

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE :
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT : DE CHIMIE
N°:.....



FILIERE : CHIMIE
OPTION : CHIMIE DE
L'ENVIRONNEMENT

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par :

✍ AMINA HALFAYA

✍ ILHAM SOUIDI

Intitulé :

**L'impact des micropolluants sur les
écosystèmes aquatiques**

Soutenus le :...../...../2022 Devant le jury :

Dr. DAKHOUCHE Achour	Université de M'sila	Président
Dr. REFFAS Abdelbaki	Université de M'sila	Examineur
Dr. KADI Souad	Université de M'sila	Rapporteur

Année Universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

J'adresse mes vifs remerciements à mon Encadreur Dr. KADI SOUAD pour m'avoir constamment guidé tout le long de mon projet et pour les précieux conseils qu'elle m'a donné, et pour sa serviabilité, sa disponibilité et ses conseils constructifs.

Je tiens à remercier, Monsieur DAKHOUCHE Achour et Monsieur REFFAS Abdelbaki pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de CHIMIE

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille et mes amis.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mon père dieu accorde
la paix à son **ABDELMADJIDE** et ma mère **FATIMA** qui
m'ont soutenus moralement durant toute la période
de mes études.*

Aussi, je dédie ce travail :

*À mes frères : **AYOUB, RACHID et ZOUHIR***

*À mes sœurs : **SOUMAIA , MARYAM et CHAHED***

*À ma poussin : **MOUAYED***

*À toute la familles : **HALFAYA et HOUICHE***

À tous mes amis et camarades.

AMINA HALFAYA

Dédicace

C'est avec une pensée pleine de reconnaissance que je dédie ce travail :

*À mes parents : mon père "Lakhder "et ma mère "Fatna" qui ont toujours été
auprès de moi pour m'encourager et me mettre sur le bon chemin.*

*À mes soeurs : **Rabiaa, Noura, Sabah et Fatima.***

*À mes Chers frères : **Mohammed Salah et Issam***

*À ma soeur que ma mère n'a pas mis au monde, ma meilleur amie : **Ikram***

Mellouk

*À ma tante **Fatna Beloul***

*À mes beaux frères : **Mansour, Ahmed et Salem***

*À mon neveu : **Abd El Moumen***

*À toute la famille "**Souidi**" et "**Taleb**"*

*À mes chères professeurs: **Maria Saidani et Abla Amroune .***

*À mes Amis : **Kenza Desdous, Asma ben abd elhakem, Inas Hamrit ,
sakina Djemait, Sara Belfedal, Imane Soltani , imane Mobarki ,
Hanane Saadaoui et Tuqa Mahmoud al-zoubi***

ILHAM SOUIDI

Table des matières

Introduction Générale	01
CHAPTRE I : GENERALITES SUR LES MICROPOLLUANTS	
I. Généralités sur les micropolluants	04
I. 1. Définition	04
I. 2. Histoire des micropolluants	05
I. 3. Familles/groupes de micropolluants	05
I. 4. Les Principaux types de micropolluants	06
I. 4. 1. Les micropolluants organiques	07
I. 4. 2. Les micropolluants minéraux	07
I. 4. 3. Les micropolluants organométalliques	08
I. 5. Effets nocifs des micropolluants	08
II. Les stations d'épuration (STEP)	09
II. 1. Procédés d'épuration des eaux usées	10
II. 2. Traitement préliminaire	10
II. 3. Traitement primaire	12
II. 4. Traitement secondaire	12
III. Avantages et inconvénients de l'épuration des eaux usées	13
Chapitre II : Les sources environnementales des micropolluants	
Introduction	15
I. Les sources environnementale des micropolluants	16
I. 1. Le secteur industriel	16
I. 2. La pollution par les eaux pluviales	16
I. 3. Le secteur agricole	17
I. 4. Les eaux usées domestiques	18
I. 5. Les retombées atmosphériques	18
I. 6. Les eaux de ruissellement	19
I. 7. Les effluents hospitaliers	19
Chapitre III : Les impacts des micropolluants sur les écosystèmes aquatiques	
Introduction	23
I. Des impacts différents selon les polluants	23
I. 1. Les micropolluants organiques	23
I. 1. 1. Pesticides	23

I. 1. 2. Les produits pharmaceutiques	24
I. 1. 3. Les rejets des systèmes d'assainissement	24
I. 1. 4. L'industrie pharmaceutique	26
I. 2. Autres contaminations diverses	26
I. 3. Les effets locaux du changement climatique	26
I. 3.1. Des situations de sécheresse plus fréquentes et plus sévères	26
I. 3. 2. Des épisodes plus fréquents et aigus de pluies intenses	27
I. 3. 3. Raréfaction de la ressource	27
Chapitre IV : Procédés d'élimination des micropolluants	
Introduction	30
I. Les procédés existants	30
II. L'amélioration des procédés de traitements : Action aval	33
III. Procédés d'élimination des micropolluants pharmaceutiques	33
IV. Procédés d'élimination des pesticides	34
V. La phyto-épuration	34
V. 1. La phyto-épuration naturelle	34
V. 1. 1. Processus d'élimination du carbone par les macrophytes	35
V. 1. 2. Processus d'élimination de l'azote par les macrophytes	36
V. 1. 3. Processus d'élimination du phosphore par les macrophytes	37
V. 1. 4. Processus d'élimination des germes pathogènes	37
V. 2. Phyto-épuration artificielle	38
V. 2. 1. Types de filtre planté	39
V. 2. 2. Phyto-épuration en Algérie	40
Chapitre V : Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques	
Introduction	42
I. Les moyens de réduire totalement ou en partie les micropolluants organiques	42
II. Les recommandations en Algérie	43
III. Les recommandations dans le monde	47
IV. Aperçu sur la réglementation Européenne dans la protection du milieu marin	50
IV. 1. Nouvelles substances, nouveaux outils : préparé l'avenir	51
IV. 2. Identifier et surveiller les substances à enjeux	51
IV. 3. Des outils biologiques novateurs pour la surveillance et le diagnostic	51
IV. 4. Bio-marqueurs et bio-essais	53
IV. 5. Vers des stratégies graduées d'évaluation	54
Conclusion Générale	56

Références Bibliographique
Résumé

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure 1	Familles de micropolluants	06
Figure 2	Station d'épuration (STEP).	10
Figure 3	Les différentes sources de micropolluants [United States Environmental Protection	09
Figure 4	Répartition de l'usage des pesticides en Belgique	15
Figure 5	Principaux processus de transformation et d'élimination du carbone dans les systèmes d'épuration des eaux.	17
Figure 6	Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes flottants.	36
Figure 7	Synthèse des travaux relatifs aux rejets d'eaux usées sur la côte algérienne entre 2001 et 2014.	39
Figure 8	Pollution marine au niveau du Port d'Alger.	43
Figure 9	Concentrations de la DBO ₅ et la DCO.	44
Figure 10	Concentrations des polluants au Maroc.	45
Figure 11	Typologie d'outils biologiques disponibles pour le diagnostic de la contamination chimique des milieux aquatiques.	49

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
----	-------	------

Tableau 1	Procédés supplémentaires envisageables pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines	32
Tableau 2	Valeurs limites de certains paramètres des rejets industriels	46
Tableau 3	Bio-marqueurs et bio-essais retenus en France pour la surveillance des milieux côtiers.	53

Introduction

Générale

Introduction :

Les micropolluants sont un ensemble de substances qui proviennent au moins en partie des activités humaines et qui présentent des effets nocifs avérés ou suspectés mêmes aux faibles concentrations (du mg/L au µg/L) auxquelles elles sont présentes dans l'environnement. Il n'existe pas de liste arrêtée comprenant l'ensemble des micropolluants car celle-ci évolue au fur et à mesure des connaissances sur les effets des substances étudiées.

Certains micropolluants, dits historiques, sont connus depuis longtemps, c'est le cas des métaux ou des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). Certains micropolluants, appelés émergents, sont nouvellement étudiés à la suite d'un progrès analytique, d'une prise de conscience ou d'une médiatisation.

Les micropolluants peuvent être regroupés par familles chimiques, usages, effets ou statut réglementaire. Un micropolluant peut ainsi appartenir à plusieurs groupes. Les effluents industriels, les rejets urbains, l'agriculture et les produits agricoles sont des sources de micropolluants identifiées et étudiées depuis les années 1970. Plus récemment, les micropolluants liés aux émissions domestiques (médicaments, cosmétiques, lessives, détergents, pesticides, solvants, tensioactifs, plastifiants, retardateurs de flammes...) sont au cœur des problématiques liées aux micropolluants [1].

Les polluants physicochimiques en circulation dans l'environnement interagissent constamment avec les systèmes biologiques. Une fois dans l'environnement, la plupart d'entre eux (ceux qui sont aérotransportés ou solubles dans l'eau notamment) sont très difficiles à contrôler ou récupérer avant qu'ils ne soient largement diffusés dans l'écosystème et qu'ils n'aient pénétré de nombreux organismes pour lesquels ils ont des effets délétères (toxiques, mutagènes, cancérigènes, perturbateurs endocriniens, etc.). Parmi les polluants les plus toxiques et problématiques figurent les métaux (plomb, mercure, cadmium et arsenic par exemple), les radionucléides (notamment issus d'essais nucléaires ou d'accidents nucléaires), mais aussi les pesticides et divers composés organiques ou organométalliques très toxiques ou écotoxiques, même à très faibles doses pour certains d'entre eux.

Les procédés classiquement utilisés pour l'épuration des eaux usées peuvent éliminer certaines matières toxiques mais ne sont pas aussi efficaces pour en éliminer d'autres (matières organiques, micropolluants...), ce qui représente un problème important en raison de leurs effets négatifs sur la santé et l'environnement. Beaucoup de micropolluants organiques présents

Introduction générale

dans les eaux usées municipales, comme les produits pharmaceutiques, les produits de soins corporels, les détergents, les biocides et les pesticides sont mal éliminés dans les stations d'épuration conventionnelles (STEP) [2].

Pour réduire la concentration de ces substances dans les eaux de surface, des traitements complémentaires sont nécessaires [3]. Par exemple, des systèmes physico-chimiques ou biologiques pour réduire l'effet de la contamination par les micropolluants ont été mis en place, mais la plupart d'entre eux sont coûteux ou nécessitent une haute technologie et par conséquent ne peuvent être appliqués à toutes les échelles [4].

L'utilisation des matériaux à faible coût comme les adsorbants d'ions dissous, offre des solutions économiquement viables à ce problème mondial et pourrait être considéré comme une éco-solution à l'amiable [5].

Le présent travail relate les différentes parties de notre étude. En dehors de l'introduction et de la conclusion, le document est divisé en cinq chapitres :

- Premier chapitre présente des généralités sur les micropolluants ;
- le deuxième chapitre expose les sources environnementales des micropolluants ;
- le troisième chapitre porte sur les impacts des micropolluants sur les écosystèmes aquatiques ;
- le quatrième chapitre présente les procédés d'élimination des micropolluants ;
- le dernier chapitre expose les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques.

Chapitre I

Généralités sur les

Micropolluants

I. Généralités sur les micropolluants

I. 1. Définition :

Un micropolluant, encore appelé « polluant émergent » est un polluant présent à faible concentration dans l'environnement [6]. La plupart des micropolluants appartiennent au groupe de substances d'origine synthétique caractérisées par des effets toxicologiques importants, même à des concentrations très faibles. Le terme «polluant émergent» permet de désigner un nombre grandissant de substances chimiques utilisées dans la vie courante et dans des applications industrielles, agricoles, sanitaires, etc.

Une définition du gouvernement français présente les polluants émergents comme les substances rencontrées dans l'environnement grâce aux améliorations de la surveillance et des méthodes d'analyse, ils ont pour caractéristique principale une absence de connaissances sur leur toxicité.

Les polluants émergents sont également caractérisés par leurs effets à long terme sur la santé dus à leur agrégation et leur persistance. Les connaissances autour du sujet sont limitées pour plusieurs raisons. Les principales sont : la capacité limitée des moyens d'analyse actuels, le manque d'informations sur l'origine des produits et le manque d'informations sur leurs processus de dégradation.

On dénombre trois (03) sortes de micropolluants :

- 1) les substances pharmaceutiques et les produits de soins corporels, incluant leurs résidus (PPCPs) ;
- 2) les produits chimiques domestiques et industriels ;
- 3) les produits de dégradation des substances pharmaceutiques, domestiques et industrielles.

Les préoccupations pour la sauvegarde des ressources en eau et leur exposition aux produits néfastes sont relativement récentes. Les scientifiques s'efforcent d'établir des règles et des chiffres les plus précis possibles sur la gestion des micropolluants, mais les obstacles sont conséquents, à commencer par la très grande variété de molécules et leurs faibles concentrations qui rendent les analyses très complexes.

Plusieurs travaux de recherche portent sur la compréhension des mécanismes de création, de persistance et d'élimination de ces molécules au cours des étapes du traitement des eaux. Ces travaux insistent également sur l'évaluation de la toxicité de ces molécules pour l'homme, son environnement et sur la mise en place de procédés pour éliminer ou retenir ces substances. Certains résultats ont déjà été obtenus sur l'impact des micropolluants sur la biodiversité aquatique. Enfin, l'évolution réglementaire a aussi son rôle à jouer [7].

I. 2. Histoire des micropolluants :

Jusqu'au milieu des années 1989, l'étude des micropolluants concernait uniquement les polluants organiques persistants (DDT, PCB) et les métaux. A côté de ces micropolluants dits historiques, les évolutions réglementaires dont la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) ainsi que les importants progrès analytiques de ces dernières décennies ont conduit au suivi de substances prioritaires dont la liste réglementaire est mise à jour régulièrement.

Par ailleurs, les micropolluants « émergents » regroupent des polluants non réglementés, sur lesquels les connaissances sont très parcellaires en ce qui concerne les niveaux d'imprégnation des milieux ainsi que leur toxicité. Leur usage n'est pas forcément nouveau, mais l'intérêt qu'on leur porte l'est. Parmi ces polluants émergents, certains font, ou ont fait l'objet d'une médiatisation particulière ces dernières années : les phtalates, les alkylphénols, le bisphénol A, ou encore les résidus pharmaceutiques. D'autres en revanche, comme les biocides-désinfectants, les plastifiants ou les détergents restent insuffisamment étudiés malgré des impacts sanitaires et environnementaux suspectés. A tous ceux-là, s'ajoutent les substances qui à ce jour ne sont pas encore identifiées ou détectées [8].

I. 3. Familles de micropolluants

Le terme « micropolluant » ne définit pas une classe de molécules en particulier, mais englobe une grande diversité de substances aux propriétés et aux usages extrêmement variables. De ce fait, différents regroupements sont classiquement utilisés (Figure 1) :

- par leur structure chimique : composés aromatiques (comme les HAP), organophosphorés, les polychlorobiphényles (PCB), alkylphénols, phtalates ;
- par leur devenir dans le milieu comme les COV (composés organiques volatils), POP (polluants organiques persistants), les vPvB (substances très persistantes et très bioaccumulables) ;

- par leurs propriétés physico-chimiques : éléments traces métalliques, micropolluants organiques, molécules hydrophiles et hydrophobes ;
- par leurs usages/familles : les composés impliqués dans la formulation des pesticides, cosmétiques, pharmaceutiques ;
- par les types d'effets sur la santé humaine et les écosystèmes : perturbateurs endocriniens, cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques ;
- par leur statut réglementaire : substances prioritaires et substances dangereuses prioritaires, polluants spécifiques de l'état écologiques, substances pertinentes à surveiller.

Un micropolluant peut ainsi appartenir à plusieurs groupes ce qui complexifie la classification. Par exemple le tributylétain (famille chimique des organoétains) est utilisé comme biocide et possède des effets de perturbation endocrinienne.

Micropolluants
Eléments traces
Métalloïdes
Organométalliques
HAP
PCB
PBDE/PBB
Solvants (chlorés/benzéniques)
Organochlorés (chloroalcane, chlorophénols, chloroanilines)
Détergents & plastifiants(alkylphénols/phtalates/bisphénol A)
MTBE
PESTICIDES
Biocides
Produits pharmaceutiques

Figure 1 : Familles de micropolluants [9].

I. 4. Les Principaux types de micropolluants

On distingue généralement trois grands groupes de micropolluants : les micropolluants organiques, les micropolluants minéraux et les micropolluants organométalliques.

I. 4. 1. Les micropolluants organiques :

Ils regroupent plusieurs types de composés contenant un ou plusieurs atomes de carbone. Ce groupe de micropolluants peut être scindé en deux grandes familles : les pesticides et les autres micropolluants organiques. Ces derniers comprennent notamment :

1. Les hydrocarbures : les plus connus sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui se forment lorsque la combustion des matières organiques est incomplète. Ces composés sont dès lors présents de manière non intentionnelle dans de nombreux matériaux (goudrons, carburants...);
2. les biphényles polychlorés (PCB) : ces molécules de synthèse possèdent des propriétés particulières (stabilité thermique, résistance à l'oxydation...) qui font qu'elles ont été largement utilisées comme isolants dans les condensateurs et transformateurs électriques ;
3. les biphényles polybromés (PBB), utilisés en mélange comme retardateur de flammes ;
4. les dibenzodioxines polychlorées (PCDD) ou dioxines : ce sont des sous-produits générés lors de la synthèse d'autres produits et lors de la combustion de certains déchets et produits pétroliers ;[10]
5. les dibenzofurannes polychlorés (PCDF) ou furannes : il s'agit aussi de sous-produits générés involontairement lors de la synthèse d'autres composés ;
6. les détergents (ou surfactants) qui possèdent des propriétés tensioactives ;
7. les esters de phtalate : ces substances sont utilisées pour améliorer la flexibilité du plastique, dont elles se libèrent facilement, ce qui explique leur présence fréquente dans diverses substances médicamenteuses : hormones (œstrogène, testostérone...), antibiotiques, anesthésiants, anxiolytiques.

Certains micropolluants organiques (comme les PCB, les dioxines, les furannes et certains pesticides) font partie des POP (polluants organiques persistants). Il s'agit de composés extrêmement toxiques et peu biodégradables qui peuvent, d'une part être transportés sur de longues distances par les courants atmosphériques, et d'autre part, s'accumuler dans les tissus le long de la chaîne alimentaire [11].

I. 4. 2. Les micropolluants minéraux :

Ils sont représentés essentiellement par les éléments traces métalliques (ETM). Les principaux ETM rencontrés dans les eaux sont le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le chrome (Cr),

le mercure (Hg), l'arsenic (As), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le nickel (Ni). Ces éléments sont présents naturellement dans les roches et les sols, mais les niveaux de concentration actuels résultent pour la plupart de diverses activités humaines (sidérurgie, tannerie, transport routier, effluents agricoles...). Dans certaines régions, le bruit de fond pédogéochimique peut également être responsable de niveaux de contamination très élevés (plomb dans la région de Plombières).

I. 4. 3. Les micropolluants organométalliques :

Ce sont des molécules mixtes dans lesquelles un ion métallique est lié à un groupement organique (méthyle de mercure) [12].

I. 5. Effets nocifs des micropolluants :

Comme nombre de substances parviennent en continu dans les eaux par le biais des STEP, leurs concentrations varient relativement peu. Cela signifie que les végétaux, les animaux et les micro-organismes aquatiques sont soumis en permanence à une charge polluante, que l'on qualifie alors de chronique. Selon la substance présente, une telle pollution peut, même à des concentrations très faibles (de l'ordre du nano-gramme [ng] ou du microgramme [µg] par litre), avoir des conséquences néfastes sur les organismes aquatiques. Voici les effets qui ont été observés pour les substances ayant un impact sur l'environnement :

- ✓ Les substances à effet herbicides entravent la photosynthèse des algues.
- ✓ Les insecticides endommagent le système nerveux des animaux aquatiques.
- ✓ Les perturbateurs endocriniens (œstrogènes, p. ex.) affectent la reproduction de poissons et d'autres organismes vivants (tels les mollusques [13]).

Certaines substances peuvent en outre provoquer des effets secondaires indésirables chez les organismes aquatiques :

- ✓ Lorsque ses concentrations dépassent certains seuils, l'analgésique diclofénac, largement répandu, peut endommager les reins des poissons [14].
- ✓ Les agents ignifuges, utilisés par exemple dans les meubles rembourrés, les appareils électriques et électroniques ou les bâtiments afin d'éviter les incendies, peuvent perturber la reproduction d'organismes aquatiques [15].

✓ Les insecticides peuvent notamment causer des dégâts subtils, encore mal connus, tels des troubles du comportement (dus notamment à des perturbations de l'orientation olfactive) ou une détérioration du système immunitaire des organismes [16].

La situation s'avère d'autant plus grave que les effets de substances aux propriétés similaires peuvent se cumuler. D'autres facteurs de stress, comme le rayonnement UV, une hausse de la température ou une détérioration de la quantité et de la qualité de la nourriture disponible, peuvent également influencer sur les atteintes. Il arrive de plus que les effets indésirables ne se manifestent qu'après plusieurs générations [17].

II. Les stations d'épuration (STEP) :

Elles constituent une autre voie d'élimination des eaux usées dans la mesure où celles-ci y subissent toute une batterie de traitements avant leur déversement dans le milieu naturel. Une STEP, généralement placée à l'extrémité aval d'un réseau est conçue pour épurer les eaux usées et limiter l'apport en excès de matière organique et dans certains cas, de substances minérales telles les nitrates et les phosphates dans les milieux récepteurs, sachant que certaines substances contenues dans un effluent, à partir d'une certaine concentration, peuvent constituer un danger pour la communauté aquatique, l'épuration des eaux usées diminue l'impact sur les écosystèmes aquatiques [18].

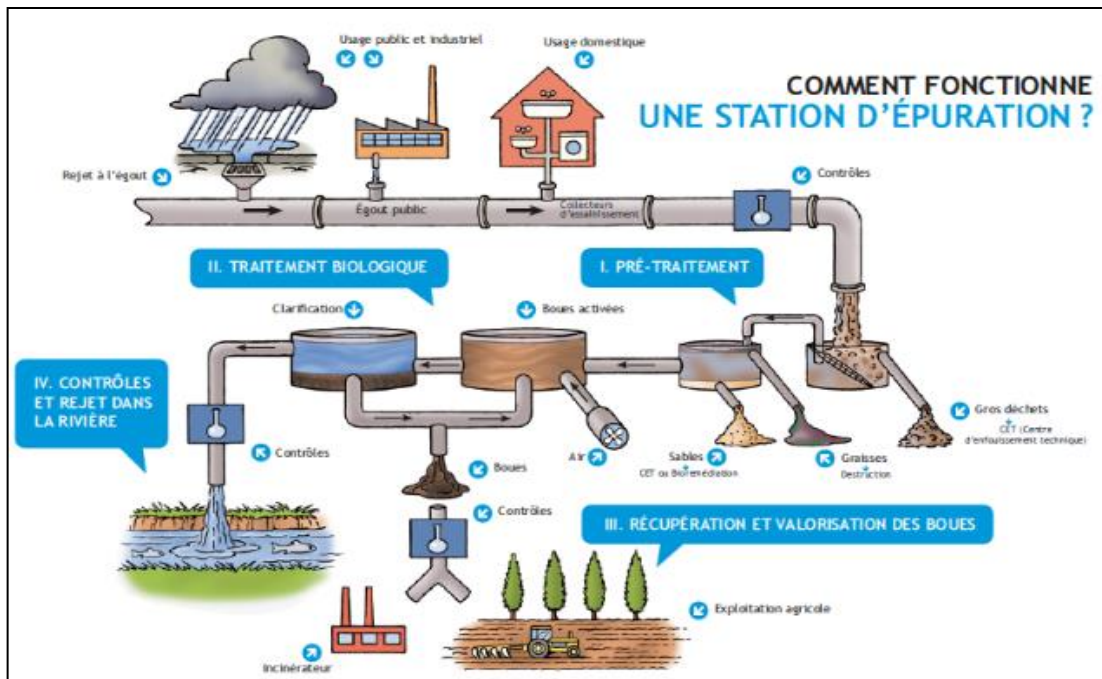


Figure 2 : Station d'épuration (STEP).

II. 1. Procédés d'épuration des eaux usées :

L'épuration des eaux usées le plus approprié est celui qui fournit, avec certitude, des effluents de qualité chimique et microbiologique exigée pour un certain usage spécifique, à bas prix et des besoins d'opération et d'entretien minimaux. Les stations d'épuration des eaux résiduaires, indépendamment du type de traitement, réduisent la charge organique et les solides en suspension et enlèvent les constituants chimiques des eaux usées qui peuvent être toxiques aux récoltes ainsi que les constituants biologiques (microbes pathogènes) qui concernent la santé publique en général.

II. 1. 1. Traitement préliminaire :

Enlèvement des solides grossiers et d'autres grands fragments de l'eau usée brute [19].

En tête d'une station d'épuration, ces procédés permettent de retenir les matières volumineuses grâce à des grilles (dégrillage), les sables (dessablage), les matières flottantes grossières (écumage) et les liquides moins denses que l'eau (désuilage). Les déchets solides peuvent être déchiquetés (dilacération) par des pompes dilacératrices, cette opération facilitant leur dispersion [19].

Dégrillage :

Le dégrillage et le tamisage permettent de retirer de l'eau les déchets insolubles tels que les branches, les plastiques, serviettes hygiéniques, etc. En effet, ces déchets ne pouvant pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Pour ce faire, l'eau usée passe à travers une ou plusieurs grilles dont les mailles sont de plus en plus serrées. Celles-ci sont en général équipées de systèmes automatiques de nettoyage pour éviter leur colmatage, et aussi pour éviter le dysfonctionnement de la pompe (dans les cas où il y aurait un système de pompage).

- Un dégrillage grossier : l'eau brute passe à travers une première grille qui permet l'élimination des matières de diamètre supérieur à 50mm.
- Un dégrillage fin : après le relevage de l'eau par quatre pompes (1250m³/ h pour chacune), il passe par deux grilles à câble composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60 à 80° sur l'horizontale. L'espacement des barreaux est de 20mm, la vitesse moyenne de passage entre les barreaux est comprise entre 0,6 et 1 m/s[20].

Dessablage :

Le dessablage a pour but d'extraire les graviers, sables et autre particules minérales de diamètres supérieures à 0,2 mm contenus dans les eaux usées, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduits, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion. L'écoulement de l'eau à une vitesse réduite dans un bassin appelé dessableur entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Ces particules sont ensuite aspirées par une pompe. Les sables extraits peuvent être lavés avant d'être mis en décharge, afin de limiter le pourcentage de matières organiques, sa dégradation provoquant des odeurs et une instabilité mécanique du matériau [21].

Déshuilage :

C'est généralement le principe de la flottation qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface (les graisses sont hydrophobes). Leur élimination se fait ensuite par raclage de la surface. Il est important de limiter au maximum la quantité de graisse dans les ouvrages en aval pour éviter par exemple un encrassement des ouvrages, notamment des canalisations [22].

II. 2. Traitement primaire:

Enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants [23]. La décantabilité des matières dans un bassin est déterminée par l'indice de Mohlman. Cet indice est déterminé chaque jour dans les stations d'épuration importantes afin de vérifier le bon fonctionnement du système.

À la fin de ce traitement, la décantation de l'eau a permis de supprimer environ 60 % des matières en suspension, environ 30 % de la demande biologique en oxygène (DBO) et 30% de la demande chimique en oxygène (DCO). Cette part de DBO₅ supprimée était induite par les matières en suspension. La charge organique restant à traiter est allégée d'autant. Les matières supprimées forment au fond du décanteur un lit de boues appelé boues primaires [24].

II. 3. Traitement secondaire (traitement biologique) :

Enlèvement des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées traitées primaires [25]. Les procédés d'épuration secondaire (ou biologique) comprennent des procédés biologiques, naturels ou artificiels, faisant intervenir des microorganismes aérobies pour décomposer les matières organiques dissoutes ou finement dispersées [25]. La dégradation peut se réaliser par voie aérobie (en présence d'oxygène) ou anaérobie (en l'absence d'oxygène).

a) la voie anaérobie : si les réactions s'effectuent à l'abri de l'air, en milieu réducteur. Le carbone organique, après dégradation, se retrouve sous forme de CO₂, méthane et biomasse. Ce type de traitement appelé « digestion anaérobie » n'est utilisé que pour des effluents très concentré en pollution carbonées, de type industriel (basserie, sucrerie, conserverie ...).

b) la voie aérobie : si l'oxygène est associé aux réactions, cette voie est celle qui s'instaure spontanément dans les eaux suffisamment aérées. Le carbone organique se retrouve sous forme de CO₂ et de biomasse [26]. L'épuration biologique des eaux usées peut être mise en œuvre dans les microorganismes se développent en suspension dans l'eau (boues activées), ou encore dans réacteurs à biomasse fixée dans lesquelles les micro-organismes se développent sur un support grossier ou sur garnissage plastique (lit bactériens), sur de disque (disques biologiques).

III. Avantages et inconvénients de l'épuration des eaux usées :**III. 1. Les avantages :**

- Excellente élimination de la pollution microbiologique ;
- Faibles coûts d'investissement et de fonctionnement ;
- Raccordement électrique inutile ;

- Très bonne intégration paysagère ;
- Valorisation aquacole et agricole de la biomasse planctonique produite et des effluents épurés; • Boues peu fermentescibles ;
- Bonne élimination de l'azote (70 %) et du phosphore (60 %).

III. 2. Les inconvénients :

- Variation saisonnière de la qualité de l'eau en sortie ;
- En cas de mauvais fonctionnement, risque d'odeurs, de moustiques, de rongeurs ;
- Emprise au sol importante ;
- Difficultés d'extraction des boues ;
- Pas de réglage possible en exploitation ;
- Sensibilité aux effluents septiques et concentrés.

Chapitre II

Les sources

environnementales

des micropolluants

Introduction :

Cette partie a pour objectif de sensibiliser à la présence des micropolluants dans l'eau et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, participent à leur présence : agriculteurs et industriels d'abord, mais aussi citoyens dans leur vie de tous les jours.

Les sources des micropolluants dans l'eau sont nombreuses et multiples. Il peut s'agir d'une part de rejets directs d'eaux usées urbaines et industrielles, et d'autre part d'apports diffus associés aux retombées atmosphériques ou au ruissellement d'eaux contaminées en provenance des sols agricoles ou des voiries. Certains micropolluants sont aussi présents dans les sédiments des cours d'eau ou présents naturellement à l'état de trace dans les sols [27].

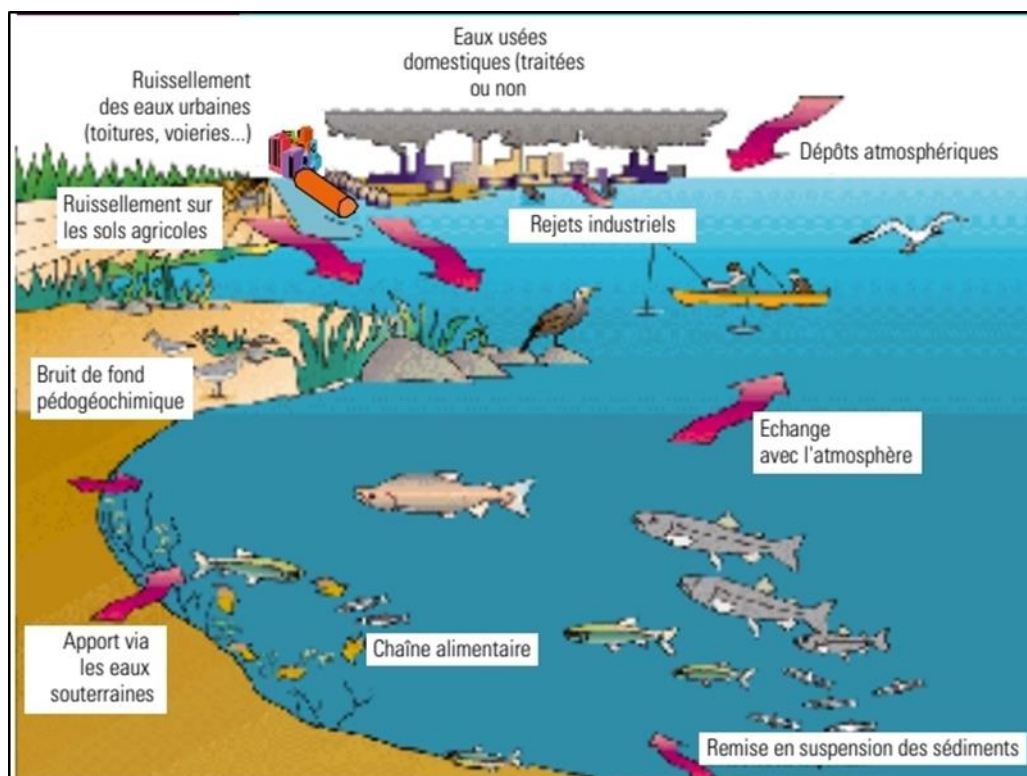


Figure 3 : Les différentes sources de micropolluants [United States Environmental Protection Agency [28].

I. Les sources des micropolluants dans l'environnement :

En fonction de la nature du bassin versant et de ses activités (industrielles, résidentielles, commerciales, tertiaires...), un grand nombre de sources de pollution peut être défini :

I. 1. Le secteur industriel :

Les principaux responsables de la présence des micropolluants dans les cours d'eau sont fortement identifiés comme étant les industriels. En deuxième position, les agriculteurs pour les ménages sont évalués comme moyennement responsables et les artisans ne sont pas du tout ou très peu identifiés comme responsables des micropolluants dans les cours d'eau. Par exemple, le fait de faire le ménage, faire une lessive, ou entretenir son jardin, faire de la peinture et nettoyer ses pinceaux dans l'évier s'agit d'une source de micropolluants.

Entre 1994 et 2002, les quantités d'ETM déversées dans les cours d'eau ont diminué de 46 %, en raison principalement de l'application de la taxe sur le déversement des eaux usées industrielles, de la cessation d'anciennes activités fort polluantes et des efforts consentis par les entreprises en matière d'épuration et d'amélioration de certains processus industriels [29].

I. 2. La pollution par les eaux pluviales :

Beaucoup de ces micropolluants, soit parce qu'ils sont volatils, soit parce qu'ils sont transformés en aérosols liquides ou solides, ou adsorbés sur les poussières atmosphériques, sont retrouvés dans les retombées sèches ou dans les eaux pluviales. Ces dernières contribuent donc de façon significative, avec des concentrations et des flux variables, à la diffusion des micropolluants dans l'environnement, via les réseaux, déversoirs d'orages et stations d'épuration.

La réduction des micropolluants dans l'eau est aujourd'hui un enjeu essentiel pour la qualité des milieux aquatiques. Dans son plan d'action, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000) inclut une réduction voire une suppression d'une liste cible de micropolluants afin de garantir le retour au bon état écologique des masses d'eau. Ceci s'avère impossible sans le traitement des eaux pluviales qui sont l'un des principaux vecteurs de contamination diffuse des milieux aquatiques en micropolluants [29].

I. 3. Le secteur agricole :

L'application de pesticides sur les sols (agricoles et non agricoles) constitue une source importante de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines.

Une étude récente menée par le CERVA a permis d'évaluer les apports de pesticides en Belgique et en Région wallonne par sous bassin hydrographique, par type d'utilisateurs et par type de pesticides. Il ressort de cette étude que les quantités totales de matières actives utilisées en Belgique en 2003 représentaient environ 8300 tonnes, dont moins de 40 % (\pm 3 000 tonnes) étaient appliquées en Région wallonne [30].

Cette étude révèle, en outre, que plus de la moitié des pesticides sont consommés par les agriculteurs et les horticulteurs, et environ un tiers par les particuliers dans le cadre de leurs activités de jardinage (désherbage des allées...). Concernant cet usage, signalons toutefois que 84 % des quantités de matières actives appliquées le sont sous la forme de chlorate de sodium et de sulfate de fer, ces deux types d'herbicides n'étant pas problématiques en terme de pollution des eaux (figure 4).

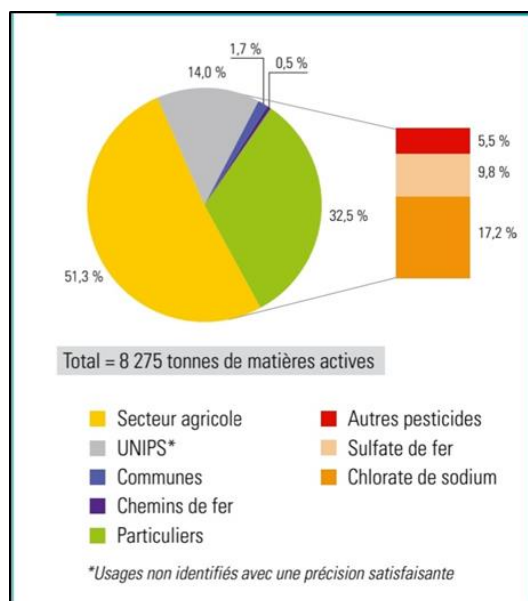


Figure 4: Répartition de l'usage des pesticides en Belgique [30]

Les sous-bassins hydrographiques où les apports en pesticides sont les plus importants correspondent aux régions agricoles où les grandes cultures dominent.

Le niveau de contamination des ressources en eau ne dépend pas uniquement des quantités de matières actives utilisées mais aussi des modes d'application et du devenir des molécules dans l'environnement. Plusieurs études scientifiques ont démontré que, lorsque les

conditions d'utilisation des pesticides étaient respectées par les agriculteurs et les horticulteurs, plus de 90 % des molécules non assimilées par la végétation pouvaient être dégradés dans l'horizon superficiel du sol (via des processus biologiques et physico-chimiques). A l'inverse, dans le cas d'utilisations non agricoles sur des surfaces imperméables (asphalte, pavés...) ou semi-perméables (gravier, ballast...), les quantités de pesticides entraînés par ruissellement pouvaient atteindre, selon les circonstances, 40 à 60 % des quantités appliquées [31].

I. 4. Les eaux usées domestiques :

Les eaux usées domestiques contiennent aussi une multitude de micropolluants, ces derniers entrant dans la composition de nombreux produits à usage domestique (détergents, cosmétiques, lessives, peintures, médicaments, onguents...). A l'heure actuelle, il est impossible d'estimer les quantités de micropolluants rejetées directement par les ménages dans les cours d'eau. Il en est de même à l'entrée et à la sortie des stations d'épuration publiques, ainsi qu'à la sortie des déversoirs d'orage, dans le cas des réseaux d'égouts unitaires.

I. 5. Les retombées atmosphériques :

Les retombées atmosphériques (sèches et humides) constituent une autre source de micropolluants pour laquelle des informations chiffrées ne sont pas disponibles, alors que les composés les plus préoccupants sont suivis dans l'air ambiant. En outre, les concentrations de micropolluants dans les eaux de pluie ne sont pas mesurées systématiquement au sein du réseau «pluies acides» [32].

I. 6. Les eaux de ruissellement :

Les eaux de ruissellement en provenance des toitures, des voiries et des surfaces agricoles sont également susceptibles de contaminer les cours d'eau en micropolluants divers (ETM, pesticides, hydrocarbures...). Selon certaines études, les eaux de toitures peuvent concentrer des quantités importantes d'ETM, en fonction du type de recouvrement et de gouttières (crochets et gouttières en zinc, tuiles bordées de cuivre, feutre bitumé, sels de plomb présent dans le PVC des gouttières...). Les eaux de ruissellement provenant des routes sont, quant à elles, contaminées par des hydrocarbures et différents ETM. A titre d'exemple, une étude réalisée sur une portion d'autoroute française (A11 à Nantes) a révélé que 1 kilomètre de voirie soumis à un trafic de 25 000 véhicules/jour libérait 25 kg d'hydrocarbures, 4 kg de zinc et 0,5 kg de plomb par an dans les eaux de ruissellement [33].

I. 7. Les effluents hospitaliers :

Encore trop peu d'études s'intéressent à la caractérisation des effluents hospitaliers qui sont le plus souvent considérés comme similaires aux effluents domestiques. L'agence environnementale Américaine EPA (1989) précise par exemple que les eaux usées provenant des hôpitaux sont essentiellement domestiques et peuvent être caractérisées par la mesure des paramètres globaux dans les limites suivantes : DBO₅ (demande biologique en oxygène pendant 5 jours) 50 à 400 mg/L, DCO (demande chimique en oxygène) 150 à 800 mg/L, MEST (matières en suspension totales) 60 à 200 mg/L et COT (carbone organique total) 50 à 300 mg/L.

Étant donné l'utilisation et les rejets de volumes importants d'eau dans les établissements hospitaliers, les polluants identifiés (métaux, radio- isotopes et autres substances chimiques) sont dilués et se retrouvent à des concentrations souvent voisines de celles des effluents domestiques.

Plusieurs études menées ces dernières années ont montré que les effluents hospitaliers présentaient des caractéristiques physico-chimiques globales tout à fait semblables à la moyenne de celles d'eaux résiduaires urbaines (à l'exception des détergents significativement plus concentrés), et que le niveau de pollution pouvait être plus faible que les effluents domestiques mais avec la présence systématique de germes ayant acquis des caractères de résistance aux antibiotiques [34].

Mais ces résultats sont trompeurs car ils ne tiennent compte en réalité ni du volume rejeté ni de la composante toxique des effluents. Un établissement de 1000 lits polluerait ainsi autant qu'une ville de 10000 habitants, sans compter l'utilisation quasi industrielle de nombreux produits chimiques. Il convient donc de s'intéresser aux types de molécules éliminées et non pas à des paramètres physico-chimiques globaux [35].

Les effluents hospitaliers sont des effluents très particuliers où l'on retrouve la présence de nombreux produits pharmaceutiques ainsi que des microorganismes le plus souvent pathogènes et beaucoup de produits désinfectants. Bien que l'on analyse le plus souvent les paramètres physico- chimiques pour tenter de les caractériser (DCO, DBO, MES, NTK), le danger résiderait plus dans la présence de certaines bactéries multi-résistantes aux antibiotiques

(*Proteus vulgaris*, Mycobactéries) et de certaines souches typiquement hospitalières (*Enterobacter sakazakii*) [36].

Les germes témoins représentent assez fidèlement le risque lié à la présence de pathogènes, dont les caractéristiques de résistance restent finalement assez banales dans le contexte hospitalier, si l'on excepte une résistance assez préoccupante aux antibiotiques de synthèse de la famille des quinolones.

On peut noter également la présence d'éléments radioactifs utilisés en médecine à des fins thérapeutiques ou pour établir des diagnostics *in vivo* ou *in vitro* [37]. Certains de ces éléments sont utilisés en sources non-scellées et sont donc susceptibles d'être dispersés, même si l'évacuation de ces effluents est soumise à une réglementation stricte. On peut citer par exemple l'utilisation d'iode 131 pour le traitement de l'hyperthyroïdie des cancers thyroïdiens, rejeté en grande quantité dans les urines [38].

L'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) est d'ailleurs régulièrement amené à intervenir sur des problèmes liés à la présence de radioactivité artificielle d'origine médicale dans les stations d'épuration (STEP). L'identification et la quantification des radios pharmaceutiques au sein des réseaux d'assainissement et dans les STEP a notamment permis de mettre en évidence la présence d'iode 131 et le technétium 99m, avec des quantités

pouvant dépasser 10 Bq/L dans le cas de l'iode 131 et allant jusqu'à 75 Bq/L dans le cas du technétium 99m [39].

Le dernier paramètre qui caractérise les effluents hospitaliers concerne bien évidemment les rejets médicamenteux qui font partie des polluants dits « émergents » [40]. Bien que les données concernant leur présence et leur diversité dans les effluents aient été pendant longtemps dérisoires, de plus en plus d'études s'y consacrent pour palier ce manque. A l'heure actuelle, les antinéoplasiques et les immuno-modulateurs représentent les postes de dépense les plus importants de l'hôpital en général (25,7 %), puis viennent ensuite les médicaments du sang et des organes hématopoïétiques qui se situent au deuxième rang devant les anti-infectieux. Concernant les médicaments liés aux cancers et à l'infection par le virus du sida, ils représentent une part de plus en plus importante des achats de médicaments par les hôpitaux [41].

Enfin, on peut noter que les milieux hospitaliers utilisent aussi de manière importante des produits destinés aux personnels, tels que l'antifongique itraconazole, l'antibiotique vancomycine, etc [42].

Chapitre III

Les impacts des micropolluants sur les écosystèmes aquatiques

Introduction :

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux notamment sur les pollutions aquatiques ont montré qu'en plus des matières organiques brutes et des nutriments, les activités humaines entraînent le transfert de flux de micropolluants chimiques écotoxiques. Ces derniers comprennent des composés organiques tels que des pesticides, résidus pharmaceutiques, plastifiants, et métaux dissous.

Des études récentes menées aux niveaux mondial, régional ou national indiquent que ces micropolluants, dont beaucoup présentent des effets chroniques et des propriétés perturbatrices du système endocrinien, mettent en péril la santé des écosystèmes aquatiques.

La présence de certains micropolluants dans les milieux aquatiques naturels perturbe les écosystèmes par différents effets toxiques. Certains ont notamment des effets sur la sexualité et la reproduction des poissons, crustacés, coquillages, perturbant l'ensemble de la chaîne alimentaire et entraînant la raréfaction de certaines espèces [43].

I. Des impacts différents selon les polluants :

On peut distinguer trois grandes catégories de micropolluants : organiques, inorganiques et organométalliques.

I. 1. Les micropolluants organiques :

Ils sont composés principalement de carbone et d'hydrogène, et proviennent généralement de synthèses industrielles. Dans cette catégories, on trouve des familles de produits aux utilisations très diverses : pesticides, biocides, médicaments, cosmétiques, agents nettoyants, etc [44].

I. 1. 1. Pesticides :

Malgré les avantages liés à l'utilisation des pesticides pour l'augmentation de rendements des récoltes agricoles, de nombreuses questions se posent quant au devenir de ces composés dans l'environnement et leur toxicité vis-à-vis de l'homme et des écosystèmes. Plusieurs études ont démontré la toxicité et l'écotoxicité de plusieurs substances actives utilisées dans les préparations commerciales de ces produits [45].

Les insecticides agricoles, y compris les molécules de nouvelle génération (comme les pyrétroïdes et les néonicotinoïdes), dépassent très souvent les seuils réglementaires, qui de plus ne semblent pas suffisamment protecteurs [46]. Ces insecticides auraient un impact sur la richesse en macro-invertébrés des rivières, pouvant atteindre 40% de perte des taxons [47].

Les herbicides, agricoles et urbains, semblent également exercer des effets sur des espèces non ciblées telles que les algues [48] avec prédiction d'un impact généralisé lorsque des approches de toxicité des mélanges sont utilisées [49]. Plus de 20 000 pesticides commerciaux sont disponibles dans le monde et leur utilisation n'a pas diminué au cours de la dernière décennie [50].

I. 1. 2. Les produits pharmaceutiques :

De l'utilisation des plantes comme remèdes à certaines maladies jusqu'à l'apparition des médicaments issus des biotechnologies, l'histoire du médicament est largement associée à la recherche scientifique qui tente dès le XVIème siècle de trouver un remède spécifique pour chaque maladie.

Aujourd'hui, et pour les années à venir, c'est vers les biotechnologies que s'orientent les recherches autour des médicaments. En effet, grâce à de nouveaux outils puissants (génie génétique, biologie moléculaire, cellules souches, clonage, etc.), les chercheurs possèdent maintenant une approche génétique des pathologies humaines [51].

I. 1. 3. Les rejets des systèmes d'assainissement :

La première mise en évidence de médicaments dans les eaux remonte à 1976 [52]. Des concentrations de 28,79 µg/L d'acide salicylique et 7,09 µg/L d'acide clofibrigue ont été identifiées dans les eaux de la station d'épuration de «Big Blue River» à Kansas City dans le Missouri. Elles représentaient respectivement 8,64 kg et 2,13 kg de ces médicaments déversés chaque jour dans la rivière. Aussi, nombre de publications ont-elles révélé que toutes les classes thérapeutiques sont concernées par ce problème de leur présence dans l'eau ou dans d'autres compartiments de l'environnement.

Une mauvaise gestion des eaux usées riches en contaminants pharmaceutiques, ajoutée à une mauvaise élimination des médicaments périmés, contribuent à la contamination de l'environnement par les micropolluants pharmaceutiques [53]. Compte tenu de l'importance du

rejet, la détérioration de l'environnement peut être durable. Les molécules des produits pharmaceutiques se retrouvent aujourd'hui dans tous les compartiments de l'environnement.

Les eaux usées urbaines émises dans l'environnement contiennent également de grandes quantités de composés préoccupants, comprenant des résidus pharmaceutiques. Or certains sont potentiellement très toxiques pour les espèces aquatiques, via divers modes d'action [54] et peuvent agir de manière synergique par le biais d'effets de mélange [55].

Il a été démontré par exemple que le rejet continu de médicaments contraceptifs dans l'eau naturelle à des concentrations usuellement retrouvées dans l'environnement peut entraîner l'effondrement total des populations de poissons dans des lacs, en quelques années [56].

Les boues issues des stations d'épuration peuvent également agir comme des concentrateurs de pollutions, tout comme les fumiers d'élevages intensifs contenant des hormones de croissance et des produits pharmaceutiques.

La majorité de ces produits résiduels sont en effet directement appliqués aux terres agricoles, avec un impact potentiel sur les eaux souterraines [57], ainsi que sur la qualité des eaux de surface et la biodiversité avoisinantes [58], voire sur les animaux qui se nourrissent sur ces terres [59].

Non traitées, ou traitées par des techniques d'épuration classiques, les eaux usées rejettent en permanence ces résidus. Plus de 200 de ces molécules ont déjà été mesurées dans des eaux naturelles [60], avec la présence fréquemment signalée de résidus de médicaments anti-inflammatoires, antiépileptiques, contraceptifs ou antibiotiques. Ces contaminations nuisent à l'intégrité de divers organismes dans les rivières [61], ainsi que dans les eaux estuariennes et marines [62].

Outre les rejets d'eaux usées, les médicaments à usage humain peuvent atteindre les milieux aquatiques par d'autres voies.

I. 1. 4. L'industrie pharmaceutique :

L'industrie pharmaceutique peut être une source ponctuelle de contamination des milieux aquatiques bien qu'elle soit soumise au respect des bonnes pratiques de fabrication, des normes ISO 14000 et de la législation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). En effet, des rejets peuvent tout de même se produire, soit

ponctuellement en raison d'accidents de fabrication, soit de manière plus régulière parce que les techniques d'épuration à un coût économique raisonnable ne permettent pas d'obtenir un rendement de 100% d'élimination.

I. 2. Autres contaminations diverses :

Certaines études récentes incitent également fortement à prêter attention à d'autres familles chimiques, tels que les métaux dissous (zinc, cuivre, aluminium) ou les tensioactifs. Leurs profils de risque restent très élevés pour les écosystèmes aquatiques, même dans les pays développés.

I. 3. Les effets locaux du changement climatique :

Les déterminants majeurs de l'impact des micropolluants sont d'abord à mettre au compte de la société industrielle et de consommation. Ses usages quotidiens et professionnels sont largement basés sur le recours à des composés chimiques de synthèse, souvent persistants et transférables dans les eaux et les matrices aquatiques.

Cela étant la composante climatique prise isolément est susceptible de jouer un rôle significatif quant à l'impact des micropolluants sur l'environnement et la santé, à divers égards via les épisodes de sécheresses, de pluies intenses, de modification des usages lorsque l'eau devient une denrée rare.

I. 3. 1. Des situations de sécheresse plus fréquentes et plus sévères :

La capacité des cours d'eau à diluer et épurer les pollutions diminuera. Les conditions de température et d'oxygénation modifiées rendront les organismes aquatiques moins performants pour lutter contre les stress toxiques et la bioaccumulation des contaminants. C'est notamment le cas des organismes ectothermes comme les poissons, dont la chaleur corporelle provient du milieu extérieur. Des études récentes semblent par ailleurs indiquer que

des populations de poissons soumis à des températures élevées présentent une sensibilité accrue à l'exposition par certains composés perturbateurs endocriniens [63].

I. 3. 2. Des pluies intenses :

Les « lessivages » des surfaces urbaines et des sols agricoles ou industriels seront plus efficaces. Ils ruissellent directement vers les milieux aquatiques, occasionnant :

- des transferts de polluants de forte intensité,
- l'érosion accrue des berges et la remobilisation de sédiments de fonds, lieux de stockage de nombreux polluants hydrophobes et métalliques.

La saturation des dispositifs d'assainissement urbains font qu'ils se trouvent temporairement inactivés ou inefficients pour traiter de gros flux d'eaux usées et pluviales. Les micropolluants, habituellement canalisés et partiellement abattus par ces systèmes, rejoignent alors directement les cours d'eaux, et peuvent même, en cas d'inondation, infiltrer des forages ou des réseaux d'eau potable insuffisamment étanches.

I. 3. 3. Raréfaction de la ressource :

Des stratégies de réutilisation des eaux usées pour l'irrigation des cultures, voire pour le recyclage de l'eau potable, se déploieront vraisemblablement plus largement. De nouveaux enjeux s'y greffent, relatifs à l'impact sanitaire potentiel des micropolluants réfractaires aux traitements ou transformés par ceux-ci, ou à l'induction d'anti-biorésistances associées aux rejets aqueux d'antibiotiques ou de biocides.

En résumé, les conditions climatiques aujourd'hui considérées comme extrêmes seront plus fréquentes. Cela se traduira, vis-à-vis des micropolluants, à la fois par :

- une plus grande sensibilité estivale des écosystèmes aquatiques aux pressions toxiques,
- par des ruissellements intenses et polluants plus fréquents,
- par des défis techniques croissants posés aux systèmes de collecte et de traitement des eaux urbaines, agricoles, ou eaux potables,
- et par de nouvelles pratiques sanitaires et professionnelles potentiellement polluantes pour les milieux récepteurs.

Il est donc indispensable d'intégrer ces risques dans les réflexions sur l'adaptation au changement climatique et son atténuation. Si rien n'est fait pour réduire ces apports aux milieux en micropolluants, les changements climatiques risquent très plausiblement de se traduire par :

- une pression supplémentaire sur la biodiversité du fait d'effets écotoxiques exacerbés sur les populations aquatiques,

- une exposition accrue des ressources en eau à ces pollutions,
- et des investissements majorés en infrastructures pour accroître leurs capacités et atteindre une qualité chimique des rejets et ruissellements compatible avec des services éco systémiques pérennes et adaptés aux besoins socio-économiques futurs [64].

Chapitre IV

Procédés

d'élimination des

micropolluants

Introduction :

Les stations d'épuration (STEP) des eaux usées domestiques n'ont pas été conçues pour traiter les micropolluants. Elles sont considérées comme une des principales sources émettrices de micropolluants vers les milieux aquatiques. Aussi, la réglementation incite à la réduction des émissions en application des objectifs fixés par la directive cadre sur l'eau (DCE) [65].

L'approche biologique permet d'éliminer à faible coût une large gamme de polluants des STEP, certains micropolluants sont réfractaires à la biodégradation et toxiques pour les microorganismes. En conséquence, leurs éliminations, par les procédés biologiques classiques, ne sont pas adaptées. Parmi les polluants réfractaires figurent les produits pharmaceutiques. En effet, la plupart des STEP actuelles ne sont pas capables d'éliminer complètement les micropolluants. Une quantité non négligeable de micropolluants, qui comprennent des résidus de médicaments, est alors rejetée en permanence à la sortie des stations de traitements.

Ce chapitre porte sur les stratégies de réduction des micropolluants dans les eaux usées urbaines en amont ou en aval des stations de traitement des eaux usées. Une grande majorité des substances chimiques contenues dans les produits ménagers, les médicaments et les biocides ou qui sont utilisées par l'industrie se retrouvent dans les eaux usées [52]. Les micropolluants émis par les activités agricoles (phytosanitaires à usage agricole) présente une fraction minime dans les eaux usées[64].

I. Les procédés existants :

Seul l'ajout d'une étape de traitement supplémentaire permettra aux STEP communales d'améliorer leur taux d'élimination des micropolluants. Pour conditionner l'eau potable ou traiter les eaux de baignade et les eaux industrielles, on utilise déjà divers procédés afin d'éliminer des substances ou des groupes de substances spécifiques.

- **Adsorption:** On met les eaux usées en contact avec un adsorbant doté d'une grande superficie, soit en leur ajoutant une dose d'adsorbant soit en les faisant passer dans un récipient rempli d'adsorbant. Les composants s'agglutinent à la surface de l'adsorbant. Celui-ci se saturant progressivement, il doit être périodiquement enlevé et subir un traitement. Le charbon actif est l'adsorbant à privilégier pour éliminer les composés traces.

- **Activité biologique:** Dans les procédés biologiques, les composants des eaux usées sont dégradés ou transformés par des micro-organismes. On ne connaît en général pas les produits de ce processus. Les STEP actuelles possédant déjà une étape de traitement biologique et ne parvenant pas à éliminer suffisamment les micropolluants, les procédés biologiques ne conviennent pas, ou alors uniquement dans des cas particuliers, pour assurer une élimination supplémentaire de ces substances.
- **Oxydation:** Les substances sont oxydées, c'est-à-dire que leur structure chimique est modifiée par l'adjonction d'un oxydant dans le flux d'eaux usées. En principe, les substances initiales perdent ainsi leurs propriétés actives, mais se transforment le plus souvent en un produit que l'on ne connaît pas. Les procédés par oxydation comprennent l'ozonation, la chloration, l'oxydation avancée (AOP), la photolyse et le recours au ferrate.
- **Action physique:** Les procédés physiques comprennent avant tout la filtration (nanofiltration et osmose inverse). Les eaux usées traversent un filtre qui retient les composants en raison de leur taille (ou de leur charge électrique). Le rétentat, dans lequel les polluants sont concentrés, doit subir un traitement ultérieur.

Il est également possible de combiner les divers procédés. Le tableau 1 donne un aperçu des procédés envisageables, de leur mode d'action et de leurs applications.

Procédé	Application (exemples)	Objectif-effet escompté
Procédé par adsorption		
Précipitation/floculation	Traitement des eaux usées urbaines	Précipitation du phosphore
Charbon actif en grains (CAG)	Production d'eau potable	Rétention de composés persistants
Charbon actif en poudre(CAP)	Industrie	Décoloration, rétention de composés persistants
Echangeur d'ions	Industrie,ménages	Adoucissement de l'eau

Nanofloculation	A l'étude	Floculation
Procédés biologiques		
Lagunage	Traitement des eaux usées urbaines	Épuration des eaux usées
Système d'épuration végétale	Traitement des eaux usées urbaines	Épuration des eaux usées
Filtre à sable	Traitement des eaux usées urbaines	Rétention des matières solides
Procédés par oxydation		
Systèmes d'oxydation avancée (advanced oxydation processes AOP)	Eau potable, eaux industrielles	Dégradation de composés persistants
Chlore, dioxyde de chlore	Production d'eau potable et conditionnement d'eau de baignade	Désinfection
Fenate	A l'étude	
Ozane	Eau potable et eau de baignade, industrie	Désinfection Dégradation des micropolluants
Photolyse	Production d'eau potable	Désinfection
Procédés physiques et autres		
Nanofiltration/osmose inverse (membranes denses)	Production d'eau potable	Dessalement d'eau de mer
Ultrasons	A l'étude	

Tableau 1 : Procédés supplémentaires envisageables pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines.

Ces procédés ont (presque) tous été mis à l'épreuve pour éliminer les micropolluants des eaux usées urbaines. Certains ont déjà été testés à grande échelle en Suisse et à l'étranger, tandis que d'autres n'ont fait l'objet de tests qu'en laboratoire ou été utilisés à grande échelle dans l'industrie [66].

II. L'amélioration des procédés de traitements : Action aval

Les possibilités d'amélioration du traitement résident soit dans la modification de certains points de conception des filières de traitement actuelles (dimensionnement, exploitation), soit dans la mise en place de procédés tertiaires avancés. Si différentes solutions technologiques commencent à se dessiner pour traiter les micropolluants, les conditions opératoires les plus appropriées ne sont pas encore maîtrisées.

Les objectifs sont les suivants :

- ✓ les micropolluants partiellement biodégradables dans les traitements conventionnels (boue activée aération prolongée). Le travail porte sur l'acquisition de connaissances sur les processus de dégradation biologiques et de sorption sur les boues liquides. Il couple des mesures en conditions maîtrisées sur une STEP, à la modélisation dynamique en vue d'une optimisation par simulations prédictives ;
- ✓ les micropolluants réfractaires aux traitements conventionnels (par exemple, certains pesticides et médicaments hydrophiles). Différentes voies de traitement tertiaire sont étudiées utilisant le processus d'oxydation (ozonation, peroxyde, ultra-violet), d'adsorption sur matériaux spécifiques (charbon actif, argile expansée, zéolite) ou de photo/phyto-dégradation ;
- ✓ les micropolluants hydrophobes transférés dans les boues. Les performances de plusieurs procédés de traitement des boues avant valorisation agricole sont étudiées (i.e. digestion anaérobie, compostage/séchage thermique ou solaire en serre, lits de séchage plantés) [67].

III. Procédés d'élimination des micropolluants pharmaceutiques

Plusieurs techniques sont utilisées pour le traitement des effluents chargés en micropolluants pharmaceutiques. Un bref aperçu est donné dans cette partie sur ces différents procédés à savoir :

- ✓ Les méthodes biologiques telles que : le système de boues activées, la biofiltration et le traitement par filtres plantés de roseaux ;
- ✓ Les méthodes physico-chimiques dont la filtration membranaire et l'adsorption ;

Les méthodes chimiques qui comptent les procédés d'oxydations [68].

IV. Procédés d'élimination des pesticides :

Les pesticides présentent une menace potentielle pour les ressources en eau. Ainsi, cette pollution affecte en priorité les eaux de surface, où l'on observe une contamination sur l'ensemble des cours d'eau. Afin de protéger l'environnement aquatique, le traitement des eaux usées urbaines, industrielles et agricoles est indispensable. Le traitement peut être réalisé à l'aide de différents procédés qui sont actuellement bien maîtrisés à l'échelle du laboratoire et appliqués à grande échelle incluant les traitements physico-chimiques et biologiques[69].

- Procédés physiques et physico-chimiques.
- Procédés biologiques.
- Procédé thermique (incinération)
- Procédés d'oxydation avancée.

V. La phyto-épuration :

V. 1. La phyto-épuration naturelle

Les différentes contributions des macrophytes flottants à l'élimination des charges polluantes sont les suivantes :

- Le système racinaire des macrophytes flottants constitue un habitat propice aux micro-organismes aérobies et/ou facultatifs responsables de la dégradation des charges polluantes. Cette flore bactérienne importante bénéficie du transport de l'oxygène photosynthétique des parties aériennes des plantes vers les racines. De plus, ces plantes libèrent des métabolites qui sont utilisés comme sources de nutriments par ces micro-organismes [70].
- La grande vitesse de reproduction des macrophytes assure une biomasse assez importante et la pérennité du processus de dégradation de la matière organique. Dans les stations de traitement à macrophytes flottants, la récolte régulière des plantes aquatiques permet d'éliminer les matières en suspension piégées dans les racines, les sels minéraux assimilés et les excédents d'organismes décomposeurs. Cette récolte favorise un rendement épuratoire élevé [71].

V. 1. 1. Processus d'élimination du carbone par les macrophytes :

Le carbone est un des éléments biogènes majeurs. Il se retrouve dans l'eau sous la forme de carbone organique (matière morte, humus, sédiments organiques) et sous forme minérale (carbonate, bicarbonate, le dioxyde de carbone libre) [72].

Le carbone organique, principal constituant de la biomasse est généralement la pollution principale à éliminer [73]. La dégradation et le recyclage de la matière organique dans la plupart

des habitats sont effectués par les bactéries à la fois dans des conditions aérobies et anaérobies. La gamme la plus grande de transformations du carbone se passe en conditions aérobies [74].

L'élimination de la matière organique dans les bassins à macrophytes flottants est basée sur une relation symbiotique plantes-bactéries, dans laquelle les bactéries utilisent l'oxygène fourni au milieu par les plantes pendant la photosynthèse pour dégrader le carbone organique [75]. L'effet sur la dégradation de la matière organique passe principalement par la création d'une zone de rhizome servant comme support pour le biofilm pouvant dégrader [76]. Cette zone appelée rhizosphère, est le siège de la dégradation aérobie. Elle est la première couche rencontrée dans les bassins à macrophytes flottants. Les microorganismes y vivant consomment l'oxygène fournit par les macrophytes pour leur croissance.

La DCO et la DBO₅ sont les principaux paramètres permettant d'apprécier la pollution organique. D'autres paramètres tels que le carbone Organique Dissous (COD), le Carbone Organique Total (COT), le Carbone Organique Particulaire (COP), le Carbone Inorganique Total (CIT) permettent aussi d'apprécier la pollution organique.

La figure 5 présente les différents processus de transformation et d'élimination du carbone.

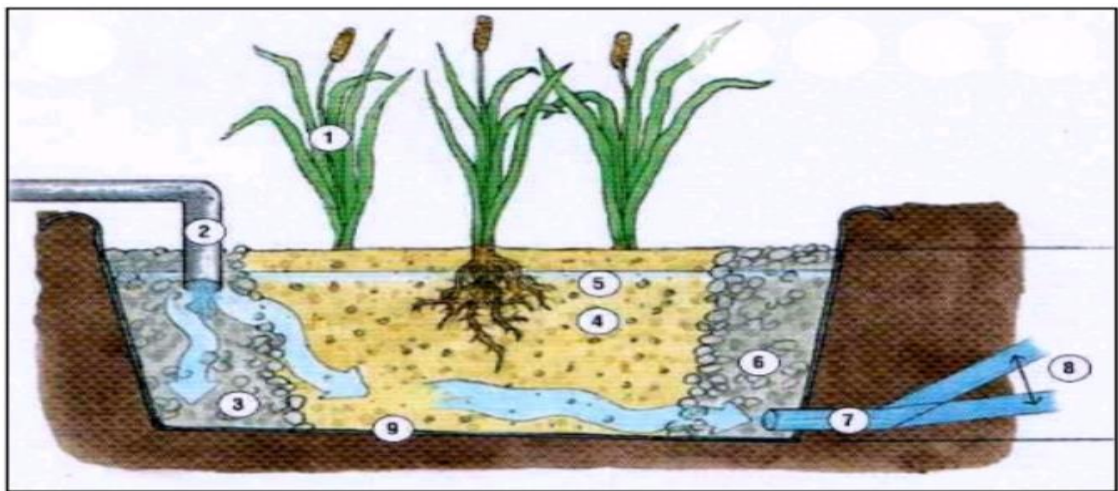


Figure 5 : Principaux processus de transformation et d'élimination du carbone dans les systèmes d'épuration des eaux [77].

Légende traduite :

- 1. Plantes tolérantes aux substances phytosanitaires**
- 2. Regard de collecte d'eaux usées**
- 3. Dégrilleur fin**
- 4. Bassin d'eau libre avec bactéries spécifiques**
- 5. Filtre à écoulement horizontale**
- 6. Substrats de matériaux drainants spécifiques**
- 7. Regard sans issue.**

V. 1. 2. Processus d'élimination de l'azote par les macrophytes :

L'azote est présent dans les systèmes naturels d'épuration des eaux usées sous les formes organique et inorganique. L'azote organique est présente sous forme dissoute et particulaire, tandis que la forme inorganique est présente sous forme dissoute [78]. Les différentes réactions qui conduisent à l'élimination de l'azote dans un milieu aquatique sont la sédimentation, l'ammonification (transformation de l'azote organique en ammonium), la nitrification (oxydation de l'ammonium en nitrate), la volatilisation (transformation de l'ammonium en ammoniac) et la dénitrification (réduction des nitrates en azote gazeux, N₂) [75].

La présence des macrophytes dans les bassins favorise l'élimination de l'azote, soit de façon directe par assimilation par les macrophytes ou de façon indirecte par les microorganismes dont le développement est accru par la présence de ces macrophytes [79].

V. 1. 3. Processus d'élimination du phosphore par les macrophytes :

Composant essentiel du vivant (nucléotides, ADN, phospholipides des membranes cellulaires, enzymes), le phosphore joue un rôle clé dans le transfert d'énergie (ATP) [80]. La croissance des macrophytes dépend donc de sa disponibilité. Dans l'eau le phosphore est sous forme d'ion phosphate correspondant à l'équilibre de dissociation de l'acide orthophosphorique.

De nombreux processus tels que l'absorption du phosphore par les plantes, la minéralisation de la biomasse végétale par les microbes, la sédimentation, la précipitation et autres, régulent l'élimination du phosphore dans les stations d'épuration naturelle des eaux

usées [81]. Le phosphore présent dans les systèmes naturels est très souvent associé aux composés organiques sous forme d'ester (C-O-P).

Cette forme n'est biodisponible, qu'après hydrolyse enzymatique en présence d'oxygène. L'élimination du phosphore sera donc d'autant plus rapide, que le milieu sera riche en oxygène, que la minéralisation sera rapide ou que le substrat sera facilement dégradable [82].

V. 1. 4. Processus d'élimination des germes pathogènes :

L'élimination des germes pathogènes présents dans les eaux usées se fait généralement à travers des mécanismes complexes faisant intervenir des interactions entre les composantes physico-chimiques et biologiques présentes dans la lagune [83].

Les principaux processus d'élimination sont :

- La photo-inhibition dont le moteur est le rayonnement solaire. Elle est régie par les mécanismes phytobiologiques (ultraviolet, biocides) et phototoxiques (couplage entre le rayonnement et les substances chimiques présentes dans l'eau).
- Le broutage, phénomène de compétition/prédation par rapport aux bactéries.
- La sédimentation de bactéries liées aux particules [84].
- Les mécanismes réactionnels conduisant à l'abattement des différentes formes de pollutions des bassins à macrophytes flottants sont complexes, et leur déroulement est influencé par les paramètres physico-chimiques du milieu.

Cependant, on peut retenir que :

- L'abattement de la pollution carbonée est contrôlé par la fixation par les racines, et la décantation de MES, ainsi que par l'activité bactérienne.
- La pollution azotée est éliminée par le prélèvement des plantes, et les réactions de nitrification et de dénitrification.
- L'élimination du phosphore est principalement due au prélèvement des plantes, qui consomment le phosphore pour leur croissance.
- Les germes pathogènes sont éliminés par la photo-inhibition, le broutage, la sédimentation de bactéries liées aux particules.

V. 2. Phyto-épuration artificielle

La purification artificielle des eaux usées au niveau des stations d'épuration, à travers les pays utilisateurs de ce mode, a montré sa complexité et ses exigences matérielles et humaine (haute technicité) ; de ce fait d'autres moyens plus simples et efficaces ont été mis en place pour l'épuration des eaux. Parmi eux un mode purement naturelle où les agents actifs dans le processus sont des Macrophytes (plantes supérieures), pour cette technique l'intervention de l'homme est très limitée et l'installation n'est pas trop coûteuse [85].

La phyto-épuration comprend l'épuration par les filières plantées de macrophytes, qui favorisent la biodiversité des espèces végétales plantées dans les bassins. Une station d'épuration par filières plantées de macrophytes fonctionne comme un marais naturel. Dans ce cas, les eaux brutes (eaux grises et eaux vannes) passent à travers des bassins remplis d'un substrat minéral (sable, gravier, pouzzolane selon les cas) où sont plantés différents végétaux sub-aquatiques : roseaux, massettes, joncs, iris... (Espèces locales de préférence car elles sont adaptées au climat). Ces plantes, et plus spécifiquement les roseaux (*Phragmites Communis* ou *Phragmites Australis*) ont la particularité de former un tissu racinaire et un réseau de galeries qui drainent, apportent de l'oxygène et servent de support aux bactéries aérobies. Ces bactéries, ainsi que la macrofaune du sol (lombrics...), ont un rôle de dégradation et de minéralisation de la matière organique, qui devient dès lors assimilable par les plantes. Ainsi le système ne produit pas de boues, lesquelles sont compostées et forment un humus sur place [86].

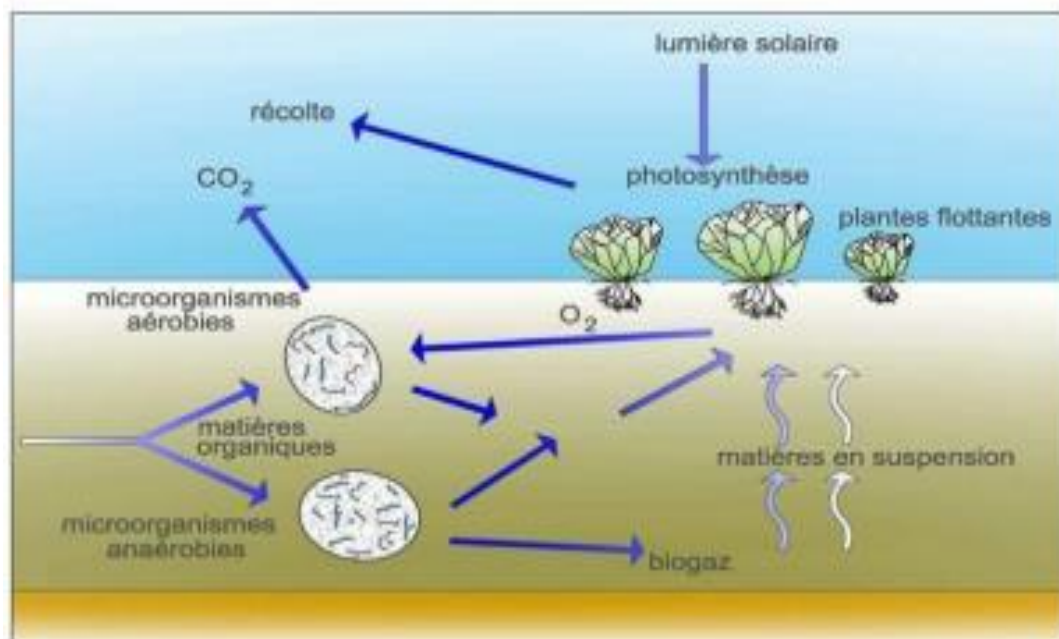


Figure 6: Principes de l'épuration dans un bassin à macrophytes flottants [79]

V. 2. 1. Types de filtre planté :

Les filtres plantés peuvent être soit à écoulement vertical, soit à écoulement horizontal. La combinaison en série des deux est largement répandue (systèmes hybrides), elle permet d'améliorer la qualité de l'épuration ainsi réalisée. Ils diffèrent par leur mode d'alimentation, par le sens de l'écoulement de l'eau et par les conditions aérobies de traitement.

V. 2. 2. Phyto-épuration en Algérie :

En Algérie, cette technique d'épuration, par filtres plantés, a fait son apparition que tardivement. En effet, ce n'est qu'en 2007 que le ministère des ressources en eau a procédé à la mise en place d'un système expérimental d'épuration des eaux usées basé sur un procédé naturel.

Ce pilote expérimental, destiné pour les petites agglomérations de moins de 2000 habitants est le premier du genre en Algérie, réalisé dans la région de Témacine servira de test pour une éventuelle vulgarisation à travers les zones et les hameaux enclavés de notre pays et qui sont dépourvus de système d'épuration.

Les premiers résultats obtenus à travers ce pilote sont concluantes vis à vis des objectifs tracés relatifs aux rendements épuratoires des éléments responsables de la pollution. Ce travail constituera avant tout une contribution à la compréhension du système et mécanismes d'épuration par lits plantés particulièrement en zones arides [87].

Chapitre V

Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

Introduction

La présence de micropolluants dans les eaux n'est pas récente, cependant la connaissance de leur présence et de leurs impacts sur la santé humaine ou sur les écosystèmes ont progressé. Aujourd'hui se pose donc la question de leur gestion et de la réduction de leurs rejets vers les milieux aquatiques.

Il existe deux grands types de mesures pour réduire la présence de micropolluants dans les eaux :

- Les mesures de réduction à la source
- Les mesures de traitement des eaux

Ces mesures peuvent être appliquées via des réglementations, des outils économiques (taxes ou subventions), la mise en place de campagnes d'informations auprès des utilisateurs ou via le développement des connaissances [88]. Aujourd'hui la majorité des systèmes de traitement des eaux usées n'abattent que très peu les micropolluants. L'ajout de systèmes de traitement des micropolluants de type ozonation, charbon actif en grain ou en poudre, nano-filtration dans les stations de traitement des eaux urbaines sont des solutions coûteuses.

La Suisse est un des premiers pays à avoir développé une stratégie de réduction des micropolluants dans les eaux. En 2014, le parlement Suisse a modifié la loi sur la protection des eaux créant un fond de financement pour permettre le développement de traitements supplémentaires dans les STEP pour abattre les micropolluants. Des critères pour les STEP ont été mis en place (localisation, taille...) pour équiper en priorité les stations de traitement de façon à optimiser l'impact sur la qualité de l'eau.

Aucun pays ne dispose actuellement d'une stratégie claire et définitive pour la gestion des micropolluants mais certains sont en train d'en définir une, comme l'Allemagne et le Royaume-Uni [89].

I. Les moyens de réduire les micropolluants organiques :

Le stockage de l'urine pendant au moins un mois fait partie des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé pour abattre les pathogènes, en l'absence d'autre forme de traitement [90]. Ce stockage participe de facto à l'abattement des micropolluants organiques. La réduction des concentrations des résidus pharmaceutiques au cours du stockage varie en fonction des molécules (très peu d'impact pour certaines molécules, plus de 90% de réduction

Chapitre V Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

pour d'autres). Les urines humaines peuvent aussi subir un traitement spécifique avant utilisation au champ, qui peut permettre de réduire davantage les concentrations de certains micropolluants organiques. Par exemple, l'ajout de charbon actif en poudre permet de réduire entre 90 et 99% la concentration d'une dizaine de médicaments[91].

II. Les recommandations en Algérie :

L'Algérie dispose d'un littoral d'environ 1550 km de la frontière Algero-tunisienne à l'Est à la frontière Algéro-marocaine à l'Ouest. Ce littoral est soumis à des pressions anthropiques qui ont conduit à la dégradation des écosystèmes littoraux.

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été réalisés afin d'évaluer l'état de la pollution marine le long du littoral algérien (Figure 7).

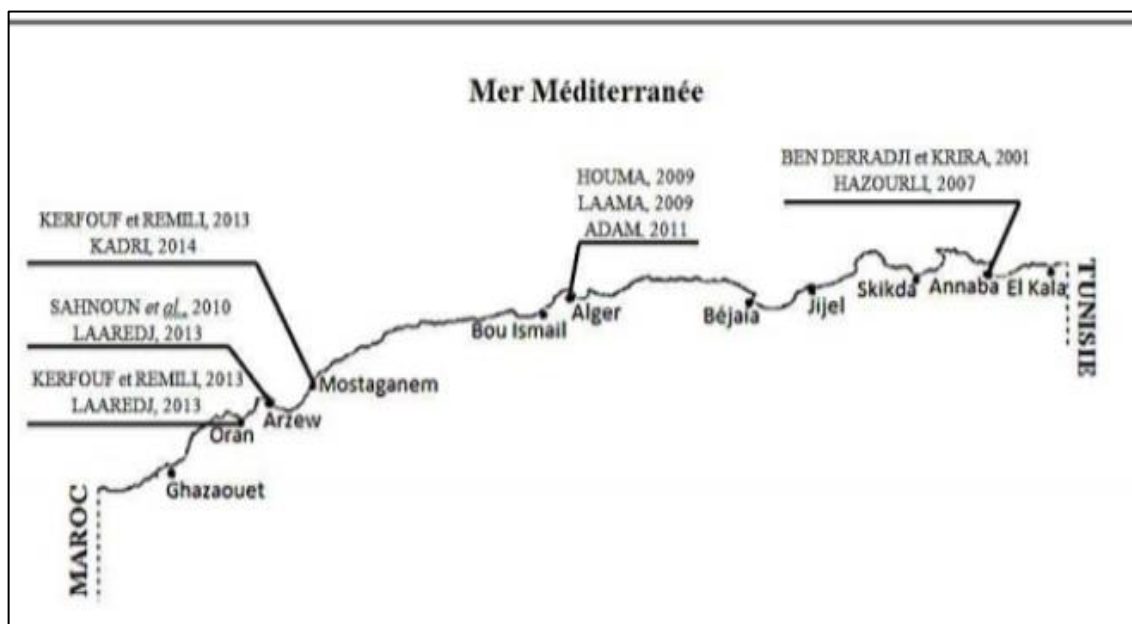


Figure 7: Synthèse des travaux relatifs aux rejets d'eaux usées sur la côte algérienne entre 2001 et 2014.

ANNABA :

Annaba et sa région sont considérées comme l'espace le plus industrialisé dans l'Est algérien. Les problèmes liés à la pollution s'aggravent de plus en plus. Les eaux de surface sont polluées par les déversements industriels non traités [92].

ALGER :

La ville d'Alger est très urbanisée et la majorité des unités sont concentrées dans les zones industrielles, le port d'Alger, Rouiba et Réghaia. Cette zone est principalement contaminée par différentes sources de pollution et soumise à plusieurs types de rejets urbains, industriels et pétroliers [93].

Selon les résultats obtenus par [94], concernant l'analyse des échantillons d'eau de mer prélevés au niveau du port d'Alger, signifient des valeurs élevées en matières en suspension, par contre les concentrations de la DBO₅ ne dépassent pas les normes.

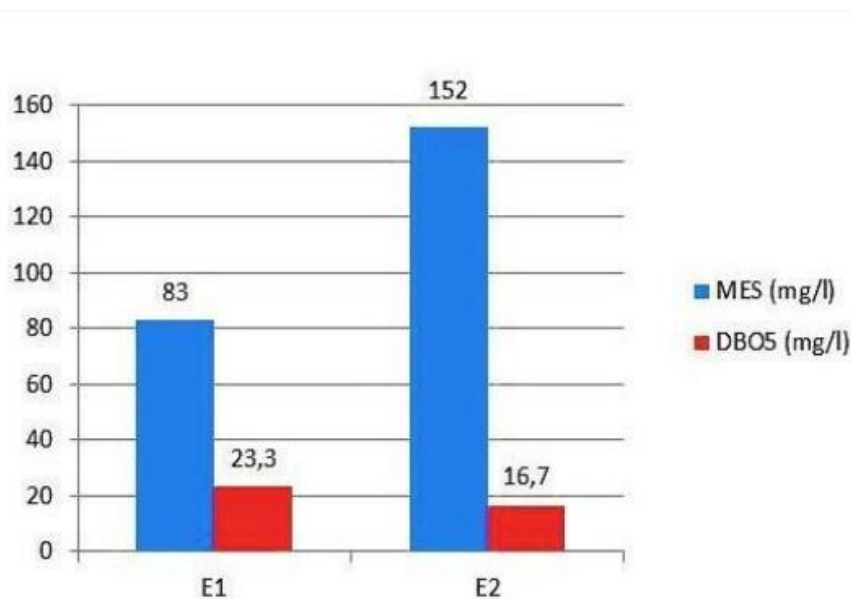


Figure 8: Pollution marine au niveau du Port d'Alger[94].

ORAN ET MOSTAGANEM :

Plusieurs travaux sont réalisés dans le but d'évaluer du degré de la pollution marine par les eaux usées sur le long du littoral oranais et mostaganémois [95] Ces travaux ont confirmé que le littoral oranais et mostaganémois est pollué par les eaux usées rejetées en milieu marin sans aucun traitement ce qui influe sur la qualité des eaux de baignade et sur la biodiversité marine et par conséquent, sur la santé humaine.

Les analyses effectuées sur des échantillons des eaux usées industrielles rejetés par la zone industrielle d'Arzew ont révélé des concentrations élevées des paramètres indicateurs de pollution notamment la DBO₅ et la DCO qui sont très loin des normes algériennes[96].

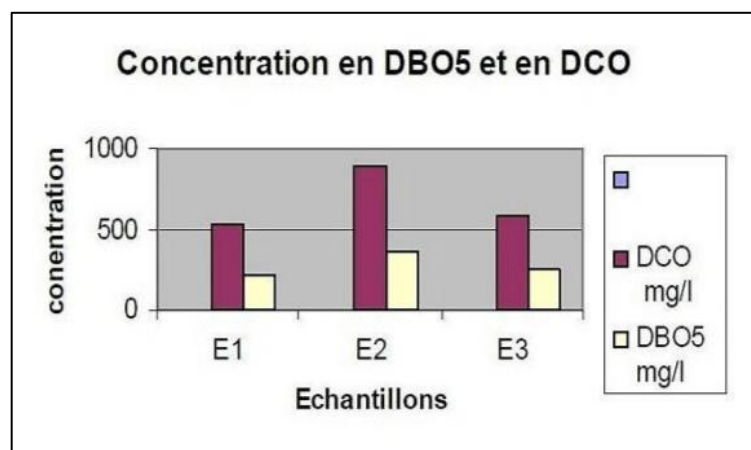


Figure 9 : Concentrations de la DBO₅ et la DCO[96]

A l'état actuel, les textes législatifs Algériens relatifs à l'environnement portent sur la réglementation [97]:

- Des activités telles que la chasse, la navigation maritime, l'occupation des sols, les industries et les installations classées, le transport.
- Des pollutions et des nuisances diverses : déchets, substances chimiques nocives ou dangereuses, fumées, odeurs, bruits et rayonnements ionisants.

En somme, cette législation touche aux facteurs susceptibles de porter atteinte aux éléments naturels tels que le sol, le sous-sol, les ressources en mer, la mer, l'air ainsi qu'aux sites naturels et historiques (littoral, frets, faune et flore, réserves et parcs naturels) [98].

Le texte de base régissant la protection de l'environnement dans son ensemble est constitué par la loi cadre n° 83-03 du 5/2/1983. Cette loi énonce une série de principes généraux et de règles générales qui fixent des impératifs de protection de l'environnement. Elle impose d'abord à l'administration le respect de principes généraux sous-tendus par l'exigence d'une prise en compte de la dimension environnementale dans la politique économique en vue d'un développement plus respectueux de l'environnement. Elle pose ensuite une série de règles à portée générale telles que la protection de la nature, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien de l'équilibre biologique et la conservation des ressources naturelles contre toutes sources de dégradation [98].

La loi n° 83-03, les textes législatifs promulgués peuvent être regroupés autour de trois thèmes :

- ✓ La protection des milieux récepteurs ;

Chapitre V Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

- ✓ La protection du milieu naturel ;
- ✓ La lutte contre les pollutions et les nuisances.

Paramètre	Valeur maximale(mg/l)	Paramètre	Valeur maximale (mg/l)
DBO5	40	Plomb	1
DCO	120	Cuivre	3
Phosphate	02	Zinc	5
Cyanures	0.1	Huiles et graisses	20
Aluminium	5	Hydrocarbures	20
Cadmium	0.2	Phénols	0.5
Chrome 6	0.1	Solvants organiques	20
Manganèse	1	Chlore actif	1.0
Mercuré	0.01	PCB	0.001
Nickel	5	Pétergents	2

Tableau 2 : Valeurs limites de certains paramètres des rejets industriels (Décret exécutif n° 93-160 du Juillet 1993) [99]

III. Les recommandations dans le monde

Allemagne :

Actuellement l'Allemagne ne dispose pas de stratégie nationale concernant la gestion des micropolluants urbains mais d'une stratégie Lander par Lander. Le ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature, de la construction et de la sécurité nucléaire (BMUB) est actuellement en train de développer une stratégie à l'échelle nationale pour lutter contre la présence de substances à l'état de traces et d'origine anthropique dans les eaux pouvant

Chapitre V Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

avoir des effets néfastes sur les écosystèmes ou sur la production d'eau potable. Le document « Stratégie Fédérale sur les éléments traces » présente 14 actions qui permettraient de réduire la présence de micropolluants dans les eaux [100].

Ces propositions font suite à des discussions entre divers acteurs : industriels, gestionnaires de l'eau et société civile, qui ont eu lieu en 2017. Ce document met en avant l'importance de la gestion du problème des micropolluants de manière globale avec des mesures en amont et en aval des stations de traitement des eaux usées ; de la production industrielle au traitement des eaux. Il souligne également la nécessité de mettre en place une politique globale au niveau national en matière de traitement des micropolluants dans les stations de traitement. Il insiste enfin sur l'importance de poursuivre les travaux de recherches pour approfondir les connaissances sur les substances à l'état de trace, notamment sur leur présence (méthodes de quantification) et leurs impacts. Ce document de réflexion accorde également une importance forte à l'application du principe de précaution.

Le document « Measures to reduce micropollutant emissions to water » de l'Agence Fédérale de l'Environnement [101] mentionnait que la stratégie de gestion des micropolluants à l'échelle nationale, devrait être une combinaison de trois types de mesures :

- les mesures de réduction à la source et d'information,
- les mesures de type décentralisées,
- et enfin les mesures de traitement des eaux usées au niveau des STEP.

Les recommandations fournies par l'agence pour l'environnement Allemande en 2018 pour réduire la présence de micropolluants dans les eaux reprenaient cette articulation[102].

Les ETATS-UNIS :

Aux Etats-Unis le « Clean Water Act » régit au niveau fédéral la qualité de l'eau avec comme objectif de « maintenir ou de restaurer le bon état chimique, physique et biologique de l'eau afin que les eaux de surface puissent permettre les activités de pêche ou de baignade. Le programme « National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES)» [103] contrôle et limite les émissions directes vers les cours d'eau par le biais d'autorisations.

Les eaux usées urbaines (POWT)[104] : dispositifs et systèmes utilisés pour le stockage, le traitement, le recyclage et la valorisation des eaux usées municipales ou des déchets industriels de nature liquide, les eaux usées industrielles ainsi que les eaux de ruissellement sont

Chapitre V Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

concernées par ce programme. Des limites d'émissions pour chaque source d'émission sont établies suivant des critères environnementaux et sanitaires. Une liste de polluants toxiques prioritaires a été définie par le CWA dès 1972, elle comprend 129 polluants dont des métaux et composés chimiques organiques anthropiques. Parmi cette liste certains polluants peuvent être considérés comme des micropolluants, mais ce n'est pas selon ce critère qu'elle a été établie.

Au sein de ce programme (NPDES) les émissions indirectes vers les stations de traitement sont régies par le programme concernant le prétraitement «pretreatment program» [105]. Les objectifs de ce programme sont de diminuer la présence de polluants pouvant altérer le fonctionnement des stations de traitement ainsi que les émissions des substances pour lesquels l'efficacité des traitements est très faible. Ce programme n'utilise pas le terme « micropolluants » néanmoins il mentionne des polluants qui passeraient au travers du traitement des eaux usées, ce qui est le cas pour une grande partie des micropolluants.

La base de données "Discharge Monitoring Report (DMR) Pollutant Loading Tool" référence les quantités de polluants déversées dans les milieux aquatiques ainsi que leur localisation [106]. Cette base de données s'appuie notamment sur le NPDES et le « Permit Compliance System » PCS.

Néanmoins il semble y avoir un intérêt pour les Contaminants Emergents (CE) appelés « Contaminants of Emerging Concerns » (CECs) dans les documents Etats unis consultés. Les contaminants émergents sont définis comme des substances qui ne sont pas soumises à des réglementations environnementales au niveau des Etats-Unis (voire au niveau mondial) mais méritent que l'on s'y intéresse.

L'institut national de surveillance géologique « United States Geological Survey » les définit comme : tout produit chimique synthétique ou naturel ou tout micro-organisme qui n'est pas actuellement surveillé dans l'environnement, mais qui est susceptible de pénétrer dans l'environnement et de causer des dommages écologiques et environnementaux connus ou soupçonnés.

LE MAROC :

Plusieurs travaux sont réalisés afin d'évaluer l'impact des rejets des eaux usées urbaines et industrielles sur le littoral marocain soit du côté méditerranéen ou du côté atlantique [107].

Les résultats obtenus par concernant l'analyse des rejets urbains déversés dans la rive atlantique marocain, les teneurs des paramètres indicateurs de pollution sont très élevés et loin d'être négligeables [108].

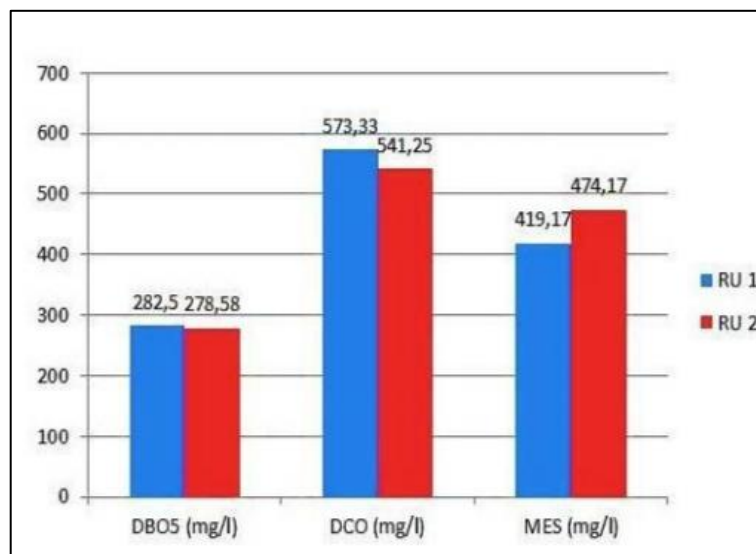


Figure 10 : Concentrations des polluants au Maroc.[109]

IV. Aperçu sur la réglementation Européenne

IV. 1. Nouvelles substances, nouveaux outils : préparé l'avenir

Les micropolluants vont constituer le sujet qui fâche dans les prochaines années. Nous rencontrons désormais moins de problèmes sur les métaux lourds et le phosphore. De plus en plus, la réutilisation de l'eau (re-use) est une préoccupation majeure.

En France et dans les eaux de surface, il porte désormais sur 53 substances. Au niveau européen, plus de 50 % des substances candidates ont été mises au placard lors des activités de sélection au niveau communautaire de la session précédente, généralement en raison d'un manque des informations sur ses effets ou des données d'exposition suffisantes pour être significatives.

En revanche, à ce jour, plus de 100 000 molécules différentes ont été produites à l'échelle industrielle dans le monde. Aujourd'hui, l'Europe produit 30 % des produits chimiques mondiaux et plus de 3800 nouvelles substances ont été produites [110].

Les substances chimiques nouvellement synthétisées, notamment celles dont le remplacement de substances interdites et/ou dont les effets sur l'environnement ou la santé font

l'objet de nouvelles préoccupations (nanoparticules, résidus de médicaments, composés perfluorés, biocides chlorés, etc.)

En France, au cours des cinq dernières années, la prise de conscience croissante des risques liés à ces diverses substances pour la santé humaine et les milieux aquatiques s'est traduite par une activité de recherche soutenue. Un comité d'experts national a été constitué pour identifier, au moyen d'une méthode itérative, les substances émergentes sur lesquelles doit se porter l'effort en priorité. Des campagnes exceptionnelles ont été menées pour rechercher, pour la première fois à aussi large échelle, des dizaines de substances nouvelles dans les eaux continentales.

En parallèle, une palette d'outils biologiques novateurs, bio-marqueurs et bio-essais, sont développés et mis en œuvre pour évaluer les effets des substances, isolément ou en mélange, sur les organismes et les écosystèmes [111].

IV. 2. Identifier et surveiller les substances à enjeux :

Pour un contaminant donné, l'acquisition de connaissances scientifiques sur son comportement et ses effets potentiels dans l'environnement est une condition préalable à la mise en place d'une réglementation, pouvant déboucher sur des restrictions d'émissions et une stratégie de surveillance [112].

À l'échelle européenne, le réseau NORMAN [113] assure depuis 2005 une mission de veille et de priorisation sur les contaminants chimiques. Regroupant 46 laboratoires de référence issus de 19 pays, il assure une mission d'échange d'informations par la mise en place de bases de connaissances partagées ou l'organisation d'ateliers, et veille à l'harmonisation des données et des méthodes utilisées[114].

IV. 3. Des outils biologiques novateurs pour la surveillance et le diagnostic :

Au-delà de la quantification des nouvelles substances dans les milieux aquatiques, le diagnostic du risque environnemental qu'elles induisent constitue un défi scientifique complexe. La contamination chimique, aiguë ou chronique, est susceptible d'affecter différentes fonctions biologiques des organismes exposés : effets toxiques sur la reproduction, sur la transmission de l'influx nerveux, perturbations endocriniennes, effets mutagènes ou immunotoxiques. Il apparaît essentiel de mieux appréhender les effets toxiques des mélanges de contaminants, ceux-ci ne sont que peu pris en compte à l'heure actuelle par la

réglementation, alors que de nombreuses études montrent l'impact des cocktails de substances interagissant entre elles, même à de très faibles concentrations individuelles [115].

La nécessité de sortir d'une évaluation des risques «substance par substance» est désormais largement admise par la communauté scientifique. Dans cette optique, différents outils biologiques (Figure 11) développés ces vingt dernières années, peuvent constituer des options pertinentes pour contribuer à un diagnostic intégré de la qualité chimique des milieux aquatiques :

- surveillance in situ des contaminants dans les tissus d'organismes (sélectionnés pour leur caractère bio-accumulateur) ;
- utilisation de bio-marqueurs (réponses biologiques mesurables à l'échelle infra-populationnelle pour mettre en évidence l'exposition des organismes à des polluants présents dans l'environnement et, dans certains cas, d'en caractériser les effets) ou de bio-essais (étude sur des organismes vivants pour mesurer l'effet de substances ou de groupes de substances) ;
- mise en œuvre d'indicateurs écologiques (traduisant les effets des contaminants à l'échelle de communautés vivantes).

Ces outils intégratifs, qui peuvent pâtir d'une interprétation encore peu standardisée, constituent des approches pertinentes en complément des analyses chimiques traditionnelles [111].

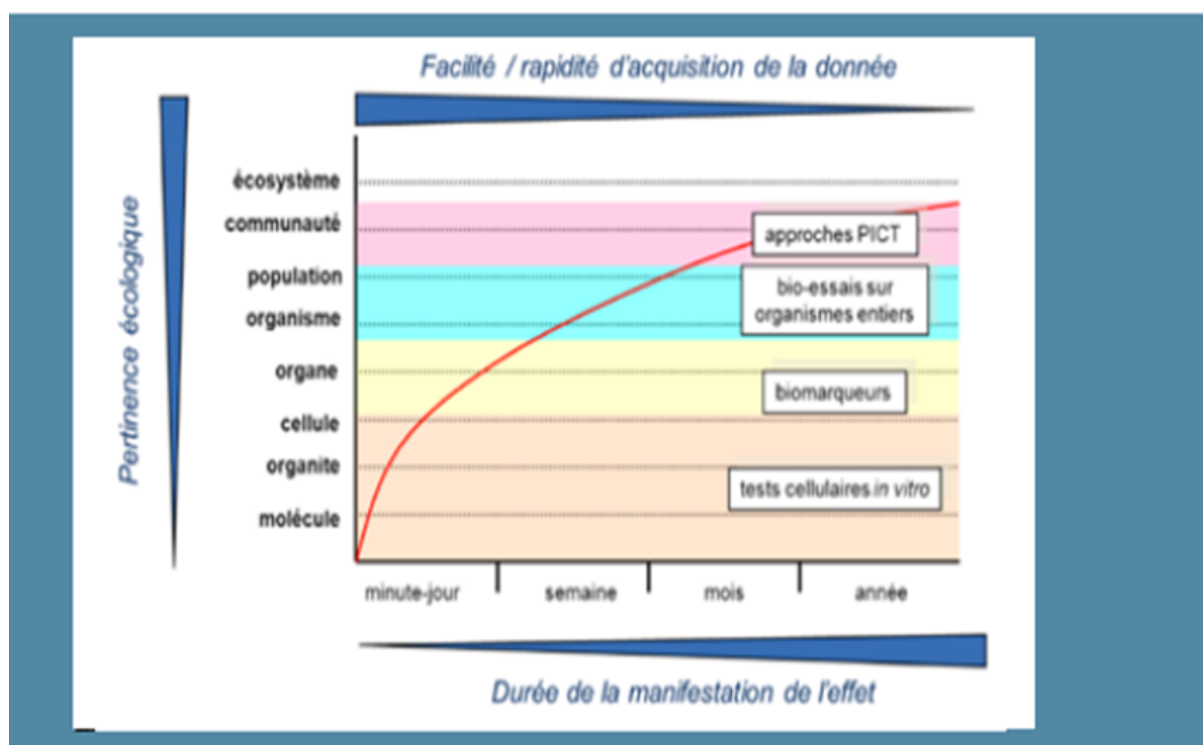


Figure 11: Typologie d'outils biologiques disponibles pour le diagnostic de la contamination chimique des milieux aquatiques[111].

Utilisées de longue date pour des recherches ciblées, de telles approches apporteront, demain, des contributions précieuses au diagnostic de l'état des eaux :

- identification de substances responsables des effets observés dans le milieu,
- évaluation des effets de mélanges représentatifs, signaux d'alarmes quant à une pollution nouvelle (dans le cas des biomarqueurs dits «pré-coces»),
- et plus largement, support à l'évaluation de l'état chimique[116].

IV. 4. Bio-marqueurs et bio-essais :

À l'échelle européenne, la mise au point des indicateurs écotoxicologiques pour le diagnostic et la surveillance de la pollution chimique a enregistré des avancées importantes à la faveur de la convention OSPAR. Ce mécanisme de coopération intergouvernemental pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-est, initié en 1992, a impulsé la validation méthodologique, sur un réseau de sites ateliers (dont l'estuaire de la Seine en France), d'un ensemble de bio-essais et de bio-marqueurs. L'effort de recherche et développement, mené par l'Ifremer au niveau national, a conduit jusqu'ici à la validation de 19 bio-marqueurs et de 4 bio-essais standardisés [117].

Chapitre V Les recommandations pour réduire la pollution des écosystèmes aquatiques

Ainsi, en France, l'arrêté ministériel du 17 septembre 2012 a-t-il retenu cinq bio-marqueurs ou bio-essais pour la description quantitative de la présence des contaminants chimiques dans les milieux côtiers. Ceux-ci sont listés sur le tableau 3.

Type d'effet biologique	Bio-marqueurs et bio-essais
1. Indice de stress général chez la moule et le poisson	Stabilité de la membrane lysosomale
2. Génotoxicité chez la moule et le poisson	Induction des micronoyaux et altérations de l'ADN
3. Embryotoxicité chez l'huître creuse et reprotoxicité des poissons	Anomalies des larves d'huîtres et des gonades de poissons
4. Imposex des gastéropodes	Index VDS (Vas Deferens Sequence)
5. Pathologies poissons	Indice de pathologies hépatiques et de pathologies externes

Tableau 3 : Bio-marqueurs et bio-essais retenus en France pour la surveillance des milieux côtiers (DCSMM), et effets biologiques associés[118]

IV. 5. Vers des stratégies graduées d'évaluation :

Enjeu majeur pour la gestion, le développement des outils biologiques ouvre la voie à la mise en œuvre de stratégies graduées d'évaluation, associant analyses chimiques et approches biologiques regroupés au sein d'une boîte à outils [119]. Ce type de stratégies, dont l'intérêt est reconnu par de nombreux acteurs de l'eau publics ou privés, s'inscrit dans la logique de priorisation qui gouverne aujourd'hui tout le dispositif de surveillance et de diagnostic de l'état chimique des milieux : la surveillance de routine, acquisition de données rapide et peu coûteuse, débouche là où c'est nécessaire sur des examens complémentaires.

Pour les sites où sont confirmée une perturbation significative, une investigation environnementale poussée conduit à l'identification des sources polluantes et à la mise en œuvre de mesures de restriction appropriées.

Conclusion

Générale

Conclusion :

Ce travail a été réalisé dans le but d'étudier les impacts des micropolluants sur les systèmes aquatiques. Nous avons tout d'abord présenté des généralités sur les différents types de micropolluants, ensuite nous avons évoqué les procédés d'élimination existant et les recommandations mondiales pour réduire la pollution causée par les micropolluants.

Nous concluons qu'il faut travailler pour trouver de nouvelles solutions afin d'éliminer une fois pour toutes des micropolluants dans les systèmes aquatiques. Parmi les solutions les plus importants nous citons les suivantes :

- Incitation des territoires à développer des plans territoriaux de lutte contre les micropolluants.
- Commencer à réfléchir aux moyens de financer la lutte contre les micropolluants.
- Réduire l'utilisation de détergents et de matériaux ayant un effet sur les milieux aquatiques.
- Actualisation de l'étude des risques sanitaires liés au retour des sols de boues d'épuration.
- Développement de machines et de matériaux dans les stations d'épuration.
- Évaluer les risques sanitaires liés à la présence de micropolluants dans les eaux destinées à la consommation humaine.

Les scientifiques et les spécialistes ont un rôle important pour anticiper ce phénomène et travailler pour le réduire et préserver la vie humaine et l'environnement.

Références Bibliographique :

- [1] “<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01803319>.” .
- [2] “2. C.W. Götz & al. Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser Kombination von Expositionen und ökotoxikologischen Effektdaten. Gwa. 2010.”
- [3] “3. J. Margot, C. Kienle, A. Magnet, M. Weil, A. L. Felipe, C. Abeggien, D. A. Barry. Treatment of micropollutants in municipal waste water : Ozone or powdered activated carbon. Science of the Total Environment. 2013. 461-462.”
- [4] “4. Gao P., Ding Y., Li H., & Xagorarakis I. (2012). Occurrence of pharmaceuticals in a municipal wastewater treatment plant: Mass balance and removal processes. Chemosphere 88: 17-24.”
- [5] “5. Volesky B. and May-Phillips H.A. (1995). Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*. Appl. Microbiol. Biotechnol, 42, 797806.”
- [6] “Ramade F. (2000). Dictionnaire encyclopédique des Sciences de l’eau. Ediscience. Vol 67, pp 55-71.”
- [7] “Captivien. (2013). LES POLLUANTS EMERGENTS.15-16.”
- [8] “<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01803319>.”
- [9] “AESN-Aquascop, 2008. Guide des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie, 276 pages.”
- [10] “M Kouassi 2001 (Les pesticides regroupent notamment les insecticides (organochlorés, organophosphorés, carbamates, pyréthrinoides...), les fongicides, les herbicides, les rodenticides et les bactéricides).”
- [11] “M.Cunliffe & Paul T. Williams, Chemosphere(Les PCDF possèdent un atome d’oxygène de plus que les PCDD). 62 (2006) 1846 – 1855.”
- [12] “Kidd K.A., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M., & Flick R.W. (2007). Collapse of a fish population after exposure to synthetic estrogen. P. Natl. Acad. Sci. USA 104, 8897-8901.”
- [13] “Hoeger B., Köllner B., Dietrich D., Hitzfeld B. 2005: Water-borne diclofenac affects kidney and gill integrity and selected immune parameters in brown trout (*Salmo trutta f. fario*). Aquatic Toxicology 75, p. 53–64.”

Références Bibliographique

- [14] “Legler J., Brouwer A. 2003: Are brominated flame retardants endocrine disruptors? *Env.Int.* 29, p. 879–885.”
- [15] “Clifford M., Eder K., Werner I., Hedrick p. 2005: Synergistic effects of esfenvalerate and infectious hematopoietic necrosis virus on juvenile chinook salmon mortality. *Env.Toxicol.Chem.* 24(7), p. 1766–1772.”
- [16] “Kidd K.A., Blanchfield P.J., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M., Flick R.W. 2007: Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS).*”
- [17] “Blieffert C., & Perraud R. (2001). *Chimie de l’environnement, air, eau, sols, déchets.* Editions DeBoek Université, 102-477.”
- [18] “SAGGAI M., 2004, Contribution à l’étude d’un System d’épuration à plantes macrophytes pour les eaux usées de la ville de Ouargla. *Mem. Mgister. Univ. Ouargla.*64p.”
- [19] “BECHAC J., BOUTIN P., MERCIER B., 1983, *Traitement des eaux usées.* 2ème Edition.BEAUDRY J.P., 1984, *Traitement des eaux.* Edition le Griffon d’Aigle Inc, 231p.”
- [20] “DEGREMANT, 2005, *Mémento technique de l’eau.* Tomel. 9 ème 6d.”
- [21] “Mohammde Ouli, S. 2001. *Procédés unitaires biologiques et traitement des eaux,* Ed.”
- [22] “Ladjel, F. 2006. *Exploitation d’une station d’épuration à boue activée niveau 02.* Centre de formation au métier de l’assainissement. CFMA- Boumerdes. 80p.”
- [23] “Mouhammed oualis., 2001, *Procédés unitaires biologique de traitement des eaux.*”
- [24] “Degrement, (1989) : *Mémento technique de l’eau.* Tome I et II. Edition Cinquantenaire.9ème édition française. Paris.”
- [25] “Rejsek.F(2002) : *Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques.* Edition Centre Régional de Documentation Pédagogique d’Aquitaine .Paris.”
- [26] “Tradat, M. H. 1992. *Chimie des eaux.* Première, le griffon d’argile inc, Canada. 537p.”
- [27] “<http://www.epa.gov/glnpo/atlas/glat-ch4.html>.”

Références Bibliographique

- [28] “M.B. du 30/06/1991, Articles D.275 et suivants du Code de l’Eau.”
- [29] “<https://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr>.”
- [30] “Livre vert Belgaqua-Phytofar (2002) : <http://www.phytofar.be/fr/pdf/livrvert.pdf> (Beernaerts S., Debongnie Ph., De Vleeschouwer C. et Pussemier L. (CERVA) Le projet pilote du bassin du Nil. Recherche des véritables sources de pollution des eaux de surface.”
- [31] “Une campagne de mesure des teneurs en ETM dans les eaux de pluie a été réalisée en milieu rural entre novembre 2004 et avril 2005.”
- [32] “<http://www.senat.fr/rap/102-215-2/102-215-27.html>.”
- [33] “S Nasri, J Lamachère, J Albergel Revue des sciences de l’eau/Journal of Water Science 17 (2), 265-289, 2004.”
- [34] “GIL Mahé, Christian Leduc, Abou Amani, JEAN-EMMANUEL Paturel, SABINE Girard, Eric Servat, Alain Dezetter IAHS PUBLICATION, 215-222, 2003.”
- [35] “Edith Crouzet, Pierre Hubert, Philippe Olive, Erik Siwertz, Adrien Marce.”
- [36] “Olivier Delestre Université d’Orléans; Université d’Orléans, 2010 Christelle Adam, Christophe Debayle, Damien Carel, Isabelle Cavalié Environnement, Risques & Santé 5 (4), 254-260, 2006.”
- [37] “Carole Catastini, Jean-Ulrich Mullot, Patrick Mazellier, Luis Castillo, Isabelle Tordjman, Paulina Cervantes, Hugues Modelon, Sylvie Zini, Yves Levi, Jean-Nicolas Ormsby Etude pilote, Techniques Hospitalières, TH 714, 56-60, 2009.”
- [38] “Isariebel Quesada, Yusmel Gonzalez, Sylvie Schetrite, Hélène Budzinski, Karyn Le Menach, Olivier Lorain, Nicolas Manier, Selim Ait Aissa, Pascal Pandard, Djamil Abdelaziz, Jean-Marie Canonge, Claire Albasi Revue des sciences de l’eau/Journal of Water Scie.”
- [39] “Carole Catastini, Jean-Ulrich Mullot, Sahidou Boukari, Patrick Mazellier, Yves Levi, Paulina Cervantes, Jean-Nicolas Ormsby European journal of water quality 39 (2), 171-180, 2008.”
- [40] “Marion Amalric, Claudia Cirelli, Corinne Larrue VertigO: la revue électronique en sciences de l’environnement 15 (3), 2015.”

Références Bibliographique

- [41] “Emmanuel Evens, Jean-Marie Blanchard, Gérard Keck, Yves Perrodin Dechets sciences et techniques 22, 31-33, 2001.”
- [42] “Olivier Delestre Université d’Orléans; Université d’Orléans, 2010 Christelle Adam, Christophe Debayle, Damien Carel, Isabelle Cavalié Environnement, Risques & Santé 5 (4), 254-260, 2006.”
- [43] “<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/649>.”
- [44] “Tierney et al, 2008 ; Weston et al, 2013 ; Carazo-Rojas et al, 2018.”
- [45] “Stehle, S., & Schulz, R. (2015). Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States*, 112(18), 5750-5755.”
- [46] “Beketov, A., Keffordb, B., Schäferc,R., Liessa, M. (2013). Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States*, 110(27), 11039-11043.”
- [47] “Van Dijk, T.C. Van Staalduinen M.A., Van der Sluijs, J.P. (2013). Macro-invertebrate decline in surface water polluted with imidacloprid. *PLoS ONE*, 8(5), e62374.”
- [48] “Malaja, E., Von der Ohea, P., Groted,M., Kühnee, R., Mondyf, C., Usseglio-Polaterag, P., ... (2014). Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. *Proceeding of the National Academy of Science of the United State*.”
- [49] “Moschet, C., Wittmer, I., Simovic, K., Junghans, M., Piazzoli, A., Singer, H., ... (2014). How a complete pesticide screening changes the assessment of surface water quality. *Environ. Sci. Technol.* , 48, 5423–5432.”
- [50] “Santos, L. H., Araújo, A. N., Fachini, A., Pena, A., Delerue-Matos, C., & Montenegro, M. C. B. S. M. (2010). Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 45–95.”
- [51] “Wilkinson, J.L., Hooda, P.S., Barker, J., Barton, S., Swinden, J. (2016). Ecotoxic pharmaceuticals, personal care products, and other emerging contaminants: a review of environmental, receptor-mediated, developmental, and epigenetic toxicity with discussi.”

Références Bibliographique

- [52] “Cleuvers, M. (2004). Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 59, 309e315.”
- [53] “Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence. *Environmental pollution*, 163, 287–303.”
- [54] “Caliman, F. A., & Gavrilescu, M. (2009). Pharmaceuticals, personal care products and endocrine disrupting agents in the environment—a review. *CLEAN—Soil, Air, Water*. 37(4–5), 277–303.”
- [55] “Bean, T. G., Boxall, A. B., Lane, J., Herborn, K. A., Pietravalle, S., & Arnold, K. E. (2014). Behavioural and physiological responses of birds to environmentally relevant concentrations of an antidepressant. *Philosophical Transactions of the Royal Societ.*”
- [56] “Kidd, K. A., Blanchfield, P.J., Mills, K.H., Palace, V.P., Evans, R.E., Lazorchak, J.M., Flick, R.W. (2007). Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States*, 104(21),”
- [57] “Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water research*. 72 , 3-27.”
- [58] “Brodin, T., Piovano, S., Fick, J., Klaminder, J., Heynen, M., & Jonsson, M. (2014). Ecological effects of pharmaceuticals in aquatic systems – impacts through behavioural alterations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological.*”
- [59] “Guler, Y. & Ford, A.T. (2010). Aquatic Toxicology. Antidepressants make amphipods see the light. *Aquatic Toxicology*. 99(3), 397–404.”
- [60] “Pal, A., Yew-Hoong Gin, K., Yu-Chen Lin, A., Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*. 408. 6062–6069.”
- [61] “Zhang, Y., Geißen, S-U., Gal, C. (2008). Carbamazepine and diclofenac: removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* 2008. 73, 1151–61.”
- [62] “UNESCO and HELCOM (2017). Pharmaceuticals in the aquatic environment of the

Références Bibliographique

- Baltic Sea region – A status report. UNESCO Emerging Pollutants in Water Series – No. 1, UNESCO Publishing, Paris.”
- [63] “Johnson, A., Donnachie, R., Sumpter, J., Jürgens, M., Moeckel, C., M., Pereira, C. (2017). An alternative approach to risk rank chemicals on the threat they pose to the aquatic environment. *Science of the Total Environment*. 599–600. 1372–1381.”
- [64] “[https://www.universalis.fr/.../4-l-adaptation-au-parasitisme.](https://www.universalis.fr/.../4-l-adaptation-au-parasitisme)”
- [65] “Jean-Marc Choubert, Maxime Pomies, Cécile Miege, Marina Coquery, Samuel Martin-Ruel, Hélène Budzinski, Christelle Wisniewski.Élimination des micropolluants par les stations d’épuration domestiques.. Dans *Sciences Eaux & Territoires* 2012/4 (Numéro 9).”
- [66] “Guler, Y. & Ford, A.T. (2010). *Aquatic Toxicology*. Antidepressants make amphipods see the light. *Aquatic Toxicology*. 99(3), 397–404.”
- [67] “(ARMISTIQ = Amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques (soutien ONEMA 2010-2013), coordonné par Irstea et réalisé avec l’université de Bordeaux 1 et Suez-Environnement).”
- [68] “Cleuvers M. (2005). Initial risk assessment for three [beta]-blockers found in the aquatic environment. *Chemosphere*.”
- [69] “Abegglen, C. et al. (2010): Mikroverunreinigungen in Kläranlagen – Technische Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. *gwa* 7/2010, p. 587–594.”
- [70] “Kengne, M. (2000). Evaluation d’une station d’épuration des eaux usées domestiques par lagunage à macrophytes à Yaoundé : performances épuratoires,développement et biocontrôle des Diptères Culicidae. Thèse de doctorat,UNIVERSITE DE YAOUNDE.”
- [71] “Beketov, A., Keffordb, B., Schäferc,R., Liessa, M. (2013). Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States*, 110(27), 11039-11043.”
- [72] “Rodier J., L. B. (2009). *Analyse de l’eau*. Paris: Dunod.”
- [73] “Degrémont. (2005). *Memento technique de l’eau* (éd. 10è édition).”
- [74] “Cébron, A. (2004). Nitrification, bactéries nitrifiantes et émissions de N₂O.Thèse de doctorat. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie.”

Références Bibliographique

- [75] “Koné, D. (2002). Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l’ouest et du centre: état des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.”
- [76] “UNESCO, 2008.”
- [77] “Reddy, K., & d’Angelo, E. (1996). Biochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands In: Proceedings 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Vienna,. keynote Address 1,1- 21.”
- [78] “(Kengne, 2000). Kengne, M. (2000). Evaluation d’une station d’épuration des eaux usées domestiques par lagunage à macrophytes à Yaoundé : performances épuratoires,développement et biocontrôle des Diptères Culicidae. Thèse de doctorat,UNIVERSITE DE YAOUNDE.”
- [79] “Chazarenc, F., & Brisso, J. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophytes species selection Science of the total environment.”
- [80] “(Cébron, 2004). Cébron, A. (2004). Nitrification, bactéries nitrifiantes et émissions de N2O.Thèse de doctorat. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie.”
- [81] “(Kengne, 2000). Kengne, M. (2000). Evaluation d’une station d’épuration des eaux usées domestiques par lagunage à macrophytes à Yaoundé: performances épuratoires, développement et biocontrôle des Diptères Culicidae. Thèse de doctorat,UNIVERSITE DE YAOUNDE.”
- [82] “(Kpondjo, 2011). Kpondjo, N. (2011). Phytoépuration des eaux usées domestiques : évaluation du traitement par combinaison de trois meilleures macrophytes flottants identifiées. Mémoire d’Ingénieur, Université d’Abomey-Calavi.”
- [83] “Kengne, M. (2000). Evaluation d’une station d’épuration des eaux usées domestiques par lagunage à macrophytes à Yaoundé : performances épuratoires,développement et biocontrôle des Diptères Culicidae. Thèse de doctorat,UNIVERSITE DE YAOUNDEI.”
- [84] “Colin, S. (2007). Modélisation des phénomènes d’abattement des micro-organismes pathogènes dans un bassin de maturation sous climat sahélien. Mémoire master.

Références Bibliographique

- ENGEES-2IE Groupe EIER-ETSHER.”
- [85] “Sarah Louviaux Université de Liège, Liège, Belgique, 2019.”
- [86] “(B.E.I.E.R.E,2009). Brillas, E., Sirès, I., & Oturan, M. A. (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton’s reaction chemistry. *Chemical Reviews*, 109.”
- [87] “Cébron, 2004). Cébron, A. (2004). Nitrification, bactéries nitrifiantes et émissions de N₂O. Thèse de doctorat. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie.”
- [88] “Metz F, et Ingold K. 2014. « Sustainable wastewater management: is it possible to regulate micropollution in the future by learning from the Past? A policy analysis », 2014.”
- [89] “Köck-Schulmeyer, Marianne, Marta Villagrasa, Miren López de Alda, Raquel Céspedes-Sánchez, Francesc Ventura, et Damià Barceló. 2013. « Occurrence and Behavior of Pesticides in Wastewater Treatment Plants and Their Environmental Impact ». *Science of TheTot*.”
- [90] “Jean-Marc Choubert, Clément Crétollier, Alexandre Tahar, Hélène Budzinski, Karyn Le Menach, Mar Esperanza, Naïke Noyon, Cécile Miège, Lysiane Dherret, Marina Coqueryirstea, 2014.”
- [91] “Mehmet A Oturan, Nihal Oturan, Jean-Jacques Aaron *Actualité Chimique*, 57-64, 2004.”
- [92] “BEN DERRADJI M. E. et KRIRA A. (2001). Ressources en eau, pollution et sante dans la région d’Annaba-Algérie orientale. *Medit N°1*.”
- [93] “(BACHARI HOUMA F. (2009). Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l’imagerie satellitaire. Thèse Doctorat ; Sciences de l’Univers et Environnement ; Univ. Val de Marne Paris XII. France, 236p. BAUDRIER J.”
- [94] “LAAMA C. (2009). Contribution à l’étude des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux du port d’Alger. Mém. DEUA en sciences de la mer ; Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l’Aménagement du Littoral ; Algérie, 45p.”
- [95] “SAHNOUN F., BENDRAOUA A. et HADJEL M. (2010). Controle de la pollution

Références Bibliographique

- marinedu littoral oranais. Communication Science & Technologie N° 8. Janvier 2010 ; COST ; Univ. STMB, Oran.”
- [96] “SAHNOUN F., BENDRAOUA A. et HADJEL M. (2010). Contrôle de la pollution marine du littoral oranais. Communication Science & Technologie N° 8. Janvier 2010 ; COST ; Univ. STMB, Oran.”
- [97] “JO (2002). Journal Officiel de la République Algérienne. Réglementation algérienne sur les rejets d’effluents liquides.”
- [98] “ROUANE-HACENE O. (2013). Biosurveillance de la qualité des eaux côtières du littoral occidental algérien, par le suivi des indices biologiques, de la biodisponibilité et la bioaccumulation des métaux lourds (Zn, Cu, Pb et Cd) chez la moule *Mytilus gallopr.*”
- [99] “BOUZIANI M. (2002). L’eau dans tous ces états : source de vie, ressources épuisables, maladies hydriques, pollutions chimiques. Ed. Dar El-Gharb, p. 225.”
- [100] “Hillenbrand, T, Tettenborn, F, et Bloser, M. 2017. « Policy-Paper Empfehlungen des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« an die Politik zur Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer ». Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Ba.”
- [101] “110. (Thomas Hillenbrand et al 2014). Thomas Hillenbrand, et al. 2014. « Measures to reduce micropollutant emissions to water ». (UBA-FB) 002037/KURZ,E.
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_87_2014_mikroschads.](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_87_2014_mikroschads)”
- [102] “111. (Helmecke, M. et al 2017). Helmecke, M., et al. 2017. « Recommendations for reducing micropollutants in waters ». Background//april2018. Umwelt Bundesamt.
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/180709_ub_pos_mik.](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/180709_ub_pos_mik)”
- [103] “(U.S Environmental Protection Agency 2010). U.S Environmental Protection Agency. 2010. « NPDES Permit Writers’ Manual ». [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/pwm_2010.pdf.](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/pwm_2010.pdf)”
- [104] “Publicly Owned Treatment Works (PWOT).”
- [105] “(US EPA 2015b). US EPA. 2015b. « National Pretreatment Program ». Overviews and

Références Bibliographique

- Factsheets.EPA. 1 octobre 2015. [https://www.epa.gov/npdes/national-pretreatment-program.115_US EPA. s. d. « Water Pollution Search | ECHO | US EPA ». Data & Tools. , /trends/l.»](https://www.epa.gov/npdes/national-pretreatment-program.115_US_EPA_s_d_«_Water_Pollution_Search_|_ECHO_|_US_EPA_».Data_&_Tools._,/trends/l.»)
- [106] “US EPA (Environmental Protection Agency) (1992). Guidelines for Water Reuse. EPA/625/r- 92/004, U. S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 247 pp.”
- [107] “BOUTHIR F.Z., SOUABI S., CHAFIK A., BENBRAHIM S. et SIFEDDINE M. (2006). Impact des rejets industriels sur l’environnement : cas de l’accumulation du chrome dans les différents compartiments aquatiques le long du littoral Casablanca – Mohammadia. Water Qu.”
- [108] “EL KHOKH K., KBIBCH A., EL KHARRIM K. et BELGHYTI D. (2012). Evaluation de la charge polluante des eaux usées de la ville de Rabat. Catégorie : Environnement > Environnement ; ScienceLib Editions Mersenne : Vol. 4, N ° 121104 ; ISSN 2111-4706.”
- [109] “ELKHOKH et al., 2012). EL KHOKH K., KBIBCH A., EL KHARRIM K. et BELGHYTI D. (2012). Evaluation de la charge polluante des eaux usées de la ville de Rabat. Catégorie : Environnement > Environnement ; ScienceLib Editions Mersenne : Vol. 4, N ° 121104 ; ISSN.”
- [110] “Yves Levi, Maëlle CARGOUËT Actualite Chimique, 49-56, 2004.”
- [111] “Patrick Flammarion, M Coquery, C Feray, J Garric, O Perceval, PF Staub Chimie et expertise, 155-168, 2021.”
- [112] “Benjamin Lopez, Jean-Philippe Ghestem, Sarah BonnevilleLa Houille Blanche, 10-17, 2018.”
- [113] “www.norman-network.net.”
- [114] “G Cotton, C Feliers, K Kecili, AL ColonTechniques Sciences Méthodes, 29-36, 2019.”
- [115] “G Leroy, V Ingrand, J Besse, S Jeandenand, D Lafon, S Vrignon, MC Huau Techniques Sciences Méthodes 10, 45-58, 2017.”
- [116] “JM Choubert, Maxime Pomies, D Patureau, M Wisniewski, M Delalonde, Marc Phillippe Heran, Claire Albasi, I Mozo, G Lessage, M Spérandio, P Boisson, JP Steyer,

Références Bibliographique

Marina Coquery, S Gillot 92ème Congrès de l'ASTEE, 13, 2013.”

[117] “H Bessi, M El Alami Les technologies de laboratoire 4 (15), 2009.”

[118] “Marc Babut, B Ferrari, JF Féraud, S Devin, R Charlatchka irstea, 2012.”

[119] “JM Choubert, Maxime Pomies, D Patureau, M Wisniewski, M Delalonde, Marc Phillippe Heran, Claire Albasi, I Mozo, G Lessage, M Spérandio, P Boisson, JP Steyer, Marina Coquery, S Gillot 92ème Congrès de l'ASTEE, 13, 2013.”

Résumé:

Ce travail présente les impacts environnementaux des micropolluants sur les écosystèmes aquatiques. Au cours de ces dernières années, l'accroissement exponentiel de la population associé à l'urbanisation et à l'industrialisation ont impacté rapidement l'environnement et en particulier les milieux aquatiques. Suite à des utilisations massives et variées, des micropolluants sont rejetés et dispersés dans l'environnement. Ces polluants présentent un risque sanitaire et environnemental majeur. Le fonctionnement des écosystèmes peut être déséquilibré et certains milieux deviennent alors très vulnérables à la réception de ces polluants. La pollution par les micropolluants dans les écosystèmes aquatiques est devenue une source de préoccupations très sérieuses qui nécessite la réalisation d'études afin de mieux appréhender le comportement, l'origine, le devenir et l'impact de cette pollution, et d'y apporter des solutions appropriées.

Mots clés : micropolluants, impacts environnementaux, écosystèmes aquatiques.

Abstract:

This work presents the environmental impacts of micropollutants on aquatic ecosystems. In recent years, the exponential increase in population associated with urbanization and industrialization have rapidly impacted the environment and in particular aquatic environments. Following massive and varied uses, micropollutants are released and dispersed in the environment. These pollutants present a major health and environmental risk. The functioning of ecosystems can be unbalanced and certain environments then become very vulnerable to the reception of these pollutants. Pollution by micropollutants in aquatic ecosystems has become a source of very serious concern which requires the carrying out of studies in order to better understand the behaviour, origin, fate and impact of this pollution, and to bring appropriate solutions.

Keywords: micropollutants, environmental impacts, aquatic ecosystems.

ملخص:

يعرض هذا العمل التأثيرات البيئية للملوثات الدقيقة على النظم الإيكولوجية المائية، في السنوات الأخيرة، أثرت الزيادة الهائلة في عدد السكان المرتبطة بالتوسع الحضري التصنيع بسرعة على البيئة وخاصة البيئات المائية، بعد استخدامات ضخمة ومتنوعة، يتم إطلاق الملوثات الدقيقة وتشتت في البيئة، هذه الملوثات تشكل مخاطر صحية وبيئية كبيرة، يمكن أن يكون عمل النظم البيئية غير متوازن وتصبح بعض البيئات عندئذ شديدة التأثير بتلقي هذه الملوثات، أصبح التلوث بالملوثات الدقيقة في النظم البيئية المائية مصدر قلق بالغ الخطورة يتطلب إجراء دراسات من أجل فهم أفضل لسلوك هذا التلوث وأصله ومصيره وتأثيره وتقديم الحلول المناسبة.

الكلمات المفتاحية: الملوثات الدقيقة، التأثيرات البيئية، النظم البيئية المائية.