
République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane MIRA de BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés

Polycopié de cours destiné aux étudiants Master II Génie Alimentaire

**Domaine : Sciences et Technologies Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Alimentaire**

Intitulé du cours

**Traitement des Eaux et Valorisation des
Déchets**

Présenté par

Dr. Nabila ROUBA

Juin 2025

Objectifs du cours

Le programme de master II en Génie Alimentaire comprend un module dédié au Traitement des Eaux et Valorisation des Déchets, conçu pour sensibiliser les étudiants aux enjeux environnementaux liés aux activités agroalimentaires. L'objectif principal de ce cours est d'étudier les procédés classiques de traitement des eaux tels que la décontraction, la filtration, l'adsorption, la coagulation-floculation ainsi que les traitements biologiques. Le cours aborde également les technologies émergentes (comme les membranes, les procédés électrochimiques les échangeurs d'ions ect) et encore la valorisation des déchets, à travers des procédés tel que le compostage, la méthanisation et d'autres filières de récupération ou de transformation.

Ce module aborde également les aspects réglementaires et environnementaux du traitement des effluents et des déchets organiques, dans une perspective de développement durable. Il s'inscrit dans une approche intégrée de la gestion environnementale et de l'optimisation des processus industriels au sein des industries agroalimentaires, tout en prenant en compte les normes internationales, les exigences écologiques et les principes de l'économie.

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Salinité des eaux de quelques océans et mers	2
I.2	Principaux types de traitements de l'eau en industrie agroalimentaire	6
I.3	Normes de rejets internationales	12
I.4	Normes Algériennes de rejets des effluents liquides	12
II.1	Différentes qualités de l'eau en fonction de TH	17
II.2	Composants chimiques de l'échantillon	17

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Fig. I.1	La part d'eau douce sur Terre (d'après Eaufrance)	3
Fig. II.1	Schéma type d'une station de traitement	21
Fig. II.2	Double couche d'une particule colloïdale	23
Fig. II.3	Double couche et potentiel zéta	24
Fig. II.4	Processus de coagulation, floculation et de sédimentation	26
Fig. II.5	Adsorption et pontage à l'aide de polymères	28
Fig. II.6	Décanteur simple à flux horizontaux	32
Fig. II.7	Décanteur simple à flux verticaux	32
Fig. II.8	Décanteur à tubes inclinés à 60 °	34
Fig. II.9	Décanteur à lamelles	34
Fig. II.10	Filtres à sable	37
Fig.III.1	Schéma de principe d'une filière type par lit bactérien	49
Fig. III.2	Schéma de principe d'une filière type de disques biologiques	50
Fig.III.3	Image d'une épuration biologique par biofiltration	50
Fig.III.4	Image d'une épuration biologique à boue activée	51
Fig. III.5	Schéma de principe d'une filière des boues activées	52
Fig. III.6	Epuration biologique boue activée avec un système d'aérateurs de surface	54
Fig. III.7	Epuration biologique à boue activée avec un système à injection d'air	54
Fig. III.8	Epuration biologique à boue activée avec un système d'aérateurs de fond	55
Fig. III.9	Lagunes de Mèze	55
Fig. III.10	Lagunage	56
Fig. III.11	Aérateurs.	56
Fig. III.12	Disque biologique rotatif	57
Fig. III.13	Processus de déphosphoration biologique	59

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I: Généralités sur l'eau et son utilisation

I.1. Aperçu général sur les eaux naturelles.....	2
I.2. Production d'eau de qualité industrielle, eau utilisée au cours des procédés de transformation (eau de process).....	4
I.3. L'eau en industrie agroalimentaire.....	5
I.3.1. Production d'eau de qualité alimentaire et d'eau de process.....	5
I.3.2. Réutilisation et recyclage des eaux usées industrielles	9
I.4. Différents types de pollutions des eaux.....	9
I.4.1. Les eaux domestiques.....	10
I.4.2. Les eaux pluviales	10
I.4.3. Les eaux industrielles	10
I.5. Caractéristiques générales des eaux usées.....	11
I.5.1. Paramètres de pollution des eaux usées et normes de rejet	11
I.6. Traitement des eaux usées et normes de rejets	13

Chapitre II: Procédés de dépollution des eaux par voie physico-chimique

II.1. Précipitations chimiques.....	16
II.1.1. Elimination (de la dureté) du calcium et magnésium.....	16
II.1.2. Précipitation des métaux.....	19
II.1.3. Déflouration des eaux par précipitation	20
II.1.4. Précipitation chimique des phosphates.....	20
II.2. Coagulation et floculation	21
II.2.1. Principe et le bute.....	21
II.2.2. Propriétés des particules colloïdales.....	22
II.2.3. Mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales par la coagulation.....	24

II.2.4. Coagulants utilisés.....	25
II.2.5. Flocculation	26
II. 3. Procédés électrochimiques de dépollution (électrocoagulation).....	29
II.3.1. Principe de décontamination électrolytique des rejets industriels.....	29
II.3.2. Différents matériaux utilisés pour les électrodes.....	29
II.3.3. Mécanisme d'électrocoagulation	29
II.4. Procédés séparatifs	31
II.4.1 Décantation	31
II.4.1.1. Bilan des forces de la décantation des particules.....	31
II.4.1.2. Types de décanteurs	32
II.4.2. La filtration.....	35
II.4.2.1. Filtration sur un milieu poreux.....	35
II.4.2. 2. Séparation par membranes	38
II.4.3. Adsorption	40
II.4.3.1. Charbon activé.....	40
II.4.3.2. Isotherme d'adsorption.....	41
II.4.4. Echange d'ions.....	42
II.4.4.1. Types de résines échangeuses d'ions.....	42
II.5. La désinfection.....	44
II.5.1 Procédés chimiques.....	44
II.5.2. Procédés physiques.....	46

Chapitre III : Principes fondamentaux de l'épuration biologique (traitement secondaire)

III.1. Réacteurs à biomasse fixée	48
III.2. Epuration biologique à biomasse libre	51
III.2.1. Procédés à boue activée	51
III.2.2 Epuration biologique par lagunage	55
III.3. Traitements biologiques complémentaires	57
III.3.1. Traitement des boues.....	57
III.3.2. Les réacteurs de Nitrification- dénitrification des eaux usées.	58

III.3.3. Elimination biologique du phosphore.....	59
---	----

Chapitre IV : Traitement des effluents agroalimentaires

IV.1. Agro-industries (laiteries, abattoirs, embouteillage, conserveries, biocarburants...)	60
IV.1.1. Effluents des industries alimentaires	61
IV. 1.1.1. Rejets liquides.....	61
IV. 1.1.2. Rejets gazeux	62
IV. 1.1.3. Déchets solides.....	63
IV.2. Spécificité des traitements de quelques industries agroalimentaires.....	64

Chapitre V : Les déchets

V.1. Déchets, classification, collecte et recyclage.....	65
V.1.1. Classifications des déchets	65
V.1.2. Déchets agricoles et agroalimentaires.....	67
V.1.3. Collecte et recyclage.....	68

Chapitre VI: Procédés de traitement des déchets

VI.1. Compostage.....	69
VI.2. Méthanisation.....	70
VI. 3 Valorisation.....	70

Références bibliographiques

Introduction

La croissance démographique rapide et les activités industrielles sont les principales causes de l'exploitation excessive des ressources naturelles, générant ainsi d'importantes quantités de polluants qui affectent l'environnement et, par conséquent, les milieux aquatiques.

Dans ce contexte, la gestion durable de l'eau et des déchets devient un enjeu majeur pour la protection de l'environnement. Le traitement des eaux usées et la valorisation des déchets ne sont plus seulement des préoccupations environnementales, mais représentent également des défis économiques, sociaux et sanitaires.

La diversité des techniques de traitement des eaux et de valorisation des déchets engendre des choix souvent complexes. Chaque procédé de traitement possède des avantages spécifiques, mais également des limites qu'il convient de considérer attentivement. Le choix du traitement le plus approprié doit tenir compte de plusieurs facteurs, notamment la nature et la qualité des eaux usées, le déchets à valoriser, ainsi que le cadre socio-économique local.

Ce cours a pour but l'étude des procédés classiques ainsi que des procédés en émergence de traitement des eaux et des déchets, dans le cadre de la gestion environnementale et de la gestion globale des industries agro-alimentaires. Il aborde en effet les différents procédés de traitement physique, chimique et biologique des eaux, ainsi que les technologies de gestion et de valorisation des déchets, telles que le recyclage, le compostage, la méthanisation, la valorisation énergétique, etc.

Chapitre I: Généralités sur l'eau et son utilisation

I.1. Aperçu général sur les eaux naturelles

L'eau se trouve dans la nature sous trois états physiques différents: gazeux (vapeur), solide (glace) et liquide. L'eau pure n'existe pas dans la nature, en effet elle contient toujours des éléments minéraux et organiques, ou encore des microorganismes. Et même si la Terre est recouverte à environ 70% d'eau, la part d'eau douce directement exploitable par l'Homme représente moins de 1% de l'eau totale présente sur la planète. Les eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltrations, nappes), les eaux de surface retenues ou en écoulement (barrage, lacs, rivières) et les eaux marines.

- **Eau marine (mers et océans) :** Elle constitue la majeure partie des réserves d'eau du globe. Cependant, du fait de sa forte salinité (sels dissous) qui varie selon les origines (*Tableau I.1*), on l'utilise rarement pour produire l'eau potable.

Tableau I.1 : Salinité des eaux de quelques océans et mers

Origine	Salinité (g/l)
Atlantique et Pacifique	32 à 35
Mer Méditerranée	38 à 40
Mer Rouge	43 à 45
Mer Morte	270

- **Les eaux de surface :** On peut répartir les eaux de surface en trois catégories : Eaux de rivière (partie amont), situées dans une région montagneuse, elles sont généralement peu polluées, en raison de la faible densité de population et pratiquement l'inexistantes d'activités industrielles. Eaux de rivière (partie aval) : généralement situées dans une région où la pollution est dense (elles traversent des régions agricoles et les industrielles). Eaux de lac : On peut considérer un lac comme un bassin naturel de décantation, où les particules en suspension ont tendance à se déposer avec le temps.

- **L'eau de pluie** : Les eaux de pluie sont saturées d'oxygène et d'azote et ne contiennent aucun sel dissous, elles sont donc très douces. Par contre dans les régions industrielles, les eaux de pluie peuvent être contaminées par les polluants atmosphériques.
- **Les eaux souterraines** : Les eaux des nappes phréatiques ou des puits profonds. elles sont souvent de meilleure qualité, riche en sels minéraux.

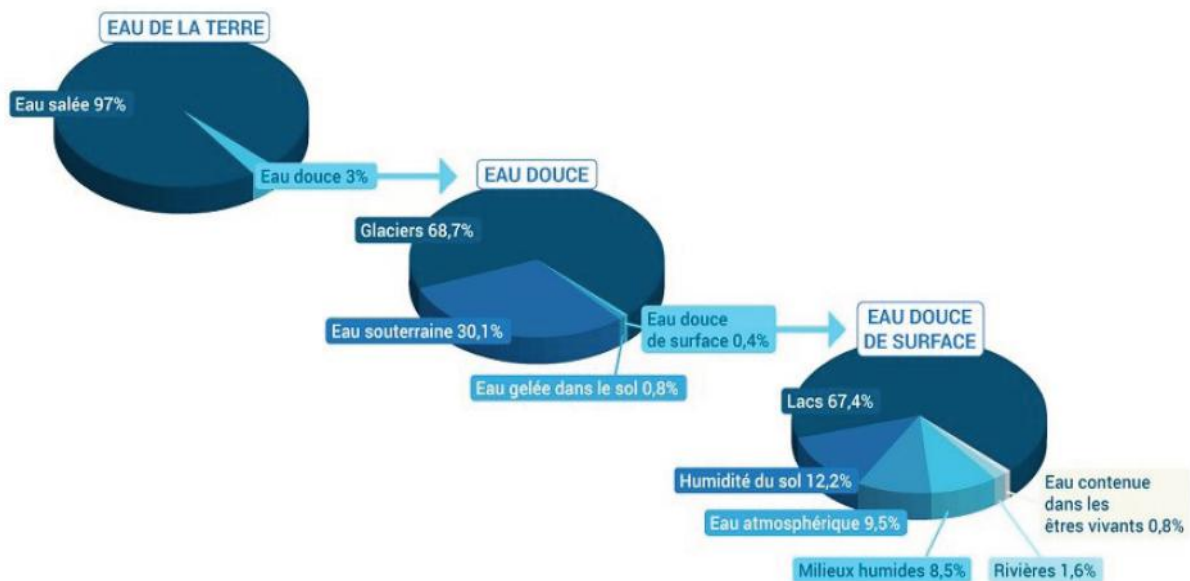


Figure I.1 : La part d'eau douce sur Terre (d'après Eaufrance).

a/ Contenu des eaux naturelles

L'eau est un excellent solvant qui se charge en composés solides ou gazeux tout au long de son cycle, suivant les milieux (rivières, roches, atmosphère ect) dans lesquels elle circule ou séjourne, de ce fait les caractéristiques chimiques de l'eau comprennent les minéraux dissous, les substances organiques dissoutes, les gaz et les contaminants microbiologiques d'origine naturelle ou provenant de l'activité humaine.

Les substances présentes dans les eaux naturelles sont soit en solution vraie, soit en solution colloïdale, soit en suspension plus au moins fine. Ces substances sont extrêmement variables, peuvent être :

- ✓ Des gaz (O_2 , N_2 , CO_2), provenant de la dissolution des gaz atmosphériques.
- ✓ Les sels minéraux, cations et anions en solution ainsi que des sels ou des matières minérales peu solubles en suspension. Dans les eaux naturelles continentales, les cations les plus abondants sont le calcium Ca^{2+} et le magnésium Mg^{+2} , puis le sodium Na^+ et en fin le

potassium K^+ . Dans l'eau de mer et dans certaines eaux douces, le sodium est l'élément prépondérant. D'autres cations peuvent être présents dans l'eau, mais généralement à des teneurs beaucoup plus faibles comme le fer et du manganèse. Les anions majeures qu'on peut trouver dans les eaux naturelles sont les bicarbonates HCO_3^- , les chlorures Cl^- et les sulfates SO_4^{2-} . L'eau peut contenir de nombreux autres anions comme des carbonates CO_3^{2-} , des silicates SiO_3^{2-} , des phosphates PO_4^{3-} , des fluorures F^- , des nitrates NO_3^- , des nitrites NO_2^- ou des sulfures PO_4^{3-} .

✓ Matières organiques plus ou moins solubles, les molécules organiques sont le plus souvent complexes; elles contiennent essentiellement du carbone et de l'hydrogène, mais aussi des atomes d'oxygène, d'azote et de phosphore.

✓ Des organismes vivants, les plus simples unicellulaires (virus, bactéries, champignons) jusqu'aux plantes et aux animaux.

I.2. Production d'eau de qualité industrielle, eau utilisée au cours des procédés de transformation (eau de process).

L'industrie de transformation utilise une importante quantité d'eau. La qualité requise pour cette eau industrielle dépend de son usage. Pour qu'elles conviennent à leurs besoins, ces eaux doivent être purifiées par différentes techniques souvent mises en œuvre successivement suivant l'eau de process voulue afin d'obtenir une eau pure qui n'endommage pas leurs installations lors de son passage afin de contrôler les problèmes tels que les dépôts, entartrage, la corrosion et la croissance bactérienne. Ces traitements peuvent être physiques (filtration au charbon actif/à membrane, résine échangeuse d'ions, traitement aux Uvs), chimiques (ozonation, oxydation, chloration...), physico-chimiques (coagulation, floculation, adoucissement) ou encore biologiques.

En effet, l'utilisation des eaux dans les systèmes de chauffage (chaudières) nécessite un adoucissement. De même dans le lavage des textiles, l'élimination du calcium, du magnésium, du fer et du manganèse est essentielle. Les centrales électriques, les industries des boissons, les laboratoires de recherches, la microélectronique et les produits pharmaceutiques utilisent l'eau de grande pureté. L'eau ultra-pure ou de grande pureté se réfère à l'eau qui est exempte de toutes les impuretés ne contient que des molécules H_2O , et les ions H^+ et OH^- en équilibre. De ce fait, la conductivité de l'eau ultra-pure est d'environ 0.054 mS/cm à 25°C.

I.3. L'eau en industrie agroalimentaire

L'eau représente une ressource essentielle pour l'activité d'un site de transformation alimentaire. En effet, l'eau réunit un ensemble de propriétés physiques et chimiques : elle peut devenir solvant, fluide thermique ou simplement liquide facile à manipuler. Ces propriétés expliquent pourquoi l'eau est impliquée dans la plupart des activités industrielles; elle permet de réaliser de nombreuses fonctions ou opérations. Il s'agit principalement :

- ❖ Le lavage d'objets et des aliments, de récipients, de canalisations, de sols d'ateliers, l'hygiène du personnel...
- ❖ Le chauffage ou le refroidissement d'objets (transferts thermiques), des milieux liquides ou gazeux.
- ❖ Dans le processus de fabrication et/ou est incorporée directement comme ingrédient lors de la préparation des aliments, sous forme liquide, glace ou vapeur.
- ❖ Dans la réalisation de réactions chimiques car une forte proportion des chimies minérale et organique se déroule en milieu aqueux.
- ❖ Le transport des matières premières, des produits finis ou intermédiaires par canalisations ouvertes ou fermées...

L'eau est aussi largement utilisée dans l'agriculture et dans la production de l'énergie.

I.3.1. Production d'eau de qualité alimentaire (eau de process).

Selon les exigences propres à chaque usage et à chaque site agroalimentaire, l'eau est amenée à subir différents traitements physiques ou chimiques pour répondre à des besoins spécifiques. Selon la provenance de l'eau, la qualité physico-chimique et microbiologique de celle-ci peut présenter une variabilité importante, non seulement d'un site à l'autre, mais également dans le temps sur un même site.

La réglementation impose que l'eau utilisée en industrie agroalimentaire réponde à certaines exigences de provenance et de qualité. Les industriels doivent donc s'assurer que l'eau utilisée réponde aux exigences propres à chaque usage par des analyses régulières des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau.

Parfois, des traitements de l'eau sont nécessaires pour atteindre ces exigences, optimiser les procédés, préserver la durée de vie des équipements, etc. *Le Tableau I.2* présente les principaux types de traitement de l'eau rencontrés en industrie agroalimentaire.

Tableau I.2 : Principaux types de traitements de l'eau en industrie agroalimentaire.

Objectif	Technologies courantes	Destinations courantes
Elimination des particules grossières	Dégrilleur Filtre à sable Filtres à cartouches	Toutes les eaux
Elimination des petites particules, des pesticides	Filtration membranaire Filtre à charbon actif	Toutes les eaux
Adoucissement	Echange d'ions (résines) Injection de CO ₂	Eaux d'appoint des utilités Eaux de nettoyage
Décarbonatation	A la chaux Echange d'ions (résines)	Eaux d'appoint des utilités Eaux de nettoyage
Déminéralisation de l'eau	Echange d'ions (résines) Osmose inverse	Eaux d'appoint des utilités
Désinfection de l'eau	Biocide UV Ozone Electrolyse Filtration membranaire	Eaux de recettes Eaux de nettoyage Eaux de circuit de refroidissement
Traitement antitartre	Traitement chimique	Circuit d'eau des utilités
Traitement anticorrosion	Traitement chimique Electrolyse	Circuit d'eau des utilités

- **L'eau utilisée pour le lavage des matières premières et des produits**

Dans certains secteurs d'activités, particulièrement pour la transformation des fruits et légumes, une étape de lavage des matières premières est réalisée, associée parfois à une désinfection. C'est le cas par exemple du rinçage des haricots pour la production de sachets de légumes de 4ème gamme. Si les méthodes traditionnelles de désinfection recourent généralement à l'ajout de chlore dans l'eau, des procédés innovants apparaissent aujourd'hui, utilisant par exemple des produits non rémanents comme l'eau ozonée.

- **L'eau entrant dans la composition des produits**

L'eau entre dans la composition de certains produits en tant qu'ingrédient ou matière première. C'est le cas par exemple pour la production de produits issus de la germination de grains, de bière, de beurre ou de margarine, de produits glacés, de pain et de pâtisseries, de pâtes alimentaires, de sucre, ou encore de la production d'eaux de table et de boissons diverses. Dans ce cas, les industriels prêtent généralement une attention particulière à la qualité de l'eau utilisée puisque celle-ci influe directement sur la composition et la qualité du

produit fini. L'eau peut donc nécessiter des traitements spécifiques avant son utilisation, permettant d'atteindre un niveau de qualité spécifique aux exigences du produit.

- **L'eau en tant que fluide thermique**

L'utilisation d'eau en tant que fluide thermique représente l'un des principaux usages de l'eau en termes de volume. D'une manière générale, l'eau est utilisée afin de réaliser des transferts d'énergie d'une entité à une autre par le biais de différents équipements (chaudières, groupes frigorifiques, échangeurs, etc.). On peut distinguer :

- La production de chaleur et l'utilisation d'eau sous forme d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur pour: la cuisson des produits, la sanitation des produits (pasteurisation, stérilisation), la désinfection des emballages, le chauffage des locaux,
- Les circuits de refroidissement pour le refroidissement de produits, le refroidissement de machines.

Ces systèmes fonctionnant généralement en circuit fermé avec appoint d'eau, nécessitent bien souvent un traitement spécifique afin de réduire les risques de prolifération microbologique et les risques de corrosion des équipements.

- **L'eau pour les étapes de nettoyage et désinfection**

Les opérations de nettoyage et désinfection en agroalimentaire sont généralement associées à une consommation importante d'eau et de produits chimiques, indispensables au maintien de la qualité sanitaire de la production. On peut distinguer les méthodes de nettoyage humides et les méthodes de nettoyage à sec. Des méthodes alternatives, plus respectueuses de l'environnement, sont également aujourd'hui disponibles.

Les méthodes de nettoyage humides traditionnelles

Les procédures de nettoyage mettent en œuvre une succession de phases d'application de solutions de produits lessiviels et de phases de rinçage. Le nombre de phases d'un cycle de nettoyage et désinfection varie généralement de 3 à 7, selon le type de produit à nettoyer et le mix de produits chimiques utilisé.

Selon les secteurs d'activité, les entreprises mettent en œuvre des procédures et des technologies de nettoyage et désinfection variées, adaptées aux spécificités propres à son type de production. Parmi les principales méthodes de nettoyage et désinfection, on peut rencontrer:

- Le nettoyage en place – NEP – (ou CIP, Clean-in-Place en anglais) : il consiste à réaliser un nettoyage sans démontage des équipements. Les installations concernées par ce type de nettoyage sont généralement les lignes de transformation de liquide (lait, bière, jus, etc.). Ce sont donc principalement des systèmes de cuverie et de tuyauterie, permettant la

circulation des solutions lessivielles. Les cycles de nettoyage, désinfection et rinçage d'une installation de NEP peuvent être gérée de façon manuelle ou automatisée.

-Le nettoyage d'équipements et ustensiles dans des machines à laver ou des tunnels de lavage.

-Le nettoyage manuel d'équipements, lignes de production et des locaux aux jets d'eau, canons à mousse, etc., associé éventuellement à des installations moyenne pression ou haute pression.

Les méthodes de nettoyage à sec

Les méthodes de nettoyage à sec sont généralement destinées à :

-Des zones de production dans lesquelles l'humidité doit être évitée (transformation et nettoyage du chocolat par exemple)

-Des zones de production faiblement souillées ou sans contact direct avec les aliments (salle de conditionnement par exemple)

Elles consistent en une succession de différentes étapes de grattage, brossage, utilisation de vapeur sèche ou de glace carbonique, désinfection moyennant l'usage de lingettes désinfectantes par exemple.

Les méthodes de nettoyage alternatives

Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes de nettoyage et désinfection alternatives aux méthodes traditionnelles :

Pour le nettoyage : cryogénie, ultrasons

Pour le nettoyage et la désinfection : vapeur sèche, vapeur saturée, électrolyse de l'eau

Pour la désinfection : UV, lumière pulsée, plasma, ozone.

- **L'eau pour les usages mécaniques**

Poste de consommation bien souvent oublié ou négligé par les entreprises, certains usages mécaniques de l'eau peuvent représenter des volumes de consommation importants. C'est le cas par exemple de l'arrosage des garnitures de pompe permettant à la fois une lubrification et un refroidissement. Dans beaucoup d'entreprises, ces systèmes fonctionnent encore avec un arrosage en eau perdue. Même si les débits peuvent sembler faibles, ce type de fonctionnement en continu peut générer des volumes d'eau utilisés conséquents. Aujourd'hui, des systèmes de récupération d'eau et de cycle fermé permettent de réduire les consommations associées à ces usages.

- **L'eau pour l'hygiène du personnel**

L'utilisation d'eau pour l'hygiène du personnel (lavage des mains, sanitaires, etc.) est un poste de consommation souvent négligé par les entreprises. Pourtant, il peut représenter des volumes de consommation d'eau important à l'échelle d'un site de production industriel.

I.3.2. Réutilisation et le recyclage des eaux usées industrielles

Les eaux usées sont très souvent considérées plus comme une nuisance à éliminer plutôt qu'une ressource. Pourtant, elles constituent une source non négligeable de substances valorisables. Il existe des applications après traitement à ces eaux usées. Le recyclage remplit donc un double objectif: il permet à la fois d'économiser les ressources en amont en les réutilisant, mais aussi de diminuer le volume des rejets pollués. Les principales catégories de réutilisation de l'eau sont les suivantes :

- Un des plus grands potentiels pour la réutilisation de l'eau est de compléter ou de remplacer l'utilisation d'eau potable et/ou de ressources naturelles pour les industries (nettoyage, le lavage, lutte contre les incendies, tours de refroidissement, etc.).
- L'irrigation urbaine d'espaces verts, par principe, la majorité des normes plus récentes exigent au minimum un traitement biologique des eaux usées destinées à la réutilisation de l'eau pour l'irrigation.
- Le recyclage en usages environnementaux pour le maintien et la restauration des plans d'eau, des rivières et des zones humides.

I.4. Différents types de pollutions des eaux

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques.

Cette pollution est provoquée par le rejet d'eau salie par nos activités domestiques, et par de diverses activités industrielles et agricoles, nécessaires pour nous fournir les aliments et biens dont nous avons besoin. On distingue trois grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux industrielles, les eaux pluviales.

I.4.1. Les eaux domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de matières organiques, matières azotées, matières en suspension de germes, etc.

I.4.2. Les eaux pluviales

Elles peuvent, elles aussi, constituer la cause de pollutions importantes des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds...). En outre, lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement ("délestage") de ce mélange très pollué dans le milieu naturel.

I.4.3. Les eaux industrielles

Les eaux usées industrielles regroupent toutes les eaux qui sont en principe rejetées par l'industrie dans le milieu extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport, et au refroidissement. La composition et la concentration des effluents industriels varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, pesticides, insecticides, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures. Certaines d'entre elles doivent faire l'objet d'un prétraitement de la part des industriels avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte. Elles sont mêlées aux eaux domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution. Les grandes entreprises sont toutes équipées d'unités de traitement interne.

❖ Les eaux usées générées par les entreprises du secteur agroalimentaire sont caractérisées par de fortes charges organiques dissoutes et en suspension. De nombreux établissements industriels rejettent des eaux ayant une quantité appréciable de graisses, de phosphore, d'azote et de chlorure de sodium. Certaines activités de nettoyage génèrent des rejets

alternativement acides et basiques occasionnant des problèmes de pH. Les rejets sont habituellement exempts de métaux et sont considérés comme biodégradables. Ils peuvent par conséquent être facilement épurés par des traitements biologiques.

I.5. Caractéristiques générales des eaux usées

I.5.1. Paramètres de pollution des eaux usées et normes de rejet

Un certain nombre de critères globaux sont utilisés pour la détermination et la caractérisation du degré de pollution pour les eaux usées.

➤ **La demande biologique en oxygène (DBO₅)**

La charge de pollution d'une eau en matières organiques s'évalue par la demande biologique en oxygène en 5 jours (**DBO₅**). Ce paramètre mesure la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour dégrader les matières organiques présentes dans l'eau usée pendant 5 jours. La DBO d'une eau usée est généralement très élevée, ce qui provoque la diminution de l'oxygène dissous dans l'eau (**hypoxie**). Quand l'oxygène vient à manquer, les micro-organismes anaérobies comme les bactéries méthanogènes et sulfatoréductrices produisent des composés malodorants comme l'anhydride sulfureux (H₂S) ou le méthane (CH₄) qui détériorent davantage la qualité de l'eau.

➤ **La demande chimique en oxygène (DCO)**

La DCO représente tout ce qui est susceptible d'être oxydé dans l'eau, en particulier certains sels minéraux oxydables (sulfures, sulfites,...), et la majeure partie des composés organiques.

➤ **Les matières en suspension (MES)**

Les MES exprimées en mg par litre. Ce sont les matières non dissoutes de diamètre supérieur à 1µm contenues dans l'eau. Elles comportent à la fois des éléments minéraux et organiques et décantent spontanément.

D'autres paramètres de routine sont aussi mesurés comme la température, le pH, la salinité, l'oxygène dissous, azote kjedahl (NTK) (azote organique et ammoniacal), azote total (qui englobe les formes oxydées de l'azote), le phosphore total et les microorganismes.

La norme de rejet est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépassée ou une limite inférieure à respecter.

✓ **Normes internationale**

Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé (OMS) respectives pour les eaux usées sont présentées dans le *tableau I.3*.

Tableau I.3 : Normes de rejets internationales

Caractéristiques	Normes utilisées(OMS)
PH	6,5-8,5
<i>DBO₅</i>	<30mg/l
<i>DCO</i>	<90mg/l
<i>MES</i>	<20mg/l
<i>NH₄⁺</i>	<0,5mg/l
<i>NO₂</i>	1mg/l
<i>NO₃</i>	<1mg/l
<i>P₂O₅</i>	<2mg/l
Température	<30°C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

✓ Normes Algériennes

Les normes de rejets des effluents industriels sont fixées par la loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux, de l'ordonnance n° 96-13 du 15 Juin 1996 modifiant et complétant la loi n° 83-17, du décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides des industriels et du décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 de la république Algérienne définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

Tableau I.4 : Normes Algériennes de rejets des effluents liquides

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	30
<i>PH</i>	-	6,5- 8,5
<i>DBO₅</i>	mg/l	30
<i>DCO</i>	mg/l	120
<i>MES</i>	mg/l	35
Azote total	mg/l	30
Phosphore total	mg/l	10
Furfural	mg/l	50
Hydrocarbures	mg/l	10
Plomb	mg/l	0,5
Fer	mg/l	3
Mercure	mg/l	0,01
Cuivre	mg/l	0,5
Zinc	mg/l	3

I.6.Traitement des eaux usées et normes de rejets

Les eaux usées sont l'ensemble des eaux issues des activités urbaines et industrielles, dans le rejet risque de polluer l'environnement. Les eaux usées sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension, colloïdales et dissoutes. Les conséquences de l'émission d'eaux usées non traitées ou mal traitées peuvent être classées en trois catégories :

- Effets nocifs pour la santé humaine.
- Impacts négatifs sur l'environnement.
- Répercussions néfastes sur les activités économiques.

Pour éviter une telle pollution, ces eaux sont retraitées en station d'épuration avant d'être réutilisées ou rejetées dans la nature. Les installations doivent être conformes aux nouvelles normes de rejets, à savoir que la réglementation impose de respecter des normes de rejets sur plusieurs paramètres :

- Les matières en suspension : MES inférieure à 35 mg/l.
- La demande chimique en oxygène : DCO inférieure à 125 mg/l d'oxygène dissous.
- La demande biologique en oxygène sous 5 jours DBO_5 : inférieure à 25 mg/l d'oxygène dissous au bout de 5 jours.
- L'azote total qui doit être inférieur à 20 mg/l.

❖ Epuration des eaux usées industrielles

Le traitement des eaux industrielles débute toujours par une analyse des effluents a fin d'identifier les polluants pour adapter le traitement a ses spécificités. Les méthodes utilisées pour le recyclage ont d'abord recours aux traitements classiques. Des traitements complémentaires sont ensuite mis en place, en fonction de la composition des effluents et la qualité de l'eau que l'on souhaite obtenir :

- La filtration par des grilles, les résidus solides sont récupérés et éliminés.
- Traitement par décantation; aidée par l'ajout de substances coagulantes et flocculant. Les boues sont récupérées, et éventuellement valorisées (engrais)
- Traitement biologique : on met l'eau usée en contact d'un écosystème bactérien spécifique qui va épurer tout en consommant l'oxygène dissous contenu dans l'eau.

- Elimination de l'azote et le phosphore, traitement chimique.
 - Un traitement par microfiltration et/ou ultrafiltration associé à des méthodes de désinfection par UV pour l'irrigation ou la recharge des nappes.
 - Un traitement par osmose inverse ou nanofiltration associé à des méthodes de désinfection par ozone, chlore et/ou par UV pour obtenir des eaux de qualité supérieure : eau potable, industrie de haute technologie.

Le traitement et le rejet des effluents liquides en agroalimentaire

Après son utilisation à travers les différents usages cités ci-dessous, la majeure partie de l'eau n'a pas été consommée et doit donc être rejetée. Selon l'activité du site et les différents usages de l'eau, celle-ci est désormais chargée en différents polluants, notamment :

- ❖ Matière organique issue des pertes de matières et du nettoyage des installations,
- ❖ Substances chimiques directement issues des produits de traitement de l'eau ou des produits de nettoyage et désinfection
- ❖ Substances chimiques issues de la dégradation et des réactions :
 - entre matière organique et produits chimiques
 - entre produits chimiques et matériaux des équipements (corrosion)
 - entre différents produits chimiques

Avant son retour vers le milieu naturel, généralement dans les eaux de surface, les effluents doivent donc subir un traitement de façon à éliminer cette pollution. En effet, la réglementation impose des valeurs seuils de concentration et de volumes de différents paramètres et substances à ne pas dépasser dans les rejets. Ce traitement peut être réalisé :

- Par l'entreprise elle-même, si elle dispose d'une installation de traitement des effluents (STEP, station de pré-traitement)
- Par la commune, après envoi des effluents de l'entreprise vers la station de traitement communale. Cette pratique est généralement encadrée par une convention de rejet signée entre l'industriel et la commune.
- Par l'entreprise puis par la commune, dans le cas où les effluents sont traités en partie sur le site de l'entreprise, puis sont envoyés vers la station de traitement communale.

L'analyse de la qualité des rejets doit être réalisée par l'entreprise ou des prestataires externes, afin de suivre différents paramètres physico-chimiques des rejets à une fréquence donnée. La réglementation impose des fréquences minimales de suivi pour un ensemble de paramètres, dépendant des volumes de rejet du site.

Chapitre II : Procédés de dépollution des eaux par voie physico-chimique

Les substances présentes dans les eaux naturelles sont soit en solution vraie, soit en solution colloïdale, soit en suspension plus ou moins fine.

Dans un premier temps on élimine tous les éléments solides volumineux et grossiers (sables,...) : on fait passer l'eau à travers des grilles plus ou moins grossières pour récupérer tous les éléments solides plus gros que les espacements des grilles. Ensuite, afin d'arrêter les particules fines en suspension ($d > 1\mu\text{m}$) on fait passer l'eau à travers des microtamisages et/ou la sédimentation.

Pour les solutions colloïdales on utilise le procédé : coagulation floculation. Pour les solutions vraies on utilise le procédé : précipitation chimique.

II.1. Précipitations chimiques

En traitement des eaux les précipitations chimiques, sont principalement utilisées pour éliminer, par insolubilisations, un ou plusieurs composés minéraux qui gênent l'usage de l'eau, entre autres : la dureté (due à la présence de Ca^{+2} et de Mg^{+2}), métaux, certains anions tels que SO_4^{-2} les PO_4^{-3} , F^- . On recherchera donc, dans chacun des cas, à apporter à l'eau, sous forme de réactif soluble l'ion permettant de former avec le composé gênant, un précipité aussi peu soluble que possible.

II.1.1. Elimination (de la dureté) du calcium et magnésium

Ce sont essentiellement les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui sont responsables de la dureté. On peut alors distinguer la dureté totale, la dureté calcique et la dureté magnésienne :

$$\text{Dureté totale} = \text{Dureté calcique} + \text{dureté magnésienne.}$$

On distingue par ailleurs la dureté carbonatée (associée aux anions HCO_3^-) et de la dureté non carbonatée, liée à d'autres anions, le plus souvent Cl^- et SO_4^- .

✓ La dureté totale (le titre hydrotimétrique TH en degrés Français °F) peut s'exprimer en meq/l de calcium et en meq/l de magnésium, avec $1\text{meq/l} = 5^\circ\text{F}$.

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$$

Tableau II.1 : Différentes qualités de l'eau en fonction de TH.

Nature de l'eau	TH (°F)	Consommation domestique
Très douce	0 à 7	potable
Douce	7-15	
Moyennement dure	15 à 25	Acceptable
Dure	25 à 42	Médiocre
Très dure	Supérieur à 42	Mauvaise

Exemple : L'analyse suivante d'un échantillon d'eau du fleuve permet de comparer les divers modes d'expression des concentrations :

Tableau II.2 : Composants chimiques de l'échantillon

Elément	mg/l
Ca ²⁺	41,0
Mg ²⁺	9,3
Na ²⁺	12,5
K ⁺	1,4
Cl ⁻	30
SO ₄ ²⁻	27,2

Déterminer :

1. La dureté TH en °F.
2. La potabilité de l'eau.

Solution :

Convertir les concentrations de mg/l en meq/l

$$\text{meq/l} = \frac{(\text{mg/l}) \times \text{Nombre de valence}}{\text{Masse atomique}}$$

Donc

Elément	Nb de valence	Masse atomique
Ca ²⁺	2	40,08
Mg ²⁺	2	24,31
Na ²⁺	2	22,99
K ⁺	1	39,10
Cl ⁻	1	35,45
SO ₄ ²⁻	2	96

Elément	mg/l	Méq/l
Ca ²⁺	41,0	
Mg ²⁺	9,3	
Na ²⁺	12,5	
K ⁺	1,4	
Cl ⁻	30	
SO ₄ ²⁻	27,2	

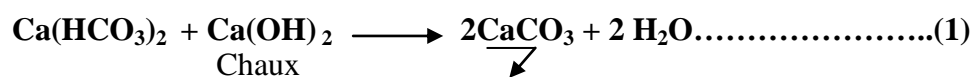
$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] = \dots\dots\dots \text{méq/l} = \dots\dots\dots ^\circ F$$

La potabilité de l'eau :

➤ **Adoucissement par précipitation chimique :**

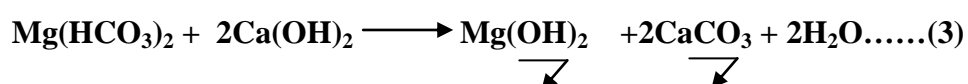
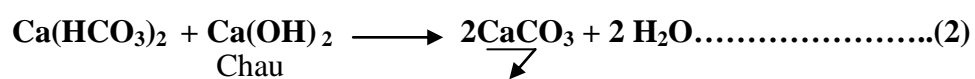
La chaux Ca(OH)₂ et le carbonate de sodium Na₂CO₃ sont utilisés pour adoucir l'eau selon les réactions suivantes :

- **Procédé par addition de chaux seulement :** il permet de réduire la concentration d'ions calcium d'une eau et n'exerce aucune influence sur la dureté non carbonatée et sur la dureté magnésienne.

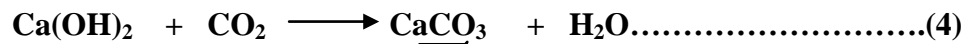


- **Procédé par addition d'un excès de chaux**

On utilise ce procédé pour réduire la dureté des eaux affectées d'une dureté carbonatée associée à du calcium et du magnésium.



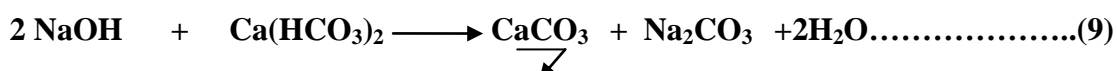
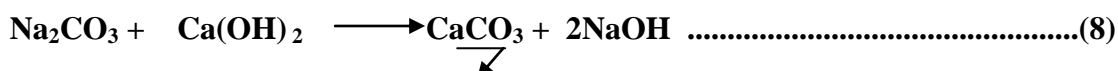
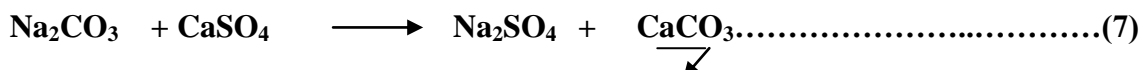
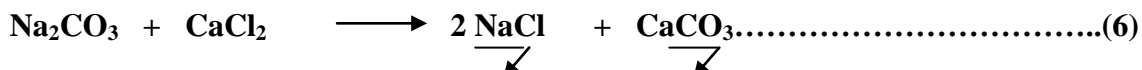
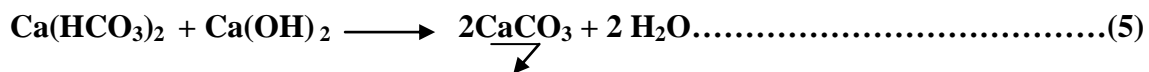
Afin de précipiter l'excès de chaux on doit procéder à une carbonatation.



• **Procédé par addition de chaux et de soude**

Ce procédé est basé sur l'utilisation de la chaux et de la soude, il permet de réduire la dureté non carbonatée d'une eau :

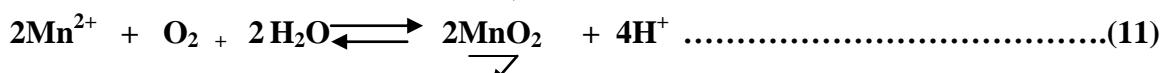
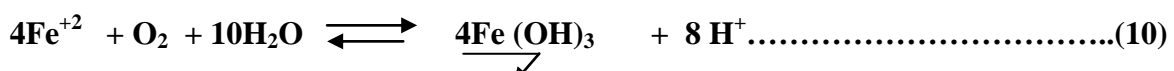
- ✓ La précipitation d'une partie de la dureté carbonatée
- ✓ La réaction d'échange entre le calcium et le sodium, pour la partie de la dureté non carbonate associée au calcium.



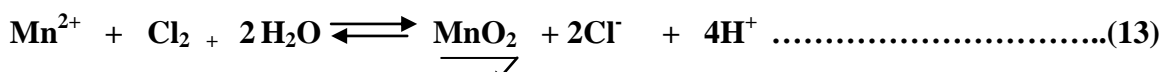
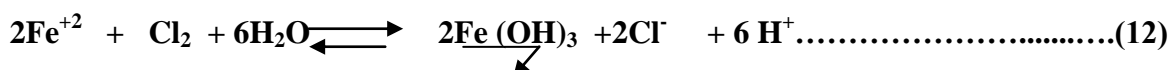
II.1.2. Précipitation des métaux

Principalement le fer et le manganèse étant présents dans la plupart des sols sous forme de minéraux et la solubilisation de ces derniers est responsable de leurs concentrations élevées dans les eaux. Le procédé le plus fréquent consiste à oxydé ces métaux, afin qu'ils puissent être avec d'autres substances et à précipiter sous forme d'hydroxydes.

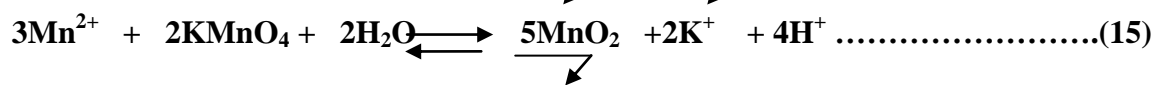
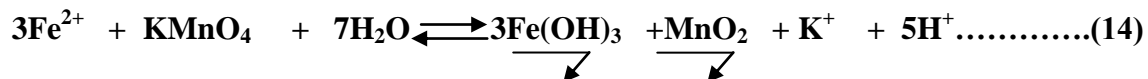
• **Oxydation par oxygène**



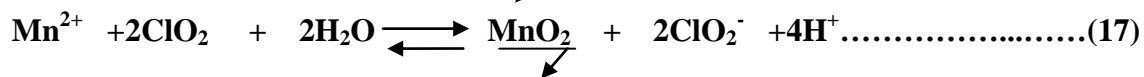
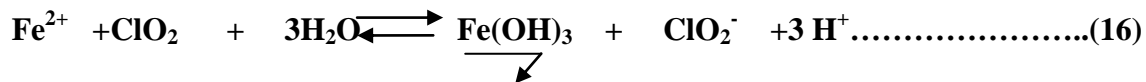
• **Oxydation par le chlore**



- **Oxydation par le permanganate de potassium**

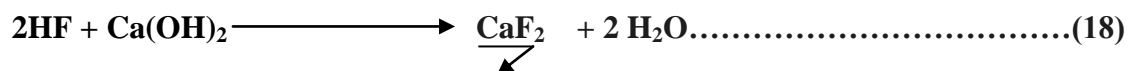


- **Oxydation par le dioxyde de chlore**



II.1. 3. Défloururation des eaux par précipitation

L'élimination des fluorures par précipitation chimique se fait par l'ajout d'un agent de neutralisation qui est principalement la chaux complété par des sels de calcium tels que CaSO_4 ou CaCl_2 .



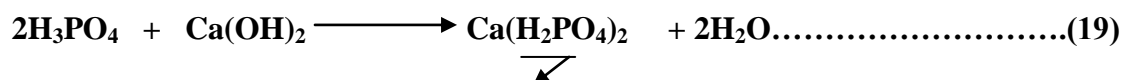
II.1.4. Précipitation chimique des phosphates

Deux modes de précipitation sont envisageables :

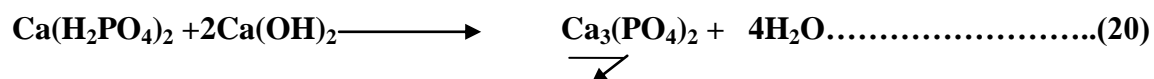
Précipitation par la chaux

En fonction de l'acidité initiale on peut avoir deux réactions

- ✓ pH optimal de 6 à 7 : précipitation de dihydrogène-phosphate de calcium

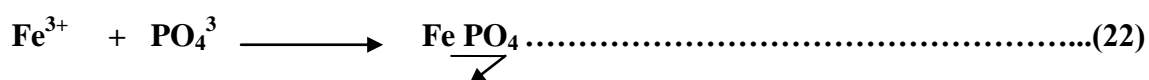


- ✓ pH de 9 à 12 : précipitation de phosphate tricalique



Précipitation par des sels de fer ou d'aluminium

On obtient alors des précipités insolubles de phosphates métalliques, comme le montrent les réactions chimiques suivantes :



II.2. Coagulation et Floculation

Ce procédé facilite l'élimination des particules colloïdales ($1\mu\text{m} > d > 10^{-3}\mu\text{m}$). Il est possible d'ajouter dans l'eau des agents coagulants et floculants. On peut alors récupérer un grand nombre de particules en suspension par décantation, flottation et/ou filtration, cette étape permet d'éliminer 90% des particules en suspensions. Ces procédés peuvent être résumés dans la figure ci-dessous.

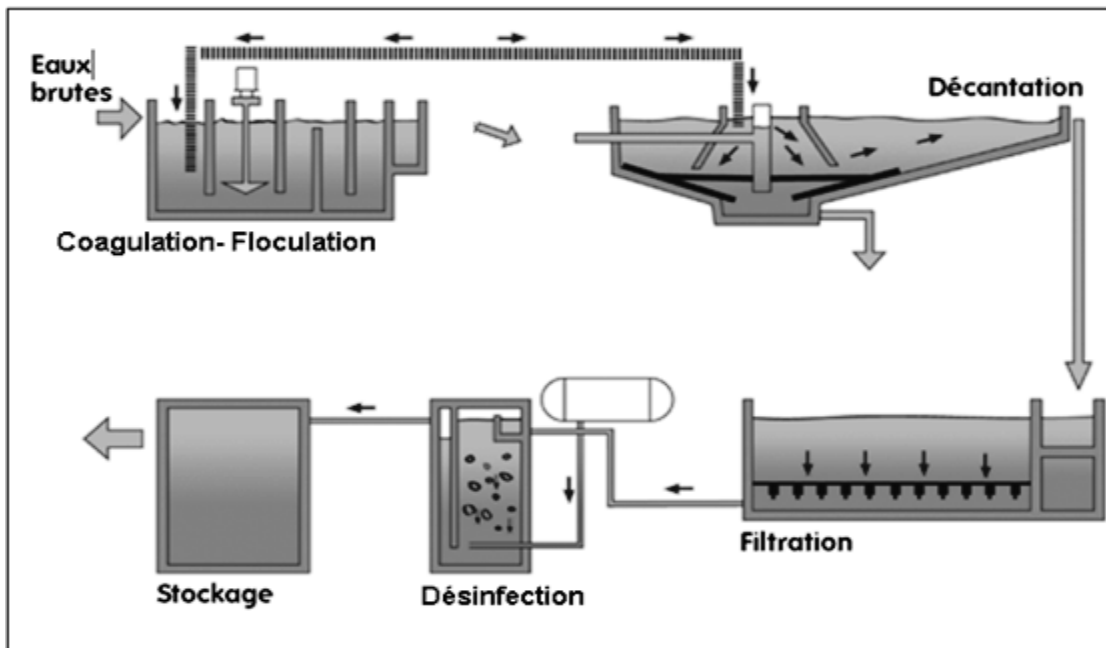


Figure II.1 : Schéma type d'une station de traitement.

II.2.1. Le principe et le but

La couleur et la turbidité d'une eau sont principalement causées par des particules très petites (de diamètre compris entre 1 et $10^{-3}\mu\text{m}$), dites particules colloïdales, ces particules sont naturellement maintenues en suspension sous l'action de forces électrostatiques de répulsions, de ce fait ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres (leurs concentration est très stable) de ce fait elles peuvent traverser un filtre très fin en plus elles sont animées du mouvement brownien et ne sont pas sédimentables. Afin d'éliminer ces particules on a recours aux procédés de coagulation et de floculation.

La coagulation a pour but de déstabiliser les particules colloïdales en suspension afin de faciliter leurs agglomérations, et la floculation a pour objectif de faciliter le contact entre les particules colloïdales déstabilisées, qui s'agglutinent pour former un floc qu'on peut

facilement éliminer par les procédés de décantation pour les plus gros, et par filtration pour les autres.

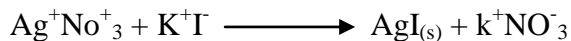
II.2.2. Propriétés des particules colloïdales

a/Charges électriques

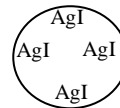
Les particules colloïdales renferment généralement des charges électriques, ces charges ont plusieurs origines:

- La particule peut contenir des groupements ionisables ($-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$, SO_4H), ou encore, il peut y avoir un centre ionisables dans chacune des molécules constituant la micelle (cas des savant RCOO^-Na^+). De même le signe de la charge peut varier selon le pH du milieu (basique ou acide).
- L'adsorption d'ions contenus dans la solution. Si elles adsorbent des anions elles se chargent négativement et si elles adsorbent des cations, elles se chargent positivement. Le signe de la charge dépend à la fois de la nature de la particule et du milieu.

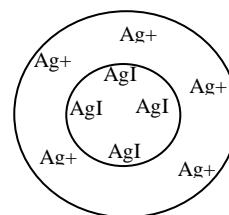
Exemple : On prépare une solution colloïdale d'iodure d'argent AgI,



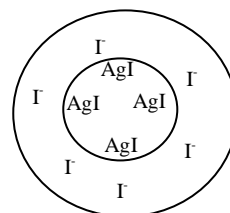
Si les réactifs sont en quantités équivalentes, les particules AgI formées sont neutres :



En présence d'un excès de AgNO_3 , il y a adsorption d'ions Ag^+ et la charge de la particule est positive :



Si c'est KI qui est en excès il y a adsorption d'ions I^- et la charge est négative :



b/Affinité des particules colloïdales pour l'eau

Les particules colloïdales sont soit hydrophiles, en général des particules de matières organiques, ou hydrophobes, qui sont des particules de matières inorganiques. Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourée de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules ce qui empêche la prolongation de la structure et donc les agrégations.

c/Double couche

Les particules colloïdales possèdent habituellement une charge électrique située à leur surface. Ces charges, dites primaires, attirent les ions, de charges opposées (ions négatifs attirent les ions positifs), en solution dans l'eau, lesquels adhèrent fortement à la particule, par attraction électrique, et attirent à leur tour des ions négatifs accompagnés d'une faible quantité d'ions positifs.

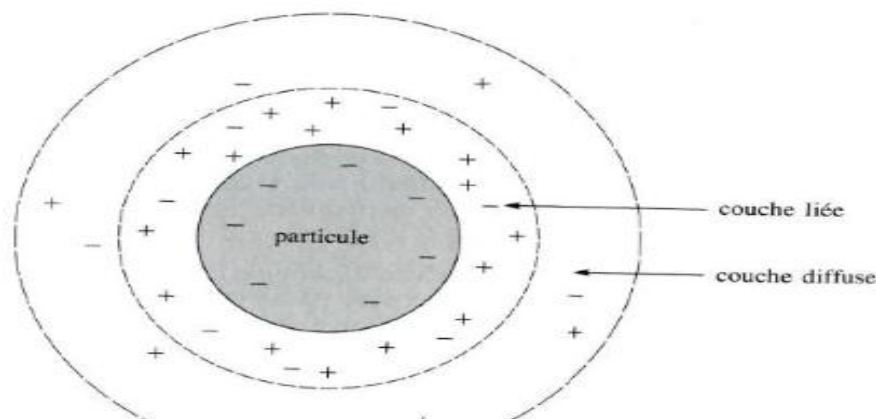


Figure II.2 : Double couche d'une particule colloïdale.

Les ions qui adhèrent fortement à la particule, par attraction électrique, forment la couche liée ou fixe (STERN), qui se déplace avec la particule, et forme autour d'elle une gaine ou un écran protecteur (figure II.2). Alors que les ions qui adhèrent faiblement constituent la couche diffuse (GOUY). Il y a donc un gradient électrostatique entre la surface de la particule et la solution, sachant que tout corps portant une charge électrique q exerce un potentiel V proportionnel à q/r . On effectue cet ensemble de charges est à l'origine d'un potentiel de surface V (potentiel de NERNST) dont la valeur décroît avec la distance à l'interface (figure II.3).

Ce phénomène revêt une importance particulière pour les particules colloïdales, en les empêchant de s'agglomérer et de décanter.

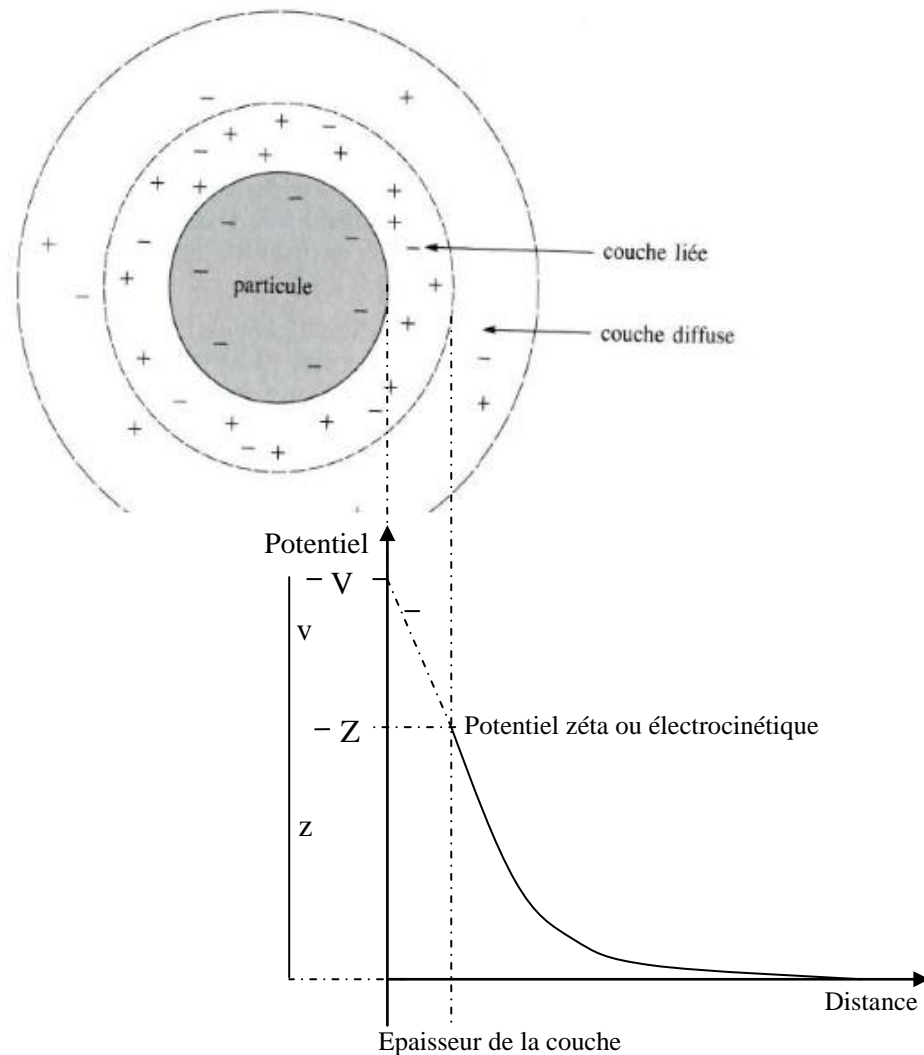


Figure II.3: Double couche et potentiel Zéta.

$V=v+z$ avec V : potentielle dû à la charge réelle, v : potentiel à l'intérieur de couche fixe, z : potentiel Zéta qui est dû à l'ensemble de la charge de la particule et la double couche. C'est le potentiel zéta qui est détermine la mobilité de la particule ainsi que sa stabilité (si z est faible la mobilité de la particule est faible).

II.2.3.Mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales par la coagulation

La charge électrique qui fait repousser les particules et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles colloïdales tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquent, à les stabiliser dans la solution. Le but principal de la coagulation est donc de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération.

La majorité des particules colloïdales sont chargés négativement. Etant de même signe, deux particules colloïdales se repoussent. Elles sont soumises à deux types de force de direction opposée :

- Force d'attraction de van der Waals, F_A , dépend des atomes des particules et de leurs densités.
- Force de répulsion F_R , liée aux charges superficielles des colloïdes et donc à leur potentiel zêta (z).

Si $F_R > F_A$, il y a principalement la répulsion entre les particules colloïdales.

Si $F_A > F_R$, l'agrégation se produit

De ce fait afin de favoriser l'agglomération des particules on peut soit augmenter l'énergie cinétique des particules soit réduire le potentiel de répulsion (z).

Pour réduire le potentiel de répulsion entre les particules (potentiel zêta) il faut amener à proximité des particules des charges de signe opposé (augmenter la distance de la couche liée). Les ions doublement chargé Ca^{2+} contribue deux fois plus que deux ions monovalents comme Na^+ (la force ionique est proportionnelle à $\frac{1}{2} Z^2 c$).

Ces cations sont attirés et adsorbés sur la couche liée (Stern). Le potentiel zêta s'annule ou avoisine le zéro avec la neutralisation de toutes les charges avoisinantes, ce qui permet aux particules colloïdales de se rencontrer.

II.2.4. Coagulants utilisés

Les principaux agent coagulants utilisés pour déstabiliser les particules colloïdale négative et pour produire un floc sont : Les plus utilisés sont des sels d' Al^{3+} ou de fer ferrique Fe^{3+} comme le sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$, l'aluminate de sodium $NaAlO_2$, le chlorure d'aluminium $AlCl_3$, le chlorure ferrique $FeCl_3$, le sulfate ferrique $Fe_2(SO_4)_3$, le sulfate ferreux $FeSO_4$, le sulfate de cuivre $CuSO_4$, et les polyélectrolytes.

En effet lorsqu'on additionne, par exemple, à l'eau les sels d'aluminium ou de fer (à des pH compris entre 7 et 9), ces derniers réagissent avec l'alcalinité de l'eau et produisent des hydroxydes, $Al(OH)_3$, ou $Fe(OH)_3$, insolubles et formant un précipité, et les particules colloïdales en suspension peuvent également s'associer à ces hydroxydes.

De la même manière, pour coaguler un colloïde positif les anions bivalents sont plus efficaces tel que les sulfates SO_4^{-2} . On emploie aussi des polyélectrolytes synthétiques, comportant un grand nombre de charges électriques régulièrement réparties.

En fin, afin de diminuer l'affinité des particules colloïdales hydrophile (lyophile) on ajoute des déshydratants qui ont une forte affinité avec l'eau, comme l'alcool éthylique.

Cette agglomération est, généralement, caractérisée par l'injection et la dispersion rapide de réactifs chimiques, ce procédé permet d'augmenter substantiellement l'efficacité des traitements ultérieurs (décantation et/ou filtration).

L'agrégation se fait à travers trois phénomènes successifs que sont l'hydrolyse (formation des radicaux hydroxydes métalliques), la coagulation et la floculation

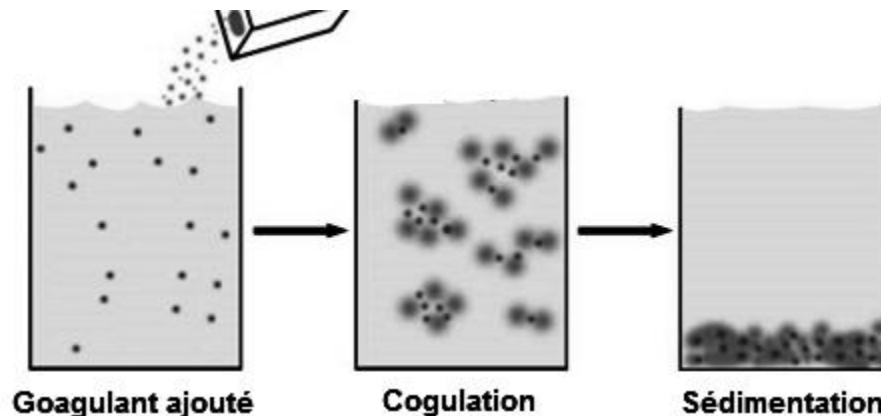


Figure II. 4 : Processus de coagulation, floculation et de sédimentation.

II.2.5. Floculation

Après avoir été déstabilisées par la diffusion rapide du coagulant, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules, les quels sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules. Cette différence de vitesse peut être attribuée : soit au mouvement brownien des particules (floculation précinétique), soit au déplacement d'une partie du fluide (floculation orthocinétique).

- **Floculation pricinétique**

Dans la floculation pricinétique F_p , les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celle-ci (mouvement brownien).

On peut exprimer le taux de variation de la concentration des particules dans la solution à l'aide de l'équation suivante :

$$F_p = dN/dt = -4\Gamma k \theta (N)^2 / 3\eta \quad \text{avec}$$

N : concentration totale des particules au temps t (nombre de particules / m^3).

Γ : nombre de collision qui entraîne l'agrégation de deux particules/nombre de collision total.

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$).

θ : température absolue (K).

η : viscosité dynamique de l'eau (Pa S).

Après intégration et en posant $N=N_0$ à $t=0$, et en posant $t_{1/2} = 3 \eta / 4\Gamma k \theta N_0$ on obtient

$$N=N_0/1+(t/t_{1/2})$$

Avec $t_{1/2}$ temps nécessaire que pour que la concentration des particules soit réduites de moitié.

Exemple : Une eau contient une concentration initiale de 10^{10} particules/L. En supposant que 3 collisions sur 4 ont pour résultat une agglomération et qu'il n'y a aucun brassage de l'eau, calculez le temps nécessaire pour que le nombre de particules soit ramené à 10^8 particules/L. la température de l'eau est de 15°C .

Sachant que qu'à 25°C on a $t_{1/2} = (1,6 \times 10^{17}) / \Gamma N_0$

- **Floculation orthocinétique**

On appelle floculation orthocinétique F_o , la floculation provoquée par l'agitation de l'eau afin d'augmenter la probabilité des collisions entre les particules. La vitesse du fluide varie donc dans l'espace et dans le temps, qui est caractérisée par un gradient de vitesse, G . Le taux de floculation peut être décrite selon l'équation suivante :

$$F_o = dN/dt = -(2\Gamma G d^3 (NN_0))/3$$

D : diamètre des particules en m

G : gradient de vitesse (s^{-1})

Après intégration, avec $N=N_0$ à $t = 0$ et $N = N$ à t on obtient

$$\ln(N/N_0) = -(2\Gamma G t d^3 N_0)/3 = -(4\Gamma G t \Pi d^3 N_0)/\Pi 6 = - \frac{4}{\Pi} \Gamma G t \left(\frac{\Pi d^3 N_0}{6} \right)$$

Avec $(\Pi d^3 N_0)/6$ est le volume total de particules par unité de volume de solution.

La comparaison entre la floculation orthocinétique et la floculation péricinétique nous permet de calculer le gradient de vitesse G

$$F_o/F_p = \eta G d^3 / 2k \theta$$

La vitesse d'agitation agit sur la probabilité de rencontre des particules. Mais, il n'est pas possible de l'augmenter exagérément. Si elle est trop élevée, les floccs formés subissent un cisaillement mécanique entraînant leur destruction et ils se reforment rarement eux-mêmes. La floculation est donc favorisée par une vitesse d'agitation assez faible qui amène doucement les floccs à se réunir.

Le flocc qui se forme par l'agglomération de plusieurs colloïdes déstabilisés peut ne pas être suffisamment large pour décanter à la vitesse souhaitée. L'utilisation d'un flocculant est alors nécessaire. Il rassemble toutes les particules de flocc dans un filet, construisant un pont d'une surface à l'autre et liant chaque particule pour former de vastes agglomérats.

On utilise comme flocculant:

- **des polymères minéraux** tels que la silice activée (SiO_2), généralement associée au sulfate d'aluminium en eau froide,
- **des polymères naturels** extraits de substances animales ou végétales : amidons, alginates (obtenus à partir d'algues marines),
- **des polymères de synthèse** apparus plus récemment qui ont fait évoluer considérablement les performances de la floculation. Ils conduisent souvent à un volume de boue très inférieur.

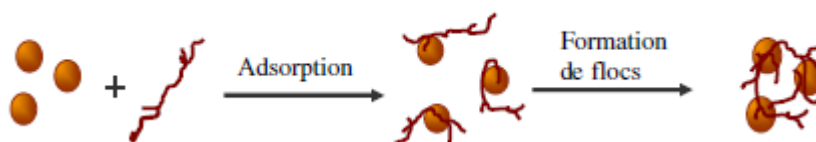


Figure II.5 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères.

II. 3. Procédés électrochimiques de dépollution (électrocoagulation EC)

Cette méthode est utilisée dans le traitement de divers polluants : dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Sn, Mg, Se, Mo, Ca et Pt ; également des anions tels que CN^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- et Cl^- ; les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, Hydrocarbures Totales de Pétrole (TPH), Toluène, Benzène et Xylène (TBX), Methyl tert-butyl ether (MTBE), DBO, MES, Minéraux, colorants organiques, huiles et graisses tous des effluents industriels variés.

II.3.1. Principe de décontamination électrolytique des rejets industriels

L'électrocoagulation est une méthode de traitement des eaux basée sur la dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel (dissolution anodique d'électrode soluble) qui, une fois dans l'effluent et moyennant les autres réactions connexes telle que l'électrolyse de l'eau, donne des complexes d'hydroxydes métalliques qui vont assurer l'adsorption, la coagulation puis la floculation des particules et des composés polluants dissous.

L'action directe d'un champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer des conditions d'une bonne coagulation-floculation. En effet le champ électrique permet de créer, d'une part, un gradient de vitesse affectant toutes les particules chargées notamment les ions et les colloïdes facilitant ainsi leur rencontre et, d'autre part, en utilisant les anodes de fer et d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création de floccs de taille suffisante.

La séparation des polluants des eaux usées est réalisée par flottation (par l'action des bulles des gaz d' O_2 et H_2) ou par décantation.

II.3.2. Différents matériaux utilisés pour les électrodes

Les électrodes les plus couramment utilisées sont celles en fer et en aluminium Fe/Al. Cependant des essais ont été conduits sur d'autres couples d'anode/cathode qui sont utilisés en électrocoagulation : Anode en plomb et cathode en acier inox, Titane /Platine, Ti/Pt/Ir, Fe/Al ou Al/Fe, Ti/acier, Al/Cu, Fe/Cu, Zn/Ni.....etc

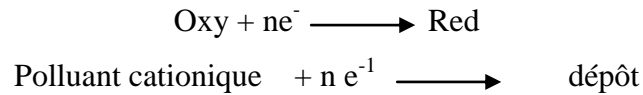
II.3.3. Mécanisme d'électrocoagulation

On peut résumer ce processus par l'électrophorèse (déplacement de particules chargées sous l'effet du champ électrique).

A la cathode

La réduction cathodique et chimique des composés organiques et inorganiques ainsi que la formation de dépôts métalliques à la cathode.

Réduction cathodique :



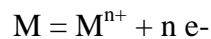
L'électrolyse de l'eau à la cathode



Ces bulles d'hydrogène empêchent ou réduisent la formation des dépôts sur la cathode et donc augmentent le rendement de l'EC quel que soit le type d'électrode utilisé.

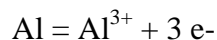
A l'anode

On a l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels (dissolution de l'anode sacrificielle, de l'état solide à l'état ionique et formation des coagulants (Ions métalliques)).

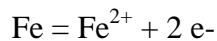


Oxydation anodique :

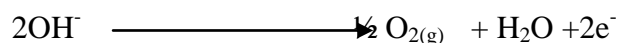
L'aluminium se dissout suivant la réaction d'oxydation:



La dissolution du fer se fait à travers la réaction suivante:



L'électrolyse de l'eau à l'anode



Les ions métalliques peuvent d'une part déstabiliser les polluants (les particules colloïdales) et cassent les émulsions. Et par conséquent l'agrégation des phases déstabilisées puis formation des floccs qui peuvent être éliminés par flottation (dus à la présence de bulles de gaz d'hydrogène (H₂) générées à la cathode). D'autre par les ions métalliques peuvent se précipiter sous forme de hydroxydes de fer Fe(OH)₂ ou hydroxydes d'aluminium à un pH supérieur à 6. Ces hydroxydes (ferreux ou d'aluminium) possèdent une forte capacité d'adsorption des polluants à leurs surfaces.

L'aluminium réagit avec l'eau en présence d'anions tels que les chlorures.



De même pour les ions ferreux, qui précipitent sous forme de Fe(OH)₂ à un pH supérieur à 6.

Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques :

- Les monocomplexes: $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$
- Les polycomplexes: $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$
- Les espèces amorphes et très peu solubles telles que $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3

Dans le cas du fer, on a les complexes tels que FeOH_2^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_2$

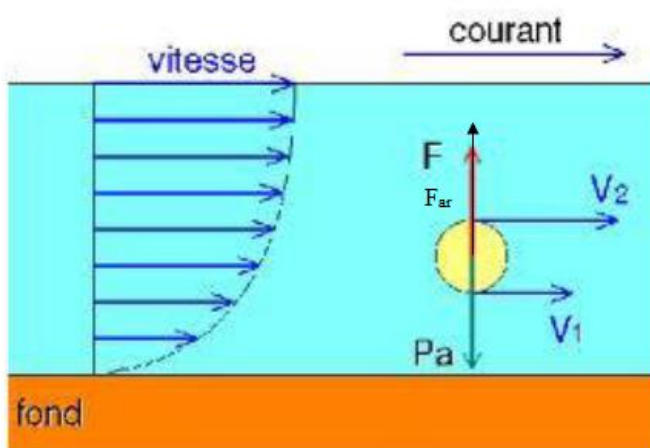
II.4. Procédés séparatifs

II.4.1 Décantation

La décantation est le procédé de séparation mécanique, par différence de gravité de phases non-miscible dont l'une est au moins est liquide. Cette méthode est utilisée afin de séparer : des phases liquides, et plus particulier, pour éliminer les particules en suspension et les floes après l'étape de coagulation/floculation dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules s'accumulent au fond du bassin sous l'action de la pesanteur, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface, dite décantée, est ensuite dirigée vers un filtre.

II.4.1.1. Bilan des forces de la décantation des particules

Toute particule présente dans l'eau est soumise à la force de pesanteur, qui est l'élément moteur, permet la chute de cette particule. Les forces de frottement dues à la traînée du fluide s'opposent à ce mouvement. La force de la poussée d'Archimède.



Pour que la décantation puisse se faire correctement, il faut que la vitesse horizontale (V_H : charge hydraulique ou de Hazen) de l'eau soit inférieure à la vitesse verticale ou de sédimentation des particules V_s .

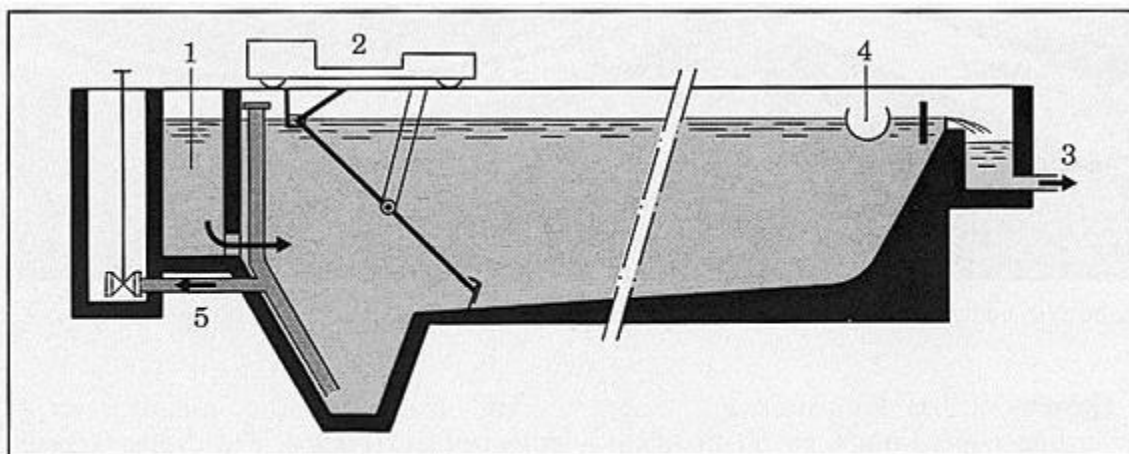
II.4.1.2. Types de décanteurs

Il existe deux types de décanteur:

a/ Décanteur simple

Le décanteur simple est constitué d'une cuve munie d'une zone d'entrée et de deux zones de sortie (une pour la sur-verse et l'autre pour les boues). Il existe des décanteurs dits simples : à flux horizontaux et à flux verticaux.

✓ **A flux horizontaux** : Dans ces bassins, la condition pour qu'une particule soit retenue est qu'elle ait le temps d'atteindre le fond avant le débordement ou la sortie de l'ouvrage.



1 - Arrivée d'eau brute.
2 - Pont racleur.
3 - Sortie d'eau décantée

4 - Reprise des flottants.
5 - Évacuation des boues.

Figure II.6: Décanteur simple à flux horizontaux

✓ **A flux verticaux** : Ce sont des ouvrages de forme conique ou pyramidale pour permettre un contrôle plus aisé du voile de boues.

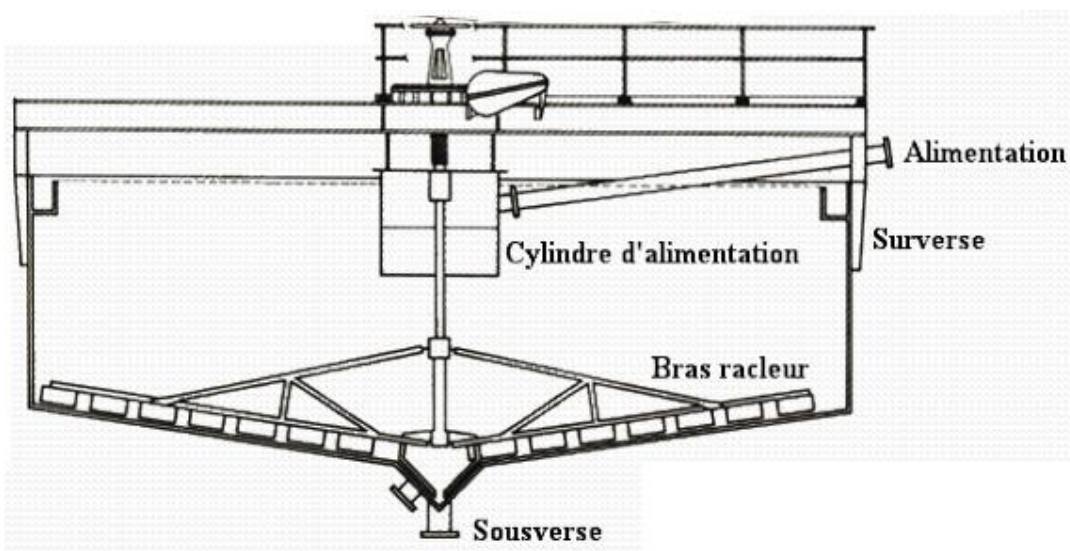


Figure II.7: Décanteur simple à flux verticaux

b/Décanteur lamellaire

Afin d'augmenter la capacité d'un décanteur il faut augmenter la surface de décantation. Pour ce faire, il suffit d'ajouter des paliers dans le décanteur. Toutefois on doit laisser entre chaque palier une surface suffisante pour qu'une certaine quantité de boues s'accumule. Il existe deux types de décanteurs lamellaires: décanteurs à tubes et décanteurs à lamelles.

b-1. Décanteurs à tubes

On trouve sur le marché deux types de décanteurs à tubes: ceux dont les tubes sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale (7°) et ceux dont les tubes sont fortement inclinés par rapport à l'horizontale (60°).

Dans les tubes inclinés à 7° lorsque l'eau flocculée pénètre dans le décanteur, les particules de floc s'y déposent et s'y accumulent, alors que le liquide surnageant est acheminé vers les filtres. L'accumulation des solides dans les tubes réduit la section d'écoulement, ce qui augmente la vitesse de l'eau, et l'ors que cette vitesse est suffisamment élevée, les solides sont remis en suspension dans l'eau et entraînés vers les filtres. Ce qui nécessite de laver les filtres à contre-courant et une partie de ces eaux est alors acheminée vers les décanteurs ce qui permet d'entraîner la totalité des solides accumulés dans les tubes (le lavage). Ce type de décanteur est utilisé dans les usines dont la capacité de production est inférieure à $4000 \text{ m}^3/\text{j}$.

Dans les usines dont la production plus importante, il est recommandé d'installer les tubes inclinés à 60° . En effet leur forte inclinaison permet d'obtenir un autonettoyage continu.



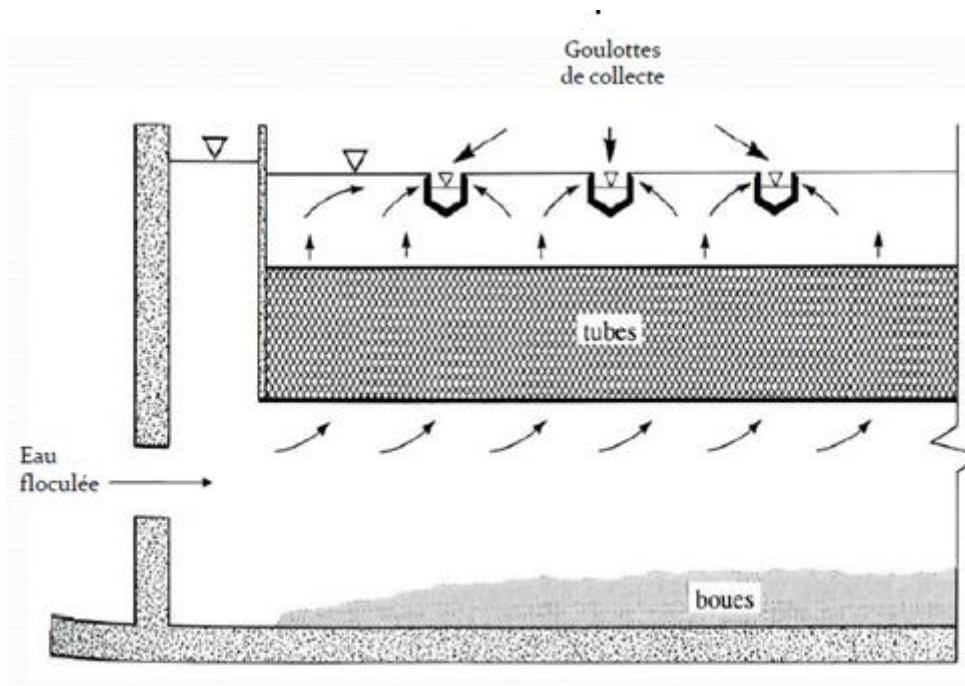


Figure II.8 : Décanteur à tubes inclinés à 60° .

b-2. Décanteurs à lamelles

Les décanteurs à lamelles sont constitués d'un empilement de plaques inclinées à 35° par rapport à l'horizontale. L'eau s'écoule de haut en bas (figure II.9), ce qui permet d'avantage le glissement des solides au fond du bassin de décantation.

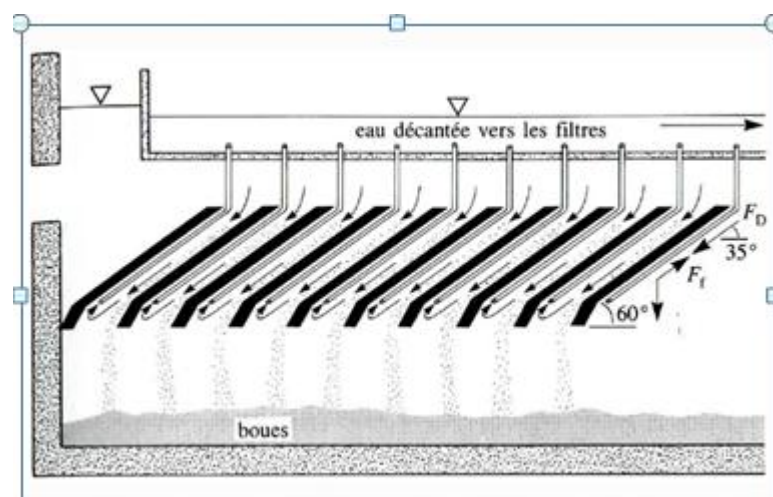


Figure II.9 : Décanteur à lamelles.

Les décanteurs à lamelles sont plus coûteux que les décanteurs à tubes. On choisit en général le type de décanteur en fonction des caractéristiques des particules à éliminer. Pour les particules de floccs lourdes, on opte pour un décanteur à tubes, ou la force de pesantur

suffit pour permettre l'autonettoyage. Dans le cas contraire, on utilise un décanteur à lamelles, en plus de la force de la pesanteur il faut associer la force de trainée afin d'assurer l'autonettoyage.

II.4.2. La filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des matières en suspension en le faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'y accumulent; il faut donc prévoir un nettoyage du filtre.

Différentes techniques de filtration existent, tel que la filtration en profondeur sur un milieu poreux au travers duquel passe une suspension et où sont retenues les particules solides (exemple : lit de sable dans le traitement de l'eau potable), et d'autre part des séparations à l'aide de membranes.

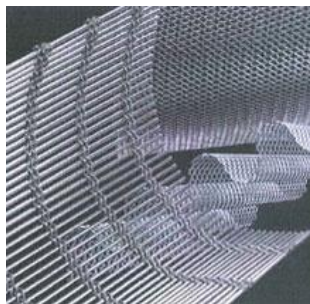
II.4.2. 1. Filtration sur un milieu poreux

a/Matériaux des filtres

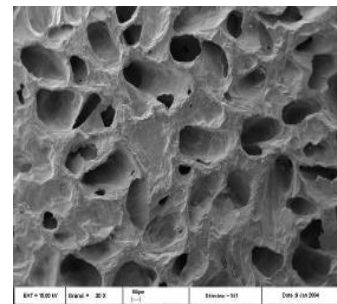
Selon le type de filtre adopté, on a recourt à divers matériaux filtrants; on utilise ainsi:
✓ Des tissus de fibres, des toiles métalliques ou des pierres poreuses à interstices très fins. Ces matériaux retiennent les solides en surface; on les utilise rarement pour traiter des quantités d'eau importantes.



Tissus en fibres de carbone



Toiles métalliques



Pierres poreuses

✓ Des granules libres : qui n'adhèrent pas les unes aux autres. Ces matériaux sont insolubles et inattaquables par le liquide filtré ou par les solides qui s'y déposent. La filtration a lieu soit en surface, soit en profondeur, selon les caractéristiques granulométriques du matériau filtrant et selon la grosseur et la cohésion des solides en suspension.

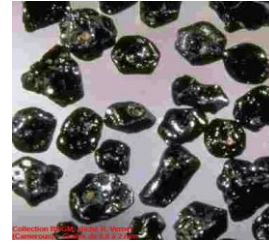
Le sable, l'antracite et l'ilménite sont couramment utilisés dans les usines de traitement des eaux.



Sable



L'anthracite: combustible solide fossile le plus dur des charbons



L'ilménite: un minéral accessoire commun dans les roches magmatiques basiques

b/Types de filtres

Pour le traitement des eaux potables, on utilise principalement: des filtres à sable rapides ou des filtres à sable lents. En pratique, les filtres à sables rapide sont les plus utilisées. En ce qui concerne les filtres à sable lents, de construction et de fonctionnement simples, nécessite de grandes superficies; c'est pour quoi on les utilise surtout dans les pays où le climat est moins rigoureux, et lors qu'on n'est pas limité par l'espace.

- **Filtres à sable rapides** : Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation. Le matériau filtrant est maintenu en place par gravité et l'écoulement de l'eau à lieu de haut en bas. Lorsque le milieu filtrant est encrassé, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau; le milieu filtrant est alors en expansion, et les particules d'impuretés, beaucoup moins denses que les grains de sable, sont alors décollées et évacuées.

Les principaux éléments d'un filtre rapide sont: le fond de filtre, le gravier de support et le milieu filtrant (figure ci-après).

Fond de filtre

Le fond de filtre est la structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant (1 m de sable et de gravier) et l'eau située au-dessus du milieu filtrant (2 m d'eau).

Il permet en outre :

- ✓ De collecter et d'évacuer les eaux filtrées.
- ✓ De distribuer uniformément l'eau de lavage.

Gravier de support

Le gravier de support, situé au-dessus du fond de filtre, permet:

- ✓ De retenir le sable du milieu filtrant;
- ✓ D'améliorer la répartition de l'eau de lavage dans le filtre.

Milieu filtrant

Les matériaux filtrants les plus utilisés sont le sable et l'antracite. Pour éviter le problème de colmatage des filtres à sable on peut utiliser un filtre constitué d'une couche de sable surmontée d'une couche d'antracite. Les grains d'antracite sont plus légers et plus gros que les grains du sable, demeurent sur le dessus du milieu filtrant. Ainsi les petites particules d'impuretés traversent facilement la couche d'antracite et sont arrêtées par la couche du sable, tandis que les grosses particules sont arrêtées par la couche d'antracite. Un filtre à deux couches permet donc une meilleure utilisation du milieu filtrant.

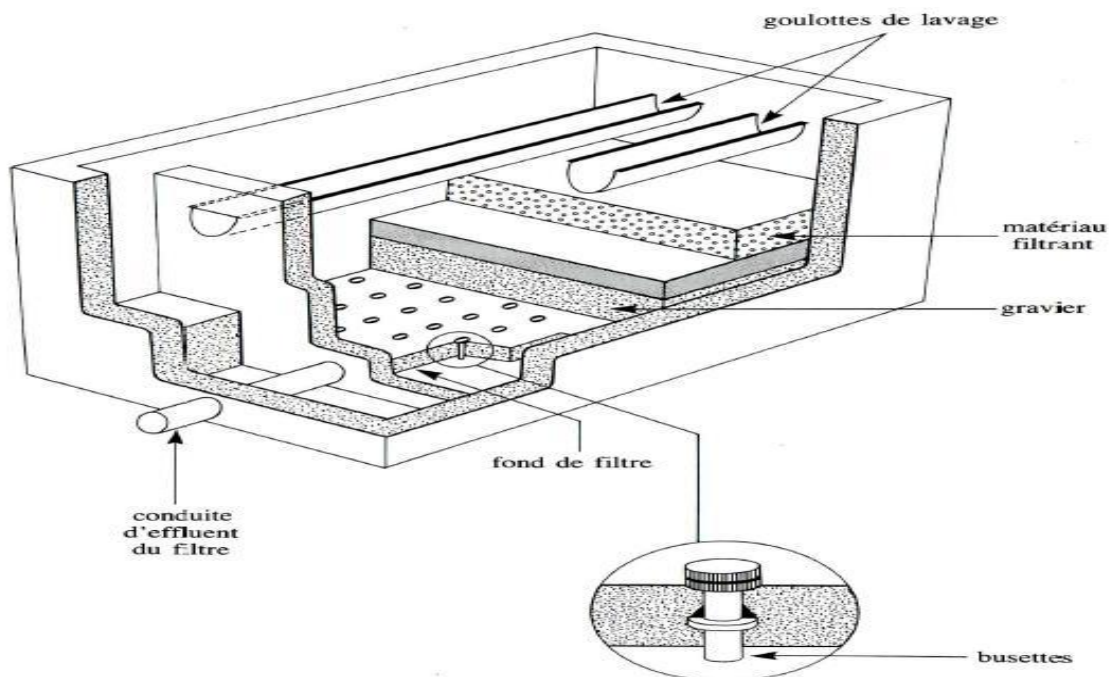


Figure II 10 : Filtres à sable.

- **Filtre à sable lents** : Les filtres à sable lents doivent être construits de telle sorte que l'eau traverse lentement une couche de sable fin et que les particules les plus grosses soient arrêtées près de la surface du sable. Ces particules forment une couche poreuse très fine, dont la surface totale de pores est très grande, ce qui facilite l'adsorption des impuretés par cette couche ou par le sable sous-jacent. Cette couche poreuse est constituée de bactéries, d'algues et de protozoaires. La filtration lente combine donc les effets de processus physiques et de processus biologiques.

-Avantages des filtres lents

- a) Les filtres lents permettent de ne pas recourir à la coagulation.
- b) Les matériaux de construction de ces filtres sont simples

- c) La surveillance du fonctionnement de ces filtres est simple.
- d) Leur effluent est moins corrosif et de qualité plus constante que celui des filtres rapides, les quels exigent un traitement chimique.
- e) Ils éliminent bien les bactéries.

-Inconvénients des filtres lents

- a) Les filtres lents occupent une grande superficie; ils exigent donc une installation de grandes dimensions, un volume de sable important.
- b) Leur mise en exploitation et leurs lavages requièrent de longues périodes de temps, au cours des quelles ils sont inutilisables.
- c) Ils décolorent médiocrement les eaux colorées.
- e) Ils donnent de mauvais résultats lorsque les eaux sont riches en algues et qu'elles n'ont pas été préalablement traitées.

II.4.2. 2. Séparation par membranes

Les procédés de séparation par membranes constituent une alternative prometteuse au traitement conventionnel de l'eau. Différentes membranes peuvent être utilisées pour éliminer la turbidité, les bactéries, les virus et les composés organiques macromoléculaires. Les membranes permettent aussi d'adoucir l'eau, et de produire de l'eau potable à partir d'eau saumâtre ou même d'eau de mer. Les membranes ont l'avantage de limiter les quantités de réactifs chimiques nécessaires à la purification de l'eau.

• Mécanismes de transport au travers des membranes

Ils peuvent être classés en deux familles

Filtration

On utilise des membranes dites semi-perméables : la solution est concentrée par passage sélectif de l'eau, alors que les autres composants du fluide sont plus ou moins arrêtés en surface du milieu poreux suivant leur taille, voire aussi leur charge. L'idéale est d'avoir une membrane qui n'est perméable qu'à l'eau (osmose parfaite).

Dialyse

Dans ce cas, les membranes utilisées permettent le passage sélectif ou non des ions, alors que l'eau ne traverse pas les membranes. Ces membranes, peuvent être neutres ou chargées. Si elles sont chargées (matériau identique à celui des résines échangeuses d'ions, mis sous forme de feuilles), elles deviennent sélectives quant au transport des ions de signes opposés et

l'on peut ainsi constituer des membranes, cationiques ne transférant que les cations, ou anioniques ne transférant que les anions.

- **Membranes semi-perméables ou de filtration**

Pour ces membranes, l'eau est la phase transférée préférentiellement, sous l'effet de gradient de pression. Elles sont la plupart du temps décrites comme membranes de filtration et classées en fonction de leur taille de pores.

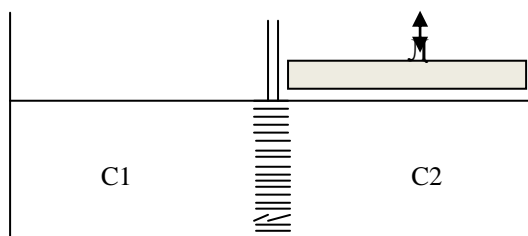
- **Osmose inverse (O.I.)**

Ce procédé consiste à utiliser les propriétés des membranes semi-perméables à travers lesquelles migre l'eau, alors que tous les solutés sont rejetés, à l'exception de quelques molécules organiques similaires à l'eau. En effet si on sépare une solution saline concentrée d'une solution plus diluée par une membrane semi-perméable, la différence de potentiel chimique tend à faire passer l'eau du compartiment à bas potentiel (concentration moins élevée) vers celui à potentiel plus élevé (concentration plus élevée) pour diminuer celui-ci (osmose directe), il en résulte une dilution de ce dernier compartiment. A l'équilibre, la différence de pression ainsi créée est appelée pression osmotique du système : $\Pi = \Delta C RT$ avec

Π : Pression osmotique (atm)

ΔC : Différence de concentration (mol L^{-1}).

Si l'on veut inverser cette diffusion, il faut exercer une pression sur le fluide « filtré ». Pour produire de l'eau pure à partir de l'eau saline, il faut donc utiliser des pressions supérieures à la pression osmotique de la solution. Une membrane semi-perméable laisse passer les molécules d'eau à travers les pores très fins tandis que les autres substances sont rejetées. Selon ces techniques de séparation, des particules de l'ordre de grandeur des virus, et même des petites molécules dissoutes ou des sels sont retenus.



Cellule osmotique

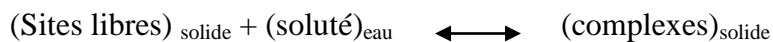
II.4.3. Adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface. En effet les échanges de matière (ions, molécules...) et des interactions s'effectuent à l'interface entre deux milieux, qui diffèrent au moins d'une des propriétés tels que la nature des phases.

On utilise le procédé d'adsorption dans les eaux usées afin de :

- L'élimination des micropolluants organiques peu solubles dans l'eau (mais à l'état de traces).
- L'élimination des goûts et odeurs dus à la présence de certains composés organiques
- Diminuer le potentiel de formation de sous-produits de chloration ; l'élimination des toxines d'algues, la réduction des oxydants résiduels ainsi que plusieurs substance toxiques, non biodégradable.

En traitement des eaux, on utilise presque exclusivement le charbon activé comme adsorbant.



II.4.3.1. Charbon activé

Le charbon activé élimine les impuretés de l'eau en les fixant et en les faisant s'accumuler à sa surface poreuse (surface absorbante). Le charbon activé est particulièrement efficace pour l'élimination des polluants organiques dissous, comme les détergents, les colorants solubles, les solvants chlorés, les phénols, les goûts et les odeurs. La plus grande partie de la surface adsorbante est située dans les pores engendrés par l'activation du charbon.

On peut produire du charbon à partir de matériaux comme le bois, le charbon, la coke, la lignine, le lignite, la noix de coco et les résidus du pétrole. L'activation du charbon obtenu se fait à l'aide d'un traitement à la vapeur (750 à 950 °C) qui a pour but principal de brûler les résidus situés à l'intérieur des pores afin d'élargir ces derniers et d'augmenter la surface spécifique, comme on peut activer le charbon par l'acide phosphorique ou d'autres réactifs à des températures plus faibles.

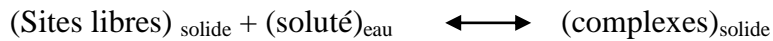
- **Types de charbon activé**

- Charbon activé granulaire est préparé à partir du charbon, offre en général les meilleures caractéristiques d'utilisation dans les filtres, il peut être aussi régénéré.

- Meilleurs charbons activés en poudre sont préparés à partir de la lignine et de le lignite.

II.4.3.2. Isotherme d'adsorption

L'adsorption d'un composé chimique dissous dans l'eau à la surface d'un solide, comme le charbon actif, est un équilibre entre une réaction d'adsorption et la réaction inverse de désorption, qui peut être schématisé par :



On peut décrire un processus d'adsorption à l'aide d'une isotherme d'adsorption, une telle isotherme est une courbe qui représente la relation entre les quantités d'impuretés adsorbées par unité de masse de charbon activé (J/m) et la concentration d'impuretés en solution.

$J = (C_0 - C) V$ avec J : masse d'impuretés adsorbées (mg)

C_0 : concentration initial d'impuretés (mg/L)

C : concentration final d'impuretés (mg/L)

V : volume de solution (L)

Les équations de base pour l'isotherme d'adsorption sont celles Langmuir et Freundlich

-Isotherme d'adsorption de Langmuir

L'équation de l'isotherme de Langmuir est la suivante :

$J/m = abC/(1+aC)$ si on inverse l'équation on obtient :

C'est l'équation d'une droite (ordonnée $1/(J/m)$; abscisse : $1/C$).

A l'aide des essais au laboratoire on peut tracer la courbe $1/(J/m)$ en fonction de $1/C$ et déterminer les valeurs de a et b

Exemple

Isotherme d'adsorption de Freundlich

En traitement des eaux, c'est le modèle simple et empirique de FREUNDLICH qui est le plus communément utilisé. Elle repose sur l'équation empirique suivante :

$J/m = KC^{1/n}$ où K et n des constante qu'il faut évaluer pour chaque solution et pour chaque température.

La forme exploitée la plus courante est le tracé en échelles logarithmiques des variations de J/m en fonction de C :

$\text{Log } J/m = \log K + 1/n (\log C)$ équation d'une droite (ordonnée : $\log (J/m)$;
abscisse : $\log C$)

La constante K est relative à la capacité d'adsorption. Elle est d'autant plus élevée que la capacité d'adsorption du charbon actif est grande. La constante n donne une indication sur l'intensité de l'adsorption qui diminue avec l'augmentation de la valeur de n .

II.4.4. Echange d'ions

L'échange d'ions est un procédé par lequel, dans certaines conditions, une substance insoluble (résine) attire un ion positif ou négatif d'une solution et rejette un autre ion de même signe: $n(R^-A^+) + B^{n+} = R_n^-B^{n+} + nA^+$

Avec

R^- = radical anionique faisant partie de la résine échangeuse d'ions

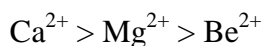
A^+ = ions fixés sur la résine neuve

B^{n+} = ions en solution

En général une résine a une plus grande affinité pour les ions dont la valence est la plus élevée : $Fe^{3+} > Mg^{2+} > Na^+$



Pour les ions de même valence, la réaction d'échange est plus forte lorsque les rayons de l'ion diminue (le numéro atomique augmente).



II.4.4.1. Types de résines échangeuses d'ions

La plupart des résines utilisées de nos jours sont des matières synthétiques produites à partir d'un polymère. Le nombre et la variété des groupes fonctionnels influencent la capacité d'échange des ions des résines. On peut les classer en deux catégories : les résines échangeuse de cations et les résines échangeuse d'anions.

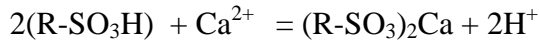
a/ Résines échangeuses de cations

On peut les subdiviser en deux groupes : les échangeurs fortement acides et faiblement acides.

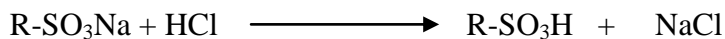
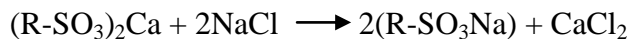
- Echangeurs de cations fortement acides

Ils sont caractérisés par la présence de radicaux sulfoniques, HSO_3^- , dont les acidités sont voisines de celles de l'acide sulfurique.

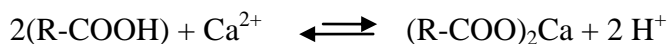
L'équation suivante présente une réaction observée lors de l'utilisation d'un échangeur de cation fortement acide.



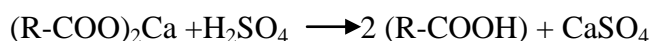
Une fois la résine est saturée d'ions calcium, on doit la régénérer. La première régénération est effectuée à l'aide du NaCl puis du HCl ou H_2SO_4 :

**✓ Echangeurs de cations faiblement acides**

Les échangeurs faiblement acides sont caractérisés par la présence de radicaux carboxyliques, COOH . L'équation suivante est observée lors d'utilisation d'une résine échangeur de cations faible acidité :



La régénération de la résine saturée s'effectue à l'aide d'une solution concentré de HCl ou H_2SO_4 .

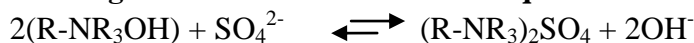


L'utilisation des résines faiblement acide est limitée aux eaux dont le pH est supérieur à 7 est dont l'alcalinité est élevée.

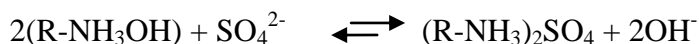
b/ Résines échangeuses d'anions

On trouve des résines échangeurs d'anions fortement basiques et des échangeurs faiblement basiques.

-Echangeurs d'anions fortement basiques : elles fixent les acides ou la silice.



Les résines peuvent être régénérées à l'aide d'une solution de NaOH

**-Echangeurs d'anions faiblement basiques**

II.5. La désinfection

Les micro-organismes font partie des composés en suspension, la grande majorité d'entre eux ne sont pas visibles à l'œil nu, à l'exception de quelques eucaryotes (algues et agrégats de champignons). Les virus sont les plus petits, à la limite du dissous.

La désinfection est une étape primordiale en production d'eau potable. Elle est toujours utilisée quels que soient les types de filière de traitement et de ressource. Afin de produire et distribuer une eau exempte de germes pathogènes. En effet la désinfection est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies.

On peut procéder à la désinfection en ajoutant à l'eau une certaine quantité d'un produit chimique doté de propriétés germicides. Les produits chimiques les plus utilisés sont: le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone, le brome, l'iode et le permanganate de potassium. On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques: ébullition, ultrasons, ultraviolets ou rayons gamma.

II.5.1. Procédés chimiques

Les désinfectants chimiques utilisés en production d'eau potable sont le chlore gazeux Cl_2 , les hypochlorites de sodium NaOCl , le dioxyde de chlore ClO_2 le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , et l'ozone.

La désinfection chimique en usine consiste à appliquer une certaine concentration résiduelle de désinfectant pendant un temps de contact suffisamment important, tout en limitant la formation de sous-produits de désinfection.

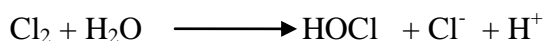
a/ Désinfection par le chlore

Le chlore gazeux est l'un des désinfectants les plus utilisés pour la désinfection de l'eau potable. Il est facilement applicable et très efficace contre la désactivation des microorganismes pathogènes. Le chlore peut être facilement appliqué, mesuré et contrôlé. Il est bon marché.

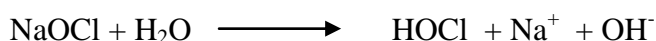
-Aspect chimique de la chloration

Le chlore gazeux et les hypochlorites réagissent rapidement avec l'eau pour former de l'acide hypochloreux HOCl , qui est le produit actif dans la désinfection.

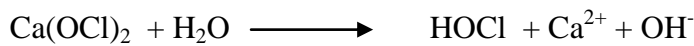
Réaction du chlore gazeux



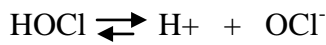
Réaction de l'hypochlorite de sodium



Réaction de l'hypochlorite de calcium



L'acide hypochloreux, HOCl, est un acide faible qui réagit de la façon suivante :



Le chlore tue les organismes pathogènes tels que les bactéries et les virus en cassant les liaisons chimiques de leurs molécules. Lorsque l'enzyme vient en contact avec les composés du chlore, un ou plusieurs atomes d'hydrogènes de la molécule sont remplacés par le chlore. Ce ci va modifier la structure entière de la molécule et dans la plupart des cas provoquer sa dissociation ou sa désactivation. Lorsque les enzymes ne fonctionnent pas correctement, la cellule ou la bactérie mourra.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> • Il peut être facilement transporté et stocké. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le chlore donne un goût caractéristique à l'eau • Certains dérivés chlorés sont dangereux
<ul style="list-style-type: none"> • Système très simple: il suffit d'utiliser une pompe à injection ou un injecteur venturi pour mélanger du chlore avec l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • L'installation nécessite le transport et le stockage de produit toxique • L'efficacité du chlore dépend du pH de l'eau

b/ Désinfection par peroxyde d'hydrogène H₂O₂

Le peroxyde d'hydrogène est un composé polyvalent, il peut être utilisé pour beaucoup d'applications. Il est connu pour son importante capacité d'oxydation et son efficacité en tant que biocide. Le peroxyde d'hydrogène n'a pas souvent été utilisé pour la désinfection de l'eau destinée à la consommation, il est souvent combiné à un traitement par l'ozone, l'argent, ou les UV.

Avantages

Le peroxyde d'hydrogène ne produit pas de résidus ou de gaz. Le peroxyde d'hydrogène est complètement soluble dans l'eau.

Désavantages

- Pour des désinfections au peroxyde d'hydrogène, des concentrations très importantes sont requises.

- Le peroxyde d'hydrogène se décompose lentement en eau et en oxygène. Une élévation de la température et la présence de pollution peuvent accélérer le procédé.
- L'efficacité du peroxyde d'hydrogène dépend de plusieurs facteurs, tels que le pH, les catalyseurs, la température, le temps de réaction.

c/ Désinfection par l'ozone O₃

L'ozone est un gaz instable composé de molécules d'oxygène triatomique O₃. Puisque l'ozone se décompose rapidement en oxygène, on doit le produire immédiatement avant son utilisation, grâce à l'émission d'une décharge électrique sous haute tension dans une atmosphère contenant de l'air sec. Dans la production de l'ozone, les coûts imputables à l'énergie électrique utilisée et à l'entretien sont très importants.

Le pouvoir désinfectant de l'ozone est de 10 à 100 fois supérieur à celui du chlore, et ce pour tous les types de microorganismes. Il est même efficace contre les spores et les kystes, qui sont pourtant les microorganismes les plus résistants

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> • L'ozone se décompose en oxygène, sans laisser de produits dérivés dans l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • La production d'ozone consomme de l'énergie
	<ul style="list-style-type: none"> • Le système est assez complexe
<ul style="list-style-type: none"> • L'ozone est produit sur place (pas de transport de produits toxiques ni de 	<ul style="list-style-type: none"> • Ce système demande un investissement de départ important

II.5.2. Procédés physiques

Le recours à la désinfection chimique est systématique en production comme en distribution. Il ne faut toutefois pas négliger l'efficacité des différents procédés de désinfection physique. C'est en effet un atout considérable de pouvoir disposer d'alternatives complémentaires à la désinfection chimique en usine quand la formation de sous-produits de désinfection est trop importante et/ou pas assez efficace, par exemple vis-à-vis des protozoaires. La désinfection par irradiation UV est de plus en plus pratiquée dans les pays développés.

a/ Désinfection par rayonnement Ultra-violet

Les longueurs d'ondes spécifiques responsables des effets bactéricides sont celles situées entre 240 et 280 nm, avec un pic à 253.7 nm. Ces longueurs d'onde sont situées dans le domaine des UV-C.

Lorsqu'un micro-organisme est exposé à un rayonnement UV, le noyau de la cellule est atteint, et la duplication de l'ADN est stoppée. Les rayonnements UV ont un effet sur l'ADN, l'acide nucléique et les enzymes. Les organismes pathogènes sont donc inactivés ou détruits.

Les sources d'UV sont typiquement des tubes de type néon, contenant du quartz et de la silice, d'un diamètre allant de 15 à 25 mm pour une longueur de 100 à 1200 mm. Ce tube est rempli d'un gaz chargé de vapeur de mercure.

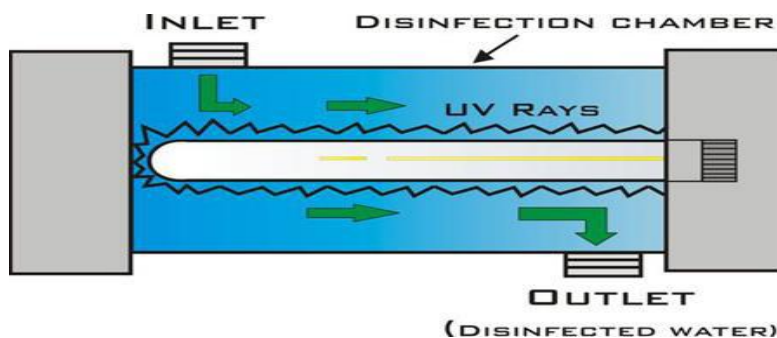


Figure 10: Dispositif de désinfection par les rayonnements UV

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> Le système est bon économique à l'investissement et à l'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> Les U.V. inactivent mais n'éliminent pas les bactéries. L'eau doit donc être consommée directement après traitement
<ul style="list-style-type: none"> Il n'y a pas de stockage de produit chimique; le traitement ne laisse aucun dérivé dans l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> Les particules dans l'eau stoppent les rayons U.V. et diminuent l'efficacité du traitement

Toute désinfection chimique ou physique en usine, même excellente, ne permet pas d'éviter une désinfection passive en réseau par voie chimique au chlore gazeux, aux hypochlorites ou au dioxyde de chlore. Cette désinfection de sécurité consistera à maintenir une concentration résiduelle de désinfectant chimique jusqu'au robinet du consommateur.

Chapitre III : Principes fondamentaux de l'épuration biologique (Traitement secondaire).

L'objectif principal de l'épuration biologique est d'éliminer le plus possible les polluants biodégradables et non décantables contenus dans les eaux usées.

La technique utilise l'activité des bactéries présentes dans l'eau, elle consiste à mettre la matière organique contenue dans les eaux usées au contact d'une masse bactérienne active en présence d'oxygène. La masse bactérienne va se nourrir de la matière organique (qui contient de l'hydrogène, du carbone, de l'azote, de l'oxygène et du phosphore) et la consommer pour : en extraire l'énergie et les éléments nécessaires à leur développement (anabolisme), et synthétiser de nouvelles cellules vivantes (catabolisme).

Elle reproduit dans des réacteurs spécifiques un phénomène qui se serait déroulé naturellement dans les rivières. A l'issue de ce processus, les bactéries constituent les "boues" qui devront être séparées de l'eau épurée. Le produit de la dégradation est essentiellement du gaz carbonique CO₂, de la biomasse (la masse active des micro-organismes) ainsi que l'eau épurée.

Eau usée + biomasse épuratrice + O₂ → Eau épurée + accroissement de biomasse + CO_{2g}

L'épuration biologique peut être effectuée de deux façons, soit par des procédés d'épurations biologiques à culture fixe, ou à culture libre.

III.1. Réacteurs à biomasse fixée

Dans ce cas, la culture bactérienne "cultures fixées" appelée aussi "biofilm", "film biologique" ou "biomasse" se présente fixée sur un support solide à travers lequel percole l'eau à traiter. Les systèmes à biomasse fixée possèdent un potentiel épuratoire bien plus important que ceux en biomasse libre. Ce la est dû au fait que la sélection des espèces et leur concentration dans le réacteur biologique se fait naturellement par accrochage sur le matériau support. Ce processus permet de sélectionner une biomasse active accrochée en quantité plus importante que celle développée en boues activées, pour un même volume de réacteur.

On utilise pour les cultures fixées soit : le lit bactériens ou disque biologique.

- **Epuración biológica par lits bactériens**

Le plus ancien procédé à biomasse fixée est le lit bactérien (Figure III.1). La biomasse est fixée sur un matériau de grosse granulométrie (3 à 8cm) sur lequel percole l'effluent à traiter. L'air est transféré par diffusion à travers le film d'eau ruisselant à la surface du matériau.

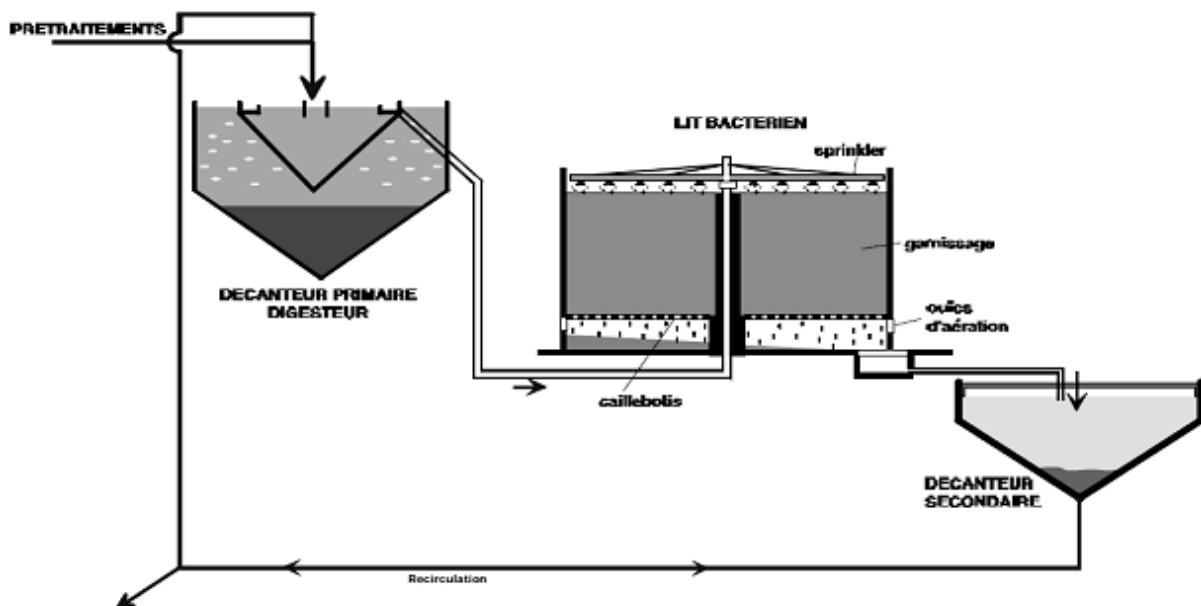
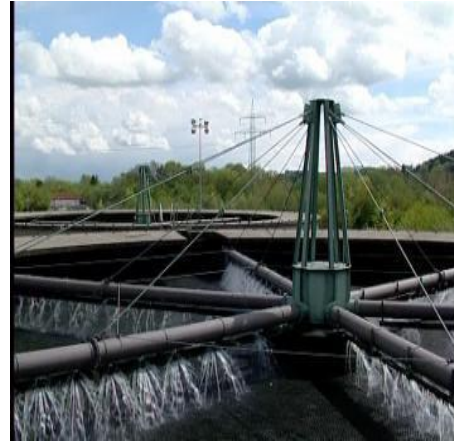
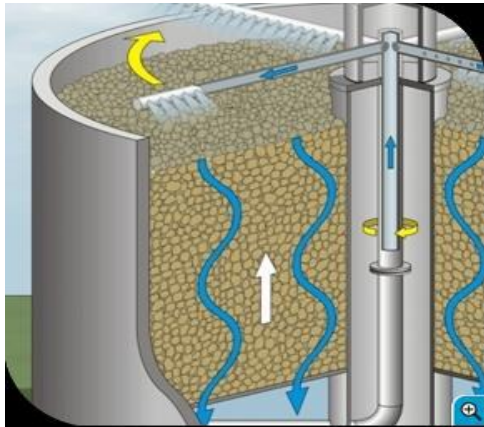


Figure III.1 : Schéma de principe d'une filière type par lit bactérien.

- **Epuración biológica par disques biologiques rotatifs (disques biologiques)**

Ce procédé consiste à alimenter en eau usée, préalablement décantée voire tamisée, une cuve contenant des disques en rotation sur un axe horizontal (Figure III.2).

Ces disques sont les supports d'un développement de microorganismes épurateurs (bio-film).

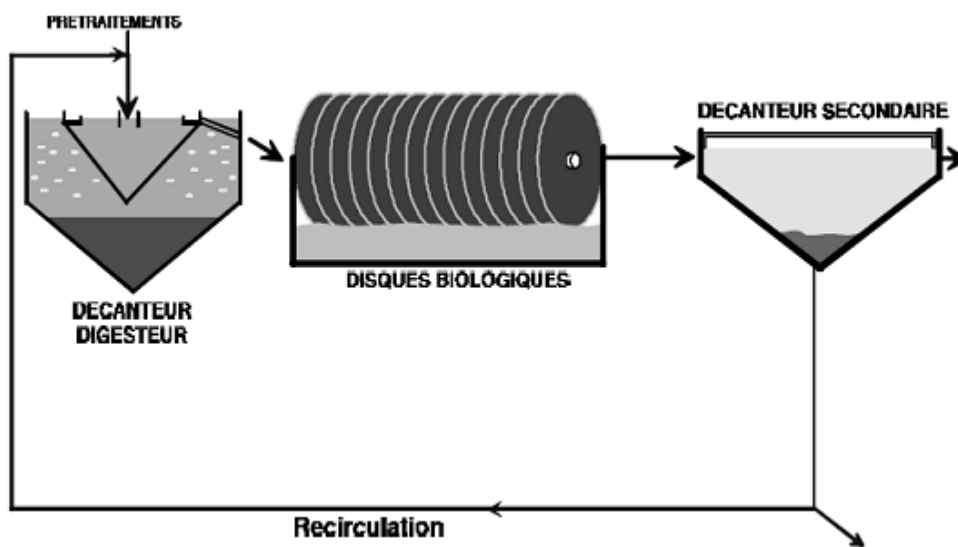
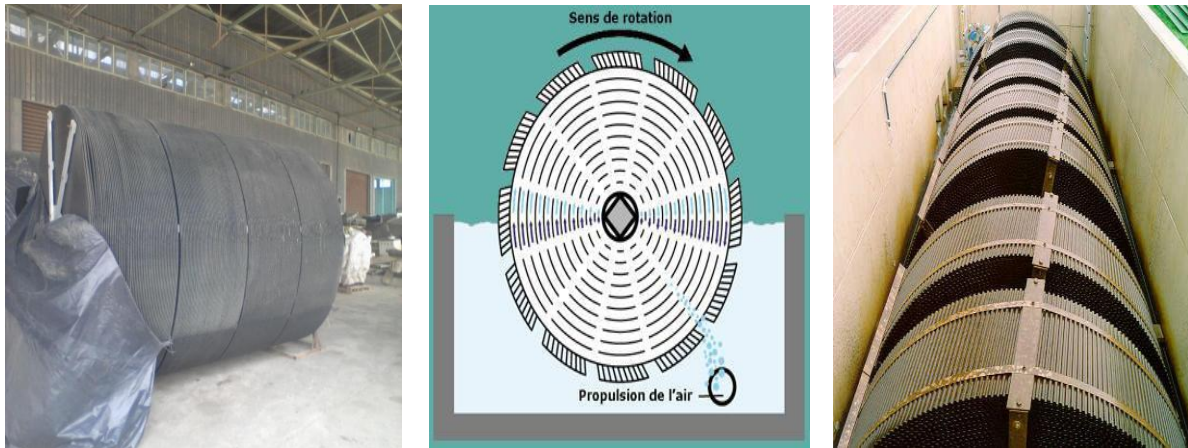


Figure III.2 : Schéma de principe d'une filière type de disques biologiques

▪ Epuración biológica par biofiltration



Figure III.3 : Image d'une épuration biologique par biofiltration

III.2. Epuration biologique à biomasse libre (procédés à Boue activée)

Le terme " cultures ou biomasses libres " regroupe les procédés où l'on provoque le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocs au sein du liquide à traiter.

Cette technologie est employée par la quasi-totalité des agglomérations de plus de 5000 habitants et par certaines activités industrielles. A raison de plusieurs grammes par litre, les micro-organismes évoluent dans une solution maintenue en agitation et alimentée en oxygène par brassage ou insufflation. L'eau usée est amenée en continu et le temps de séjour dans le réacteur biologique varie de quelques heures à quelques jours.

Parmi ces procédés, on trouve soit l'épuration biologique par boue activée, soit par lagunage.

III.2. 1. Procédés à boue activée

Le procédé d'épuration par boue activée est celui qui représente, le meilleur compromis technico-économique pour atteindre une qualité satisfaisante d'effluents épurés.



Figure III.4: Image d'une épuration biologique à boue activée.

Le principe du procédé consiste à provoquer le développement d'un floc bactérien dans un bassin alimenté en eau à épurer en brassant suffisamment le milieu pour éviter la décantation des flocs d'une part et fournir l'oxygène nécessaire au développement des bactéries et mettre en contact les micro-organismes avec le substrat d'autre part.

Le bassin d'aération peut être précédé d'un décanteur primaire et sera toujours suivi d'un décanteur secondaire (clarificateur) qui permet la séparation solide liquide. Le clarificateur est muni d'un système de raclage des boues. Une partie de ces boues sera recyclée à la tête du bassin d'aération pour maintenir la concentration bactérienne au niveau du réacteur constante,

tandis que la partie de boue en excès sera orienté vers le traitement des boues (incinérée ou valorisée en agriculture).

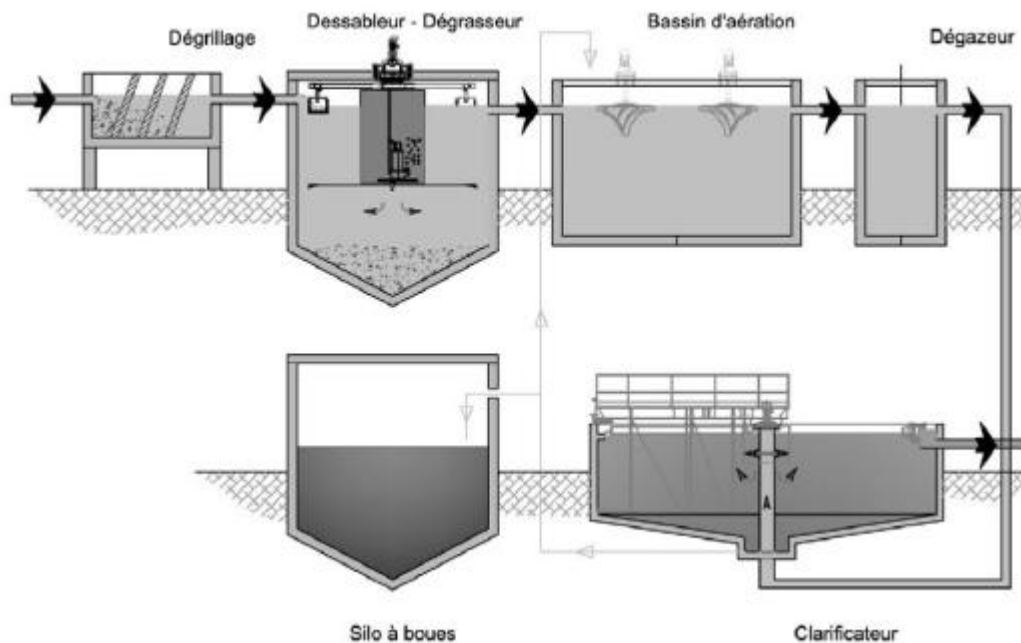


Figure III 5 : Schéma de principe d'une filière des boues activées.

- **Phase biologique**

Les polluants sont éliminés par oxydations biologiques, grâce à une microfaune aérée constituée de bactéries chimio-organotrophes principalement, de protozoaires voire de métazoaires des boues activées. La forte concentration en microorganismes (2 à 5 g/L) est maintenue constante grâce à un recyclage de la biomasse qui permet de maintenir, dans le bassin à boue activée, un taux de croissance constant. Le système d'apport de l'air permet le brassage de la biomasse et évite sa décantation dans le bassin d'aération.

- **Structure de la boue activée**

La boue activée est constituée par le floc, lui-même étant constitué de bactéries agglomérées, emprisonnées dans une matrice organique. Dans les conditions d'une eau usée, les bactéries sont sous-alimentées et pour mieux résister vont sécréter des polymères exocellulaires. Grâce à ce polymère, les bactéries peuvent adhérer les unes aux autres pour éviter une dispersion des bactéries. Retenir et adsorber les substances nutritives de l'eau usée, et

donc de concentrer les matières nutritives au voisinage des bactéries. Viennent en suite se développer sur et à proximité de ces floccs une faune de protozoaires voire de métazoaires.

La boue est composée de:

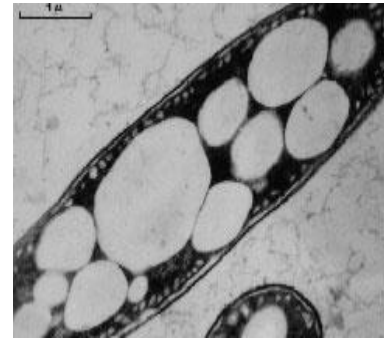
➤ Bactéries à raison de 6,6 milliards/mL de boue activée. Elles représentent la biomasse la plus abondante par le nombre. On y trouve des germes de l'environnement et pour l'essentiel des bacilles Gram-aérobies et mobiles. Les principaux genres sont Pseudomonas, Aeromonas, Arthrobacter, Flavobacter, Achromobater et Alcaligenes.



Pseudomenas



arthrobacter



Cellule d'alcaligne

➤ Protozoaires à raison de 50000/mL de boue activée. Ils se partagent en différentes classes comme les zooflagellés, les holotriches, les hypotriches et les péritriches.

➤ Métazoaires comme les rotifères et les nématodes.



zooflagellés



holotriches



métazoaire

Fonctionnement de la boue activée

La boue activée est organisée comme une chaîne alimentaire, les bactéries étant à la place des producteurs et se multipliant de manière proportionnelle à la charge organique. Les autres organismes établissent des relations de compétition.

Les bactéries minéralisent la matière organique alors que les autres organismes favorisent leur élimination, participant ainsi au maintien d'une biomasse bactérienne constante et à la clarification du liquide interstitiel

Systèmes d'aération

Pour l'aération, les dispositifs utilisés actuellement sont :

➤ Les aérateurs de surface



Figure III 6 : Epuration biologique boue activée avec un système d'aérateurs de surface.

➤ Les systèmes à injection d'air.

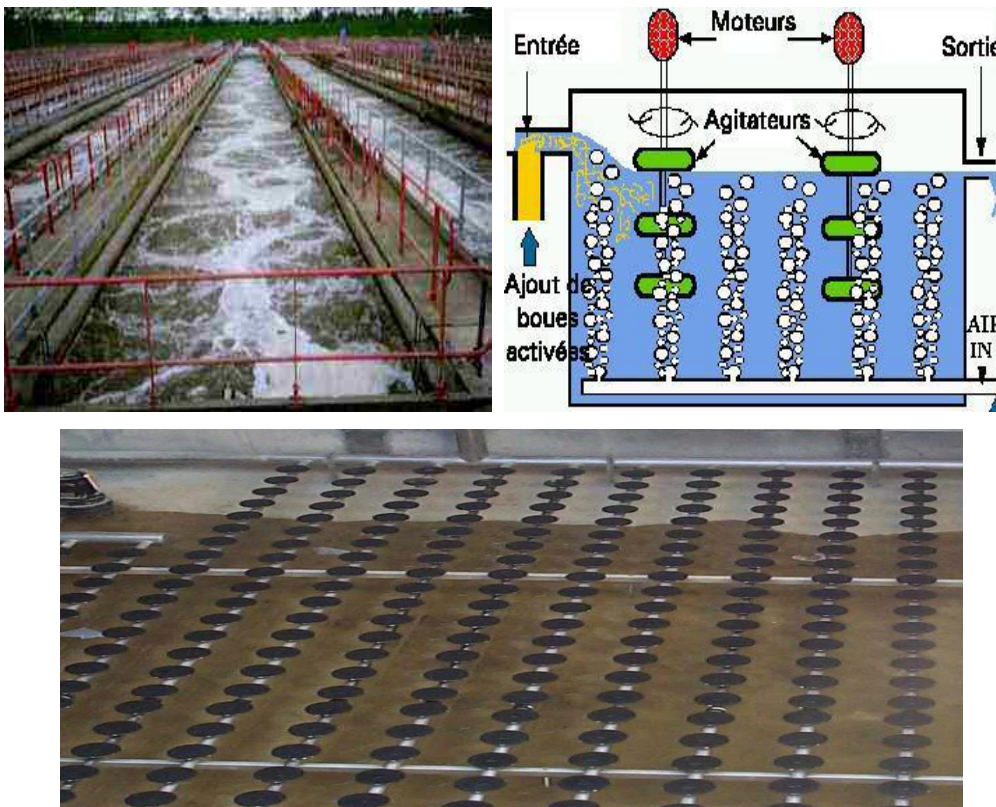


Figure III 7 : Epuration biologique à boue activée avec un système à injection d'air.

➤ Les aérateurs de fond

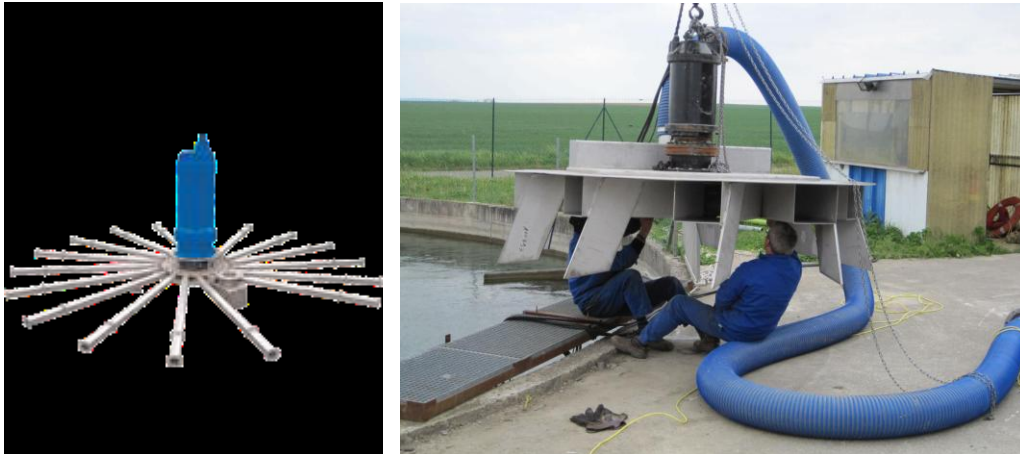


Figure III 8 : Epuration biologique à boue activée avec un système d'aérateurs de fond.

III.2.2. Epuration biologique par lagunage

Il consiste en l'utilisation d'étang naturel ou artificiel, comme milieu récepteur d'effluents.



Figure III 9 : Lagunes de Mèze.

On distingue deux types de lagunes:

a/ Lagunes naturelles : Le lagunage naturel est un procédé de traitement de type culture libre. Les effluents bruts ou prétraités sont dirigés dans des bassins de faible profondeur de 0,8 à 1 m, à l'aire libre, les algues photosynthétisent leurs matières premières en fournissant de l'oxygène à la population bactérienne.

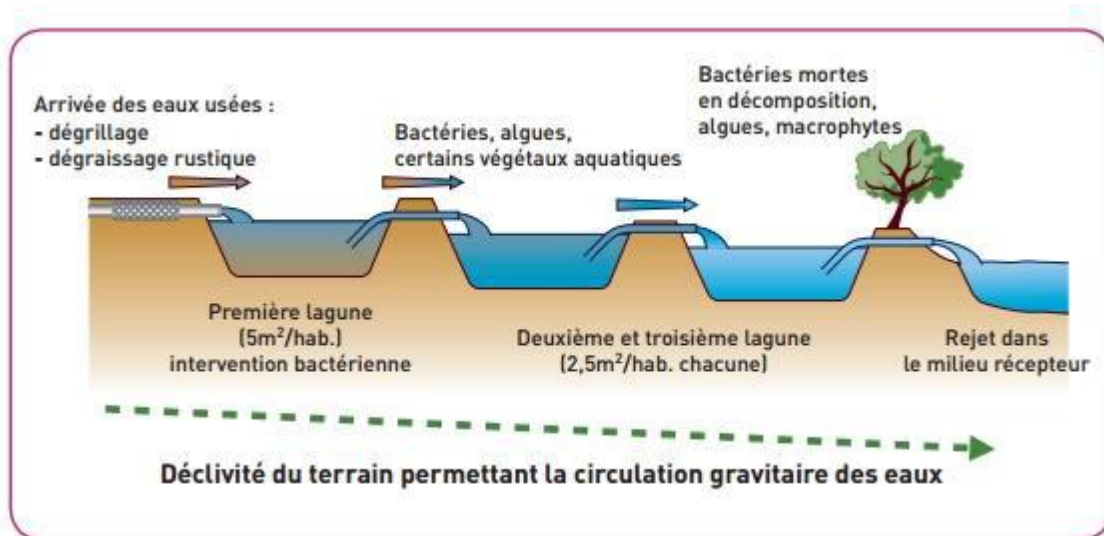


Figure III 10 : Lagunage.

b/ Lagunes aérées (vastes bassins): On effectue une épuration biologique bactérienne comme celle qui se pratique naturellement dans un étang, en apportant de l'extérieur par insufflation d'air ou oxygénation au moyen d'aérateurs de surface, l'oxygène nécessaire au maintien des conditions aérobies des bactéries épuratrices.



Figure III 11 : Aérateurs.

A l'issue du traitement biologique, l'effluent est renvoyé dans un clarificateur, appelé aussi décanteur secondaire où l'eau est séparée des boues par décantation. L'eau peut alors être rejetée dans le milieu naturel.

Une partie des boues retenues dans cet ouvrage de décantation secondaire est renvoyée vers le bassin d'aération afin d'y maintenir une masse suffisante de micro-organismes. L'autre partie est séchée puis évacuée en décharge, incinérée ou valorisée en agriculture.

III.3. Traitements biologiques complémentaires

III.3. 1. Traitement des boues

Il existe différents types de boues selon l'étape de traitement des eaux duquel elles sont issues. On rencontre ainsi des boues primaires, secondaires et des boues physico-chimiques. Trois étapes de traitement sont ici distinguées : la réduction de la teneur en eau via l'épaississement et la déshydratation, la stabilisation et l'hygiénisation.

a/Epaississement et déshydratation des boues : il permet de réduire trois à six fois le volume des boues, réduisant ainsi les coûts de stockage et de transport. Cet épaississement peut se faire soit par simple égouttage, par flottation comme présenté sur la figure suivante (III.12), par centrifugation ou par voie gravitaire au moyen d'un concentrateur. Cette étape a pour effet d'augmenter la proportion en matières sèches dans les boues.

La déshydratation est une étape de réduction de volume d'eau également, mais encore plus poussée que l'épaississement. On peut faire la déshydratation au moyen de centrifugeuses, filtres-presses ou des filtres à bandes, la siccité,



Figure III 12 : Disque biologique rotatif.

b/Stabilisation : Les boues d'épuration sont composées de matières organiques dégradables, de matières minérales et d'organismes pathogènes. La stabilisation induit la stabilisation du caractère fermentescible des boues, en dégradant les matières organiques ou en bloquant les réactions. On distingue, en effet, différents procédés de stabilisation : par voie aérobie, anaérobie, et chimique. La stabilisation par voie aérobie peut se faire dans des bassins d'aération. Cette dernière s'effectue en deux étapes majeures : la première durant laquelle la matière organique fraîche est dégradée à hautes températures (50 à 70°C) sous l'action de bactéries. Cette élévation de température est essentiellement d'origine biologique due à

l'activité microbienne ; la deuxième phase dite de maturation qui est une phase de dégradation moins soutenue. La stabilisation par voie chimique est également employée et se réalise par chaulage. Contrairement au compostage, le chaulage ne transforme pas la matière organique mais bloque toute évolution des boues par augmentation du pH. Comme son nom l'indique, la digestion anaérobie permet la digestion de l'essentiel de la matière organique contenue dans les boues.

III.3.2. Les réacteurs de Nitrification- dénitrification des eaux usées

L'élimination de l'azote repose sur la nitrification de NH_4^+ , qui est nitrifié en NO_3^- .

a/Nitrification biologique : La nitrification dépend de plusieurs facteurs tels que :

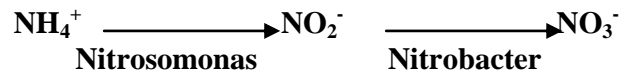
La concentration en oxygène dissous, une concentration d'au moins 2 mg /l, est souhaitable.

La température, au alentour de 30 °C.

Le pH, une valeur entre 6 et 9,6, en dehors de cette gamme la nitrification est totalement inhibé.

Le phosphore, minimum 0,5 mg/l.

À laide de deux bactéries à savoir, Nitrosomonas et Nitrobacter, dans un premier temps les ions d'ammonium sont nitrifiés.



b/Dénitrification biologique : La dénitrification consiste en la réduction des nitrates formés en azote gazeux par des bactéries hétérotrophes placées dans un milieu pauvre en oxygène.

Les principaux facteurs influençant la dénitrification sont :

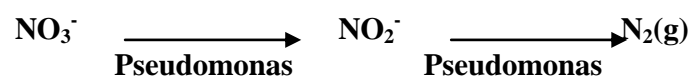
La concentration en oxygène dissous, absence totale d'oxygène.

La température, le processus peut avoir lieu entre 5 et 50 °C, l'optimum entre 25 et 30 °C.

Le pH, l'optimum est obtenu pour des valeurs de pH aux alentours de 7 à 7,5. Et en dehors des valeurs de pH entre 6 et 8, l'efficacité de la dénitrification diminue fortement.

La concentration en carbone, qui est un facteur limitant.

Pour un bonne dénitrification, il faut un rapport pollution carbonée $\text{DBO}_5/\text{NO}_3^- > 2$



III.3.2. Elimination biologique du phosphore

Le métabolisme des bactéries fait intervenir le phosphore au niveau des phénomènes régissant le stockage ou l'utilisation de l'énergie (figure III 13). Il suffit alors éliminer les bactéries pour éliminer du phosphore. Cela est possible par ultrafiltration par exemple.

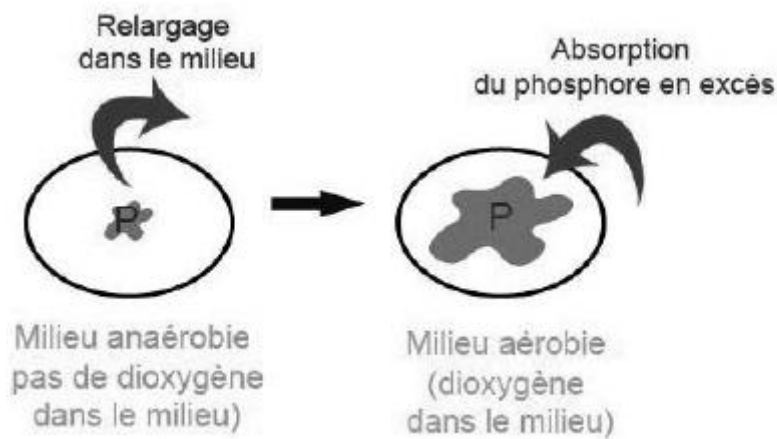


Figure III 13 : Processus de déphosphoration biologique.

Chapitre IV : Traitement des effluents agroalimentaires

IV.1. Agro-industries (laiteries, abattoirs, embouteillage, conserveries, biocarburants...).

L'industrie agroalimentaire recouvre toute une série d'activités industrielles visant au traitement, à la préparation, à la transformation, à la conservation et au conditionnement des denrées destinées essentiellement à l'alimentation humaine. En effet on peut citer huit grandes familles des industries alimentaires.

✓ L'industrie laitière

- Fabrication du lait, du beurre, des yaourts, des fromages, du lait en poudre ou concentré;
- Fabrication du lait pour l'industrie alimentaire (caséine, lactose, protéines ultra filtrées..);
- Fabrication de crèmes glacées et glaces.

✓ L'industrie de la viande

- Abattage du bétail, de la volaille;
- Transformation et conservation de la viande de boucherie ;
- Transformation et conservation de la viande de volaille ;
- Préparation industrielle de produits à base de viande.

✓ L'industrie sucrière

- Fabrication de sucre ;

✓ La fabrication de produits alimentaires élaborés

- Fruits, légumes, poissons, plats cuisinés et confitures.

✓ La fabrication de produits à base de céréales

- Meunerie ;
- Autres activités du travail des grains ;
- Fabrication de produits amylicés ;
- Fabrication industrielle de pain et de pâtisserie fraîche ;
- Fabrication de biscuits, biscottes et pâtisseries de conservation ;
- Fabrication de semoules et pâtes alimentaires ;
- Fabrication des aliments pour animaux d'élevages et domestiques.

-Production d'huiles et graisses brutes, qui consiste à extraire la matière grasse contenue dans les graines oléagineuses (soja, tournesol, l'arachide..) ou dans certains fruits (olive ou la palme).

- Fabrication d'huiles et graisses raffinées ;

-Fabrication de margarine et graisses comestibles similaires.

✓ **La fabrication de produits alimentaires divers**

-Fabrication de Chocolat, confiserie ;

-Fabrication des herbes aromatiques, vinaigres ;

-Transformation et conservation de poisson, de crustacés et de mollusques

-Transformation du thé et du café ;

-Fabrication de condiments et assaisonnements ;

- Fabrication de plats préparés, des aliments pour bébés et produits de régime ;

-Fabrication d'aliments homogénéisés et diététiques.

✓ **La production de boissons et alcools**

-Industrie des eaux minérales ;

-Fabrication de cidre et jus de fruits et de légumes ;

- Production de boissons alcooliques distillées ;

-Fabrication de vins effervescents ;

-Vinification ;

-Production d'autres boissons fermentées ;

- Fabrication de bière ;

- Fabrication de malt ;

-Production de boissons rafraichissantes et apéritives

✓ **Production de la bioénergie**

-Fabrication des biocarburants pour les moteurs;

-Fabrication des biocombustibles pour produire de la chaleur ou combinée à une production de bioélectricité.

IV.1.1. Effluents des industries alimentaires

IV. 1.1.1. Rejets liquides

Les effluents liquides de l'industrie de transformation des aliments montrent une concentration extrêmement élevée en matières organiques biodégradables

a/Paramètres permettant de caractériser les effluents liquides

Les paramètres qui permettent d'apprécier la qualité des effluents liquides sont prioritairement les suivants:

- **Matières en suspension (MES):** Qui représentent la fraction non dissoute des effluents. Suivant le type d'activité, le taux de matières en suspension (MES) est plus ou moins important, mais leur présence est fréquente.
- **Demande chimique en oxygène (DCO):** Elle mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières contenues dans l'effluent.
- **Demande biochimique en oxygène(DBO₅):** Correspond à la quantité de la pollution facilement biodégradable et se mesure par la quantité d'oxygène consommée en cinq jours par les micro-organismes contenus dans l'effluent pour oxyder une partie des matières carbonées.
- **Matières oxydables (MO):** Ce paramètre est un des coefficients spécifiques de pollution utilisée par les agences de l'eau dans le calcul de la redevance pour détérioration de la qualité de l'eau (redevance pollution). Sa valeur est donnée par la formule : $(DCO + 2DBO) / 3$

A ces paramètres, il convient d'ajouter ceux qui sont relatifs à la teneur des effluents en azote (abattoir, forte teneur en azote) et en phosphore, particulièrement lorsque le mode de traitement retenu pour ces effluents consiste en leur épandage sur des terres agricole.

Exemple

Abattoir : forte teneur en azote ;

Fromagerie : forte teneur en phosphore dans le cas d'utilisation d'acide phosphorique pour les lavages.

IV. 1.1.2. Rejets gazeux

En règle générale et à quelques exceptions près, la pollution atmosphérique due à l'industrie alimentaire est plus le fait d'odeurs désagréables que d'émissions toxiques dans l'air. Toute fois Il est parfois nécessaire de mettre en place des absorbeurs ou des épurateurs. Les fuites d'ammoniac qui peuvent se produire dans les installations de réfrigération constituent un grave problème de santé publique. Ce gaz irrite fortement les yeux et les voies respiratoires. Un important rejet dans l'atmosphère peut nécessiter l'évacuation des habitants de la zone touchée. Un plan de maîtrise des fuites et des mesures d'urgence s'imposent.

Les industries alimentaires qui utilisent des solvants (par exemple, pour l'extraction des huiles alimentaires) peuvent dégager des vapeurs dans l'atmosphère. La production en circuit fermé et le recyclage des solvants sont les meilleures solutions pour y remédier. Les secteurs qui, comme dans le cas du raffinage du sucre de canne, utilisent de l'acide sulfurique ou d'autres acides peuvent produire des substances contaminantes telles que des oxydes de soufre. Des moyens de lutte, parmi lesquels les épurateurs, devraient être mis en œuvre.

IV. 1.1.3. Déchets solides

On peut classer les déchets solides en agroalimentaire en 4 classes :

- **Déchets dangereux** : Ce sont des déchets qui contiennent en quantités variables des éléments toxiques pour la santé humaine et/ou l'environnement. Les déchets dangereux doivent être éliminés dans des installations spécifiques et de manière conforme.
- **Déchets d'emballage** : Les déchets d'emballages (carton, bois, plastique et métalliques) sont des déchets plus légers, plus recyclables.
- **Boues** : L'épandage des boues est soumis à une réglementation spécifique dont les dispositions applicables prévoient notamment la réalisation de :
 - Etude préalable comprise dans l'étude d'impact montrant l'innocuité et l'intérêt agronomique des effluents ou des déchets, l'aptitude du sol à les recevoir, le périmètre d'épandage... ;
 - Un programme prévisionnel annuel d'épandage incluant un « plan d'épandage » ;
Un cahier d'épandage (à conserver pendant 10 ans, tenu à jour et à disposition de l'inspection des ICPE) ;
 - Un bilan annuel.
- **Déchets organiques** : Sont des Déchets banals biodégradables qui proviennent soit des rebuts des aliments (biscuits, chocolat, invendus périmés, pulpe de fruits...), soit des fruits et légumes flétris ou abîmés, retraits alimentaires périmés ou abimés, emballés ou non. Ces déchets peuvent être valorisés dans des filières différentes (alimentation animale, valorisation agronomique avec ou sans compostage ou énergétique (Méthanisation) ou incinération avec valorisation énergétique.

Deux caractéristiques importantes des déchets organiques sont à prendre en compte : leur forte fermentescibilité et leur saisonnalité dans certains secteurs d'activités

IV.2. Spécificité des traitements de quelques industries agroalimentaires

L'un des principaux objectifs des installations de traitement des effluents industriels est de réduire leur charge polluante (MES, graisses, DCO, DBO5, phosphore...). Les procédés de traitement visent à éliminer les polluants et à purifier l'eau avant son rejet dans le milieu naturel. Cela permet de préserver la qualité des cours d'eau et des nappes phréatiques comme il peut permettre une réutilisation des boues et des eaux traitées pour des usages agricoles, industriels ou domestiques, contribuant ainsi à une utilisation plus durable et à une conservation des ressources par la récupération de certains matériaux valorisables, tels que l'eau recyclée ou les nutriments contenus dans les boues d'épuration.

Chapitre V: Les déchets

V.1.Déchets, classification, collecte et recyclage

On appelle déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné que son propriétaire destine à l'abandon (**D'après l'article 3 du journal officiel de la République Algérienne de la loi N 01-19 du 19 décembre 2001**) et qui est de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs. D'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement. Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible.

V.1.1. Classifications des déchets:

Différentes classifications sont possibles selon que l'on distingue les déchets par leur producteur, par la façon dont ils sont collectés ou encore par leur devenir.

- **Classification des déchets selon leur origine**

Déchets ménagers et assimilés DMA: Un « déchet ménager » est « un déchet dangereux ou non dangereux dont le producteur initial est un ménage, ce sont les déchets qui proviennent des maisons ainsi que ceux qui proviennent des activités industrielles, commerciales, artisanales et autres, et qui sont similaires aux déchets ménagers par leur nature et leur composition. Les déchets ménagers et assimilés sont collectés par le service public de ramassage mis en place par les collectivités.

Déchets d'activités économiques DAE: Ce sont les déchets issus des entreprises industrielle, de l'artisanat, des commerces, des bureaux et petites industries ou d'établissements collectifs (éducatifs, socioculturels, militaires, pénitentiaires, hospitaliers, etc.).

- **Classification des déchets selon leur nature**

Les déchets sont classés **en** **cinque** catégories selon leur nature :

Les déchets organiques: Composés de matière organique caractérisée par la présence de carbone issu d'organismes vivants, végétaux ou animaux. Ces déchets peuvent être soumis à la biodégradation par les microorganismes.

Les déchets banals: Regroupent les déchets municipaux au sens large du terme et les déchets banals des entreprises qui peuvent être valorisables par recyclage, par fermentation ou par incinération avec récupération d'énergie. Ils ne sont par définition ni toxiques ni dangereux.

Les déchets toxiques ou dangereux: Regroupent des déchets essentiellement d'origine industrielle (DIS), mais également produits par des petites entreprises ou structures (DTQD), par les ménages (DMS) ou par le monde agricole (produits phytosanitaires). Ils contiennent des substances toxiques ou dangereuses en concentration plus ou moins forte susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement. Leur traitement doit faire l'objet de précautions particulières. Certains d'entre eux, du fait de leur toxicité reconnue, sont soumis à des contrôles et des réglementations spécifiques (ex : PCB).

Les déchets ultimes: Un déchet ultime est un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est pas susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Les déchets inerte: Les déchets dits « inertes » font partie des déchets non dangereux, mais sont classés séparément et définis par la négative : ne brûlent pas, ne se décomposent pas, ne produisent aucune réaction ni chimique ni physique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine. Il s'agit presque exclusivement de déchets minéraux, issus essentiellement du secteur du BTP. Mais attention : tous les minéraux ne sont pas inertes ! À noter aussi qu'un déchet non dangereux n'est pas nécessairement inerte.

- **Classification des déchets selon leur devenir**

On distingue principalement quatre types de déchets selon leur devenir:

Les déchets biodégradables ou compostables, (résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires...), Ils s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, ...etc., selon leur origine.

Les déchets recyclables, (matériaux de construction, métaux, matières plastiques), ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont broyés et réutilisés...

Les déchets ultimes, déchets qui ne sont plus valorisables, ni par recyclage, ni par valorisation énergétique, ne pouvant plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment. Ils sont alors réglementairement les seuls à pouvoir être enfouis.

Les déchets spéciaux et déchets industriels dangereux (DID), sont anciennement appelés déchets industriels spéciaux (DIS), à la différence du déchet banal, peuvent entrer dans la catégorie des déchets dangereux, dont font partie les déchets toxiques et les déchets radioactifs qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité. Parmi les déchets nucléaires, on distingue les déchets radioactifs ultimes qui « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment ». La production du poulet de chair à l'échelle industrielle a connu un développement considérable au cours des vingt-cinq dernières années et génère une grande quantité de déchets.

Cette industrie figure parmi les plus polluantes en raison des grandes quantités de déchets générés. Ces déchets d'abattoirs constituent cependant une source potentielle de biomasse valorisable en raison de leurs teneurs en matière organique. Les techniques et procédés biotechnologiques appropriés pouvant être utilisés dans la biotransformation et la valorisation de ces déchets s'adressent tout d'abord à la fertilisation des sols dans une optique de protection de l'environnement. Cette approche explique incontestablement l'importance de la biotechnologie comme outil de biotransformation des déchets des abattoirs.

V.1.2. Déchets agricoles et agroalimentaires

Ils proviennent de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage. Beaucoup de ces déchets sont liquides et à ce titre, peuvent être généralement considérés comme des effluents. Certains d'entre eux sont utilisés sur place en raison de leur richesse en matières organiques. Dans cette catégorie, nous pouvons citer les déjections d'élevage, les déchets des cultures et de la forêt. En effet une grande partie des déchets de l'industrie agroalimentaire sont organiques et l'autre partie sont des déchets banals, à savoir le papier/carton, le plastique, le bois, le verre et les métaux.

V.1.3. Collecte et recyclage

Les déchets peuvent être soit enfouillés pour être dégradés naturellement, soit incinérés, soit recyclés. En effet le recyclage est la transformation des déchets en vue de leur donner une seconde vie, il nécessite donc des opérations préalables de collecte, de tri et de transformation des déchets. Le recyclage permet à la fois de réduire des déchets, dont l'accumulation pose problème pour l'environnement, et de substituer des ressources déjà utilisées à des ressources vierges, dont certaines peuvent ne pas être renouvelables.

a/Collecte des Déchets

La première étape du traitement des déchets consiste à la récupération des déchets à partir de différentes sources, telles que les ménages, les entreprises, les industries, les institutions et les décharges.

b/ Tri

Cette étape consiste à séparer les matériaux pouvant être transformés ou réutilisés de ceux qui sont destinés à être mis en décharge ou incinérés.

Des installations spécialisées utilisent diverses techniques pour trier les débris en fonction de leur composition, facilitant ainsi le recyclage et la valorisation.

c/ Recyclage et Réutilisation

Le recyclage est l'une des méthodes les plus importantes de traitement des déchets. Les matériaux recyclables tels que le plastique, le papier, le verre, et le métal sont collectés, traités, et traités chimiquement ou physiquement afin de les transformer en nouvelles matières premières pour la fabrication de nouveaux produits.

Le recyclage a pour avantage de réduire la consommation en matières premières pour la fabrication de nouveaux biens. Et permet de minimiser l'impact environnemental des déchets, on parle souvent de la technique des trois R : Réduire, Réutiliser, Recycler.

Chapitre VI : Procédés de traitement des déchets

Les déchets peuvent être soit stockés dans des endroits affectés à cet usage pour être dégradés naturellement, soit incinérés, soit recyclés.

VI.1. Compostage

Le compostage est un processus naturel de traitement des déchets organiques, tels que les déchets alimentaires et les résidus de jardin. Ces débris se décomposent naturellement dans des conditions contrôlées, en présence de l'oxygène de l'air et d'humidité. Par action conjuguée des micro-organismes et macro-organismes, le produit formé est un compost riche en nutriments, utilisé comme amendement du sol dans l'agriculture et l'horticulture.

Le compostage industriel compte trois étapes essentielles :

- Un pré-traitement, qui consiste à préparer les déchets fermentables afin d'obtenir une composition optimale aux transformations biologiques.
- Le compostage suit une phase de fermentation caractérisée par une augmentation de température, au cours de laquelle la matière organique est dégradée puis minéralisée par les microorganismes.
- Enfin la phase de maturation du compost, cette étape peut être précédée ou non d'un criblage, permettant d'atteindre la granulométrie souhaitée en fonction de l'utilisation prévue du compost.

➤ Avantages et inconvénients

• Les avantages de compostage :

- ✓ Réduit les odeurs, et le remplissage des sites d'enfouissement.
- ✓ Permet de produire des engrais organiques.
- ✓ C'est un procédé écologique.

• Les inconvénients de compostage :

- ✓ La maîtrise des agents pathogènes nécessite des températures élevées et une bonne aération.
- ✓ Les risques de pertes d'azote au cours du processus de compostage

- ✓ Le compostage nécessite de la surface et l'investissement en temps et en argent

VI.2. Méthanisation

La méthanisation est une biodégradation anaérobie. Elle est basée sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène (réaction en milieu anaérobie). Il en résulte une biomasse, du CO₂, H₂O et CH₄. Le méthane est un biogaz, une énergie renouvelable. L'intérêt de ce procédé est double, il permet d'assurer la gestion des déchets tout en produisant de l'énergie renouvelable.

Les étapes biologiques de la méthanisation

Le processus biologique met en jeu plusieurs bactéries qui vont transformer la matière organique en biogaz au cours de quatre étapes fondamentales successives : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et enfin la méthanogénèse.

- **L'hydrolyse**: la dégradation des molécules complexes (polymères) en monomères.
- **L'acidogénèse** : la transformation des monomères de l'hydrolyse en acides gras volatiles, alcool, acides organiques, hydrogène et dioxyde de carbone.
- **L'acétogénèse** : la formation de l'acétate, l'hydrogène et le gaz carbonique, précurseurs directs du méthane, à partir des composés issus de l'acidogénèse.
- **La méthanogénèse** : la transformation des produits de l'acétogénèse en méthane.

Procédés de la méthanisation

VI.3. Valorisation

La valorisation des déchets est toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets. On distingue la valorisation énergétique, matière et organique :

a/ Valorisations énergétiques : Exploitation du gisement d'énergie que contiennent les déchets non recyclables. Cette énergie sert à produire de l'électricité et/ou de la chaleur et/ou de la vapeur. Elle est utilisée, par exemple, pour chauffer des immeubles.

Les déchets solides urbains peuvent être incinérés dans des installations spécialisées, produisant ainsi de l'énergie tout en réduisant le volume des déchets.

b/ Valorisations matière : Utilisation de tout ou partie d'un déchet en remplacement d'un élément ou d'un matériau.

- ✓ **Le recyclage** : Les techniques de recyclage visent à obtenir une qualité de matière première apte à être utilisée comme charge ou comme constituant majoritaire dans un procédé de fabrication industriel.

✓ **Réemployer** : Prolonger la vie ou donner une seconde vie à ce qu'on considérait auparavant comme un déchet. « Vous avez recours au réemploi à chaque fois que vous fréquentez : les bibliothèques, les commerces de location (vidéos, outillage), les ateliers de réparation (cordonnerie, appareils électroniques), les ventes-débarras, les commerces d'articles de sport usagés, les comptoirs de vêtements usagés et les friperies, les boutiques d'antiquaires et de restaurateurs de meubles, les magasins de livres et de disques usagés, les magasins de matériaux de construction usagés, les magasins qui vendent en vrac et réutilisent les contenants, ainsi que les magasins d'ordinateurs et d'appareils ménagers usagés.

c/Valorisation organique : utilisation pour amender les sols de compost, déchets organiques transformés par voie biologique.

✓ **Le compostage** : Un procédé biologique de conversion et de valorisation des déchets organiques qui consiste à faire fermenter, dans des conditions contrôlées les déchets organiques en présence de l'oxygène de l'air.

✓ **La méthanisation** : Un procédé de dégradation des matières fermentes cibles contenues dans les déchets en réacteur anaérobie. Le biogaz généré par fermentation est collecté et peut être valorisé sous forme de chaleur, d'électricité ou du carburant, les résidus organiques peuvent être valorisés en agriculture après avoir été compostés.

Références bibliographiques

- ✓ **Bessedik, M., 2015.** Traitement et épuration de l'eau. Cours, <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads>.
- ✓ **Boeglin, J.C., Roubaty, J.L., 2007.** Pollution industrielle de l'eau -Caractérisation, classification, mesure. Techniques de l'ingénieur.
- ✓ **Bond, R., Straub, C.P., 1974.** Wastewater, treatment and disposal. CRC Press,
- ✓ **Cardot, C., 2001.** Techniques appliquées au traitement de l'eau. Techno sup.
- ✓ **Damien, A., 2009.** Guide du traitement des déchets. Paris.
- ✓ **Damien, A., 2016.** Guide du traitement des déchets. Réglementation et choix des procédés, Technique de l'ingénieur.
- ✓ **De MWH.** Water Treatment - Principles and Design, Wiley.
- ✓ **Jestin, E., 2006.** La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires. Agence de l'eau Seine-Normandie.
- ✓ **JORA, 1993.** Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels. Journal Officiel de la République Algérienne, Décret exécutif N° 93-160 du 1993.
- ✓ **Koller, E., 2009.** Traitement des pollutions industrielles, eaux, air, déchets, sols, boues. Technique de l'ingénieur.
- ✓ **Rodier J., 2009.** L'analyse de l'eau. France.
- ✓ **Sean, X. L. 2007.** Food and Agricultural Wastewater Utilization and Treatment. New York, NY, U.S.A : Blackwell Publishing.
- ✓ **Spellman, F., 2003.** Handbook of water and wastewater treatment plant operations. CRC Press.