersion,
- boucher tous les regards d'égouts et les caniveaux ou construire une digue lorsque le déversement; s'effectue sur le béton, l'asphalte ou le sol et nettoyer la zone avec des chiffons et des solvants tels que le kérosène, fuel-oil, térébenthine, trichloroethane varsol,
- circonscrire la zone si le déversement a eu lieu dans l'eau et draguer les sédiments contaminés,
- prélever des carottes pour déterminer le degré de pénétration et ce, sur une profondeur de 2,5 cm pour le béton et l'asphalte et 60 cm pour le sol, recouvrir d'une bâche de plastique pour réduire le ruissellement par la pluie. Enlever une épaisseur de la surface au-delà de la couche contaminée.
- vérifier si l'eau des puits et des autres nappes d'eau ne renferment pas des traces de «P.C.B.» dans le cas d'un déversement au sol,
- mettre en dépôt les matières contaminées et l'huile à base de «P.C.B.» résiduelle.

G) Décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels :

Le présent décret a pour objet, en application des dispositions de la loi n°83-03 du 5 février 1983 et de la loi n°83-17 du 16 juillet 1983 susvisées, de réglementer les rejets d'effluents liquides industriels. Au sens du présent décret, il est entendu par rejet tout déversement, écoulement, jets, dépôts directs ou indirects d'effluents liquides industriels dans le milieu naturel.

Les rejets d'effluents liquides industriels ne peuvent être autorisés que:

- s'ils ne dépassent pas à la source les valeurs limites maximales telles qu'annexées au présent décret.
- s'ils remplissent les conditions techniques dont la définition fera, l'objet d'un arrêté du ministre chargé de la protection de l'environnement.

Les conditions techniques prévues ci-dessus tiennent compte notamment:

- du débit et du degré de pollution des eaux réceptrices et de leur capacité de régénération naturelle,
- des conditions d'utilisation des eaux réceptrices et des exigences de l'alimentation en eau des populations,
- de la protection de la faune et de la flore et des exigences sanitaires économiques et touristiques,
- de l'importance et de la nature des rejets.

Les demandes d'autorisation de rejet sont adressées au ministre chargé de l'environnement par l'intermédiaire du wali territorialement compétent. Les dossiers de demande d'autorisation de rejet comportent notamment:

- les noms, prénoms, qualité et domicile du demandeur ou si la demande émane d'une collectivité, d'une entreprise publique ou de toute autre personne morale, les indications suivantes: nature, siège, objet, noms, prénoms et qualité du ou des représentants habilités auprès de l'administration,
- la description de l'emplacement de l'opération projetée et le cas échéant de sa profondeur et des niveaux souterrains dans lesquels elle s'effectue,
- la nature et l'importance du rejet, les conditions d'évacuation ou de dépôt notamment sa répartition dans le temps, les mesures proposées pour remédier à la pollution des eaux,
- la nature des agents polluants susceptibles d'altérer la qualité des eaux,
- la description technique des installations prévues pour éviter d'altérer la qualité des eaux ou de nuire à la salubrité publique.

A la demande est jointe une carte à l'échelle minimale de 1/50.000 sur laquelle est reporté l'emplacement de l'opération projetée.

L'acte d'autorisation définit les prescriptions techniques que devront respecter les rejets. Il prescrit, le cas échéant, l'exécution par le demandeur et à ses frais de puits permettant de contrôler la qualité des eaux souterraines.

Pour de plus amples informations, nous donnons le tableau III.1, en annexe K, qui précise les valeurs limites maximales des paramètres de rejet des installations de déversement industrielles.

H) Décret exécutif n° 07-399 du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau :

Il est relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eaux. Il a pour objet de fixer les conditions et les modalités de création et de délimitation des périmètres de protection qualitative des ressources en eau, la nomenclature des périmètres de protection ainsi que les mesures de réglementation d'activités dans chaque périmètre de protection qualitative.

La protection qualitative des ressources en eaux des eaux souterraines est assurée par trois types de protection :

- Le périmètre de protection immédiate.
- Le périmètre de protection rapprochée.
- Le périmètre de protection éloignée.
 - **Le périmètre de protection immédiate** : ce périmètre a la fonction d'empêcher la détérioration des ouvrages de captages de prélèvement et d'éviter le déversement ou les infiltrations de substances polluantes à l'intérieur ou à une proximité immédiate d'ouvrage de captage. Son étendue est constituée par les terrains d'emprise des ouvrages et installations de mobilisation de traitement et de stockage de l'eau.
 - **Le périmètre de protection rapprochée** : a pour but d'empêcher la dégradation de la qualité de l'eau par migration souterraine ou superficielle de substances dangereuses toxiques ou indésirables. Il s'étend depuis la limite du premier périmètre de protection jusqu'à une distance déterminée sur la base du temps de migration souterraine ou superficielle des substances dangereuses, toxiques ou indésirables. Son étendue est déterminée par le temps de migration entre le lieu d'émission de la pollution et le point de prélèvement de la ressource en eau. Pour les eaux souterraines c'est la zone d'appel.
 - **Le périmètre de protection éloignée** : qui a pour but de prolonger le périmètre de protection rapprochée pour renforcer la protection contre les risques de pollution chronique, diffuse ou accidentelle. Il s'étend depuis la limite de la zone 2 jusqu'à la limite du bassin versant pour les ressources superficielles ou du bassin d'alimentation pour les ressources en eaux souterraines.

Le décret exécutif n° 07-399 a fixé les conditions et les modalités de création et de délimitation des périmètres de protection en deux sections :

- Les champs d'application
- La procédure d'instauration des périmètres de protection qualitative.

Le chapitre II du même décret exécutif a fixé les mesures de réglementation des activités à l'intérieur du périmètre de protection qualitative.

Autour des parties vulnérables des nappes d'eau souterraine ou des oueds, la protection est assurée exclusivement par l'établissement d'un périmètre de protection rapprochée ou d'un périmètre de protection éloignée.

Le décret exécutif a défini toutes les procédures d'installation des périmètres de protection qualitative des ressources en eaux souterraines, ainsi que toutes les parties ou les personnes chargées de la création et de la surveillance de ces périmètres.

Le décret exécutif a exigé une étude technique pour délimiter les périmètres de protection qualitative autours :

- Des ouvrages et l'installation de mobilisation des eaux souterraines ainsi que de certaines parties vulnérables de nappes d'eaux souterraines.
- Des ouvrages et installation de mobilisation des eaux superficielles ainsi que de certaines parties vulnérables d'oueds.
- Des stations de traitement d'eau, des usines de dessalement d'eau de mer, des stations de déminéralisation d'eau saumâtre ainsi que des réservoirs de stockages d'eau.

l) Décret exécutif n° 10-73 du 21 Safer 1431 correspondant au 06 février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères :

Ce décret a pour objet de fixer les modalités de délimitation de périmètre de protection quantitative des nappes aquifères ainsi que les conditions spécifiques d'utilisation de leurs ressources en eau.

L'objet d'un dispositif de protection quantitative est d'assurer la préservation des ressources soit par des prélèvements d'eau raisonnables par rapport à la capacité renouvelable de l'aquifère soit par l'évitement de la surexploitation de la nappe aquifère.

3.2. LEGISLATIONS ETRANGERE :

3.2.1. LEGISLATIONS EUROPEENNES :

En matière de protection de l'environnement, la communauté européenne propose et édicte de nombreuses directives abordant différents sujets, différents domaines.

On compte aujourd'hui plusieurs directives, approuvées ou en projet, ayant trait à l'Environnement au sens large, et englobant les thèmes de la protection de l'eau, du transport et du traitement des déchets, des risques industriels et chimiques et de la conservation de la nature (Environmental Research Newsletter., 1993).

Dans la législation communautaire, une directive constitue un ensemble de recommandations légales, approuvées par le Conseil Européen et qui est proposée à tous les pays membres de la communauté. Chaque directive fixe des obligations d'objectifs et de résultats concrets à atteindre, mais la liberté est laissée aux pays membres de se donner les moyens pour y parvenir et d'intégrer l'objet de la directive dans sa propre législation nationale. Parmi ces directives il ya :

A) Directive 80/68/CE :

Cette directive concerne la protection des eaux souterraines contre la pollution causée par certaines substances dangereuses. Elle impose aux États membres de réglementer les rejets directs ou indirects de certaines substances polluantes vers les eaux souterraines, et interdit les rejets des substances considérées comme les plus dangereuses. Ces dispositions ont été incorporées notamment dans la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement [37].

B) Directive 91/271/CEE :

Cette directive promulguée le 21 mai 1991 est relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. Elle introduit la notion de « zones sensibles » ; zones dans lesquelles les eaux résiduaires urbaines rejetées doivent subir un traitement contre le phosphore et/ou l'azote.

C) Directive 91/676/CEE :

La directive 91/676/CEE du 12 décembre 1991 relative à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir des sources agricoles. Elle vise à réduire la pollution des eaux provoquée ou induite par les nitrates à partir de sources agricoles et à prévenir toute nouvelle pollution de ce type, par la mise en œuvre de plans d'action sur les zones vulnérables identifiées préalablement et l'instauration de programmes de surveillance pour en évaluer l'efficacité.

D) Directive 2000/60/CE relative à l'eau :

Cette directive est appelée « Directive Cadre européenne sur l'Eau » (DCE) est adoptée le 23 octobre 2000. Elle définit le cadre de gestion et de protection des eaux par grand bassin hydro-graphique. Les bassins hydrographiques actuels constituent donc l'échelon de mise en œuvre de la directive et les comités de bassin sont chargés de la définition des objectifs environnementaux dans le cadre de la mise à jour des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). Cette directive donne la priorité à la protection de l'environnement et engage les états membres à

atteindre d'ici 2015 un bon état général tant pour les eaux souterraines que superficielles, y compris les eaux côtières. Il convient de prévenir toute dégradation supplémentaire des milieux, de préserver et d'améliorer l'état des écosystèmes aquatiques.

Les périmètres de protection correspondent à un zonage établi autour des points de captage d'eau potable. (Art L1321 du Code de la Santé Publique).

- Le périmètre de protection immédiate protège le captage de la malveillance, des déversements directs sur l'ouvrage et des contaminants microbiologiques (parasites, bactéries, virus). La protection assurée par une clôture peut être utilement complétée par un dispositif anti-intrusion ou de détection avec alarme.
- Le périmètre de protection rapprochée doit constituer une zone tampon vis-à-vis des activités présentes à proximité. Cette zone doit offrir un délai de réaction vis-à-vis des pollutions qui pourraient se produire. Toutes les activités susceptibles de provoquer une pollution sont interdites. Souvent zone de sylviculture avec un terrain riche en humus absorbant les polluants.
- Périmètre de protection éloignée- le seul qui n'est pas obligatoire sauf si menaces- Souvent une zone de forêt [37].

E) Directive 2000/76/CE sur l'incinération des déchets :

L'Union européenne (UE) le 04 décembre 2000, fixe des mesures visant à prévenir ou réduire la pollution de l'air, de l'eau et du sol résultant de l'incinération et de la coïncinération des déchets, ainsi que les risques pour la santé humaine qui en résultent. Ces mesures imposent notamment l'obtention d'un permis pour les installations d'incinération ou de coïncinération et des limites d'émission pour certaines substances polluantes rejetées dans l'atmosphère et dans les eaux.

L'incinération des déchets dangereux et non dangereux peut donner lieu à des émissions de substances polluantes l'air, l'eau et le sol et ayant des effets nocifs sur la santé humaine. Pour limiter ces risques, l'Union européenne (UE) impose des conditions d'exploitation et des exigences techniques strictes aux installations d'incinération et de coïncinération de déchets.

La présente directive s'applique non seulement aux installations destinées à l'incinération des déchets solides ou liquides mais aussi aux installations de coïncinération. Sont exclues du champ d'application de la directive les installations expérimentales visant à améliorer le processus d'incinération et traitant moins de 50 tonnes de déchets par an, ainsi que les installations traitant seulement:

- des déchets végétaux agricoles et forestiers;
- des déchets végétaux provenant de la transformation alimentaire si la chaleur produite est valorisée;

- certains déchets végétaux fibreux issus de la production de la pâte à papier ou du papier s'ils sont coïncinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée;
- certains déchets de bois;
- des déchets de liège;
- des déchets radioactifs;
- des carcasses d'animaux;
- des déchets provenant de l'exploitation de pétrole et gaz et incinérés dans des installations offshore.

E1) Les valeurs limites des émissions dans l'air :

Les valeurs limites des émissions atmosphériques pour les installations d'incinération sont indiquées à l'annexe V de la directive. Elles portent sur les métaux lourds, les dioxines et furannes, le monoxyde de carbone (CO), les poussières, le carbone organique total (COT), le chlorure d'hydrogène (HCl), le fluorure d'hydrogène (HF), le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO et NO₂).

La détermination des valeurs limites d'émissions atmosphériques pour les installations de coïncinération est indiquée à l'annexe II. Des dispositions spéciales relatives aux fours de ciment et aux installations de combustion coïncinérant des déchets y sont aussi indiquées.

E2) Rejets d'eaux usées provenant de l'épuration des gaz d'échappement :

Les installations d'incinération ou de coïncinération doivent posséder un permis qui les autorise à rejeter les eaux usées résultant de l'épuration des gaz d'échappement. Ce permis doit garantir que les valeurs limites d'émission indiquées dans le tableau III.2, en Annexe L sont respectées.

A3) Les résidus :

Les résidus du processus d'incinération ou de coïncinération doivent être réduits au minimum et recyclés dans la mesure du possible. Au moment du transport des résidus secs, des précautions doivent être prises pour éviter leur dispersion dans l'environnement. Des essais doivent être faits pour connaître les caractéristiques physiques et chimiques des résidus, ainsi que leur potentiel de pollution.

E4) Le contrôle et la surveillance :

La directive prévoit l'installation obligatoire des systèmes de mesure permettant de surveiller les paramètres d'exploitation et les émissions pertinentes. Les émissions dans l'air et dans l'eau sont mesurées en continu ou périodiquement conformément à l'article 11 et à l'annexe III de la directive.

E4) Contexte :

La présente directive vise à intégrer dans la législation existante les progrès techniques en matière de contrôle des émissions des procédés

d'incinération et à assurer le respect des engagements internationaux pris par la Communauté en matière de réduction de la pollution, notamment ceux concernant la fixation de valeurs limites pour les émissions de dioxines, de mercure et de poussières occasionnées par l'incinération de déchets. La directive se fonde sur une approche intégrée: aux valeurs limites mises à jour pour les émissions atmosphériques s'ajoutent des limites relatives aux rejets dans l'eau (JO L 311., du 21.11.2008).

F) Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution):

L'Union européenne (UE) le 24 novembre 2010, définit les obligations que les activités industrielles à potentiel majeur de pollution doivent respecter. Elle établit une procédure d'autorisation et fixe des exigences, notamment en termes de rejets. L'objectif est d'éviter ou de minimiser les émissions polluantes dans l'atmosphère, les eaux et les sols, ainsi que les déchets provenant d'installations industrielles et agricoles, dans le but d'atteindre un niveau élevé de protection de l'environnement et de la santé.

La présente directive couvre les activités industrielles à potentiel majeur de pollution, définies à l'annexe I de la directive (industries d'activités énergétiques, production et transformation des métaux, industrie minérale, industrie chimique, gestion des déchets, élevage d'animaux, etc.).

La directive contient des dispositions spéciales pour les installations suivantes:

- les installations de combustion (≥ 50 MW);
- les installations d'incinération ou de coïncinération des déchets;
- certaines installations et activités utilisant des solvants organiques;
- les installations produisant du dioxyde de titane.

La présente directive ne s'applique pas aux activités de recherche et de développement ni à l'expérimentation de nouveaux produits et procédés.

F1) Exigences environnementales :

Toute installation industrielle qui met en œuvre les activités énumérées à l'annexe I de la directive doit respecter certaines obligations fondamentales:

- prendre les mesures de prévention contre la pollution;
- appliquer les meilleures techniques disponibles (MTD);
- ne causer aucune pollution importante;
- limiter, recycler ou éliminer les déchets de la façon la moins polluante;
- maximiser l'efficacité énergétique;
- prévenir les accidents et limiter leur impact;
- remettre les sites en état lorsque les activités prennent fin.

F2) Application des meilleures techniques disponibles :

Les installations industrielles doivent utiliser les MTD, c'est-à-dire les techniques les plus efficaces, pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble, qui sont mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables. La Commission européenne doit adopter les conclusions sur les MTD contenant les niveaux d'émission associés aux MTD. Ces conclusions servent de référence pour l'établissement des conditions d'autorisation.

F3) Conditions d'autorisation :

L'autorisation doit prévoir les mesures nécessaires pour assurer le respect des obligations fondamentales de l'exploitant et les normes de qualité environnementale. Ces mesures comprennent au minimum:

- des valeurs limites d'émission pour les substances polluantes;
- des prescriptions garantissant la protection des sols, de l'eau et de l'air;
- des mesures pour la surveillance et la gestion des déchets;
- des exigences concernant la méthode de mesure des émissions, la fréquence des relevés, la procédure d'évaluation;
- une obligation d'informer l'autorité compétente, au moins une fois par an sur les résultats de la surveillance;
- des exigences concernant l'entretien et la surveillance des sols et des eaux souterraines;
- des mesures relatives aux circonstances exceptionnelles (fuites, dysfonctionnements, arrêts momentanés ou définitifs, etc.);
- des dispositions visant à minimiser la pollution à longue distance ou transfrontalière;
- les conditions permettant d'évaluer le respect des valeurs limites d'émissions.

F4) Dispositions spéciales :

Des dispositions spéciales s'appliquent aux installations de combustion, aux installations d'incinération et de coïncinération des déchets, aux installations utilisant des solvants organiques et aux installations produisant du dioxyde de titane. Les valeurs limites d'émissions pour les grandes installations de combustion définies à l'annexe V de la directive sont généralement plus strictes que celles de la directive 2001/80/CE. Une certaine flexibilité (plan national transitoire, dérogation limitée dans le temps) est introduite pour les installations existantes. Pour les autres activités, pour lesquelles des dispositions spéciales s'appliquent, les dispositions des directives actuelles ont été largement maintenues.

F5) Inspections environnementales :

Les États membres doivent mettre en place un système d'inspection environnementale des installations concernées. Toutes les installations doivent être couvertes par un plan d'inspection environnementale. Ce plan doit être régulièrement révisé et mis à jour. Sur la base des plans d'inspection, l'autorité compétente doit établir régulièrement des programmes d'inspection environnementale de routine, y compris la fréquence des visites des sites pour les différents types d'installations. L'intervalle entre deux visites d'un site doit être basé sur une évaluation systématique des risques environnementaux que présentent les installations concernées. Elle ne peut pas excéder un an pour les installations présentant les risques les plus élevés et trois ans pour les installations présentant les risques les moins élevés (JO L 334, du 17.12.2010).

3.2.2. LEGISLATIONS SUISSE:

L'environnement de la Suisse est soumis à de fortes pressions (pollution, prélèvements de ressources naturelles, restructuration de l'espace) dues notamment à l'industrie, l'agriculture, les transports et le tourisme. Ces pressions résultent de densités de population et d'activités très élevées, et de la situation de la Suisse au cœur de l'Europe.

Depuis plus de 30 ans, des politiques environnementales ambitieuses et impulsées par la Confédération ont été mises en œuvre par les cantons et les communes. Elles reposaient sur une approche prescriptive, un effort financier public soutenu et une opinion publique active et très préoccupée d'environnement (notamment suite à certains accidents industriels majeurs, à l'impact sur l'environnement de l'agriculture intensive, au débat sur le dépérissement des forêts et aux inondations de 1987). Ces politiques ont conduit à des résultats remarquables concernant la lutte contre les pollutions et les dangers naturels. Plus récemment et dans la période d'examen, les politiques environnementales ont mis l'accent sur les partenariats avec les milieux économiques et l'ensemble de la société civile, sur l'application du principe pollueur payeur et la prévention (par exemple dans la gestion des risques et des ressources naturelles) [91].

3.2.2.1. MISE EN ŒUVRE DES POLITIQUES ENVIRONNEMENTALES RENFORCEES :

Beaucoup de résultats concernant la lutte contre la pollution en Suisse figurent parmi les meilleurs des pays de l'OCDE. Ce bilan est notamment le fruit d'une politique législative et institutionnelle ambitieuse et de longue haleine dans le domaine de l'environnement. La loi fédérale sur la protection de l'environnement, révisée au milieu des années 90, insiste sur les principes de coopération, de causalité (principes pollueur payeur et utilisateur payeur) et de prévention. Dans l'ensemble, il y a une très bonne coopération entre tous les acteurs, dont la société civile (ONG environnementales, entreprises, groupements d'agriculteurs, par exemple), ainsi

qu'entre la Confédération, les cantons et les communes. Plusieurs taxes environnementales et mesures fiscalement neutres ont été étudiées et/ou adoptées (taxe incitative sur les COV, par exemple, dont le produit est redistribué aux ménages par le biais des assureurs maladie). La création de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) le 1er janvier 2006 concrétise la volonté d'étendre la gestion durable des ressources naturelles (forêts, nature, eau) et de couvrir la gestion des dangers naturels et des risques technologiques. Les dépenses des pouvoirs publics et des entreprises concernant l'environnement (lutte contre les pollutions et protection de la nature) sont restées stables : de l'ordre de 1.4% du PIB. Elles ont conduit à des bénéfices économiques concernant :

- La santé (dépenses de santé évitées, amélioration de la productivité du travail), et
- L'économie suisse dans des secteurs comme le tourisme, la construction mécanique, les équipements électriques, l'éco-industrie et l'agro-alimentaire (grâce à l'image internationale de pays écologique de la Suisse).

Toute cette évolution s'inscrit dans le cadre d'une économie très ouverte aux échanges avec l'Union européenne et mondialement.

Cependant, la Suisse est confrontée à de nombreux défis environnementaux résultant de la pollution diffuse (d'origine agricole, par exemple) ou des modes de consommation non durables (transports, loisirs, occupation des sols, etc.). Sa biodiversité et ses paysages sont menacés. Il faut mettre l'accent sur les résultats effectifs des politiques environnementales et renforcer la coordination entre différents niveaux d'administration en s'appuyant sur des données factuelles. Il convient de concevoir un système intégré et harmonisé d'autorisation des activités industrielles. Il serait opportun d'étendre l'utilisation des instruments économiques pour accroître l'efficacité des politiques environnementales (taxe sur le CO₂, par exemple) et la gestion durable des ressources naturelles. Même si des progrès ont été réalisés dans les domaines de l'eau et des déchets, les principes « pollueur payeur » et « utilisateur payeur » ne sont pas suffisamment appliqués dans les domaines du climat, de l'air, du bruit et de la protection de la nature

Alors que les préoccupations pour une croissance économique atone ou faible et pour la compétitivité internationale de son économie sont très présentes, la Suisse a réalisé des progrès significatifs dans le découplage des pressions environnementales de la croissance économique, notamment pour les émissions de polluants atmosphériques traditionnels (SO_x, NO_x), les prélèvements d'eau, l'utilisation des engrais et des pesticides. Les deux stratégies pour le développement durable au niveau fédéral (1997 et 2002) ont stimulé une meilleure collaboration entre services fédéraux et ont été accompagnées de procédures d'évaluation et de suivi. Des

indicateurs de développement durable ont été adoptés au niveau fédéral et développés aux niveaux de certains cantons et villes [91].

3.2.2.2. ENGAGEMENTS INTERNATIONAUX :

La Suisse possède un dispositif efficace de coordination des activités internationales environnementales qui repose sur une concertation formelle (au niveau fédéral et entre la Confédération et les cantons), et sur différents processus de consultation informels. Elle entretient des relations de coopération poussées avec les pays voisins et l'UE dans son ensemble, y compris pour l'harmonisation des législations environnementales. Elle a transposé les dispositions d'un certain nombre d'accords multilatéraux sur l'environnement comme :

- Le Protocole sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (Protocole de Montréal) et ses amendements,
- La Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux (Convention Eau),
- La Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES),
- La Convention sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transfrontière (Convention d'Espoo),
- La Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontalières de déchets dangereux et de leur élimination,
- La Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international,
- La Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POPs),
- La Convention sur la diversité biologique et le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture.

Elle est un défenseur actif de la protection de l'environnement et du développement durable dans les instances internationales [91].

3.2.2.3. PRINCIPAUX TEXTES LEGISLATIFS CONCERNANT LA PROTECTION DES EAUX EN SUISSE :

La protection des eaux est assurée par la loi fédérale du 8 octobre 1971, remise à jour le 1^{er} avril 1985. Elle vise à éviter toute altération des propriétés physiques, chimiques et biologiques des eaux souterraines exploitables, indépendamment de leur usage actuel. Cette loi introduit trois subdivisions du territoire suisse :

- les secteurs de protection des eaux :
- les zones de protection des eaux souterraines.

- les périmètres de protection des eaux souterraines (Lallemand B A. et Roux J C., 1995).

A) La loi fédérale Suisse pour la protection des eaux (LEau) du 24 janvier 1991 (Etat le 26 septembre 2006) :

Cette loi a pour but de protéger les eaux contre toute atteinte nuisible. Elle vise notamment à :

- Préserver la santé des êtres humains, des animaux et des plantes ;
- Garantir l'approvisionnement en eau potable et en eau d'usage industriel et promouvoir un usage ménager de l'eau ;
- Sauvegarder les biotopes naturels abritant la faune et la flore indigènes ;
- Sauvegarder les eaux piscicoles ;
- Sauvegarder les eaux en tant qu'élément du paysage ;
- Assurer l'irrigation des terres agricoles ;
- Permettre l'utilisation des eaux pour les loisirs ;
- Assurer le fonctionnement naturel du régime hydrologique.

Dans le chapitre 1, le titre 1 sous le titre 'sauvegarde de la qualité des eaux'. Section 4 'mesures d'organisation du territoire' nous intéressons à la protection des eaux superficielles et souterraines.

Art. 19 : secteurs de protection des eaux.

Les cantons subdivisent leur territoire en secteurs de protection en fonction des risques auxquels sont exposées les eaux superficielles et les eaux souterraines. Le conseil fédéral édicte les prescriptions nécessaires. La construction et la transformation de bâtiments et l'installations, ainsi que les fouilles, les terrassements et autres travaux analogues dans les secteurs particulièrement menacés sont soumis à autorisation cantonale s'ils peuvent mettre en danger les eaux.

Art. 20 : zone de protection des eaux souterraines.

Les cantons délimitent des zones de protection autour des captages et des installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines qui sont d'intérêt public ; ils fixent les restrictions nécessaires du droit de propriété. Les détenteurs de captages d'eaux souterraines sont tenus :

- De faire les relevés nécessaires pour délimiter les zones de protection ;
- D'acquérir les droits réels nécessaires ;
- De prendre à leur charge les indemnités à verser en cas de restriction du droit de propriété.

Art. 21 : périmètres de protection des eaux souterraines.

Les cantons délimitent les périmètres importants pour l'exploitation et l'alimentation artificielle futures des nappes souterraines. Dans ces périmètres, il est interdit de construire des bâtiments, d'aménager des installations ou d'exécuter des travaux qui pourraient compromettre l'établissement futur d'installations servant à l'exploitation ou à l'alimentation artificielle des eaux souterraines.

Les cantons peuvent mettre à la charge des futurs détenteurs de captages d'eaux souterraines et d'installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines les indemnités à verser en cas de restriction du droit de propriété.

Dans la section 5 'exigences concernant les liquides de nature à polluer les eaux' les liquides de nature à polluer les eaux ne doivent pas être entreposés dans des cavernes-réservoirs s'ils risquent d'entrer en contact direct avec les eaux souterraines.

Art. 37 : endiguements et corrections de cours d'eau.

Lors de ces interventions, le tracé naturel des cours d'eau doit autant que possible être respecté ou rétabli. Les eaux et les rives doivent être aménagées de façon à ce que les interactions entre eaux superficielles et eaux souterraines soient maintenues.

Art. 43 : protection des nappes d'eaux souterraines.

Les cantons veillent à ce que les prélèvements opérés dans une nappe souterraine ne soient pas supérieurs à la quantité d'eau qui l'alimente. Les prélèvements peuvent toutefois excéder temporairement les apports, à condition qu'ils ne portent préjudice ni à la qualité des eaux souterraines, ni à la végétation.

Les cantons veillent à améliorer, dans toute la mesure du possible, l'état des nappes souterraines lorsqu'elles sont surexploitées ou que leur alimentation a été réduite, en diminuant les prélèvements, en alimentant artificiellement les nappes ou en stockant de l'eau potable dans le sous-sol.

La création de communications permanentes entre des nappes souterraines est interdite si une telle intervention peut diminuer les réserves en eaux souterraines ou altérer leur qualité.

Les constructions ne doivent pas avoir pour effet de réduire de façon notable et permanente la capacité du réservoir, ni l'écoulement des nappes souterraines exploitables.

Les ouvrages de retenue de faible hauteur ne doivent pas affecter gravement les nappes souterraines, ni la végétation qui dépend du niveau de ces nappes. L'autorité peut autoriser des exceptions pour les installations existantes.

Le drainage d'une région provoquant, sur une grande surface, la baisse du niveau des nappes souterraines n'est autorisé que s'il représente le seul moyen de maintenir l'exploitation de terres agricoles (LEaux., 1991).

B) Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 (Etat le 1^{er} juillet 2008) :

Art 8 : infiltration.

- Il est interdit de laisser s'infiltrer les eaux polluées.
- L'autorité peut autoriser l'infiltration d'eaux polluées communales au d'autres eaux polluées de composition analogue :
 - Si les eaux polluées ont été traitées et que les exigences auxquelles est soumis le déversement dans les eaux sont respectées ;
 - Si les eaux du sous-sol concernées respectent, après infiltration des eaux polluées, les exigences de qualité des eaux définies dans l'annexe 2 ;
 - Si les eaux sont infiltrées dans une station prévue à cet effet, si les valeurs indicatives fixées dans l'Osol6 ne sont pas dépassées même à long terme ou si la fertilité du sol est assurée même à long lorsqu'il n'existe pas de valeurs indicatives, et
 - Si les exigences relatives au fonctionnement des installations d'évacuation et d'épuration qui déversent des eaux dans le milieu récepteur (art. 13 à 17) sont respectées.

Art. 9 : eaux à évacuer particulières :

Les eaux polluées qui sont produites hors du périmètre des égouts publics et dont le déversement, l'infiltration ou la valorisation par mélange aux engrais de ferme n'est pas admis doivent être collectées dans une fosse sans écoulement et périodiquement amenées dans une station centrale d'épuration ou dans une installation spéciale de traitement.

Les eaux à évacuer provenant du traitement des engrais de ferme, de la production hors-sol et de procédés de production végétale analogues doivent être utilisées dans l'agriculture ou dans l'horticulture conformément à l'état de la technique et dans le respect des exigences de l'environnement.

Les eaux à évacuer provenant d'installation sanitaire mobile doivent être collectées et ne peuvent être déversées dans les égouts publics qu'au moyen d'équipements appropriés.

Art. 10 : interdiction d'éliminer les déchets avec les eaux à évacuer.

Il est interdit :

- D'éliminer les déchets solides et liquides avec les eaux à évacuer, sauf si cela est opportun pour le traitement des eaux.
- D'évacuer des substances d'une façon non conforme aux indications apportées par le fabricant sur l'étiquette des eaux.

Art. 28 : contrôle des installations de stockages des engrais de ferme.

L'autorité cantonale veille à ce que les installations de stockage des engrais de ferme soient contrôlées régulièrement ; la fréquence des contrôles est définie en fonction du risque de pollution des eaux. On contrôlera que :

- L'installation dispose de la capacité de stockage prescrite ;
- Les installations de stockage (y compris les conduites) sont étanches ;
- Les installations sont en état de fonctionner ;
- Les installations sont utilisées correctement.

Art. 29 : détermination des secteurs de protection des eaux et délimitation des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines.

Lorsqu'ils subdivisent leur territoire en secteurs de protection des eaux, les cantons déterminent les secteurs particulièrement menacés et les autres secteurs. Les secteurs particulièrement menacés, décrits à l'annexe 4 du chapitre 11 de la susdite ordonnance, comprennent :

- Le secteur Au de protection des eaux, destiné à protéger les eaux souterraines exploitables ;
- Le secteur Ao de protection des eaux, destiné à protéger la qualité des eaux superficielles, si cela est nécessaire pour garantir une utilisation particulière des eaux ;
- L'aire d'alimentation Zu, destiné à protéger la qualité des eaux qui alimentent des captages d'intérêt public, existants et prévus, si l'eau est polluée par des substances dont la dégradation ou la rétention sont insuffisantes, ou si de telles substances présentent un danger concert de pollution ;
- L'aire d'alimentation Zo, destiné à protéger la qualité des eaux superficielles, si l'eau est polluée par des produits phytosanitaires ou des éléments fertilisants, entraînés par ruissellement.

Ils délimitent, en vue de protéger les eaux du sous-sol qui alimentent des captages et des installations d'alimentation artificielle d'intérêt public, les zones de protection des eaux souterraines (art. 20 LEau) décrites dans l'annexe 4, ch. 12. Ils peuvent également délimiter des zones de protection des eaux souterraines pour des captages et des installations d'alimentation artificielle d'intérêt public prévus, dont la localisation et la quantité à prélever sont fixées.

Ils délimitent, en vue de protéger les eaux souterraines destinées à être exploitées, les périmètres de protection des eaux souterraines (art. 21 LEau) décrits dans l'annexe 4, ch. 13.

Pour déterminer les secteurs de protection des eaux et délimiter les zones et périmètres de protection des eaux souterraines, ils s'appuient sur les informations hydrogéologiques disponibles ; si ces dernières ne suffisent pas, ils veillent à procéder aux investigations hydrogéologiques nécessaires.

Art. 30 : cartes de protections des eaux.

Les cantons établissent des cartes de protection des eaux et les adaptent en fonction des besoins. Ces comportent au moins :

- Les secteurs de protections des eaux ;
- Les zones de protection des eaux souterraines ;
- Les périmètres de protection des eaux souterraines ;
- Les résurgences, les captages et les installations d'alimentation artificielle importants pour l'approvisionnement en eau.

Les cartes de protection des eaux sont accessibles au public. Les cantons remettent à l'office fédéral de l'environnement (OFEV) et à chaque canton limitrophe concerné un exemplaire des cartes des zones de protection des eaux (y compris les modifications).

Art. 31 : mesures de protection.

Quiconque construit ou transforme des installations dans un secteur particulièrement menacé ainsi que dans une zone ou dans un périmètre de protection des eaux souterraines, ou y exerce d'autres activités présentant un danger pour les eaux, doit prendre les mesures qui s'imposent en vue de protéger les eaux ; ces mesures consistent en particulier :

- A prendre les mesures exigées dans l'annexe 4, ch. 2 ;
- A installer des dispositifs de surveillance, d'alarme et de piquet.
- L'autorité veille à :
- A ce que pour les installations existantes qui sont situées dans les zones définies à l'al. 1 et présentent un danger concret de pollution des eaux, les mesures nécessaires à la protection des eaux, en particulier celles qui sont mentionnées dans l'annexe 4, ch. 2, soient prises ;
- A ce que les installations existantes qui sont situées dans les zones S1 et S2 de protection des eaux souterraines et menacent un captage ou une installation artificielle soient démantelées dans un délai raisonnable, et à ce que d'autres mesures propres à protéger l'eau potable, en particulier l'élimination des germes ou la filtration, soient prises dans l'intervalle.

C) Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 (Etat le 1^{er} juillet 2008). Modifié le 1er janvier 1999.

Art. 62 : zones de protection des eaux souterraines.

Les zones de protection des eaux souterraines se composent de la zone de captage (zone S1), de la zone de protection rapprochée (zone S2) et la zone de protection éloignée (zone S3). Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique ou

fissuré, il n'est pas nécessaire de délimiter la zone S3 si la désignation d'une aire d'alimentation Zu permet d'assurer une protection équivalente.

Pour les eaux du sous-sol présentes dans les roches meubles, le dimensionnement des zones S2 et S3 est déterminé par la quantité maximale pouvant être prélevée et sur la base d'une situation d'étiage.

Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique ou fissuré, le dimensionnement des zones de protection des eaux souterraines est déterminé par la vulnérabilité du bassin d'alimentation du captage ou de l'installation artificielle. La vulnérabilité est déterminée selon des critères suivants :

- Formation des roches proches de la surface, tel qu'épikarst et zone désagrégée ;
- Formation des couches de couverture ;
- Conditions d'infiltration ;
- Formation du système karstique ou des systèmes de discontinuité.

Zone de captage (zone S1) : la zone S1 doit empêcher que les captages et les installations d'alimentation artificielles ainsi que leur environnement immédiat soient endommagés ou pollués. Elle comprend le captage ou de construction et, ou besoin, l'environnement immédiat des installations.

Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique ou fissuré, elle couvre encore d'autres zones :

- Si ces dernières présentent une vulnérabilité particulièrement forte (ponors, dolines, fissures et zones tectonisées), et
- Si l'existence d'une liaison directe entre ces zones et le captage ou l'installation d'alimentation artificielle est prouvée ou doit être présumée.
- *Zone de protection rapprochée (zone S2)* : la zone S2 doit empêcher :
- Que des germes et des virus pénètrent dans le captage ou l'installation d'alimentation artificielle ;
- Que les eaux du sous-sol soient polluées par des excavations et travaux souterraines, et
- Que l'écoulement des eaux du sous-sol soit entravé par des installations en sous-sol.

Pour les eaux de sous-sol présentes dans les roches meubles, elle est dimensionnée de sorte :

- Que la durée d'écoulement des eaux du sous-sol, de la limite extérieure de la zone S2 au captage ou à l'installation d'alimentation artificielle, soit de 10 jours au moins, et
- Que la distance entre la zone S1 et la limite extérieure de la zone S2, dans le sens du courant, soit de 100 m au moins ; elle peut être inférieure si les études hydrogéologiques permettent de prouver que le captage ou l'installation d'alimentation artificielle sont aussi bien protégés par des couches de couvertures peu perméables et intactes.

Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique ou fissuré, elle couvre les parties du bassin d'alimentation du captage ou de l'installation d'alimentation artificielle qui présentent une forte vulnérabilité.

Zone de protection éloignée (zone S3) : la zone S3 doit garantir qu'en cas de danger imminent (ex : en cas d'accident impliquant des substances pouvant polluer les eaux), on dispose de suffisamment de temps et d'espace pour prendre les mesures qui s'imposent.

Pour les eaux du sous-sol présentes dans les roches meubles, la distance entre la limite extérieure de la zone S2 et la limite intérieure de la zone S3 doit en règle générale être aussi grande que la distance entre la zone S1 et la limite extérieure de la zone S2.

Pour les eaux du sous-sol en milieu karstique ou fissuré, la zone S3 comprend les parties du bassin d'alimentation du captage ou de l'installation d'alimentation artificielle qui présentent une vulnérabilité moyenne.

Les interdictions aux zones de protection des eaux souterraines :

Zone de protection éloignée (zone S3), ne sont pas autorisés dans la zone S3 :

- Les exploitations industrielles et artisanales impliquant un risque pour les eaux du sous-sol ;
- Les constructions diminuant le volume d'emménagement ou la section d'écoulement de l'aquifère ;
- L'infiltration d'eaux à évacuer, à l'exception des eaux non polluées s'écoulant des toits à travers une couche recouverte de végétation ;
- La réduction importante des couches de couverture protectrices ;
- Les canalisations soumises à la loi du 4 octobre 1963 sur les installations de transport par conduite, à l'exception des conduites de gaz ;
- Les circuits thermiques qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans le sous-sol ;
- Les réservoirs et les conduites enterrés contenant des liquides de nature à polluer les eaux ;
- Les réservoirs contenant des liquides de nature à polluer les eaux, dont le volume utile dépasse 450 l par ouvrage de protection, à l'exception des réservoirs non enterrés pour huile de chauffage et huile diesel destinés à l'approvisionnement en énergie de bâtiments ou l'exploitations pour deux ans au maximum ; le volume utile total de ces réservoirs ne doit pas dépasser 30 m³ par ouvrage de protection ;
- Les installations d'exploitation contenant des liquides de nature à polluer les eaux, dont le volume utile dépasse 2000 l.

Zone de protection rapprochée (zone S2), les exigences du ch.221 sont applicables à la zone S2 ; en outre, ne sont pas autorisés sous réserve de l'al. 2 :

- La construction d'ouvrages et d'installations ; l'autorité peut accorder des dégradations pour des motifs importants si toute menace pour l'utilisation d'eau potable peut être exclue ;
- Les travaux d'excavation altérant les couches de couvertures protectrices ;
- L'infiltration d'eaux à évacuer ;
- Les autres activités susceptibles de réduire la quantité d'eau potable et d'altérer sa qualité.

Zone de captage (zone S1), dans la zone S1, seuls les travaux de construction et les activités servant à l'approvisionnement en eaux potable sont autorisés ; une exception est consentie pour l'herbe fauchée laissée sur place (OEau., 1998).

3.2.3. LEGISLATIONS CANADIENNE

Même si nous tentons de prévenir la pollution, les activités humaines, la production industrielle croissante et l'urbanisation étendue produisent diverses substances nocives. Ces substances doivent être gérées de façon à limiter leurs répercussions sur la santé humaine et l'environnement.

Au sein du gouvernement du Canada, la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (1999) est l'outil majeur de la gestion des polluants. « Environnement Canada » applique cette loi, ainsi que d'autres lois et règlements de protection.

En outre, les scientifiques du Ministère s'efforcent de mieux comprendre les répercussions de nos actes sur l'environnement. À partir de ces connaissances de plus en plus développées, de nouveaux outils sont présentés afin de limiter les substances nocives. Les efforts d'Environnement Canada pour maîtriser la pollution comprennent :

- Suivi des effets sur l'environnement : Il s'agit d'un outil scientifique qui aide à protéger la santé de l'écosystème en déterminant les répercussions des activités humaines.
- Évaluation des nouvelles substances : Il s'agit de l'évaluation de toutes les nouvelles substances pour déterminer leur toxicité éventuelle et contrôler leur introduction sur le marché canadien.
- Outils de gestion de la pollution : Découvrez les outils clés comprenant des ententes sur la performance environnementale, une planification de la prévention de la pollution et des règlements d'Environnement Canada.
- Gestion des sites contaminés : Apprenez comment EC gère les sites contaminés sous sa responsabilité et aide d'autres ministères à faire face aux enjeux écologiques et autres questions environnementales liés à leurs sites contaminés [92].

Plusieurs lois fédérales ont des composantes qui touchent la gestion de l'eau. Bien qu'il soit impossible de toutes les énumérer, la liste suivante regroupe les lois les plus souvent citées [93] :

- Loi constitutionnelle de 1867 (AANB 1867);
- Loi canadienne sur la protection de l'environnement (L.R. 1999, ch. 33);
- Loi canadienne sur l'évaluation environnementale (L.R. 1992, ch. 37);
- Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques (L.R. 1985, ch. A-12);
- Loi sur la protection des eaux navigables (L.R. 1985, ch. N-22);
- Loi sur les ouvrages destinés à l'amélioration des cours d'eau internationaux (L.R., 1985, ch. I-20);
- Loi sur les ressources en eau du Canada (L.R. 1985, ch. C-11);

A) Loi sur la qualité de l'environnement aux Québec. Règlement sur le captage des eaux souterraines :

Chapitre III : Aires de protection.

Section I : dispositions générales

Les propriétaires de lieux de captage d'eau de source, d'eau minérale ou d'eau souterraine alimentant plus de 20 personnes doivent prendre les mesures nécessaires pour conserver la qualité de l'eau souterraine, notamment par la délimitation d'une aire de protection immédiate établie dans un rayon d'au moins 30 m de l'ouvrage de captage.

A l'intérieur de l'aire de protection immédiate, sont interdits les activités, les installations ou les dépôts de matières ou d'objets qui risquent de contaminer l'eau souterraine, à l'exception, lorsqu'on aménage de façon sécuritaire, et l'équipement nécessaire à l'exploitation de l'ouvrage de captage.

La finition du sol, à l'intérieur de l'aire de protection immédiate, doit être réalisée de façon à prévenir le ruissellement d'eau.

Les propriétaires de lieux de captage d'eau de source, d'eau minérale ou d'eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable et dont le débit moyen d'exploitation est supérieur à 75 m³ par jour doivent faire établir les documents suivants :

- Le plan de localisation de l'aire d'alimentation ;
- Le plan de localisation de l'aire de protection bactériologique et de l'aire de protection virologique, lesquelles correspondent aux portions de l'aire d'alimentation du lieu de captage tels définis par l'emploi d'un temps de migration de l'eau souterraine sur 200 jours (protection bactériologique) et sur 550 jours (protection virologique).
- L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les aires définies au paragraphe 2 par l'application de la méthode DRASTIC ;

- L'inventaire des activités et des ouvrages situés à l'intérieur des aires définies au paragraphe 2 qui sont susceptibles de modifier la qualité microbiologique de l'eau souterraine tels que les systèmes de traitement d'eaux usées, les ouvrages ou les lieux de stockage ou d'épandage de déjections animales ou de compost de ferme, ou les cours d'exercices d'animaux d'élevage.

Dans le cas de lieux de captage exploités à des fins d'eau potable dont le débit moyen est inférieur à 75 m³ par jour et alimentant plus de 20 personnes, l'aire de protection bactériologique est fixée dans un rayon de 100 m du lieu de captage et l'aire de protection virologique est fixée dans un rayon de 200 m. pour l'application de la section II du présent chapitre, les eaux souterraines y sont réputées vulnérables. Toutefois, les aires de protection pourront être différentes si elles sont établies conformément aux dispositions du paragraphe 2 du premier alinéa et que la vulnérabilité des eaux souterraines y a été évaluée par l'application de la méthode DRASTIC.

Section II : dispositions particulières pour le milieu agricole.

L'épandage de déjections animales, de compost de ferme, d'engrais minéraux et de matières résiduelles fertilisantes est interdit à moins de 30 m de tout ouvrage de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Cette distance est toutefois portée à 100 m lorsqu'il s'agit de boues provenant d'ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées ou de tout autre système de traitement ou d'accumulation d'eaux usées sanitaires, ou de matières contenant de telles boues, et que ces boues ou matières ne sont pas certifiées conformes à la norme CAN/BNQ 0413-200 ou CAN/BNQ 0413-400.

L'épandage de déjections animales, de compost de ferme ou de matières résiduelles fertilisantes, sauf les matières résiduelles fertilisantes à la norme CAN/BNQ 0413-200, CAN/BNQ 0413-400 ou BNQ 0419-090, est interdit dans l'aire de protection bactériologique d'un lieu de captage d'eau souterraine lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est égal ou supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire.

L'épandage de boues d'ouvrage municipaux d'assainissement des eaux usées ou de tout autre système de traitement ou d'accumulation d'eaux usées sanitaires, ou de matières contenant de telles boues, est interdit dans l'aire de protection virologiques d'un lieu de captage d'eau souterraine lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est égal ou supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire. Cette interdiction d'épandage n'est toutefois pas applicable aux boues ou matières en contenant qui sont certifiées conformes à la norme CAN/BNQ 0413-200 ou CAN/BNQ 0413-400.

L'épandage de déjections animales, de compost de ferme, de matières résiduelles fertilisantes, sauf les matières résiduelles fertilisantes certifiées conformes à la norme CAN/BNQ 0413-200, CAN/BNQ 0413-400 ou BNQ 0419-090 en périphérie des zones d'interdiction prescrites par le présent article doit être réalisé de manière à en prévenir le ruissellement dans ces mêmes zones.

Une municipalité peut, par règlement adopté en vertu de la loi sur l'aménagement et l'urbanisme (L.R.Q., c. A-19.1), interdire l'épandage de déjections animales, de compost de ferme, d'engrais minéraux et de matières résiduelles fertilisantes dans des portions définies de l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage alimentant un système de distribution d'eau potable, si, lors de 2 contrôles consécutifs réalisés dans le cadre du contrôle périodique prévu au Règlement sur la qualité de l'eau potable (D. 647-2001, 01-05-30), la concentration en nitrates de l'eau provenant d'un lieu de captage d'eau souterraines excède 5mg/l.

L'érection ou l'aménagement d'une installation d'élevage d'animaux ou d'un ouvrage de stockage de déjections animales est interdit :

- A moins de 30 m de tout ouvrage de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine ;
- Dans l'aire de protection bactériologique d'un lieu de captage d'eau souterraine, lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est égal ou supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire.

Le stockage à même le sol de déjections animales, de compost de ferme ou de matières résiduelles fertilisantes dans un champ cultivé est interdit :

- A moins de 300 m de tout ouvrage de captage d'eau souterraine destinée à la consommation humaine ;
- Dans l'aire de protection bactériologique d'un lieu de captage d'eau souterraine, lorsque celle-ci est réputée vulnérable ou lorsque l'indice DRASTIC de vulnérabilité est égal ou supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire (L.R.Q., 2002).

3.2.4. LEGISLATIONS EN FRANCE :

Le code de l'environnement regroupe, en France, des textes juridiques relatifs au droit de l'environnement. Le code comporte sept livres divisés en titres, chapitre, sections, sous-sections et paragraphes.

Ce qui concerne la protection des eaux souterraines en France, trois périmètres de protection sont distingués : immédiate (environ 15 m), rapprochée (environ 50 jours) et éloignée (ce dernier périmètre n'a pas de caractère obligatoire ; il renforce le précédent et peut couvrir une superficie très variables). La vulnérabilité est également évaluée ; la moitié de la surface agricole française est classée en zones vulnérables. Des aides financières permettent de passer des contrats avec des agriculteurs qui s'engagent à mettre en œuvre des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement.

Malgré la gamme d'outils (instrument réglementaires, aides financières et conseils) pour lesquels il est recherché la meilleure cohérence possible, les résultats

sont insuffisants la dégradation de la qualité des eaux par rapport aux nitrates continue. De nombreux éléments peuvent l'expliquer : long temps de réponse des eaux souterraines, complexité de ces pollutions diffuses, lobbying des organisations professionnelles agricoles, absence d'instruments économiques contraignants et débats autour de l'incidence des nitrates sur la santé.

3.2.5. LEGISLATIONS EN ALLEMAGNE :

Les dispositions relatives aux utilisations et à la protection des eaux souterraines figurent dans un certain nombre de loi et règlements. La protection de la qualité des eaux souterraines est assurée par l'application de procédures pour la délimitation des zones de protection. Ces procédures ont été publiées dans 'Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete' des 1953. Elles ont été reprises en 1961, puis 1975. On distingue :

- *Zone I* : Elle doit être au moins 10 m tout autour du captage, et au moins 10 m en amont d'une source. La zone doit être clôturée.
- *Zone II* : elle s'étend depuis la limite de la zone I jusqu'à une distance correspondant à un temps de transfert de l'eau souterraine de 50 jours (la plupart des germes étaient éliminés).
- *Zone III* : Cette zone doit protéger de la pollution engendrée par les produits chimiques et radioactifs. Elle peut être subdivisée en zone III.A et zone III.B (Lallemand B A. et Roux J C., 1995).

3.2.6. LEGISLATIONS AUX ETATS-UNIS :

Le « Safe Drinking Water Act » (SDWA) de 1974, est une loi sur la protection des eaux alimentation. Cette loi désigne l'environnementale protection agency (EPA) pour énoncer des standards de potabilité et les procédures d'application de ces standards. De plus, la loi SDWA demande à EPA de définir des zones dans lesquelles l'aquifère est « seule source d'eau potable » qui ne peut en aucun cas être polluée.

La loi « SDWA Amendments » de 1986, renforce la première, en règlement les injections dans le sous-sol, en émettant un programme de définition des « seules sources d'eau potable », et en établissant des programmes pour développer la mise en place de zones de protection des captages. Les articles 1427 et 1428 de cette loi sont relatifs aux périmètres de protection des captages.

Dans chaque état des Etats-Unis, le gouverneur devait dans un délai de 3 à 4 ans après la mise en application de cette loi, c'est -à- dire avant 1990, établir et soumettre à l'administration centrale de l'EPA, un programme de mise en place de zones de protection de captage. Un état qui ne soumet aucun programme, n'est pas

pénalisé, mais il ne reçoit aucune aide pour la protection des captages. L'EPA n'a aucune autorité pour entreprendre un programme à la place des états fédérés. L'administration centrale de l'EPA avait obligation de fournir aux états fédérés, en 1987, un guide technique leur permettant de définir ces zones de protection. Ce guide a été publié en juin 1987. Il s'inspire des travaux européens, allemands, néerlandais et anglais.

L'EPA recommande un périmètre de protection immédiate de 30 m de rayon autour du captage. La limite du périmètre rapprochée correspond à un temps de transfert de 50 jours (165m). La limite du périmètre de protection éloignée doit correspondre à un temps de transfert de 15 ans minimum et 20 ans si possible (Lallemand B A. et Roux J C., 1995).

3.3. LACUNES OBSERVEES AU NIVEAU DES TEXTES ALGERIENS:

Il est vrai que la réglementation de la prévention contre la pollution en Algérie a connu une évolution positive depuis l'indépendance jusqu'au moment actuel en promulguant un nombre de neuf directives sous forme de décrets et lois qui régissent et règlementent certains processus majeurs de lutte contre la pollution des eaux et des sols.

Cependant, en ce qui concerne la protection des eaux, ces textes ont tracé les grandes lignes de la protection des ressources en eau sans pour autant donner des précisions sur la (ou les) méthode(s) pour la détermination des distances des différentes zones de protection. Ces distances sont bien déterminées dans les pays développés. A titre d'exemple : le périmètre de protection immédiat ou la zone 1 : en Allemagne fédérale est à moins de 10 m, en Norvège de 20 à 30 m, aux Etats-Unis d'Amérique de 30 m et en Belgique de 10 m. Le périmètre de protection rapproché ou zone 2 est basée sur le temps de transfert d'un polluant par exemple : en Allemagne fédérale il est de l'ordre de 50 jours, en Norvège de 60 jours, aux Etats-Unis d'Amérique de 50 jours et en Belgique de 24 heures. Le périmètre de protection éloigné ou zone 3 correspond en Allemagne fédérale et en Norvège à la totalité de la zone d'alimentation, aux Etats-Unis, il est déterminé sur un temps de transfert du polluant de 15 ans minimum et 20 ans si possible et en Belgique de 1 à 50 jours.

La législation concernant la protection des eaux souterraines a pour objet la mise en disponibilité d'une eau propre et potable pour le citoyen. Mais elle reste insuffisante sans l'utilisation de nouveaux outils qui permettraient d'assurer une meilleure protection contre la pollution. Parmi ces outils on cite:

- La vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : la vulnérabilité est parmi les outils de prévention des eaux souterraines qu'elle n'existe pas dans la législation Algérienne. A titre recommandation, Il faut voir dans les règlements Algériennes les textes pour l'applicabilité des cartes de vulnérabilité à différentes échelles. Ces cartes doivent répondre à des préoccupations principales ; *la prévention par la localisation des zones

sensibles, la définition de la propagation des polluants et la situation des foyers de contamination actifs ou potentiels. *la protection par mise en place d'aménagements spéciaux (étanchéité des stockages et des canalisations de surface et souterrains, collecte des effluents, etc.) et des réseaux de qualité.

- Les cartes de protection des eaux souterraines : les cartes de protection sont aussi des outils efficaces pour la protection des eaux souterraines qu'il faut appliquer en Algérie. Ces cartes sont établies par les régions et comprennent au moins les éléments suivants : *secteurs Au et Ao de protection des eaux, *aires d'alimentation Zu et Zo, *périmètres de protection des eaux souterraines, *sources non captées, *captages et installations d'alimentation artificielle.

En outre, en ce qui concerne les rejets polluants industriels et domestiques. L'application de principe « pollueur-payeur » est une solution clef pour la lutte contre la pollution des eaux, la protection et la restauration des ressources en eau. C'est un principe découlant de l'éthique de responsabilité. Il prévoit que chaque usager prenne en compte les 'externalités' négatives de son rejet, c'est-à-dire les impacts qu'il a sur l'environnement. Ce principe aide financièrement et techniquement les opérations d'intérêt général au service de l'eau et de l'environnement. Donc l'état algérien doit y ajouter ce principe dans les textes législatifs concernant la protection de l'environnement, et exiger des redevances qu'elle perçoit sur les usagers de l'eau (habitant, industries, acteurs économiques...). Cette redevance est redistribuée sous forme d'aides financières aux maîtres d'ouvrage privés ou publics qui concourent à la lutte contre la pollution des eaux, à l'amélioration de la répartition de la ressource en eau, à la protection et la restauration des milieux aquatiques naturels. Les avantages de ces redevances sont :

- La ressource financière de l'agence
- Une forme de mise en application du principe « pollueur-payeur »
- Une incitation à moins polluer et limiter ses rejets d'eau.

3.4. CONCLUSION :

On remarque que la réglementation sur la protection contre la pollution des gouvernements européens et américains est très riche et stricte ; toutes les mesures adéquates sont prises en vue d'assurer un développement durable dans l'avenir et corriger un grand nombre d'erreurs conises dans le passé. Ceci est particulièrement vrai pour la Suisse et le Québec qui sont réputés mondialement pour leur respect strict à l'environnement et au développement durable.

La réglementation algérienne actuelle est suffisante sur le plan des objectifs cruciaux à atteindre. Cependant, sa mise en œuvre sur le terrain est limitée compte tenu de l'insuffisance en matière de moyens matériels et/ou juridiques. Pour cette raison il est nécessaire d'enrichir les moyens de protection pour une meilleure sauvegarde de cet environnement. Face à la difficulté liée aux techniques et au coût de

dépollution il serait plutôt plus judicieux de mettre beaucoup plus de poids sur le côté prévention.

On comparant la législation algérienne avec la législation de divers pays présentés dans ce chapitre, on remarque que dans le contexte de réglementation pour la protection contre les différents types de pollution, notre pays, malgré le nombre important de textes promulgués, lui reste beaucoup à faire que ce soit du point de vue législatif qui nécessite un enrichissement ou bien du point de vue de l'application de la loi sur terrain.

On remarque qu'actuellement on règle seulement les situations d'urgence alors que les actions de prévention contre les risques de pollution sont pratiquement inexistantes. Pourtant la situation environnementale est inquiétante, pour cela certaines actions supplémentaires peuvent être envisagées. A ce titre et à la lumière de ce qui a précédé, nous recommandons ce qui suit:

- La sensibilisation permanente de la population sur les risques de pollution et des Maladies à transmission Hydrique (MTH), sur la responsabilité de chaque citoyen, sur l'économie de la ressource mobilisée, sur les propriétés des périmètres et des ouvrages.
- La veille à l'application stricte de la loi et de surveillance des abus, des mépris et des délinquances sur les éléments sensibles à la pollution hydrique souterraines ou de surface.
- La création de cellules de surveillance et de suivi de la pollution, munies de moyens technologiques adéquats pour recevoir des alertes en temps réel et donc agir promptement.
- La création de cellules de conseil et de partage de l'information, avec la présentation des données sur tout le territoire national.
- L'initiation de projets de recherche universitaire visant à améliorer les modèles actuels de diffusion de la pollution et leur application sur le terrain via des cellules de veille.
- Une approche nouvelle basée sur la concertation, la communication de tous les secteurs s'impose donc pour protéger l'environnement en Algérie.

La protection de l'environnement est l'affaire de tous, c'est notre avenir de survie sur notre « Belle Bleue » aussi bien que celui de nos enfants dont nous avons la responsabilité de leur laisser un milieu naturel décent et promoteur de beaucoup de richesses.

CHAPITRE IV

ETUDE DE CAS ; IMPACT DE LA POLLUTION D'OUED MOUILLAH SUR LE BARRAGE BOUGHERARA.

4.1. INTRODUCTION :

Généralement les aménagements hydrauliques font l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement. Mais dans le cas présent c'est l'approche inverse à savoir l'impact de l'environnement sur le barrage Hammam Boughrara.

Compte tenu de l'importance hydrique et pédologique que présente le bassin versant de l'Oued Mouillah, il s'y est développé d'importantes activités économiques traduites par l'évolution de grandes agglomérations telles que Maghnia et Oujda.

Les apports du Oued Mouillah seules ressources importantes en eau de surface (80 % de l'apport total) pour le barrage Hammam Boughrara sont gravement infectés par une pollution générée par les activités urbaines et industrielles (Selka G. et Debbal Z., 2007). De plus, il faut signaler l'existence de décharges sauvages des déchets solides et ordures ménagères de Maghnia situées à proximité de l'Oued Mouillah et à l'amont du barrage de Hammam Boughrara. Ceci cause de graves problèmes de pollution.

Face à ces problèmes de pollution, plusieurs études ont été menées afin d'identifier et caractériser la pollution enregistrée au niveau du barrage Hammam Boughrara et dont la principale source est l'Oued Mouillah (Mokrab R. et Cheriette B., 2003).

Dans ce qui suit nous faisons une synthèse de tous les travaux effectués sur ce site.

4.2 LE BASSIN VERSANT D'OUED MOUILLAH:

Le bassin versant d'oued Mouillah est situé à l'Ouest du bassin de la Tafna. La majeure partie de sa superficie qui couvre les plaines d'Angad et de Maghnia se trouve dans le territoire marocain. D'un périmètre de 230 Km, d'une longueur de thalweg principal de 123 km, ce bassin dont l'altitude maximale est de 1430 m, s'étend sur une superficie de 2650 km² (Ghenim A., 2001).

Oued Mouillah, affluent rive gauche d'Oued Tafna prend naissance dans la région d'El Abed en Algérie à 1250 m d'altitude puis pénètre au Maroc en prend le nom d'Oued Isly et suit un cours intermittent. Il redevient permanent en aval de la ville d'Oujda (Maroc) pour s'appeler Oued Bou-Naïm et pénètre en Algérie aux environs de Maghnia sous l'appellation de Oued Mouillah. Il reçoit alors sur sa rive droite Oued Ouerdeffou qui forme la réunion d'Oued El Abbes, Oued Aouina et Oued Mehaguen et sur sa rive gauche Oued Bou Selit, Oued Saria et Oued El Aouedj (Ghenim A., 2001). Le point de confluence de l'Oued Mouillah avec l'Oued Tafna est

situé au niveau de Sidi Belkheir à l'altitude 285 m en amont du barrage Hammam Bougherara (Ghenim A., 2001) et (Rouissat T., 2001).

En plus de la ville Marocaine de Oujda et ses périphéries, le bassin versant de l'Oued Mouillah inclus les communes de Maghnia, Sidi Medjahed, Béni Bahdel et Béni Boussaïd (Mokrab R. et Cheriète B., 2003).

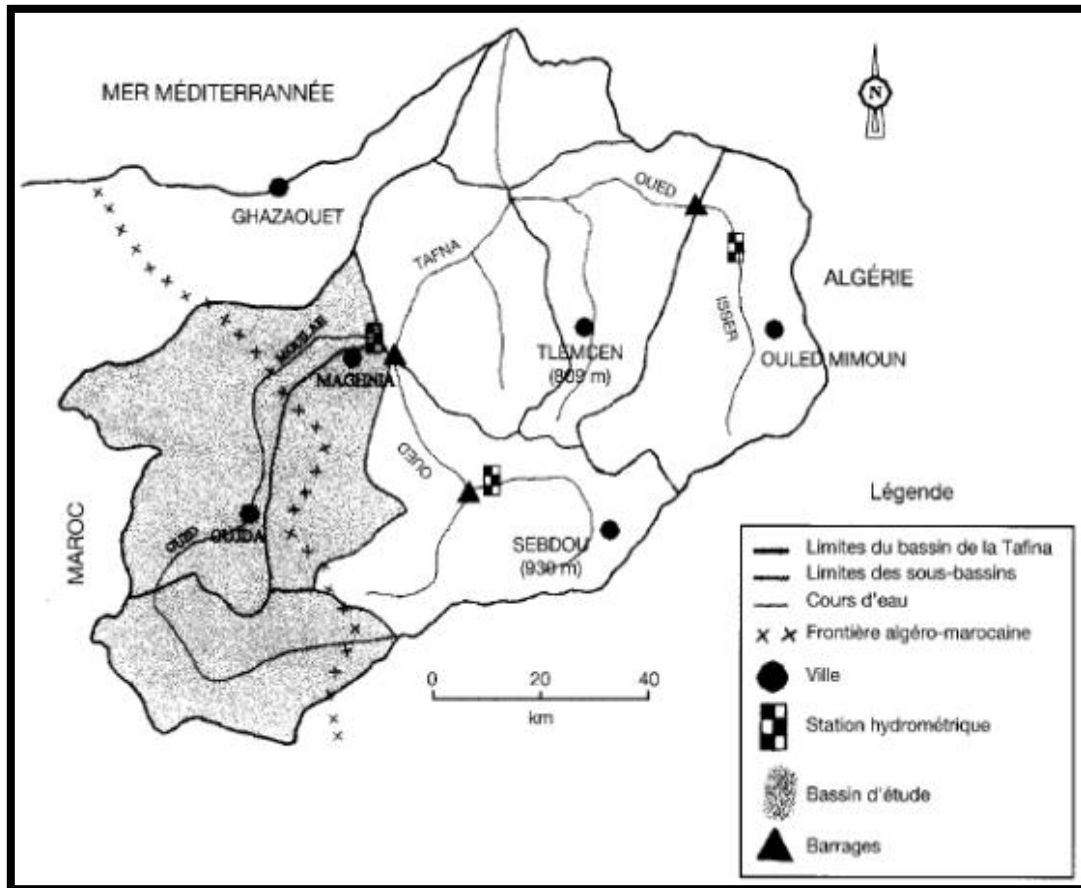


Figure 4-1 : bassin versant de Mouillah (Bouchelkia H. et al., 2001).

4.3. BARRAGE HAMMAM BOUGHRARA :

Le barrage de Hammam Bougherara (mise en eau en 1999) est situé sur la confluence de oued Mouillah avec oued Tafna à 10 km en aval de la ville de Maghnia (coordonnées Lambert du site X=102.920, Y=85.200). Il est destiné à l'alimentation en eau potable des villes d'Oran (33 Hm³), de Maghnia (17 Hm³) et à l'irrigation (09 Hm³) de la moyenne Tafna (Selka G. et Debbal Z., 2007).

La cuvette du barrage constitue l'exutoire principale de l'Oued Mouillah dont le bassin versant s'étend sur une superficie de près de 2650 km². Il est composé d'une vaste plaine riche en terres agricoles et en réseau hydrique. Autour de ces richesses hydriques et pédologiques, il s'y est développé d'importantes activités agricoles, industrielles et commerciales engendrant une importante pollution des milieux hydriques et terrestres. Cette pollution se propage et se diffuse pour atteindre finalement le barrage Hammam Boughrara qui constitue le milieu récepteur de tous

les rejets aussi bien solides que liquides de l'ensemble des activités du périmètre (Benadda L. et al., 2001).

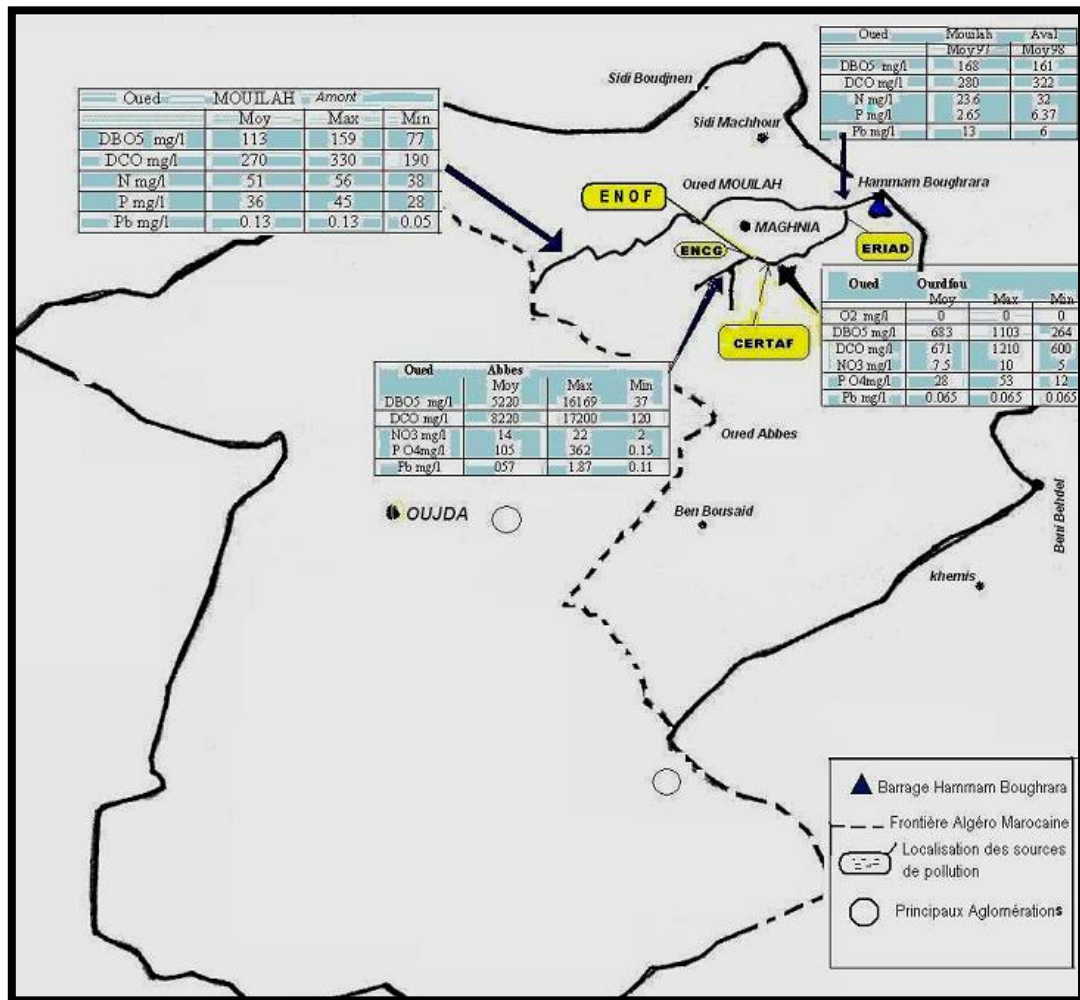


Figure 4-2 : Localisation des sources de Pollution (E.N.H.P.O., 2003).

4.3. SOURCES DE POLLUTION :

Le bassin versant de l'Oued Mouillah connaît de fortes pollutions provoquées par les divers rejets liquides et solides de part et d'autre de la frontière algéro-marocaine.

Les sources de ces rejets sont d'ordre domestique, agricole et industriel. Ces rejets ont un impact néfaste sur beaucoup de régions stratégiques de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Mouillah, comme le milieu urbain de la ville de Maghnia et, notamment, sur le barrage Hammam Boughrara situé à l'exutoire principal de l'Oued Mouillah au point de confluence avec l'Oued Tafna.

Ce titre traite des différents rejets urbains, agricoles et industriels, pour chacune des deux parties du bassin versant, en l'occurrence les rejets de la partie algérienne et ceux de la partie marocaine.

4.3.1. SOURCE URBAINES :

La pollution domestique se situe à deux niveaux, à savoir la sources de pollution liquide et la source de pollution solide.

A) Sources de pollution liquide :

Cette pollution est due aux rejets d'eaux usées d'usage domestique de toutes les villes et agglomérations se trouvant dans la zone de notre étude.

Dans le cadre de la réduction de l'agressivité de cette pollution, la wilaya de Tlemcen a réalisé une STEP, à Maghnia, en amont du nouveau barrage de Hammam Boughrara pour préserver ses eaux de la pollution. Cette station d'épuration biologique à une capacité totale de 150.000 équivalents habitants n'a malheureusement commencé à fonctionner que bien après la mise en eau du barrage de Hammam Boughrara [66] et qu'elle ne traite actuellement que les eaux usées en provenance de la ville de Maghnia.

B) Sources de pollution solide :

La décharge actuelle des déchets solides urbains est située en amont de Hammam Chigueur environ 2,5 km de la ville de Maghnia, cette décharge ne répond pas aux normes techniques appropriées et peut être considérée comme décharge sauvage. Nous y trouvons, mélangés, les déchets ménagers, d'abattoirs hospitaliers, industriels et agricoles (Benadda L. et *al.*, 2001).

La quantité des déchets à évacuer varie d'une région à l'autre selon les saisons de l'année, les habitudes, le niveau de vie et de l'éducation des habitants. Aucune formule ne permet d'en calculer la valeur, sauf des études et des observations effectuées sur place (Sidhoum S. M., 2000). Une partie importante de ces déchets se trouvera d'une façon ou d'une autre dans le bassin versant de l'Oued Mouillah, et par conséquent dans le barrage. Ainsi, il est suggéré de mener des études de décharges solides afin de régler le problème de pollution solide au niveau du bassin versant d'Oued Mouillah.

4.3.2. SOURCES INDUSTRIELLES :

L'industrie émet une multitude de polluants dans le milieu récepteur et d'innombrables composés minéraux et organiques tous aussi dangereux les uns que les autres tel que les métaux lourds, les matières organiques, des substances minérales, des poussières, des particules radioactives, de la chaleur.

4.3.2.1. SOURCES DE POLLUTION LIQUIDE :

Cette pollution est due aux rejets d'eaux usées des différentes unités industrielles implantées dans le bassin versant à savoir, ENOF (Entreprise de bentonite et de terre décolorante), ENCG (Entreprise des Corps Gras), Maïserie (ERAD : Entreprise Des Aliments et Dérivés), CERTAF (omplexe de la vaisselle et céramique).

4.3.2.2. SOURCES DE POLLUTION SOLIDE :

Les boues résiduelles issues du traitement de la terre décolorante par l'unité de bentonite (ENOF) sont stockées actuellement dans l'excavation d'une ancienne carrière d'argile. Cette dernière devrait connaître l'aménagement en une décharge industrielle contrôlée qui sera gérée par plusieurs industries et prendra en charge à côté des déchets de l'ENOF, les déchets solides issus de complexe céramique de la Tafna CERTAF et d'autres industries (E.N.H.P.O., 2003).

4.3.3. SOURCES DE POLLUTION AGRICOLES :

L'utilisation massive des engrais et des produits phytosanitaires a permis une augmentation spectaculaire des rendements mais a entraîné une importante pollution de l'espace rural, des eaux, des terres cultivées et la contamination des produits végétaux et animaux par des substances minérales et organiques parfois toxiques.

Le lessivage résiduel des engrais chimiques par les eaux de pluie ou d'irrigation et leur entraînement vers les milieux hydriques (lacs, cours d'eau) se traduit par un important développement des algues et une concentration des matières en suspension très élevée. Les produits phytosanitaires polluent les nappes et les cours d'eau et ont un impact considérable sur les écosystèmes [68].

4.3.4. SOURCES DE POLLUTION FRONTALIERE :

Cette pollution est engendrée par les eaux usées urbaines et industrielles provenant de la ville marocaine d'Oujda, déversées, sans aucun traitement préalable, directement dans l'oued Bounaïm, principale affluent de l'oued Mouillah.

Au niveau de l'Oued Mouillah, la pollution des eaux de l'oued est perceptible à l'œil nu. On nous signale que les Marocains ont implanté, au milieu des années 1990, pas moins de 6 fabriques aux abords de l'oued Bounaïm. Des usines de détergeants, de la tannerie et des fabriques de batteries ont été réalisées. « Toutes ces fabriques déversent leurs déchets toxiques vers notre pays. Des métaux lourds ont été détectés au niveau du barrage de Hammam Bougherara, pollué à un degré très élevé », a déclaré notre interlocuteur qui précise que « l'Etat algérien a déboursé pas moins de 22 millions de dollars pour les systèmes d'irrigation de cette région et que les nappes phréatiques ont été aussi touchées par les produits toxiques. » [68].

Les campagnes d'analyses physico-chimiques menées par l'A.N.R.H concernant ce cours d'eau donnent les résultats suivants :

Tableau 4-1: Concentration en DBO5 et en DCO

	1996	1999
DBO₅	29,41	72,66
DCO	83,33	181,66

D'après ces résultats nous observons les valeurs moyennes annuelles de la DBO₅ et la DCO pendant la période de 1996 sont inférieurs aux normes, mais pour l'année 1999 les valeurs de la DBO₅ et la DCO sont très élevées que celles précédentes et dépassent largement les normes préconisées par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S). Sachant que la norme maximale de la DBO₅ admise dans le cours d'eau doit être de 40 mg/l et au barrage à 3 mg/l, pour la DCO la norme maximale admise dans le cours d'eau et de 80 mg/l, celle admise au barrage doit être de 30 mg/l. Ces taux correspondent à une forte charge de matières organiques provenant du Maroc (Benadda L. et *al.*, 2001).

4.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION :

Les rejets depuis l'amont de diverses origines (domestiques, industrielles, agricoles locales et transfrontalières) entraînent d'innombrables agents polluants diffusés dans le milieu récepteur du bassin versant de l'oued Mouillah. Ces polluants génèrent de graves conséquences sur les milieux écologiques du bassin versant et sur l'homme et sa santé.

On présente, brièvement dans ce chapitre, les conséquences de ces rejets sur le milieu du bassin versant et ses différentes composantes.

4.4.1. IMPACT DE LA POLLUTION SUR LE BASSIN D'OUED MOUILLAH:

4.4.1.1. IMPACT DE LA POLLUTION SUR L'ETRE HUMAIN :

Les nuisances les plus importantes sont engendrées par la présence des bactéries et les germes, dont certaines peuvent être pathogènes, provoquant des MTH, telles que le choléra, la fièvre typhoïde, la dysenterie bacillaire, l'hépatite virale, la méningite, la parasitologie B et C.

D'autre part, certains métaux lourds émis, tel que le plomb (Pb), s'accumulent dans les tissus et peuvent par bioaccumulation et bioconcentration causer des maladies dangereuses. Les nitrites et nitrates peuvent, par exemple, être à l'origine de cancers chez l'adulte.

4.4.1.2. IMPACT DE LA POLLUTION SUR LE MILIEU RECEPTEUR :

La pollution des cours d'eau peut avoir plusieurs origines, dont les principales sont les rejets en provenance de la ville de Maghnia et celle d'Oujda.

A) **Oued Mouillah** : drainant les pollutions urbaines et industrielles de l'importante ville d'Oujda et d'autres localités marocaines secondaires.

B) **Oued Abbes** : drainant les eaux industrielles polluées de Maghnia et complexe des corps gras ENCG, Maîserie Tafna et complexe de céramique aisselle

ECVO. Oued Abbes déverse dans l'Oued Ouerdeffou à quelques kilomètres en aval de la ville de Maghnia.

C) **Oued Ouerdeffou** : il draine les eaux usées urbaines de la ville de Maghnia et les eaux de certaines activités industrielles dont principalement l'usine de production de bentonites et de la terre décolorante (ENOF) en celles de l'Oued Abbes, l'Oued Ouerdeffou déverse dans l'Oued Mouillah.

En ce qui concerne les eaux souterraines, la zone d'étude comprend essentiellement la plaine de Maghnia qui est le prolongement oriental de la plaine marocaine des Angad et la plaine de Zriga.

L'intérêt de la connaissance de ces plaines s'impose pour prévoir les risques de contamination des nappes par l'infiltration des eaux polluées.

D'autre part, la décharge actuelle des déchets solides urbains qui se situe en amont de Hammam Chigueur, ne répond pas aux normes techniques appropriées, elle attire les insectes les rougeurs, les animaux qui peuvent renfermer des germes pathogènes et des parasites.

Ces déchets génèrent des nuisances comme les odeurs, la pollution du milieu et les risques de pollution des cours d'eau et nappes souterraines, par lessivage et entraînements dus aux ruissellements.

Par ailleurs, les sols et les végétations sont largement contaminés par la pollution, leur dégradation favorisée sous l'action permanente des différentes substances chimiques et biologiques polluantes (Sidhoum S. M., 2000).

4.4.1.3. IMPACT DE LA POLLUTION SUR LE BARRAGE BOUGHERARA :

Le site du barrage Hammam Bougherara se présente comme une source secondaire de pollution, alimentée par les oueds Mouillah et Tafna et leurs différents affluents.

Cette pollution composée de différents paramètres et éléments chimiques, organiques et biologiques constitue un réel danger sur la qualité et la potabilité des eaux régularisées par le barrage.

Ainsi, cet important ouvrage joue actuellement le rôle d'une grande lagune, et ne peut être utilisé pour les objectifs auxquels il a été conçu et risque, même, d'être condamné, si aucune action de lutte contre sa pollution n'est entreprise dans les brefs délais.

4.5. ANALYSE DE LA POLLUTION :

Différentes campagnes d'analyses ont été menées, depuis 1990, à plusieurs endroits du bassin. Effectuées et suivies essentiellement par l'inspection de l'environnement et la direction de l'Hydraulique de la wilaya de Tlemcen, auprès des laboratoires : ANRH-Oran, METANOF-Ghazaouet et CRD-Boumerdès. En plus il y a plusieurs analyses de la pollution faites par des ingénieurs dans le secteur de Maghnia, afin de trouver des solutions pour maîtriser cette pollution, parmi eux il y a Mr Sidhoum S, Benadda L, Melle Mokrab R et Melle Cheriète B....

Les résultats d'analyses ont permis la mise en évidence des différents types de pollutions générées, et évaluer les risques inhérents des pollueurs situés à l'amont du barrage Hammam Bougherara.

D'après les analyses physico-chimiques annuelles (réalisées au niveau de laboratoire de l'ANRH-Oran) de l'année 2000 jusqu'au 2005 prélevés à différents niveaux de la cuvette du barrage (figure 4.3). Il a été trouvé différents résultats. Les concentrations en DBO₅ dans la cuvette sont inférieures à la norme (30mg/l), cette teneur de la DBO₅ augmente avec la profondeur de la cuvette. Par contre, les valeurs de la DCO sont souvent supérieures à la norme (60mg/l), ceci est dû à l'existence d'une quantité considérable de substance oxydable. Durant l'année 2005 ils ont enregistré une quantité plus importante au fond de la cuvette conséquence de la décantation des matières organiques. La teneur en bicarbonate HCO₃ varie entre 150 et 400 mg/l, La teneur en ammonium sur toute la cuvette est largement inférieure à la norme (10mg/l), mais elle augmente avec la profondeur, les teneurs en Phosphore total (P) sont aux environs de 5mg/l.

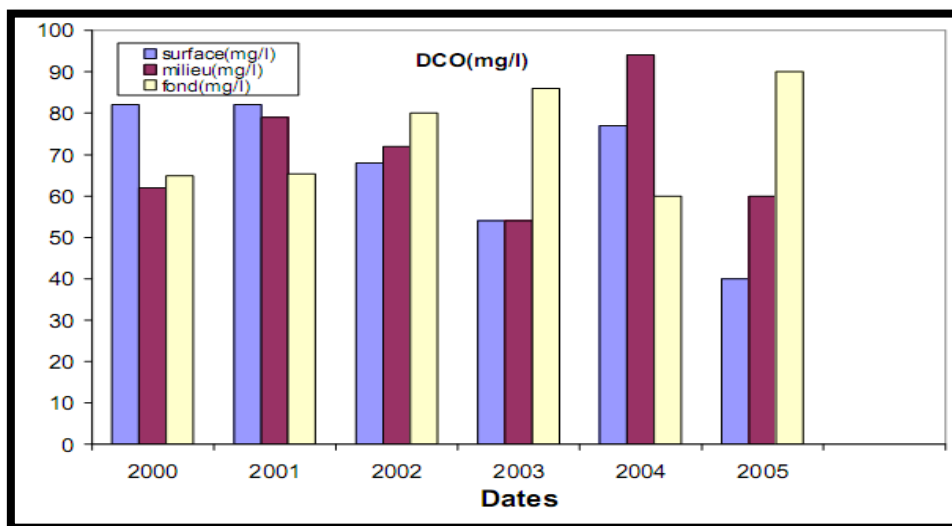


Figure 4-3 : Evolution des concentrations de DCO (Analyse ANRH 2000-2005).

Le même laboratoire a refait les analyses en 2008 (Tableau 4.2). D'autres résultats ont été trouvés. Ces résultats sont importants en profondeur qu'en surface, ces dernières présentent une pollution organique exprimée en DCO qui varie entre 20 mg/l et 120 mg/l, la concentration enregistrée des matières organiques est environ 15.1mg/l en surface et 5mg/l au fond. Les teneurs en ammonium augmentent à partir de 10m de profondeur pour atteindre un taux de 7.4 mg/l au fond. Les teneurs élevées

en phosphate dans les eaux du fond s'expliquent par les apports des effluents, les valeurs varient entre 1.97 mg/l et 7.02 mg/l.

Tableau 4-2 : Rejet de Oued Mouillah dans le barrage (Analyse ANRH 2008).

Paramètres	Cuvette de barrage	
	Min	Max
DBO ₅ (mg/l)	5	15,1
DCO (mg/l)	20	120
NH ₄ (mg/l)	0,03	7,4
HCO ₃ (mg/l)	213	376

Pendant le mois d'avril 2000, Sidhoum S. M. a travaillé sur l'impact des rejets domestiques et industriels sur la zone Maghnia-Hammam Bougherara. Il a procédé à une campagne de prélèvements des eaux usées rejetées par les quatre entreprises polluantes (ENOF, ENCG, ERIAD, ECVO). Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire de la station d'épuration de Maghnia. Les résultats trouvés pour la DBO₅ sont largement supérieurs à la norme (40mg/l), surtout pour l'ERIAD et ENCG. Les valeurs de DCO environ 120 mg/l. les concentrations de l'aluminium (Al) rejetés par ENOF dépassent 53 mg/l. le zinc (Zn) est un peu supérieure (6,75 mg/l) pour l'ENOF.

D'après ces résultats, il a proposé comme remède pour la réduction de la charge de pollution une station de traitement dite « station de finition » commune recevant les rejets des quatre unités industriels pour l'amélioration de la qualité future des eaux déversées dans le Barrage.

Le même principe de travail a été suivi par Mokrab R et Cheriette B, elles ont synthétisées différents analyses de la période 1999-2000. Elles ont proposées après des solutions au niveau de chaque unité industrielle, à court, moyen et long terme.

Le travail de Benadda L. intitulé sur les analyses spatio-temporelles aux différents points du secteur étudié. On prend par exemple le point d'oued Mouillah amont, il a trouvé que les valeurs de DBO₅ et DCO sont toujours loin des normes. Les valeurs des métaux lourds presque toujours supérieures à la norme.

Les normes préconisées par l'organisation mondiale de la santé (OMS) pour le déversement de rejets industriels sont référés au tableau III.1 en annexe K.

A la lumière de ce qui a précédé, nous constatons que le barrage de Hammam Bougherara est sévèrement menacé par toute sorte de pollution et des solutions efficaces n'ont pas été trouvées et/ou mises en œuvres à nos jours. Nous faisons remarquer, outre la pollution causée par différentes activités au niveau du territoire algérien et qui restent plus ou moins solvables, la pollution en provenance du Maroc demeure, à nos jours, incontrôlable et une solution, même efficace, en aval au niveau du territoire algérien ne contribuera, nullement, à sa totale éradication totale.

4.6. RECOMMANDATIONS :

4.6.1. RECOMMANDATION 1 : POLLUTION TRANSFRONTALIERE.

Une approche régionale du problème de pollution transfrontalière devrait être rapidement engagée. Dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée et de partenariat-méditerranéen par le biais du programme SMAP (programme d'actions à moyen et court terme), il est possible de trouver une solution globale avec des appuis techniques et financiers. Les actions de gestion intégrées de l'eau et des pollutions sont prioritaires au niveau de ces institutions. Des investigations seront menées pour identifier les solutions possibles visant la réduction de la pollution en provenance du Maroc sur le tronçon d'oued Mouillah amont plus particulièrement en saison d'étiage.

4.6.2. RECOMMANDATION 2 : EPURATION PAR LES PLANTES.

Dans le bassin versant d'Oued Mouillah, la pollution des eaux par les rejets d'eaux industrielles et domestiques provient du Maroc pose un réel problème et devient de plus en plus dramatique. Sachant que cette pollution est incontrôlable par les institutions algériennes compétentes en la matière et que sa nature est d'origines industrielles, agricoles et domestiques, aucune solution, en aval au niveau du territoire algérien ne peut être complètement efficace. Néanmoins, en dehors de la solution suggérée en § 4.6.1, nous recommandons l'implantation de deux stations d'épurations par filtres plantés. L'implantation de ces stations est motivée par leurs coûts modérés, leurs simples d'entretien, leurs négligeables consommations énergétiques et leurs complètes intégrations au paysage naturel.

La première station, du type « épuvalisation » décrite plus bas, sera implantée à la frontière algéro-marocaine au niveau du déversoir installé récemment par les services de l'hydraulique de la wilaya de Tlemcen qui se trouve complètement envasé à ce jour. Cette station, outre sa fonction principale de réduction de la pollution par métaux lourds, permettra d'éviter le colmatage précaire du déversoir. Le déversoir actuel doit être amélioré pour assurer une décantation efficace des métaux lourds et la station doit être dotée d'un système de siphonage pour assurer l'évacuation des métaux lourds vers les filtres plantés. Cette station aura en effet comme fonction principale de réduire au maximum la pollution des rejets d'eaux usées industriels et domestiques de la ville marocaine Oujda lesquels sont véhiculés par oued Mouillah. Les plantes à utiliser doivent avoir un pouvoir, entre autres, d'éliminer les métaux lourds. Certains végétaux ont la capacité d'accumuler les métaux lourds. Ils pourraient assainir les eaux contenant des métaux lourds. Les scientifiques étudient les différentes possibilités de l'épuration en utilisant des plantes telles que le tournesol, la moutarde, l'arabette de Haller, l'ambroisie, le chou et géranium, ainsi que d'autres espèces moins connues.

La deuxième station sera, du type classique « filtres à macrophytes », sera implantée juste en amont du barrage Hammam Bougherara. Sa fonction principale sera l'élimination de la pollution des eaux usées domestiques des agglomérations en amont. Cette station sera équipée d'un système de trop plein pour éviter son inondation.

Description du procédé « épuvalisation » :

Sur la base d'une étude faite par le Professeur Dimitri Xanthoulis, Avenue de la faculté d'agronomie 2, 5030 Gembloux. On propose une station d'épuration par plusieurs plantes épuratrices. Ce projet s'appelle « épuvalisation ». Cette technique de traitement et de valorisation des eaux usées par les plantes a été mise au point et brevetée par l'ASBL EPUVALEAU qui dépend de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Le traitement consiste à utiliser les besoins des plantes et leur système racinaire pour absorber les éléments dissous dans l'eau usée.

Comme l'illustre la figure 4.4, le système d'épuvalisation se compose de goulottes où sont disposées les plantes racines nues, en contact direct avec l'effluent à épurer. D'un point de vue physico-chimique, cette technique permet d'obtenir une élimination importante des nitrates (NO_3^-), des phosphates (PO_4^{3-}), de la demande chimique en oxygène (DCO), des matières en suspension (MES) et des métaux lourds. Aussi, au niveau microbiologique, les coliformes fécaux, coliformes totaux, streptocoques, les œufs d'helminthes sont fortement réduits.

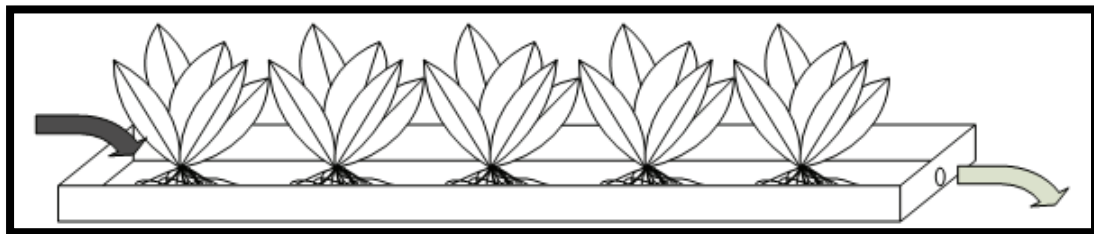


Figure 4-4 : illustration d'une goulotte d'un système épuvalisation (Dimitri X., 2007).

La technique « épuvalisation » permet notamment la production de plantes valorisables (plantes ornementales, biomasse, aliments pour animaux, production de semences etc). La technique a été testée sur de nombreuses plantes en Belgique et à l'étranger parmi celles-ci : le céleri de Huy (variété à couper), le cyperus, le cresson de fontaine, le cana, le palmier washingtonia, et diverses plantes ornementales. Pour plus de détails sur le fonctionnement de ce projet, on peut se référer à l'article publié par le prof Dimitri X, sous le titre 'Epurer et valoriser vos eaux usées par les plantes grâce à l'épuvalisation'.

4.6.3. RECOMMANDATION 3 : TECHNIQUES MODERNES DE GESTION DES DECHETS HOSPITALIERS.

Les déchets hospitaliers sont souvent considérés comme un sous produit ignoré de l'activité médicale et le secteur de la santé est générateur d'une pollution spécifique et dangereuse due à ces déchets. La production de déchets de nature diverse dans les établissements de soins, expose à des risques sanitaire graves pour le personnels, les patients, le public d'une part, et pour l'environnement d'autre part. A cet effet nous proposons l'implantation d'un incinérateur de déchets du type torche à plasma.

A) Réglementation :

En Algérie, la gestion des déchets en général est réglementée par la loi 1-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets : cette loi définit clairement les responsabilités, fixe les principes d'une gestion intégrée et écologiquement rationnelle des déchets et permet la délégation de toute partie de la gestion des déchets solides.

L'introduction récente de la fiscalité environnementale constitue un instrument moderne et fiable de gestion des déchets en général : pour les DAS, une taxe d'incitation au déstockage de déchets, d'un montant de 24 000 DA par tonne, a été instituée, par la loi de finances de l'année 2002, pour inciter les hôpitaux, cliniques et autres centres de soins à réduire la production de déchets infectieux ou toxiques.

Récente et probablement en cours d'évolution dans notre pays, la réglementation spécifique aux déchets de soins de santé précise les obligations, les responsabilités et définit les différents partenaires en matière de gestion de la filière d'élimination de ces déchets.

Ainsi :

Le décret ministériel n° 03-478 du 9 décembre 2003 : fixe les prescriptions d'élimination des DAS selon leur typologie.

Le circulaire n° 001 du MSPRH, du 4-8-2008, vient préciser d'autres obligations en matière d'organisation de la filière d'élimination des DAS et exige notamment :

- La désignation d'une personne référent chargée de cette filière dans l'établissement de soins ;
- Le respect de la réglementation et le soin de veiller à la traçabilité.
- Pour l'essentiel, ces textes :
- Classifient des déchets en général et ceux produits par les établissements de soins en particulier, en font obligation d'une déclaration annuelle des déchets spéciaux dangereux (décret 315 du 10-09-2005)
- Fixent les responsabilités du producteur, en particulier dans la bonne gestion de la filière d'élimination des DAS et prévoient des sanctions pénales pour les contrevenants.

- Fixent leur nomenclature (décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006), permettant notamment une classification et une traçabilité tout le long de leur filière d'élimination, ainsi qu'une définition des critères de leur dangerosité.
- Définissent la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement (décret 198 du 31-05-2006) et la nomenclature des installations classées ;
- Oblige la formation et l'information des personnels ainsi que le respect des cinq étapes : tri, conditionnement, entreposage, transport, destruction.

B) Description de projet recommandé :

Le centre d'incinération proposé, doit être installé au niveau de la zone de décharge publique de Hammam Chigueur. L'objectif est l'incinération de tous les déchets des activités de soins générés par toutes les infrastructures hospitalières de la région de Maghnia. Ce projet est de nature à contrôler l'élimination saine et protectrice de l'environnement et particulièrement la pollution d'oued Mouillah, de ce type de déchets dangereux.

Le but de ce projet est s'attaquer à la problématique des déchets hospitaliers en améliorant leur gestion depuis leur collecte jusqu'à leur destruction complète.

Le projet doit intervenir principalement sur cinq axes :

- La formation du personnel de l'hôpital au niveau de l'organisation de la collecte et du tri des déchets ;
- La formation du personnel technique spécialisé pour l'incinération ;
- La fourniture des équipements nécessaires au tri, à la collecte, au stockage intermédiaire (chariots en matière inoxydable pour les sacs en plastique de différentes couleurs, bacs en PEHD pour les salles de soins et salles de stockage intermédiaires) ;
- Le développement d'un circuit dédié exclusivement au transport des déchets vers l'incinérateur ;
- La création d'un incinérateur de dernière génération avec traitement des fumées avancé conformément à la législation en vigueur et récupération de la chaleur pour la valorisation.

C) Présentation de l'incinérateur recommandé :

Conformément à la réglementation, les déchets d'activité de soins doivent être incinérés. Pour cela, on recommande un incinérateur de déchets hospitaliers avec traitement avancé de fumées et récupération de chaleur pour la région de Maghnia. Les bonnes pratiques d'incinération sont à respecter ; elles doivent viser à diminuer l'exposition aux polluants toxiques liés à la combustion (dioxines, furanes, PCB coplanaires...) et donc, à réduire les risques professionnels et publics. Parmi ces bonnes pratiques, il y a notamment :

- La réduction effective du volume des déchets et leur tri, pour que seuls les déchets appropriés soient incinérés ;
- L'installation de l'incinérateur à l'écart des zones peuplées (au niveau de Hammam Chigueur), pour éviter l'exposition et, par conséquent pour diminuer les risques ;
- La conception de l'incinérateur de telle sorte que les conditions soient adaptées (température et durée de combustion suffisantes), pour diminuer la formation de produits résultants d'une combustion incomplète ;
- Leur construction doit être réalisée conformément aux plans d'exécution du constructeur notamment pour éviter des rejets liquides et gazeux, conformément aux recommandations européennes relatives à la limitation des rejets ;
- La protection des travailleurs doit être assurée par des équipements de sécurité.

D) Données techniques :

L'incinérateur n'est pas seulement un four de combustion, c'est une installation industrielle complète, d'après la figure IV.5, comprenant :

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Arrivée des déchets. | 7 - Mâchefers. |
| 2 - Fosse à déchets. | 8 - Traitements des effluents gazeux. |
| 3 - Grues de chargement. | 9 - Filtres à manches. |
| 4 - Trémie d'alimentation. | 10 - Cendres volantes. |
| 5 - Grille d'incinération. | 11 - Cheminée. |
| 6 - Chaudière. | 12 - Turbines à vapeur. |

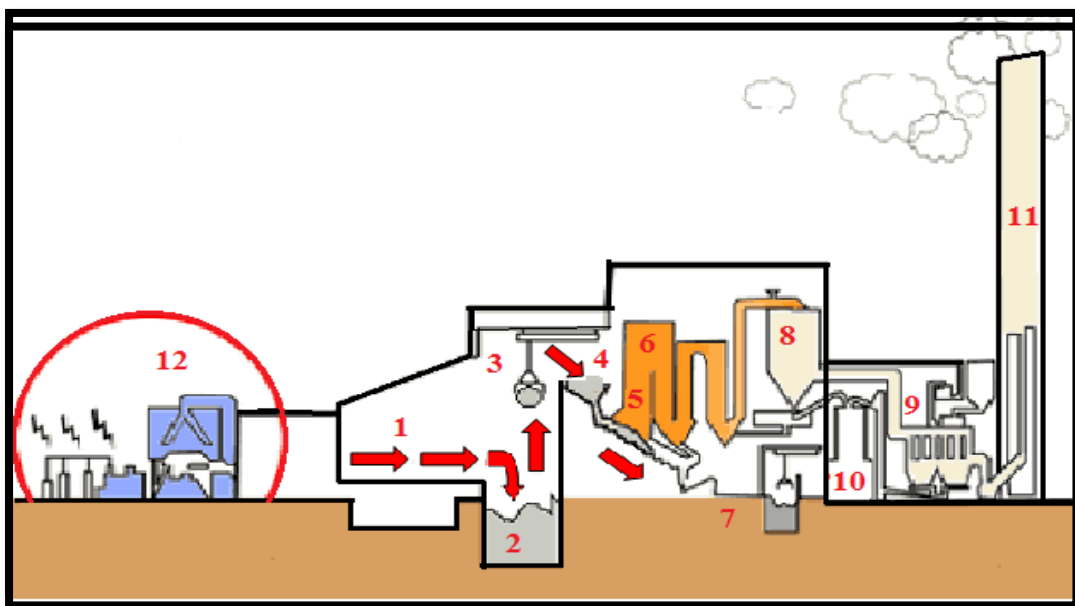


Figure 4-5: Schéma de fonctionnement d'un incinérateur des DAS

- i. Arrivée des déchets : les déchets sont transportés depuis les hôpitaux vers l'installation de l'incinération et amenées jusqu'à la fosse à déchets.
- ii. Fosse à déchets : la fosse est suffisamment grande pour alimenter l'incinérateur.
- iii. Grues de chargement : de grandes pelles mécaniques prennent en vrac les déchets de la fosse et les déversent dans le trémie d'alimentation.
- iv. Trémie d'alimentation : il alimente le four à un rythme contrôlé.
- v. Grille d'incinérateur : température d'au moins 850 °C.
- vi. Chaudière : les gaz à haute température sont utilisés pour produire de l'électricité ou distribuer de la chaleur.
- vii. Mâchefers : une partie des déchets incinérés ressort sous formes de cendres, appelées mâchefers. Ces mâchefers valorisés par des entreprises de travaux publics ou bâtiments, qui les mélangent à leurs matériaux pour en faire des routes ou même des logements.
- viii. Traitement des effluents gazeux : de la chaux, de l'ammoniaque ou du carbone activé sont pulvérisés sur les gaz qui transitent par le système de purification. Cela permet en partie de neutraliser les gaz acides et d'absorber une partie des dioxines.
- ix. Filtres à manche : Un système de purification de plus dans le circuit destiné à piéger les dioxines, les métaux lourds et autres substances polluantes. Les filtres collectés s'ajoutent aux résidus de l'incinération contenant des substances toxiques.
- x. Cendres volantes : Elles sont en principe acheminées en mélange avec les résidus de purification des fumées.
- xi. Cheminée : La hauteur de la cheminée, sur un tiers, contient des équipements destinés à mesurer les polluants qui s'en échappent. C'est à dire une demi-douzaine identifiée et connue, sur la centaine qui s'en échappe.

- xii. Turbine à vapeur : La vapeur produite fait fonctionner des turbines qui produisent de l'électricité d'abord utilisée sur le site de l'incinérateur. Le surplus est exporté vers le réseau électrique de Maghnia.

4.7. CONCLUSIONS :

Comme tout pays qui connaît un fort accroissement démographique, économique et urbain, l'Algérie rencontre les problèmes liés à l'augmentation des rejets d'eaux usées dans les milieux récepteur, et par conséquent, leurs pollution.

Dans ce chapitre et dans le but d'atténuer ce problème, nous avons traité la pollution du bassin versant de l'oued Mouillah et leur impact sur le barrage de Hammam Bougherara, en s'accroissant sur la pollution engendrée par les déversements de la ville limitrophe d'Oujda d'une part, et d'autre, les rejets industriels et domestiques de la ville de Maghnia.

En fait, Oued Mouillah situé dans la partie extrême Nord-Ouest de l'Algérie ayant une superficie de 2650 km², largement partagée avec le Maroc, est fortement touché par le problème de pollution, cause immédiate des rejets et émissions directes en provenance des eaux usées domestiques et industrielles des villes de Maghnia et Oujda.

D'une part, on a constaté que la pollution, rejetée directement dans un réseau hydrographique très important, se propage jusqu'à atteindre le corps du barrage Hammam Bougherara, destiné à l'alimentation en eau potable des villes de Maghnia, Ain temouchent, Oran et le couloir Nord-Ouest de la wilaya de Tlemcen, ainsi que l'irrigation de la plaine de Tafna.

D'autre part, vu la composition alluvionnaire du sol du bassin, les eaux souterraines risquent fort probablement la pénétration des eaux résiduaires.

A la lumière de cette étude approfondie du milieu, nous pouvons constater que le bassin versant de l'Oued Mouillah est sérieusement touché par la pollution, celle-ci à pour conséquences :

- Pollution du barrage Hammam Bougherara ;
- Pollution des nappes souterraines ;
- Apparition des maladies à transmission hydrique.

Ces études approfondies du milieu, nous ont permis de faire des propositions de solutions que nous avons vu adéquates pour résoudre le problème de pollution du bassin versant étudié. Ces solutions se résument comme suit :

□ *En matière de pollution industrielle :*

- Apporter un soutien technique aux industries pour améliorer et maîtriser la réduction des polluants à la source,

l'épuration de leurs effluents, et les amener à se doter du plan environnement,

- Créer une décharge inter- entreprise pour l'élimination des déchets industriels,
- Encourager la sous-traitance de la gestion des stations d'épuration industrielles,
- Encourager la création d'un laboratoire inter- entreprise pour l'auto surveillance et le suivi du fonctionnement des installations d'épuration.

□ *En matière de pollution urbaine :*

- Pérenniser la gestion de la station d'épuration actuelle en favorisant la sous-traitance en confiant son exploitation à un organisme externe,
- Implanter une autre station à macrophytes juste en amont du barrage Hammam Bougherara,
- Encourager la réutilisation des eaux usées épurées,
- Encourager et vulgariser les techniques d'assainissement individuel dans les zones non assainies,

□ *Gestion des déchets urbains :*

- Activer l'étude et la réalisation d'une nouvelle décharge intercommunale dans la commune de Maghnia équipée d'un incinérateur de dernière génération,
- Initier un plan de gestion des déchets à l'échelle du bassin du barrage,
- Mettre en place dans le secteur sanitaire le tri à la source de déchets d'activités de soins par la séparation des déchets à risque infectieux et améliorer le fonctionnement de l'incinérateur.

□ *La pollution transfrontalière :*

- Améliorer les textes législatifs internationaux pour la pollution transfrontalière qui provient du Maroc,

- Améliorer le traitement des eaux usées au niveau amont de l'Oued Mouillah, par la création d'une nouvelle STEP à filtres plantés.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES :

La pollution représente un problème majeur dans le monde, dû à la diversité des activités humaines et leurs rejets immédiats dans la nature. Ces rejets génèrent de graves conséquences sur les milieux écologiques et sur l'homme et sa santé. C'est pourquoi le thème pollution/prévention/dépollution des eaux et des sols est devenu très sensible ces dernières années. Il englobe pleinement aujourd'hui les préoccupations de tous les intervenants en matière économique, sociale et juridique.

Dans ce travail, on a présenté les différents types et les principaux mécanismes de la pollution. On a présenté aussi les différents polluants qui peuvent menacer la qualité de l'environnement. Plusieurs méthodes de prévention et de dépollution des eaux et sols peuvent être mises en œuvre pour minimiser l'impact de ces polluants. L'étude bibliographique détaillée, sur les méthodes de prévention et de dépollution mises au point par différents auteurs à travers le monde, que nous avons effectuée, nous a permis de constater que ces dernières sont nombreuses et diversifiées. Elles sont applicables dans différents sites aussi bien en Europe qu'en Amérique. Cependant toutes ces méthodes ne sont pas forcément applicables dans les conditions territoriales de l'Algérie.

Plusieurs politiques concernant la protection contre la pollution ont été développées en Algérie. A cet effet des textes législatifs ont été mis au point mais ils restent lacunaires tant qu'ils ne prévoient pas des outils nouveaux de protection. Le principe « pollueur-payeur » est l'un de ces nouveaux outils.

Les différentes recherches effectuées sur la pollution du barrage de Hammam Bougherara nous ont permises de constater que ce problème demeure à nos jours sans solution. Poursuivre le déversement des rejets liquides et solides, sans traitement préalable dans le réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouillah, risque à court terme d'aggraver la pollution des ressources hydriques superficielles et de compromettre la potabilité des ressources en eau souterraine. Cette situation va s'empirer, d'autant plus qu'il n'existe toujours pas de stratégie globale ni de plans d'intervention adaptés pour la prise en charges des points de rejets. L'instauration d'une politique globale qui prend en charges ces problèmes de pollution, doit impérativement adopter la conception et l'implantation de nouvelles installations de traitement à ces milieux. Dans ce mémoire, on a suggérer une solution pour contribuer à la réduction de l'impact de la pollution sur le barrage de Hammam Boughrara. Il a été suggéré l'implantation de deux stations d'épuration à filtres plantés. La première en amont de l'Oued Mouilleh et la deuxième en son aval. Comme, il été recommandé d'implanter une installation d'incinération des déchets issus des activités de soins au niveau de la zone de décharge public de Hammam Chigueur.

Enfin, nous souhaitons que ce modeste travail puisse servir comme un guide pour différentes études préliminaires concernant les moyens de prévention et de dépollution des eaux et des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- A.D.E.M.E., 1999 : les techniques de gestion des déchets ménagers. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- A.D.E.M.E., 2010 : Feuille de route stratégique collecte, tri, recyclage et valorisation des déchets. Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie.
- A.F.D., 2011: réutilisation des eaux usées traitées perspectives opérationnelles et recommandation pour l'action. Agence Française de Développement, Rapport final Février 2011.
- Albinet M. et Margat J., 1975 : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Groundwater Pollution. Symposium, Pollution des Eaux Souterraines. Actes du Colloque de Moscou, Août 1971. IAHS-AISH Publication N°.103, 1975.
- http://itia.ntua.gr/hsj/redbooks/103/iahs_103_0058.pdf. Consulté le 13.09.2012
- Alexander M., 2000 : Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants. Article : Environmental Science & Technology, 2000, 34 (20) p. 4259-4265. Publication date 08 septembre 2000.
- Amharref M. et Bernoussi A., 2007 : Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007. Faculté des Sciences et Techniques, B.P. 416 - Tanger Maroc.
- Arthur E. et al., 2005 : Critical Reviews in plant Science. Phytoremediation, An overview. Article publier date 01 mars 2005. p 109-122.
- Aust S. D., 1995 : Mechanisms of degradation by white rot fungi. Article : Environmental Health Perspectives, vol 103(suppl 5).
- Aviron V., 2000 : Réutilisation des eaux usées après traitement, lors du 1st World Water Congress of the International Water Association (IWA).
- Azzaoui A., Melis M., 2007: étude d'analyse physico-chimique et bactériologique des eaux de barrage BAKHADDA, TIARET. Mémoire D.E.U.A. Tlemcen.
- B.R.E.F., 2006 : Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles. document intitulé, Incinération des déchets. Publié par la commission européenne Août 2006.

- B.R.G.M., 1996 : Conception d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'un centre de stockage de déchets, ultimes ou non. Guide méthodologique. Rapport final 1996.
- Barcza N. A. et al., 1993 : The treatment of metallurgical wastes using the enviroplas process. Processing for the treatment and minimization of wastes, Edition : Metals & Materials Society.
- Barthelemy B., 2003 : Combustion – Vitriification de déchets radioactifs par plasma d'arc, Modélisation de la thermique et de la dynamique. Thèse du doctorat. Univ. LIMOGES. le 12 juin 2003.
- Baumont., S : Réutilisation des eaux usées épurées, risques sanitaires et faisabilité en Île de France. Étude réalisée à Observatoire régional de santé d'Ile de France. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile de France.
- Beauchamp J., 2006 : pollution et dépollution des nappes d'eau souterraines. Ressource pédagogique. Univ de Picardie jules verne, Amiens, France.
- <http://www.infotheque.info/cache/8951/www.upicardie.fr/~beaucham/cours.qge/pol-sout/pol-sout.htm> consulte le 13/09/2012.
- Benadda L. et al., 2001: Protection du barrage de Hammam boughrara contre la pollution, Séminaire National sur l'eau, UAB Tlemcen, Nov 2001.
- Benallal., H : Epuration des eaux usées au Maroc, Situation actuelle et capitalisation.
- Bicocchi S. et Antonini G., 1998 : les polluants et les techniques d'épuration des fumées. Cas des unités de destruction thermique des déchets. Edition Lavoisier, paris.
- Bindu T. et al., 2008 : Ramasamy pollutant removal from domestic wastewater with taro (*Colocasia esculenta*) planted in a subsurface flow system. Ecological Engineering. Elsevier, 33, 68-92, 2008
- Blaauboer B. M., 1996 : Biotransformation, detoxication and bioactivation. In Toxicology, Principles and Applications, M. A. Hollinger, Edition : Boca Raton, Florida: CRC Press p. 41-61.
- Bliefert C. et Perraud R., 2004: chimie de l'environnement air, eau, sol, déchets. Edition : de boeck.
- Borderes A., 2000 : vitrification des REFIOM et valorisation du vitrifiat. Revue VERRE. vol 6, n° 4. Septembre 2000. Institut de Verre.

- Bouanani A. 2006 : Transport Solide Et Modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse Doctorat d'état. Tlemcen 2006.
- Bouchelkia H., Belarbi F. et Remini B., 2011 : Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique, cas du bassin versant de Mouillah. Journal de l'eau et de l'environnement N° 19 p.29-41. Décembre 2011.
- Bourrelrier et Berthelin., 1998 : Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des sciences n° 42. Edition tec & Doc, Lavoisier. Paris.
- Broda P. et al., 1994 : Phanerochaete chrysosporium and its natural substrate. Article : FEMS Microbiology Reviews, vol 13, p. 189-196.
- Brouillet J. L., et al, 2008 : Ecotechniques d'assainissement des eaux domestiques, évolution et perspective. Montpellier, XIIIe Congrès Mondial de l'Eau. 1er au 4 Sept 2008.
- Bruce K. R., 1998 : Evaluation of plasma based thermal treatment system for destruction of difficult to remediate waste. Conférence internationale sur l'incinération et de technologies de traitement thermique, Salt Lake City, USA. P 559-565.
- Castany G., 1980 : Principe et méthode de l'hydrogéologie. Édition Dunod.
- Cerqueira N. et al., 2002 : Heavy metals volatility during thermal plasma vitrification of mineral waste. Conférence internationale sur l'incinération et de technologies de traitement thermique, New Orleans, USA.
- C.G.L., 2008 : Etude sur les techniques existantes de traitement des déchets. Conseil Général des Landes, Assistance technique à la commission de suivi du Plan Départemental d'Elimination des Déchets Ménagers et Assimilés des Landes. 16 décembre 2008.
- Chabni L., 2005: Etude de la propagation des polluants dans les eaux souterraines. Mémoires d'ingénieur d'état en hydraulique. ENSH-BLIDA.
- Chaib A., 2004 : Bioépuration par lagunage naturel. Bulletin N°5 des Energies Renouvelables. Attachée de Recherche, CDER BOUZAREAH.
- Chevrier B. et al., 2008 : Stokinov, innovations dans le domaine du stockage des déchets. Rapport final, BRGM, avril 2008.
- Christian N., 2004 : Déchets et pollution impact sur l'environnement et la santé. Edition Dunod, paris.

- Christophe S., 2009 : réhabilitation des sols pollués. Nancy Université, INPL, ENSAIA, Laboratoire Sols et Environnement, UMR1120 INRA, Vandœuvre-lès-Nancy. Académie d'Agriculture de France. Séance du 18 mars.
- Circeo L. J. et al., 1994 : PRISM, Plasma Remediation of In Situ Materials and its potential for the remediation of Chernobyl consequences. 33th Hanford Symposium on Health and The Environmental Symposium on in-situ remediation, Richland, USA. p. 1124-1128.
- Claude C., 2008 : Panorama des principales techniques de dépollution des sols et des eaux souterraines. Journée d'information DRIRE / EPF Lorraine 23 septembre 2008.
- Colombano S. et al., 2010 : Quelles techniques pour quels traitements. Service environnement et procédés centre scientifique et technique. Rapport final B.R.G.M. JUIN 2010.
- Comité Français Géosynthétiques (CFG)., 2003 : Détection de fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques. Document, Version 6. Juin 2006
- Commission Européenne., 2001 : procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités (500-5000 Eh), Luxembourg, office des publications officielles des Communautés européennes, office international de l'Eau ISBN 92-894-1690-4.
- Corgie S. C. et al., 2004 : Spatial distribution of bacterial communities and phenanthrene degradation in the rhizosphere of *Lolium perenne* L. journal Applied and Environmental Microbiology. Vol 70.
- Daloz A., 2007 : L'épuration des eaux usées par les filtres plantés de macrophytes. Mémoire, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon.
- Décret n° 07-399., 2007 : Journal Officiel de la République Algérienne du 14 Dhou El Hidja 1428 correspondant au 23 décembre 2007 relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau.
- Décret n° 84-378., 1984 : Journal Officiel de la République Algérienne du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et du traitement des déchets solides urbains.
- Décret n° 87-182., 1987 : Journal Officiel de la République Algérienne du 18 août 1987 relatif aux huiles à base de poly-chloro-biphenile (P.C.B.), aux équipements électriques qui en contiennent et aux matériaux contaminés par ce produit.

Décret n°93-160., 1993 : Journal Officiel de la République Algérienne du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels.

Décret n° 10-73., 2010 : Journal Officiel de la République Algérienne du 06 février 2010 relatif à la protection quantitative des nappes aquifères.

DGRNE : Installations d'Incinération et de co-incinération des déchets. Guide Méthodologique pour l'Evaluation des Incidences sur l'Environnement. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement du Ministère de la Région wallonne.

Dietmann D. et al., 2007 : Expertise nationale concernant les alternatives à l'incinération et aux décharges : aspects environnementaux, sanitaires et socio-économiques. Rapport élaboré par le Groupe des experts scientifiques sur les dangers de l'incinération (GESDI).

Dimitri X., 2007 : Epurer et valoriser vos eaux usées par les plantes grâce à l'épuvalisation. Article publié en juin 2007. ASBL EPUVALEAU, Avenue de la faculté d'agronomie 2. 5030 Gembloux. <http://www.epuvaleau.eu>.

Dron D., 1997 : déchets municipaux. Coopérer pour prévenir. Rapport au ministre de l'Environnement, Documentation Française, Paris.

E.N.H.P.O., 2003 : Etude de dépollution du barrage Hammam Boughrara, Wilaya de Tlemcen. Réalisé par entreprise national des projets de l'Ouest E.N.H.P.O Janvier 2003.

El Bennoury A., 2002: protection des captages d'eau souterraine destinés à l'alimentation humaine. Revue H.T.E N° 122-Mars 2002.

Emilian K., 2004 : traitement des pollutions industrielles. Edition Dunod, paris.

Environmental Research Newsletter., 1993 : commission of the European Communities, N°11, SP-I.93.27.

Evariste, 2007 : Inertage et stockage des déchets ultimes. Fiche Technologie. clé n : 26 VERSION 3, disponible sur :

<http://admi.net/evariste/100tc/1996/f026.html>.

F.A.O., 1996: Systèmes d'Assainissement ; Food and Agriculture Organization. Biogas ; Technology: A Training Manual for Extension. Consolidated Management Services, Kathmandu. Disponible sur <http://www.fao.org/>.

- François R., 2000 : dictionnaire encyclopédique des pollutions. Ediscience international, Paris.
- G.M.T.E., 2005 : Epuration des eaux usées domestiques par filtre plantés de macrophytes. Groupe Macrophytes et Traitement des Eaux. Recommandation techniques pour la conception et la réalisation. Vol 32 N°3.
- Ghenim A., 2001 : contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna cas de Oued Isser, Oued Mouillah et la haute Tafna. Thèse de Magister. Tlemcen.
- Ghislain M., 2006: Les eaux continentales. Rapport sur la science et la technologie N° 25 Animateur : Ghislain de Marsily. Académie des sciences. France.
- Grison C., 1999 : Epuration des eaux usées par des filtres plantés de macrophyte, Une étude bibliographique ; Edition : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse Lyon. France.
- Guihard B., 2002 : Industrial and environmental applications of non transferred plasma. International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, New Orleans, USA.
- Habib R. et El Rhazi O., 2007 : Impact sanitaire de la réutilisation des eaux usées. Mémoire de Licence. Univ. Cadi Ayyad Marrakech.
- Hamza Cherif C., 2011 : Epuration des eaux usées par les pacrophytes. Mémoire de Magister en Hydraulique. Univ. Tlemcen.
- Hans B., 1987 : treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants- the Root-Zone Method, publication : water science & technology. Vol 19. P. 107-118.
- Herlemont B., 2003 : une climatologie exceptionnelle, Esquisse de bilan phytosanitaire. EUROVITI, Publication : Montpellier 26 et 27 Nov. 2003.
- Isère C. G., 2005 : Etude sur la gestion des déchets. Les techniques de traitement des déchets résiduels. Conseil Général de l'Isère. 27 avril 2005.
- Jeffers P. M. et al., 1998 : Green plants: A terrestrial sink for atmospheric CH₃Br. Article : Geophysical Research Letters. Vol 25. P, 43-46. 1er janvier 1998
- JO L 311., du 21.11.2008 : directive 2000/76/CE du parlement européen et du conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets. Journal Officiel L 311 du 21.11.2008.

- JO L 334., du 17.12.2010 : directive 2010/75/UE du parlement européen et du conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution). Journal Officiel L 334 du 17.12.2010.
- Just C. et Schnoor J., 2004 : Phytophotolysis of Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in leaves of Reed Canary Grass. Publication : Environmental Science & Technology. Vol 38. P 290-295.
- Karavangeli M. et al., 2005 : Development of transgenic tobacco plants overexpressing maize glutathione S-transferase I for chloroacetanilide herbicides phytoremediation. Article : Biomolecular Engineering. Vol 22. P 121-128.
- Kawahigashi H., 2006 : Phytoremediation of the herbicides atrazine and metolachlor by transgenic rice plants expressing human. Journal of Agricultural and Food Chemistry ; Vol 54, n° 8 (April 19, 2006): 2985-2991.
- Kinzelbach et al., 1991 : Sanierungsverfahren für Grundwasserschäden und Altlastenanwendbarkeit und Beurteilung. DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Association Allemande pour les Ressources en Eau et l'Amélioration des Sols), Schriften Nr. 98, Wirtschafts-und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn.
- Kinzelbach W. 1993 : use of models in the design and monitoring of in situ remediation measures. Techn. For Env. clean up : soil and groundwater. Vol. 1. Kluwer Ac. Publisher.
- Komives T. et Gullner G., 2000 : Phytoremediation. In: Plant-environment interactions. Edition : Wilkinson RE. Marcel Dekker, New York, pp. 437-52.
- Komives T. et Gullner G., 2005 : Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. Plant Protection Institute of the Hungarian Academy of Sciences. Zeitschrift fur Naturforschung. 60c. P 179-185.
- Komořa D. et al., 1995 : Metabolic processes for organic chemicals in plants. In: Plant contamination. Edition : Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, P 69-103.
- Ladjali M. A., 2005 : Etude méthodologique du lagunage : Etude de cas dans la wilaya de Ain Temouchent ; Mémoire de l'ingénieur. Tlemcen.
- Lallemand B A. et Roux J C., 1995 : Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Édition BRGM.

- Lallemand B A., 1992 : méthodes d'analyses des gaz dans les sols pour le diagnostic des pollutions du sol et des nappes. Rapport BRGM.
- Lallemand B A., 1995 : Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Édition BRGM.
- LEau., 1991 : loi fédérale Suisse pour la protection des eaux (LEau) du 24 janvier 1991 (Etat le 26 septembre 2006).
- L.R.Q., 2002 : loi sur la qualité de l'environnement du 11 juin 2002, législation du Québec.
- Leboukh A., 2003 : Etude de la méthodologie de l'irrigation à partir des eaux épurées, pratique et réglementation. Mémoire de l'ingénieur. Tlemcen.
- Lecomte P., 1998 : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2e édition Lavoisier.
- Loi n° 83-03., 1983 : Journal Officiel de la République Algérienne du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement.
- Loi n°01-19., 2001 : Journal Officiel de la République Algérienne du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n°05-12., 2005 : Journal Officiel de la République Algérienne du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.
- Loi n°83-17., 1983 : Journal Officiel de la République Algérienne du 16 juillet 1983 portant code des eaux.
- Lombi E. et al., 2001 : Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *Journal of Environmental Quality* 30.
- M.E.F., 1998 : un portrait de la situation des matières résiduelles au Québec, 1996-1997. document préliminaire interne au MEF, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec.
- Mancini F., 2006 : traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération d'énergie. Thèse de Doctorat. Univ. Bordeaux I.
- McCutcheon S. et Schnoor J., 2003 : Transformation and Control of Contaminants. *Environmental Science & Technology: A Wiley Interscience Series of Texts and Monographs*. Edition; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2003

- Meagher R., et Heaton A., 2005 : Strategies for the engineered phytoremediation of toxic element pollution, mercury and arsenic. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 32 ; p11-12.
- Megnounif A. et Kara DJ., 2010 : L'approche systémique et l'analyse des risques. Cas des systèmes hydrauliques de la wilaya de Tlemcen, 1er Séminaire International Euro-méditerranéen, Aménagement du Territoire, Gestion des Risques et Sécurité Civile. Batna, Algérie 20-22 Avril 2010.
- Mémento., 1994 : Mémento du Gestionnaire de l'Alimentation en Eau et de l'Assainissement, Tome 2. Edition : Lavoisier 1994.
- Metiche M., 2004 : Environnement. phénomènes de pollution et techniques de protection. Publication : Centre Universitaire de Béchar. Octobre 2004.
- Meunier J. al., 1996 : DROSCAR, pilot plant recovery of aluminium dross. 13th Congress on Electricity Applications. P 11-19.
- Mokrab R. et Cheriette B., 2003 : Etude de la maîtrise de la pollution industrielle à travers le bassin versant de l'Oued Mouillah. Audits aux unités industrielles de la ville de Maghnia. Mémoire de l'ingénieur. Tlemcen.
- Müller S. et Kozel R., 2004 : Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Section Protection des eaux souterraines.
- Mulligan et al., 2001 : Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. Edition : Elsevier. *Engineering Geology*. Vol 60. 2001. P 371-380.
- Negri M. et al., 2003 : Root development and rooting at depths. McCutcheon and J.L. Schnoor, édition *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*: Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. p233-262.
- Newman L. A. et Reynolds C. M., 2005 : Bacteria and phytoremediation: new uses for endophytic bacteria in plants. *Trends in Biotechnology*. Article : *Appl Environ Microbiol*. Vol 71(12): p 8500-8505.
- Nièvre., 2002 : Plan Départemental d'Elimination des Déchets Ménagers et Assimilés de la Nièvre. Rapport Environnemental octobre 2009.
- Nyer E. K., 1992 : *Groundwater treatment technology*. 2nd Edition. Van Nostrand Reinhold New York.

- OEau., 1998 : ordonnance sur la protection des eaux (OEau) du 28 octobre 1998 (Eau le 1er juillet 2008).
- Oliveira R. S. et al., 2001 : The mycorrhizal status of *Phragmites australis* in several polluted soils and sediments of an industrialised region of Northern Portugal. Article : vol 10, p 241–247.
- Oudjaoudi G. et Dulac G., 2005 : conseil de développement de l'agglomération grenobloise. Livre blanc pour une gestion citoyenne des déchets. <http://c2d.lametro.fr/content/download/22015/308551/file/livreBlanc>. consulté le 22.08.2012.
- Perera P. et Baudot B., 1991 : Guide de Procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités (500-5000 eq-hab). Mise en œuvre de la directive du Conseil n° 91/271 du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires.
- Peuke A. D. et Rennenberg H., 2005 : Phytoremediation with transgenic trees. Article publié date 2005, Zeitschrift fur Naturforschung 60c. p. 199-207.
- Pierre L C., 2004 : introduction aux traitements de l'air. Professeur. Responsable du département Systèmes énergétiques et Environnement. École des mines de Nantes. Article publié : 04 avril 2004.
- Pilon-Smits., 2005 : Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology. Article publié date juin 2005. Vol 56. P 15-39.
- Poulet J. B. et al., 2004 : stations d'épuration a lits filtrants plantes de macrophytes. Courrier du Savoir, Strasbourg et Université Mohamed Khider. Biskra, N°05.
- Rao A. S., 1990 :. Botanical Review. Edition : Root flavonoids Vol 56. P1-84.
- Recyc-Québec., 2000 : bilan 2000 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Recyc-Québec.
- Rémy P., 1981: le ménagement de la nature des politiques contre la pollution. Edition : Dunod, paris.
- Renard S., 2002 : La biorémediation, techniques de réhabilitation des sites pollués par l'action des microorganismes. Mémoire Maîtrise B.G., Fac. Sci. Amiens, 30 p.
- Roland V., 2003 : Eau, environnement et sante publique. Editions tec & doc Lavoisier.

- Rouissat T., 2001 : Analyse décisionnelle appliqué a la sécurité des grands Barrages cas de la Submersion. Thèse de Magister. Tlemcen.
- Russelle M. P., 2001 : Alfalfa rapidly remediates excess inorganic nitrogen at a fertilizer spill site. publication, Journal of Environmental Quality. Vol 30. P 30-36.
- S.Q.A.E., 1993 : Etude de techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées de petites agglomérations. Société québécoise d'assainissement des eaux, systèmes de traitement des eaux usées par marais artificiels.
- Sandermann H., 1992 : Plant metabolism of xenobiotics. Article date février 1992. Vol 17. P 82-84.
- Sandermann H, 1994 : Higher plant metabolism of xenobiotics; the "green liver" concept. Pharmacogenetics. Vol 4 p 225-241
- Schoenmuth B. et Pestemer W., 2004 : Dendroremediation of trinitrotoluene (TNT) Part 1: Literature overview and research concept. Article : Environmental Science and Pollution Research. Vol 11. P 273- 278.
- Seidl M. et Mouchel J., 2003 : Valorisation des eaux usées par lagunage dans les pays en voie de développement. Rapport final de Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement, centre conjoint de l'ENGREF, de l'ENPC et de l'UPVM mars 2003.
- Selka G. et Debbal Z., 2007 : Evaluation des effets environnementaux du oued Mouilah sur la Pérennité du Barrage Hammam Boughrara. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux.
- Sidhoum S. M., 2000 : Etude de l'impact des rejets domestiques et industriel sur la zone Maghnia-Hammam Bougherara et les remèdes nécessaires pour réduire la pollution. Mémoire de l'ingénieur. Tlemcen.
- Soltani W. et al., 2000 : contribution à l'étude de la pollution des eaux superficielles à l'amont du barrage de Hammam Bougherara. Mémoire de l'ingénieur. Tlemcen.
- Souikni N. et Seghioer N., 2006 : Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans le grand Tlemcen, Tlemcen-Mansourah-Chetouane. Mémoire D.E.U.A, Tlemcen.
- Springer M. D. et al., 1995 : A thermal destruction and recovery process for medical waste powered by a thermal plasma arc torch. International Symposium on Environmental Technologies, Atlanta, USA. P 671-682.

- Sun W. et al., 2004 : Phytoremediation of petroleum hydrocarbons in tropical coastal soils - I. Selection of promising woody plants. Article : Environmental Science and Pollution Research. Vol 11. P 260-266.
- Suresh B. et Ravishankar G., 2004 : Phytoremediation - A novel and promising approach for environmental clean-up. Article : Critical Reviews in Biotechnology. Vol 24. P 97-124.
- Susarla S., 2002 : Medina VF and McCutcheon SC Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. Article : Ecological Engineering. Vol 18. P 647-658.
- Tarmoul F., 2007 : Détermination de la pollution résiduelle d'une station d'épuration par lagunage naturel, cas de la lagune de BENI-MESSOUS. D.E.U.A, Institut des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral. Tlemcen.
- Timbrell J. A., 1982 : Principles of biochemical toxicology. Edition Taylor and Francis.
- U.S.E.P.A., 1991 : Stabilization Technologies for RCA Corrective Actions, Cincinnati. United States Environmental Protection Agency, Handbook. Rapport EPA/625/6-91/026.
- UNESCO., 2008 : Traitement des eaux usées par lagunage. Fiche technique : Bureau de l'UNESCO à Rabat Bureau multi pays pour le Maghreb.
- Veolia eau, 2006, Fiche technique « protéger et gérer la ressource en eau » <http://www.veoliaeau.com/ressources/files/1/117,Proteger-gerer-ressource-en-ea.pdf>. Consulté le 24.04.2012
- Vila M., 2006 : Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT : Approches en laboratoire. Thèse de doctorat, TOULOUSE.
- Vogel T. M., 1993 : les traitements biologiques de sols. Communication au Colloque Pollutec Maladie en sous-sols. Octobre 1993.
- Wang L. et al., 2005 : Biodegradation of atrazine in transgenic plants expressing a modified bacterial atrazine chlorohydrolase. Article : Plant Biotechnology Journal. Vol 3. P 475-486.
- Wolfgang C., 1961 : Quelques aspects de la protection des eaux contre la pollution. Choix de communications présentées à la conférence sur les problèmes de la pollution des eaux en Europe, Genève.

Yu X. Z. et Gu J. D., 2006 : Uptake, metabolism, and toxicity of methyl tert-butyl ether (MTBE) in weeping willows. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 137(3). P 1417-1423.

Zmirou D. et al., 2003 : déchets et sols pollués, Environnement et santé publique-fondements et pratiques. Edition : Tec & Doc, Acton Vale, Paris.

Sites web:

[1] : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degredation.htm>. Consulté le 25/01/2012.

[2] : <http://www.agrojob.com/pollution/>. Consulté le 13/03/2012.

[3] : <http://www.mtaterre.fr/dossier-du-mois/archives/746/La%20qualite%20de%20l'air%20que%20nous%20respirons>. Consulté le 13/03/2012.

[4] : http://moletta-methanisation.fr/documents/CHAP_4%20LA%20POLLUTION%20DE%20L%20EAU.pdf. Consulté le 25/01/2012.

[5] : <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/exos/prem/eval-1L/eau.pdf>. consulté le 25/01/2012.

[6] : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/index-fra.php>. Consulté le 20/02/2012.

[7] : http://cerea.enpc.fr/fich/doc_ENPC_transport.pdf. Consulté le 25/01/2012.

[8] : [http://www.alcor-controles.fr/audit-pollution-sols.html](http://www.alcor-contrroles.fr/audit-pollution-sols.html). Consulté le 13/03/2012.

[9] : http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_6_01.html#a_6_01_a Consulté le 13/03/2012.

[10] : http://www.dictionnaire-environnement.com/pollution_ponctuelle_ID1031.html. Consulté le 26/032012.

[11] : <http://www.glossaire.eaufrance.fr/concept/pollution> Consulté le 26/032012.

[12] : http://www.mddep.gouv.qc.ca/jeunesse/bassin_versant/pollution.htm Consulté le 19/04/2012.

[13] : http://platform.twitter.com/widgets/tweet_button.1331069346.html Consulté le 13/03/2012.

- [14] : http://www.atmosphere.mpg.de/enid/271840bef4850cd8613faa2fc7473ddc,0/Bases/1_Pollution_de_l_air_2ub.html Consulté le 13/03/2012.
- [15] : <http://www.vedura.fr/environnement/biodiversite/pollution-des-sols> Consulté le 13/03/2012.
- [16] : <http://www.une-eau-pure.com/principales-causes-de-l'eau-polluee-et-de-la-pollution-des-sols.html> Consulté le 13/03/2012.
- [17] : <http://www.sertius.be/fr/index.asp?key=ds8&lang=fr> Consulté le 23/13/2012.
- [18] : http://www.dictionnaire-environnement.com/pollution_historique_ID708.html Consulté le 23/03/2012.
- [19] : <http://www.cycleau.com/index.asp?docid=1002898> Consulté le 23/13/2012.
- [20] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_de_l%27eau Consulté le 23/03/2012.
- [21] : http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/developpement-durable-2/d/pollution-chronique_6887/ Consulté le 23/03/2012.
- [22] : <http://www.admin.ch/ch/f/rs/i8/0.814.288.1.fr.pdf> Consulté le 24/04/2012.
- [23] : http://www.eaufrance.fr/docs/industrie/rejets_industriels/2004/Annexes/annexe_eau.htm Consulté le 13/03/2012.
- [24] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/vitrification-c5582niv10035.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [25] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/slurping-c5582niv10026.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [26] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/pyrolyse-c5582niv10023.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [27] : http://www.km-dev.com/eaufrance/francais/etudes/pdf/etude_23.pdf. Consulté le 01/05/2012.

- [28] : http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/matiere_en_suspension_mes.php4. Consulté le 01/05/2012.
- [29] : <http://www.laease.com/>. Consulté le 01/05/2012.
- [30] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/incineration-c5582niv10015.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [31] : <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnprd/tabs/tab24-f.html> . Consulté le 06/06/2012.
- [32] : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=22790> . Consulté le 16/06/2012.
- [33] : <http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/brochure/fr.pdf> . Consulté le 24/04/2012
- [34] : <http://www.ec.gc.ca/eau-water/> Consulté le 14/03/2012.
- [35] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/desorption-thermique-ex-situ-c5582niv10010.html#figure-sl4326410-web>. Consulté le 11/08/2012.
- [36] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/bioventing-c5582niv10008.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [37] : <http://www.eauxdesources.org/telechargement/articles/protection-captages.pdf>. Consulté le 02/03/2012.
- [38] : <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/pol-sout/pol-sout.htm> Consulté le 03/06/2012.
- [39] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/compostage-de-sols-c5582niv10009.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [40] : <http://eau.seine-et-marne.fr/library/ad806e04-c103-4bbf-be38-03be18c19141-Fiche-Technique---Lagunage.pdf> . Consulté le 21/06/2012.

- [41] : <http://www.magnard.fr/compagnons/svt/Pollution-du-sol-et-de-l-eau> Consulté le 25/06/2012.
- [42] : <http://www.arehn.asso.fr/publications/cpa/cpa26.pdf>. Consulté le 21/06/2012
- [43] : http://isma.pagesperso-orange.fr/fr_lagunage-aere-documentation.html Consulté le 22/06/2012.
- [44] : <http://hmf.enseiht.fr> Consulté le 22/06/2012
- [45] : <http://www.globenet.org/preceup/pages/fr/chapitre/document/guy.htm> Consulté le 21/06/2012.
- [46] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/biotertre-c5582niv10007.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [47] : <http://retraitementeaux.free-h.net/biologique.php>; Consulté le 22/06/2012.
- [48] : <http://www.cg24.fr/modules.php?name=Sections&op=printpage&artid=281>. Consulté le 22/06/2012.
- [49] : [http://www.lagunage.eu/index.php?title=Bassins de maturation](http://www.lagunage.eu/index.php?title=Bassins_de_maturation) ; Consulté Le 22/06/2012.
- [50] : <http://www.oodoc.com/30316-amelioration-traitement-lagunage-aere-eration.php>. Consulté le 22/06/2012.
- [51]: http://www.akvo.org/wiki/index.php/Lagunage_a%C3%A9r%C3%A9s. Consulté le 22/06/2012.
- [52]: <http://traitementdeseaux.fr/techniques-traitement/lagunage/> . Consulté le 23/06/2012.
- [53]: <http://www.conservation-nature.fr/> . Consulté le 23/06/2012.
- [54]: <http://Www.carteleau.org/guide/d026.htm>. Consulté le 22/06/2012.
- [55]: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/barrieres-reactives-c5582niv10003.html>. Consulté le 11/08/2012.

- [56] : Méthodes de désinfection de l'eau « Maribia's Blog.htm consulté le 09/05/2012.
- [57] : [Traitement_des_eaux_usées.htm](#) consulté le 09/05/2012.
- [58] : http://www.depolluer.fr/fichier/4_pollution_depollution_des_sols_decontamination_des_sols_informations.php?id_rubrique=2 . Consulté le 23/06/2012.
- [59] : <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=85AB89EC705B13319475B422D71FAC831296206756007.pdf> . Consulté le 18/07/2012.
- [60] : http://www.fabi.be/actu1/JI132_LR.pdf . Consulté le 18/07/2012.
- [61] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/air-sparging-c5582niv10001.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [62] : http://rocles03.free.fr/sictom/page_energie.htm. Consulté le 06/01/2012.
- [63] : http://www.artac.info/fic_bdd/pdf_fr_fichier/091123_rapportincineration_12961388050.pdf. Consulté le 18/07/2012.
- [64] : http://www-cadarache.cea.fr/fr/activites/pdf/Dossier_Innovation_Atout_n1.pdf. Consulté le 18/07/2012.
- [65] : http://www.basse-normandie.cci.fr/iso_album/f3-sols-techniques-de-depollution.pdf . Consulté le 18/07/2012.
- [66] : <http://www.djazairess.com/fr/infosoir/1792>. Consulté le 11/08/2012.
- [67] : <http://www.envireausol.fr/pages/864789839-excavation-des-sols>; Consulté le 11/08/2012.
- [68] : <http://www.djazairess.com/fr/elwatan/73395>. Consulté le 11/08/2012
- [69] : <http://www.ec.gc.ca/p2/Default.asp?lang=Fr&n=88D8B369-1>. Consulté le 11/08/2012.
- [70] : <http://www.smedar.fr/editorial-les-actions-du-programme-56.html> . Consulté le 11/08/2012.
- [71] : <http://environnement.wallonie.be/enviroentreprises/pages/etatenviindustrie.asp?doc=syn-deg-tec>. Consulté le 11/08/2012.

- [72] : http://etat.environnement.wallonie.be/uploads/rapports/parties/chapitres/fiches/D_EC_02.pdf. Consulté le 11/08/2012.
- [73] : <http://www.l3m.univ-mrs.fr/site/EquipeMoulin/pubD.pdf>. Consulté le 11/08/2012.
- [74] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_des_d%C3%A9chets#Le_d.C3.A9chet.2C_une_ressource_.C3.A0_valoriser. Consulté le 11/08/2012.
- [75] : http://www.stefanomontanari.net/sito/images/pdf/gestion_dechets.pdf. Consulté le 11/08/2012.
- [76] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Tri_s%C3%A9lectif. Consulté le 11/08/2012.
- [77] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_des_d%C3%A9chets#Le_d.C3.A9chet.2C_une_ressource_.C3.A0_valoriser. Consulté le 22/08/2012.
- [78] : <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Recyclage-Valorisation.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [79] : <http://www.smedar.fr/editorial-pourquoi-composter-106.html>. Consulté le 11/08/2012.
- [80] : <http://www.incinerateur-bergeracois-danger.ouvaton.org/spip.php?article99>,
http://www.cniid.org/camp_incin.htm . Consulté le 11/08/2012.
- [81] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-des-dechets-42437210/traitements-thermiques-des-dechets-g2051/procedes-de-gazeification-g2051niv10007.html> . Consulté le 11/08/2012.
- [82] : <http://www.cefrepede.org/nos-thematiques/valorisation-des-dechets-en-combustibles.html> . Consulté le 11/08/2012.
- [83] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-des-dechets-42437210/traitements-thermiques-des-dechets-g2051/procedes-d-incineration-g2051niv10002.html> . Consulté le 11/08/2012.
- [84] : <http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-41513.html>. Consulté le 22/08/2012.
- [85] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_des_d%C3%A9chets#Le_d.C3.A9chet.2C_une_ressource_.C3.A0_valoriser . Consulté le 21/08/2012.
- [86] : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/gestion-des-dechets-42437210/traitements-thermiques-des-dechets->

- [g2051/proc%C3%A9d%C3%A9s-d-oxydation-haute-temperature-par-plasma-g2051niv10004.html](http://www.ademe.fr/proc%C3%A9d%C3%A9s-d-oxydation-haute-temperature-par-plasma-g2051niv10004.html). Consulté le 21/08/2012.
- [87] : <http://www.incinerateur-bergeracois-danger.ouvaton.org/spip.php?article90>,
Consulté le 21/08/2012.
- [88] : http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=2DB1EAE59AC4A6C3300FF9A5CB259EDE_tomcatlocal1328801533595.pdf. Consulté le 22/08/2012.
- [89] : <http://www.primeverre.com/principe.htm>. Consulté le 22/08/2012.
- [90] : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15681>. Consulté le 11/08/2012.
- [91] : <http://www.oecd.org/fr/environnement/examensenvironnementauxparpays/38522660.pdf>. Consulté le 11/09/2012.
- [92] : <http://www.ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=Fr&n=9FE6A74E-1>. Consulté le 11/09/2012.
- [93] : <http://www.cobaric.qc.ca/legislation.htm>. Consulté le 11/09/2012.

ANNEXE A

Tableau II.1 : Comparaison des techniques de dépollution par circulation d'air (Kinzelbach et al., 1991).

Caractéristique \ Procédé	Venting (ventilation sol)	Stripping in situ (sparging)	UVB	Hydrochoc	Géo-choc
Dépollution rapide	++	+	+	0	0
Rayon d'action élevé	++	+	0	+	+
Technique bien développée	+++	++	++	0	0
Extension importante du marché	++	+	+	0	0
Bonne possibilité de contrôler la migration du polluant	++	0	0	+	+
Faible besoin en énergie	+++	+	++	+	+
Faible coût de contrôle	+++	++	++	+	++
Faible influence de géochimie et sous-sol	+++	+	+	+++	++
Possibilité de mise en œuvre à long terme	+++	++	++	+	+
Zone d'application :					
-zone non saturée	+++	0	0	0	++
-zone saturée	0	++	++	++	+

0 = peu vrai

+ = exact

+++ = très pertinent.

Tableau II.2 : aperçu des coûts pour un foyer de pollution standard : pollution, 100 kg tétrachloroéthylène ; épaisseur de la zone à dépolluer : 5 m ; rayon de foyer de pollution : 10 m ; sable grossier ; état 1989 (Kinzelbach et al., 1991).

Procédé	Coûts d'investisse ment (F)	Coût courant (F/mois)	Coût par m ³ de terrain la 1 ^{ère} année (F)
Venting	52 500	3 500	35-70
Stripping in situ (incluant le venting du sol)	105 000	7 000	105-140
UVB	140 000	5 250	105-140
Hydrochoc	35 000	3 500	35-70
Géochoc	35 000	3 500	35-70

Le prix est calculé en prenant 1 DM = 3,50 francs

ANNEXE B

Le tableau II.3 donne les indications sur la distribution des micro-organismes dans les eaux et les sols, et le tableau II.4 présente les caractéristiques principales des milieux sols et eau comme espaces de vie pour les micro-organismes.

Tableau II.3: distribution de la population des micro-organismes dans le sol et l'eau souterraine (Nyer E. K., 1992).

Organisme	Taille de la population	
	Typique	Extrême
	Sol en surface (cellules/g/sol)	
Bactéries	0,1 - 1 billion	> 10 billions
Actinomycètes	10 - 100 millions	100 millions
Fongicides	0,1 - 1 million	20 millions
Algues	10 000 - 100 000	3 millions
	Sous-sol (cellules/g/sol)	
Bactéries	1 000 - 10 000 000	200 millions
	Eau souterraine (cellule/g/sol)	
Bactéries	100 - 200 000	1 million

Tableau II.4 : caractéristiques principales des espaces de vie sol et eau souterraine.

	Sol		Eau souterraine et matrice
	Près de la surface	Couches profondes	
Milieu Température	Variable jour/nuit et selon saison	Constante, fraîche, environ 10°C	Constante, environ de 10°C
Nutriments organique	Variable, dépend de l'utilisation, plus abondants qu'en profondeur	Pauvres en nutriments, avec des zones réduites enrichies en nutriments	Pauvre en nutriments avec des espaces riches en nutriments
Oxygène	Variable, anaérobie en cas d'inondation	Aérobies avec petites zones anaérobies suite à consommation	Aérobies avec des emplacements très petits anaérobies
Teneur en eau	Dépend des conditions atmosphériques, sécheresse ou inondation	Dépend des conditions météo et du type de sol	Constante quand le niveau de la nappe est stable
Conséquence Conditions de vie	Très variables	Relativement constantes relativement mauvaises	Relativement constantes mauvaises sauf ponctuellement
Processus de dégradation	Variable avec la vitesse	Relativement lent	Relativement lent
Colonisation	Bactéries : fréquentes gram + et champignons fréquents		Bactérie : plus de gram. Rares champignons

ANNEXE C

Tableau II.5 : mesures des capacités d'échange de quelques métaux sur des résines.

Eléments	Capacité statique (meq/g milieu sec)	Capacité dynamique (meq/g milieu sec)
Nickel	1,6	1,1
Cuivre	3,5	3,2
Cadmium	1,3	1,0

ANNEXE D

Les normes de rejet d'une STEP :

Les stations d'épuration ont des normes de rejet à respecter pour les matières carbonées, les matières azotées et les matières phosphorées (Baumont S).

- Les rejets en matières carbonées sont mesurés par les trois paramètres (DCO, DBO, MES).
- Les rejets en matière azotées sont mesurés par 2 paramètres :
 - ❖ Le **NTK** (azote Kjeldahl) : c'est la mesure des matières azotées sous forme réduite, principalement l'urée, d'origine humaine.
 - ❖ Le **NGL** (azote total) : c'est la mesure de l'azote total, réduit ou oxydé. L'élimination du NGL signifie que les nitrates formés ont été éliminés (dénitrification).
- Et le taux de phosphate (**PT**) est également réglementé ; les phosphates rejetés dans le milieu sont en partie responsables de l'eutrophisation des cours d'eau (Baumont S).

Tableau II.6 : Eaux usées urbaines, quelques valeurs numériques (Baumont S).

MES	DBO	DCO	NTK	P
De 150 à 500 mg.l ⁻¹	De 100 à 400 mg.l ⁻¹ d'O ₂	De 300 à 1000 mg.l ⁻¹ d'O ₂	De 30 à 100 mg.l ⁻¹	De 10 à 25 mg.l ⁻¹

ANNEXE E

Tableau II.7 : des données relatives aux performances des différents procédés biologiques (Baumont. S).

	MES mg/l	DBO ₅ mg/l	DCO mg/l	Virus	Bactéries	Kystes de protozoaires	Œufs d'helminthes
Lits bactériens	30	30-40	90	30 à 40 %	50 à 95 %	83 à 99 %	20 à 90 %
Boues activées	30	25	100	90 %	60 à 90 % jusqu'à 99 %	Peu d'effet	80 à 100 %
Biofiltration	80 %		60 à 90 %				

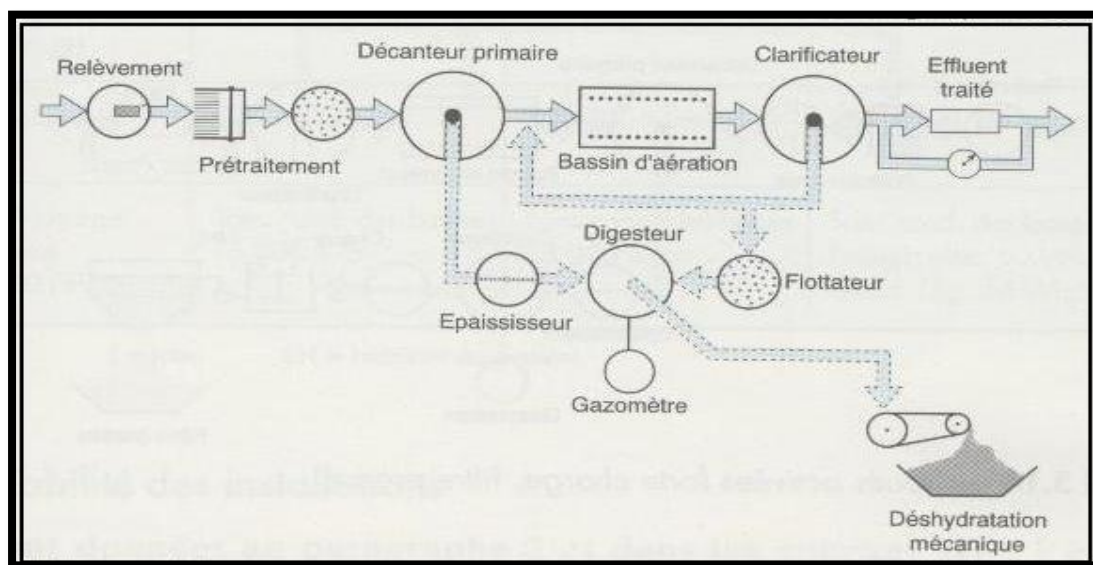


Figure II.1 : Décantation primaire, boues activées forte charge [55].

ANNEXE F

Tableau II.8 : origine et nature des déchets (Zmirou D. et al., 2003).

Source	Nature
Origine résidentielle (déchets ménagers ou ordures ménagères)	Matières putrescibles (nourriture) et résidus de jardin Emballages divers (plastiques, cartons, papiers, feuilles d'aluminium) Boîtes de conserve en métal Vieux vêtements Déchets encombrants (meublier, appareils électroménagers) Résidus de produits de nettoyage, de peintures, de pesticides divers (déchets domestiques dangereux) Médicaments périmés, cosmétiques Papier journal Boues de fosse septique (en cas d'assainissement individuel)
Origine liée aux activités de soins (déchets biomédicaux)	Déchets anatomiques humains, infectieux ou non (incluant le sang) Déchets anatomiques animaux provenant des laboratoires de recherche Déchets non anatomiques et infectieux (seringues, pansements, résidus de salles d'opération, sang ou autres liquides biologiques provenant de patients, résidus de laboratoires de microbiologie, de pathologie ou autres)
Origine agricole et déchets de l'industrie agro-alimentaire	Carcasses d'animaux Résidus de pesticides et d'engrais Excréments d'animaux (utilisés à titre de valorisation des sols) Emballages divers Huiles de lubrification, huiles de moteur de machinerie agricole Pièces de machinerie et d'équipements agricoles désuets Débris de construction divers
Origine commerciale	Résidus de restaurants et de cafétérias Emballages divers Vieux papiers Déchets encombrants
Origine industrielle	Emballages (plastiques, bois, cartons, papiers) et contenants divers Équipements de production désuets (résidus métalliques) Équipements électriques (incluant de vieux transformateurs contenant des PCB) Résidus de produits chimiques (résidus de laboratoire, fonds de réservoirs, produits ne rencontrant pas les critères de qualité ou les spécifications requises) Métaux ferreux ou non ferreux Huiles usées de toute sorte (huiles de coupe, huiles de lubrification, huiles à moteur) Résidus textiles contaminés ou non Résidus agro-alimentaires, pharmaceutiques Boues provenant de réservoirs ou de procédés industriels Résidus découlant des procédés d'assainissement (boues d'épuration, filtres, nombreux produits chimiques) Rejets de production non réutilisables Cendres et mâchefers provenant des chaudières industrielles Résidus radioactifs

ANNEXE G

Tableau II.9 : les principaux polluants ayant un impact sanitaire, leur effet ainsi que les principales valeurs de VTR utilisées (Nièvre, 2002).

Polluant	Effet sans seuil		Effet avec seuil	
	Risques par inhalation	Risques par ingestion	Risques par inhalation	Risques par ingestion
Dioxines	-	oui (EPA)	-	Oui (UE)
Particules (PM10 ou PM2,5)	oui	-	-	-
Plomb	-	-	oui	oui
Arsenic	oui	oui	oui	oui
Cadnium	oui	-	oui	oui
Nickel	oui	-	-	-
Chrome	oui	-	-	-
Mercuré	-	-	oui	oui

ANNEXE H

Tableau II.10 : contraintes et avantages spécifiques des procédés thermiques de traitement des déchets (CGL, 2008).

	Incineration	Gazéification/pyrolyse	Vitrification
Nature des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets dangereux (usine dédiée qu'au traitement de ces déchets dans ce cas) • Déchets ou non dangereux (OM, DIB...) • Déchets liquides (boues) et solides 	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse • DIB et refus de tri combustibles • OM brutes 	<ul style="list-style-type: none"> • Tous déchets mais principalement réservée aux déchets dangereux (REFIOM, amiante, déchets radioactifs)
Capacité	<ul style="list-style-type: none"> • Très large : 20 000 à 500 000 t/an 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 000 à 200 000 t/an 	<ul style="list-style-type: none"> • <20 000 t/an
Produits résultant du cœur du traitement	<ul style="list-style-type: none"> • Mâchefers • Fumées 	<ul style="list-style-type: none"> • Résidu solide + ou -carboné • Gaz combustible + ou -riche • Pyrolyse : huile 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitrifiat • Gaz combustible
Atouts spécifiques à chaque filière	<ul style="list-style-type: none"> • Tri amont simplifié • Traitement adapté à toutes sortes de déchets 	<ul style="list-style-type: none"> • Génération d'une quantité moindre de fumées (5 fois moins qu'avec une UOM à grille) • Moindre production de dioxines (absence d'air) 	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des dioxines (température très élevée) • Vitrifiat=résidu inerte et non dangereux, stockable en centre de classe III • Gain de capacité de stockage en classe I
Contraintes spécifiques à chaque filière	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement spécifique des fumées d'incineration • Production des déchets classés dangereux REFIOM à éliminer dans des centres de stockage déchets dangereux (classe I) • Conditions favorables à la production de polluants dont dioxines 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité globale et pas de retour d'expérience • Epuration du gaz nécessaire avant rejet ou valorisation énergétique • Nécessité de préparer les déchets (broyage, chlorage, déshydratation) 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité globale du procédé/peu de retour d'expérience • Coûts de traitement et d'investissement élevés • Traitement du gaz combustible avant rejet ou valorisation énergétique • Procédé énergivore : température de fusion des déchets
Atouts communs	<ul style="list-style-type: none"> • Diminue fortement le volume des déchets • Valorisation énergétique possible (échangeurs pour récupérer la chaleur, turbine à gaz, moteurs) du gaz combustible produit ou des fumées 		

ANNEXE I

Tableau II.11 : Qualité physico-chimiques de lixiviats de décharges d'ordures ménagères et de déchets industriels (Zmirou D. et al., 2003).

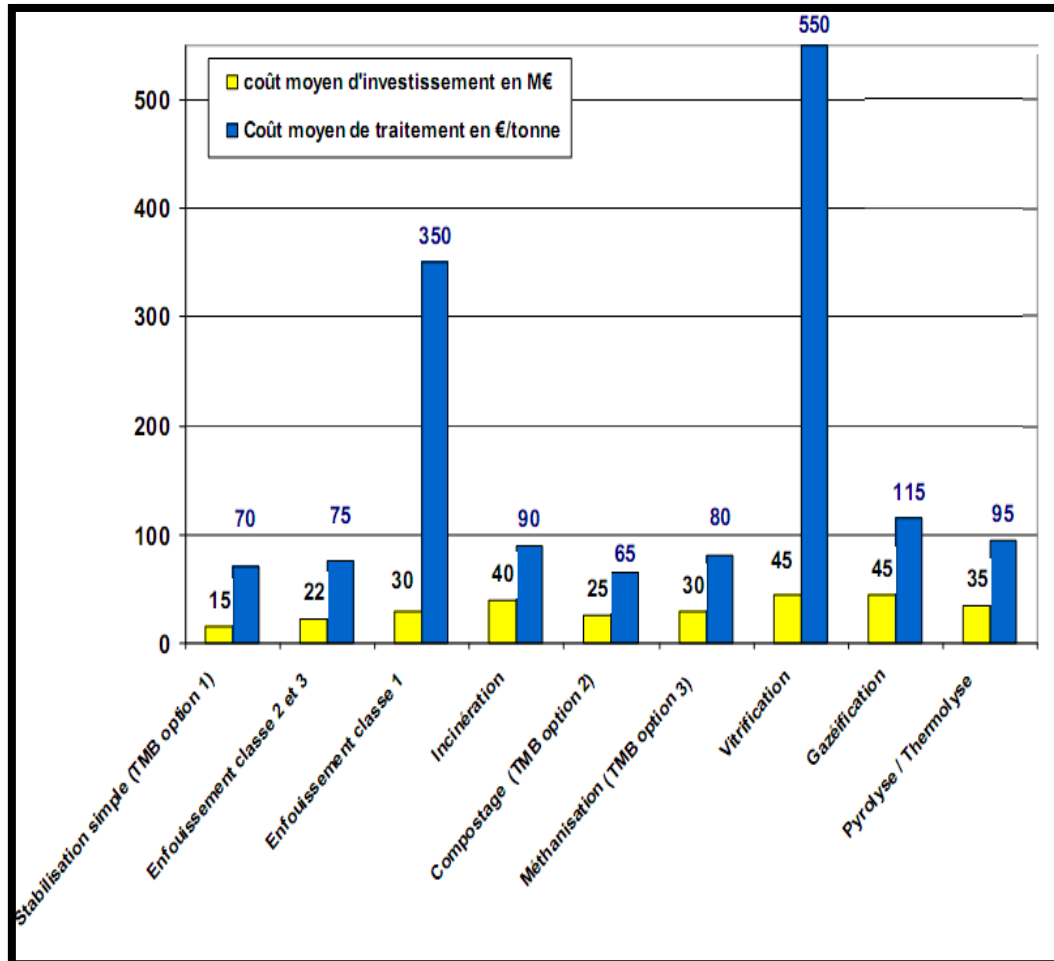
Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne géométrique
pH	4,9	8,9	6,9
DCO (mg O ₂ /L)	10,0	86 000	1231,0
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	0	73 000	388,0*
COT ou COD (mg/L)	3,0	22 500	218,0
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,9	2 154	47,0
Cl ⁻ (mg/L)	7,0	8 800	523,0
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	3,0	3 239	121,0
Fer (mg/L)	0,05	1 995	11,5
Zinc (mg/L)	0	326	0,36*
Nickel (mg/L)	0	79	0,12*
Chrome (mg/L)	0	23	0,07*
Cuivre (mg/L)	0	16	0,04*
Plomb (mg/L)	0	46	0,05*

* à l'exception des concentrations nulles

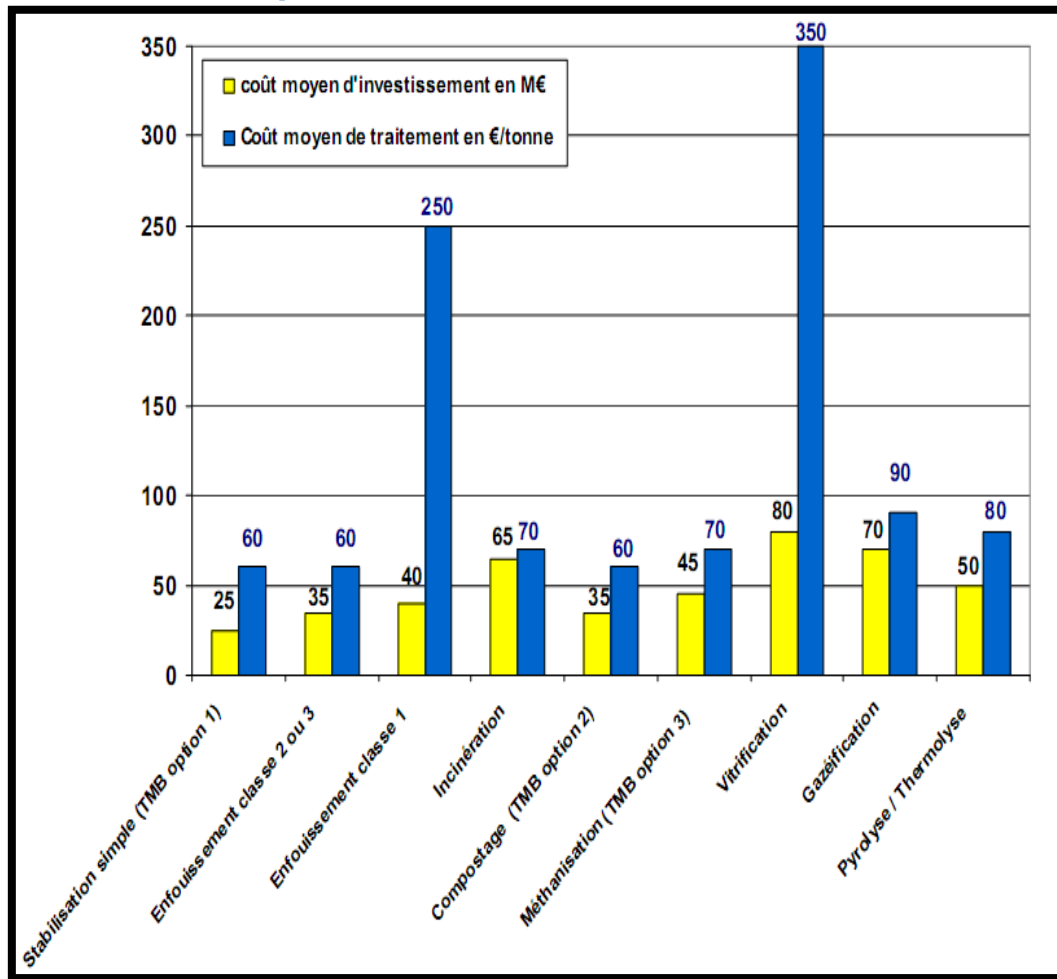
ANNEXE J

Comparaison des coûts des différentes méthodes utilisées pour la gestion des déchets.

Comparaison des coûts (base ~50 000 t/an) (CGL, 2008).



Comparaison des coûts (base ~100 000 t/an) (CGL, 2008).



Remarque : Les coûts sont donnés à titre indicatif et représentent des moyennes ; ils peuvent varier selon le retour d'expérience, la technologie utilisée, le type de déchets traités ...

Pour la vitrification, les coûts sont des estimations ; ils ont été extrapolés à 50 000 et 100 000 t/an car il n'y a pas de référence d'une telle capacité. Pour les petites unités, ces coûts peuvent être nettement plus élevés.

ANNEXE K

Tableau III.1 : Valeurs limites de rejets des déversements industriels selon OMS (décret n°93-160, 1993).

Paramètres	Unités	Valeurs maximales
Températures	°C	30
PH	-	5, 5 à 8, 5
MES	mg/l	30
DBO ₅	mg/l	40
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	40
Phosphates	mg/l	02
Cyanures	mg/l	0,1
Aluminium	mg/l	5
Cadmium	mg/l	0,2
Chrome 3+	mg/l	3,0
Chrome 6+	mg/l	0,1
Fer	mg/l	5
Manganèse	mg/l	1
Mercure	mg/l	0,01
Nickel	mg/l	5
Plomb	mg/l	1
Cuivre	mg/l	3
Zinc	mg/l	5
Huiles et graisses	mg/l	20
Hydrocarbures	mg/l	20
Phénols	mg/l	0,5
Solvants organiques	mg/l	20
Chlore actif	mg/l	1
PCB	mg/l	0,001
Détergeant	mg/l	2
Tension active anionique	mg/l	10

ANNEXE L

Tableau III.2 : Valeurs limites d'émission pour les rejets des eaux usées résultant de l'épuration des gaz de combustion.

Substances polluantes	Valeurs limites d'émission exprimées en concentrations massiques pour des échantillons non filtrés	
	95%	100%
1. Total des solides en suspension tels que définis par la directive 91/271/CEE	30mg/l	45mg/l
2. Mercure et ses composés, exprimés en mercure (Hg)	0,03 mg/l	
3. Cadmium et ses composés, exprimés en cadmium (Cd)	0,05 mg/l	
4. Thallium et ses composés, exprimés en thallium (Tl)	0,05 mg/l	
5. Arsenic et ses composés, exprimés en arsenic (As)	0,15 mg/l	
6. Plomb et ses composés, exprimés en plomb (Pb)	0,2 mg/l	
7. Chrome et ses composés, exprimés en chrome (Cr)	0,5 mg/l	
8. Cuivre et ses composés, exprimés en cuivre (Cu)	0,5 mg/l	
9. Nickel et ses composés, exprimés en nickel (Ni)	0,5 mg/l	
10. Zinc et ses composés, exprimés en zinc (Zn)	1,5 mg/l	
11. Dioxines et furannes, définis comme la somme des dioxines et des furannes individuels évalués conformément à l'annexe I	0,3 ng/l	

Jusqu'au 1^{er} janvier 2008, l'autorité compétente peut accorder des dérogations pour le total des solides en suspension pour les installations d'incinération existantes, à condition que le permis prévoie que 80 % des valeurs mesurées ne dépassent pas 30 mg/l et qu'aucune de ces mesures ne dépasse 45 mg/l (JO L 311 du 21.11.2008).