



INVENTAIRE DES OPERATIONS UNITAIRES DES TRAITEMENTS D'EAUX RESIDUAIRES

Kliaguine Guennady

(Université nationale technique, Donetsk, Ukraine)
Tel. : +38(062)305 24 69; E-mail: dfst@dgtu.donetsk.ua

Résumé : L'objectif du traitement des eaux résiduaires est l'obtention d'une eau épurée qui satisfait aux normes de rejet édictées par la législation et pouvant par suite être évacuée sans danger dans le milieu naturel ou bien être utilisée dans le cadre des mesures nécessaires à une bonne gestion de l'eau (recyclage), plus particulièrement en milieu industriel. Le présent article présente les différentes filières ou chaînes de traitement des eaux et des boues résiduaires urbaines et industrielles, puis décrit succinctement les principales opérations unitaires mises en œuvre.

Mots-clés : traitement d'eaux, traitements physiques, traitements chimiques, traitements biologiques.

Dans le cas très fréquent d'une eau résiduaire qui contient des **polluants de natures très variées**, on fait généralement appel, selon un assemblage séquentiel approprié, à tout l'arsenal des opérations physiques, chimiques ou biologiques.

Nous donnons ci-après le principe de chacune des **opérations unitaires** couramment utilisées dans le traitement des eaux résiduaires.

1 Traitements physiques

1.1 Traitements courants

Ils constituent l'essentiel des opérations du **prétraitement** et du **traitement primaire** des rejets, mettant en œuvre les **séparations solide-liquide** énumérées ci-après.

➤ La **rétenction par dégrillage ou tamisage des matières volumineuses**, dont la dégradation par voie chimique ou biochimique est difficile sinon impossible. Ces matières sont susceptibles de gêner le bon fonctionnement d'une station d'épuration.

➤ L'**élimination des particules grossières et de forte densité** (graviers, sables, matières en suspension décantables) **ou des produits insolubles de faible densité** (huiles, graisses, hydrocarbures ou matières solides finement dispersées) se fait respectivement par **décantation** et **flottation** (naturelle ou accélérée).

➤ La **décantation** est une opération dont le principe repose dans la séparation, sous l'action de la force de gravité, des matières en suspension de l'eau et dont la densité est supérieure à celle de cette dernière. Elle est réalisée dans des décanteurs continus, essentiellement des bassins circulaires ou rectangulaires, munis d'un dispositif mécanique de raclage en vue de la collecte des boues. Dans le principe de fonctionnement de ces ouvrages, la théorie montre que la hauteur du bassin n'a aucune influence sur la séparation des particules, celle-ci ne dépendant que du débit et de l'aire de décantation.

➤ La **flottation**, réalisant une **décantation inversée**, est une opération de séparation par laquelle on amène les substances solides en suspension, généralement finement dispersées dans l'eau, dans un complexe plus léger, constitué essentiellement par une mousse d'air, qui flotte à la surface de l'eau et que l'on sépare soit par débordement soit par raclage mécanique. La technologie la plus utilisée est l'**aéroflottation** ou flottation par air dissous produisant des microbulles d'air selon le processus de pressurisation-détente : l'eau préalablement saturée en air sous une pression de 2 à 4 bars dégaze dans une cellule de

flottation à la pression atmosphérique en donnant naissance à un nuage de microbulles d'air qui, en se fixant sur les particules, les allège en provoquant leur flottation.

➤ La **filtration** est généralement une opération de séparation solide-liquide utilisée lors d'un traitement de finition pour parfaire la clarification de l'eau réalisée préalablement par décantation ou flottation. Elle consiste à séparer les matières en suspension du liquide par passage à travers une membrane ou un lit de matériaux granulaires qui retiennent les impuretés et laisse passer le liquide seul (filtrat). En traitement d'eau, on réalise généralement une filtration en profondeur à travers des matériaux filtrants (sable ou anthracite) accumulés en lit épais (sur 1 à 2 m). Le fonctionnement des filtres est cyclique avec des périodes alternées de filtration et de régénération par lavage d'eau en retour, aidé d'un soufflage d'air surpressé.

1.2 Traitements spécifiques

On peut utiliser également les traitements physiques cités ci-après pour l'élimination spécifique de certains polluants.

➤ Le **stripping ou la désorption** est une opération par laquelle un soluté gazeux est chassé de l'eau par l'action d'un autre gaz appelé *gaz laveur* et dont le rôle est de provoquer dans la phase gazeuse une chute de la pression partielle du constituant à éliminer et d'entraîner ainsi son dégazage. Réalisé à l'ambiante ou à des températures supérieures à 100 °C (en utilisant la vapeur d'eau comme gaz laveur), le *stripping* réalisé dans des colonnes à garnissage concerne essentiellement l'élimination des **produits soufrés** (sulfures et mercaptans), de l'**ammoniac** et des **phénols volatils**.

➤ L'**adsorption** est un phénomène de fixation superficielle sur un corps solide appelé adsorbant, d'un gaz, d'une vapeur, d'un liquide ou d'un soluté, appelé adsorbé. L'adsorption en phase liquide utilisée en traitement d'eaux résiduaires, essentiellement en finition, permet l'élimination de composés organiques peu ou pas biodégradables constituant la DCO « dure » par ailleurs souvent à l'origine de la coloration. L'adsorbant industriellement utilisé par suite de sa très grande surface spécifique est le **charbon actif** pouvant être mis en œuvre à l'état pulvérulent, ou mieux, sous forme de grains disposés en lits fixes dans des colonnes semblables aux filtres à sable.

➤ L'**extraction liquide-liquide** est une opération par laquelle un solvant non miscible à l'eau extrait de cette dernière un composé polluant qui s'y est dissous. Cette technique, **peu pratiquée**, trouve une application dans l'épuration de rejets particulièrement concentrés en **composés phénolés**.

➤ Les **techniques de séparation membranaire** (microfiltration, ultrafiltration, osmose inverse) sont des procédés de séparation fonctionnant selon le même principe de base consistant à assurer le passage de l'eau résiduaire – par l'application d'une surpression de quelques bars – à travers une **membrane semi-perméable**, organique ou minérale, possédant une microstructure suffisamment fine, susceptible d'arrêter, en fonction du seuil de coupure (de 103 à 1 nm), les particules colloïdales en suspension ou en émulsion, les virus et bactéries, les macromolécules synthétiques et naturelles, les molécules organiques simples ou complexes en solution, ainsi que les éléments minéraux dissous à l'état ionique.

On obtiendra un perméat (eau traitée) débarrassé des impuretés dont la qualité en fonction de la finesse de la séparation peut atteindre celle de l'eau « **ultra-pure** ».

2 Traitements chimiques

Situés dans la chaîne de traitement des eaux résiduaires soit en amont (à titre de prétraitements), soit en aval (comme traitement d'affinage), les traitements chimiques comportent essentiellement les opérations ci-après.

➤ La **neutralisation** a pour objet de **modifier le pH** d'une eau résiduaire pour l'amener à une valeur déterminée pour favoriser un traitement ultérieur ou permettre le rejet dans un milieu récepteur. Il s'agit d'une opération dans laquelle on ajoute à une eau à

caractère basique ou acide une quantité suffisante soit d'acide soit de base, de manière à réaliser un échange protonique complet entre les deux constituants. L'introduction automatique du réactif dans le milieu réactionnel est asservie à une chaîne de régulation de pH.

➤ L'**oxydo-réduction** est une opération par laquelle on ajoute à une eau contenant une substance à caractère oxydant ou réducteur une quantité suffisante soit d'un réducteur soit d'un oxydant, de manière à réaliser un échange électronique complet entre les deux constituants. Ces réactions chimiques sont mises en œuvre en particulier dans le traitement de **détoxication des effluents de galvanoplastie** pour la réduction des chromates (Cr^{6+}), par le métagénosulfite de sodium en milieu acide, en chrome trivalent (Cr^{3+}) précipitable sous forme d'hydroxyde $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ou pour l'oxydation en milieu basique, par le chlore ou les peracides, des cyanures (CN^-) en cyanates (CNO^-) puis en CO_2 et azote gazeux.

Notons que la réaction d'oxydation est utilisée en traitement de finition pour la désinfection des rejets urbains (par le chlore Cl_2) et la décoloration des rejets de l'industrie textile (par l'ozone O_3 et le peroxyde d'hydrogène H_2O_2).

➤ La **précipitation** est une méthode très largement utilisée pour éliminer les composés solubles, le plus souvent minéraux, contenus dans les rejets, en l'occurrence les **sels** (carbonates, sulfates, fluorures...), les **phosphates** à l'origine de l'eutrophisation et les **métaux lourds** à caractère toxique (Cu, Pb, Cd, Cr, Fe...). Elle consiste à ajouter à l'eau résiduaire un réactif appelé *précipitant* de manière à ce que le produit de la réaction présente une solubilité aussi faible que possible et puisse, de cette façon, être séparé de l'eau sous forme solide.

➤ **Coagulation-floculation** : la séparation des particules finement dispersées et des colloïdes (matières en suspension non décantables), à l'origine de la turbidité des rejets, implique la **rupture de la stabilité colloïdale de la suspension aqueuse** par l'intermédiaire de réactifs chimiques (*coagulants* et *floculants*) qui, en provoquant l'agglomération mutuelle des particules « extrafines », contribuent à accélérer leur séparation et à parfaire la clarification des effluents.

○ Les **électrolytes minéraux à polycations** (sels de fer et d'aluminium) réalisent la **coagulation**, processus assurant la coalescence des colloïdes par la neutralisation des charges électriques répulsives.

○ Les **polymères organiques de synthèse** (macromolécules de masse molaire élevée) engendrent ce que l'on a coutume d'appeler la **floculation**, procédé qui permet l'union des particules solides élémentaires déchargées préalablement, par « pontage », moyennant la mise en œuvre d'un processus d'adsorption puis de réticulation conduisant à la formation d'un « macrofloc » dense, facilement décantable.

➤ L'**échange ionique** désigne la **permutation de deux ions** de même signe, l'un se trouvant en solution dans l'eau, l'autre étant fixé sur une matrice solide non soluble, mise en contact intime avec l'eau traitée. Cette matrice insoluble appelée **échangeur d'ions** est constituée d'une résine organique qui comporte, dans sa structure, des radicaux susceptibles d'être libérés et donc échangés. On distingue deux grandes classes d'échangeurs :

— les **échangeurs cationiques**, caractérisés par la présence dans leur structure de radicaux acides sulfoniques $-\text{SO}_3\text{H}$ ou carboxyliques $-\text{CO}_2\text{H}$ susceptibles de fixer des cations minéraux et de les échanger avec un proton H^+ ;

— les **échangeurs anioniques**, renfermant dans leur structure des radicaux à fonction basique du type ammonium quaternaire $-\text{NH}_3\text{OH}$ susceptibles de fixer des anions minéraux et les échanger avec l'ion hydroxyle OH^- .

L'échange d'ions par association des deux types d'échangeurs en série est utilisé dans le traitement en circuit fermé de **détoxication des effluents de galvanoplastie** et l'obtention d'eau déminéralisée.

3 Traitements biologiques

Ils constituent le mode classique d'épuration de la pollution organique carbonée et azotée.

Les techniques d'épuration biologique reposent sur les conditions qui permettent aux flores microbiennes de se développer, pour assurer la dégradation des matières organiques polluantes, éliminées dans la mesure où elles servent d'aliments aux bactéries, à condition cependant qu'elles soient *biodégradables*.

Il faut considérer que, quoique théoriquement l'épuration biologique puisse s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie, c'est le **traitement aérobie** qui est universellement utilisé par suite de sa supériorité évidente pour des effluents dont la production polluante à débit élevé contient des matières organiques pas trop concentrées. Du fait du caractère beaucoup plus exothermique du métabolisme aérobie, la cinétique du processus s'avère beaucoup plus rapide et les rendements d'épuration plus élevés (> 95 %) avec, comme contrepartie, la production d'une biomasse excédentaire plus importante.

3.1 Traitements biologiques aérobies

Ils s'effectuent dans un réacteur où l'on met en contact les micro-organismes épurateurs et les polluants organiques de l'eau à épurer cela en présence d'oxygène généralement fourni par l'air.

La mise en œuvre de l'épuration biologique aérobie est réalisée suivant deux types de techniques:

— **procédés à cultures libres** type *boues activées et lagunage naturel et aéré*, quand la masse bactérienne est en suspension dans un bassin aéré ;

— **procédés à cultures fixées** type *lits bactériens ou biofiltres bactériens*, quand la biomasse est fixée sur ou par un support solide.

➤ **Boues activées**

Ce procédé consiste en une intensification des processus d'autoépuration des cours d'eau. On provoque le développement d'un « floccule » bactérien dans un bassin dit d'aération, alimenté en eau résiduaire, en brassant suffisamment la masse pour éviter la décantation des floccules et en fournissant l'oxygène nécessaire à la prolifération des micro-organismes. Un **clarificateur** ou décanteur secondaire permet de séparer la biomasse de l'eau épurée. Les boues biologiques sont en partie recyclées dans le bassin d'aération pour en assurer le réensemencement et maintenir une concentration permanente ; une partie est extraite vers le traitement des boues.

➤ **Lagunage aéré**

Il peut être défini comme une variante du traitement par boues activées dans laquelle les boues biologiques sont maintenues en équilibre avec la pollution appliquée. La recirculation des boues biologiques décantées n'est pas réalisée et la concentration de la biomasse épuratrice reste faible.

➤ **Lits bactériens**

Ce procédé dérive d'une intensification des processus d'épuration naturels de filtration par le sol. La biomasse est fixée sur des matériaux traditionnels (mâchefer, coke) ou plastiques, accumulés sur une certaine hauteur, sur lesquels percole l'effluent préalablement décanté. L'air est transféré par diffusion à travers le film d'eau ruisselant à la surface du matériau. Une vitesse hydraulique suffisante, assurée par un recyclage d'eau traitée, permet l'évacuation du **biofilm** en excès, qui est séparé de l'eau traitée dans un ouvrage de décantation situé en aval.

Les **bio-disques** constituent une variante : on développe un biofilm sur des plaques circulaires en matière plastique en rotation lente dans des cuvettes semi-circulaires traversées par un courant d'eaux résiduaires à traiter.

➤ **Biofiltres**

La **biofiltration**, qui a eu un développement industriel récent sous la forme de systèmes à lits granulaires (charbon, argiles et schistes expansés) est une technique qui vise à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction de dégradation aérobie de la pollution par la biomasse fixée sur le matériau et la clarification par filtration de l'effluent traité. Le procédé permet de s'affranchir d'un clarificateur aval, mais implique cycliquement la régénération du réacteur par des technologies mises en œuvre par filtration sur sable (détassage à l'air des matériaux puis lavage à l'eau à contre-courant).

3.2 Traitements biologiques anaérobies

On constate un regain d'intérêt pour la dépollution des rejets industriels biodégradables fortement concentrés ($DBO_5 > 3\ 000\ \text{mg O}_2/\text{L}$) par fermentation anaérobie, essentiellement comme premier étage d'un traitement biologique en vue d'une **élimination de 70 à 85 % de la pollution carbonée**.

Le traitement présente un certain nombre d'avantages par rapport à un traitement aérobie :

- faible consommation d'énergie pour les besoins du processus ;
- faible production de boues biologiques en excès (5 fois moins que pour un traitement aérobie);
- et surtout **recupération d'un biogaz** (à 70 % de méthane) pouvant être utilisé industriellement comme source d'énergie.

Sur le plan technologique, le **biométhaniseur** peut fonctionner avec une biomasse en suspension ou avec une biomasse fixée sur un support.

3.3 Traitements par voie biologique de l'azote et du phosphore

➤ L'**élimination de l'azote** est réalisée par l'intermédiaire de réactions enzymatiques qui se produisent dans des conditions bien définies, en présence ou absence d'oxygène, en deux étapes successives. Dans un premier stade, par l'intermédiaire de microorganismes strictement aérobies autotrophes (*) s'opère l'oxydation de l'ammoniacque en nitrate (**nitrification**) après ammonification (*) préalable de l'azote organique. Les bactéries impliquées (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) sont caractérisées par un *temps de génération* élevé dépendant de la température. Dans un second stade, la réduction des nitrates en azote gazeux (**dénitrification**) est réalisée par des bactéries hétérotrophes (*) en l'absence stricte d'oxygène, mais en présence d'un substrat carboné, puisé généralement dans l'effluent brut.

(*) **Autotrophe** : se dit des micro-organismes capables de vivre *sans* substrat ou aliment organique.

Hétérotrophe : se dit des micro-organismes qui ne peuvent se développer qu'aux dépens de matières organiques déjà élaborées.

Ammonification : réaction de transformation de l'azote organique en azote ammoniacal, généralement par hydrolyse et désamination oxydative voire réductive.

➤ La **déphosphatation biologique** met en œuvre des phénomènes de suraccumulation du phosphore dans la biomasse, par l'intermédiaire de populations bactériennes possédant un métabolisme capable d'utiliser les conditions particulières d'une alternance de conditions anaérobie et aérobie.