

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

X•0V•EX •KIE □:s:IA :||s•X - X:0E0:t -



جامعة البويرة

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département de Génie Civil

## Polycopié de cours/TD/TP

En : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydrauliques

Niveau : Master



---

# Traitement Physico-Chimique de l'Eau

Concept, théorie et exercices résolus

---

Par : Mehdi Metaiche

Expertisé par :

- Pr Lounici Hakim ; Université de Bouira
- Dr Amitouche Mourad ; Université de Boumerdes

Année : 2022/2023

## Préface

La turbidité élevée des eaux génère énormément de problèmes sur le plan sanitaire, économique et environnemental. Donc une eau à turbidité élevée ne peut pas être utilisée ni pour la consommation humaine et animale, ni en irrigation des plantes, ni en piscines et milieux de baignade, ni en rejet dans les cours d'eau et plans d'eau naturels.

Le traitement physico-chimique appelé aussi traitement de coagulation-floculation est une phase indispensable pour : i)-le traitement des eaux de surface (de barrages) qui sont souvent chargées en colloïdes issus des argiles ou d'oxydes métalliques , ii)-le traitement des eaux souterraines karstiques chargées en grains de calcaires, iii)-et le traitement des eaux usées industrielles dont la biodégradabilité n'est pas facilement ou pas du tout assurée ; et résultant de la teneur élevée en DCO.

Le traitement physico-chimique d'une eau vise principalement la réduction de sa turbidité jusqu'aux niveaux tolérés par la réglementation en vigueur.

Les eaux traitées par les procédés physico-chimiques sont destinées à l'un des finalités suivantes : i)-l'alimentation en eau potable urbaine pour le cas des eaux de barrages ou souterraines, ii)-le rejet sécurisé dans les milieux naturels pour le cas des eaux usées, iii)-la réutilisation conforme à la réglementation après usage urbain, industriel ou agricole.

Le traitement physico-chimique d'une eau comporte deux phase : la coagulation et la floculation, et utilise deux techniques de natures différentes : le dosage en réactifs chimiques (assurant la neutralisation des colloïdes causants la turbidité), et l'agitation physique (assurant le bon mixage et le bon grossissement des colloïdes afin de faciliter leur séparation).

Ce polycopié couvre une partie importante des modules enseignés aux niveaux licence et master pour la filière hydraulique et toutes les filières proches : agronomie, biologie, chimie, génie des procédés, chimie industriel, industries agroalimentaires, ...

Ce manuel forme un outil très utile pour l'étudiant, pour l'enseignant et pour le praticien ; en enseignement et en engineering. Il est

présenté en cinq chapitres : le premier est dédié à la turbidité et les colloïdes, le deuxième à la coagulation, le troisième à la floculation, le quatrième à l'agitation, et le dernier à la mise en oeuvre du traitement physico-chimique.

Chaque chapitre se termine par des exercices résolus afin d'aider le lecteur à bien comprendre et à fixer les idées.

Quelque soit son niveau de rédaction et de présentation ; ce manuel est perfectionnable par les bons lecteurs qui trouvent ici une incitation à le lire, à l'exploiter et le perfectionner.

## **Chapitre 1**

### **Turbidité et colloïdes**

#### **1-Turbidité :**

La turbidité est directement reliée à la quantité de la matière colloïdale (les colloïdes) existante dans l'eau.

La turbidité représente un paramètre caractérisant l'eau, et qui varie en fonction de la teneur en composés colloïdaux (ex : argiles) ou en acides humiques (résultant de la dégradation des végétaux).

La turbidité élevée d'une eau est considérée comme une pollution ; et une eau turbide c'est une eau trouble.

Pratiquement : la turbidité d'une eau empêche le passage de la lumière à travers cette eau.

Dans la nature ; une importante turbidité de l'eau entraîne une réduction de sa transparence qui réduit la pénétration de la lumière solaire nécessaire à la vie aquatique (photosynthèse).

La turbidité est un indicateur de pollution microbiologique ; car certains micro-organismes peuvent y être associés par adsorption.

#### **2-Types de colloïdes :**

Les colloïdes peuvent être : des macromolécules dont la masse molaire est supérieure à 5000 g/mol ; ou bien des agrégats atomiques dont le comportement physico-chimique est très différent des solutions normales dites micromoléculaires.

Les colloïdes ont une surface spécifique considérable, et sont chargés électro-négativement.

Les particules colloïdes sont soumises à des forces électrostatiques de répulsion qui les maintiennent en suspension indéfiniment.

Les colloïdes peuvent être :

- substances minérales (oxydes).
- substances végétales (acides humiques).
- bio-polymères.
- virus.
- bactéries.

### 3-Problématique liée aux colloïdes:

La matière colloïdale est chargée électriquement, elle forme une suspension stable, donc elle ne se dépose pas.

L'annulation des forces ioniques répulsives afin d'être agglomérer (coagulation), la provocation au grossissement (floculation), puis décantation par effet de la pesanteur (décantation).

Le but principal de traitement de la turbidité est d'agréger les MES fines (0,2  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$ ) en MES grossières ( $d_p > 50 \mu\text{m}$ ) décantables. on peut aussi envisager selon la nature des colloïdes : la déphosphatation, et l'élimination des métaux comme : fluorures, zinc, nickel, plomb, cuivre, zirconium, molybdène, ....

### 4-Mesure de la turbidité :

L'appareil de mesure de la turbidité est : le turbidimètre ; qui mesure la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière.

Généralement, on utilise pour mesurer la turbidité ; la méthode normalisée NFU par spectrométrie ; permettant de mesurer l'absorption de la lumière par l'eau.

Les unités de mesure de la turbidité sont :

- i)-NFU (unité formazine normalisée) ;
- ii)-NTU (Nephelometric Turbidity Units);
- iii)-mg/l.

La classification des eaux selon la valeur de la turbidité est donnée par le tableau 1-1 et le tableau 1-2.

Tableau 1-1 : classification de l'eau selon sa turbidité évaluée en NFU

0-0,2 NFU	0,2-0,5 NFU	0,5-1 NFU	1-2 NFU	2-25 NFU	> 25 NFU
Eau distillée	Eau désinfectée	Sortie de la station de traitement AEP	Eau de robinet	Eau trouble visible	Eau opaque

Tableau 1-2 : classification de l'eau selon sa turbidité évaluée en NTU

0 à 5 NTU	5 à 30 NTU	$\geq 30$ NTU
Eau claire	Eau légèrement trouble	Eau trouble

### **5-Domains d'applications du traitement physico-chimique (coagulation-floculation) :**

La coagulation-floculation est pratiquée couramment dans les domaines suivants :

-le traitement des eaux de surface et des eaux souterraines chargées en calcaires.

-le traitement plus poussé des eaux chargées en : i)-particules en suspension (sable, limons, débris organiques), ii)-matières colloïdales plus petites (argiles fines, bactéries), iii)-matières dissoutes (matières organiques, sels...).

-le renforcement ou remplacement de la voie biologique de traitement des eaux usées (clarification).

Remarque : la coagulation-floculation permet de supprimer : 90% de MES, et 75% de DBO<sub>5</sub>.

**Exercice 1-1 :**

Déterminer la surface offerte par 10 g d'un colloïde de densité  $\gamma_p = 2,6$  ; pour les deux cas :

- i)- la masse du colloïde est formée par des particules homogènes de forme sphérique de diamètre  $d_p = 1 \mu m$  ?
- ii)- la masse du colloïde est formée par une seule particule ?

**Solution de l'exercice 1-1 :**

i)-cas où le colloïde est formé par plusieurs particules homogènes sphériques :

-volume d'une particule :

$$V_p = \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} = 0,52 \cdot 10^{-18} m^3$$

-masse d'une particule :

$$m_p = \gamma_p \cdot V_p = 2600 \cdot 0,52 \cdot 10^{-18} = 1,35 \cdot 10^{-15} kg$$

-nombre de particule dans 1 litre d'eau :

$$n_p = \frac{m_T}{m_p} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{1,35 \cdot 10^{-15}} = 7,41 \cdot 10^{12}$$

-surface offerte par une particule :

$$S_p = \pi \cdot d_p^2 = \pi \cdot 10^{-12} m^2$$

-surface totale offerte par les particules de la solution :

$$S_T = S_p \cdot n_p = \pi \cdot 10^{-12} \cdot 7,41 \cdot 10^{12} = 23,27 m^2$$

ii)-cas où le colloïde est formée par une seule particule :

-une sphère de 10 g doit avoir un diamètre de :

$$V_p = \frac{m_p}{\gamma_p} = \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} \Rightarrow d_p = \sqrt[3]{\frac{6m_p}{\pi\gamma_p}} = \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 2600}} = 1,94 \cdot 10^{-2} m$$

Et offre une surface de :

$$S_p = \pi \cdot d_p^2 = \pi \cdot (1,94 \cdot 10^{-2})^2 = 0,118 \cdot 10^{-2} m^2$$

Le tableau suivant donne la surface offerte pour chaque cas.

Une seule particule	Plusieurs particules de diamètre de 1 $\mu m$ chacune
$0,118 \cdot 10^{-2} m^2$	$23,27 m^2$ (Soit : $\approx 20\ 000$ plus grandes)

**Exercice 1-2 :**

Comparer entre la force d'attraction massique et la force d'attraction électrique pour les deux cas :

i)-entre la terre et la lune ?

ii)-entre l'électron et le proton de l'atome d'hydrogène ?

On donne :

Masse de la terre :  $m_T = 5,98.10^{24}$  kg

Masse de la lune :  $m_L = 7,34.10^{22}$  kg

Charge électrique de la terre :  $q_T \approx 0$

Charge électrique de la lune :  $q_L \approx 0$

Distance entre le centre de la terre et celui de la lune :

$l_{T-L} = 384000$  km =  $3,84.10^8$  m

Masse de l'électron :  $m_e = 9,1091.10^{-31}$  kg

Masse du proton :  $m_p = 1,6726.10^{-27}$  kg

Charge électrique de l'électron :  $q_e = 1,6.10^{-19}$  C

Charge électrique du proton :  $q_p = 1,6.10^{-19}$  C

Distance entre l'électron et le proton dans l'atome d'hydrogène (rayon atomique de l'atome d'hydrogène) :  $l_{e-p} = 0,53.10^{-10}$  m

**Solution de l'exercice 1-2 :**

\* forces d'attraction massique (loi de Newton) :

$$F_m = \frac{m_1 \cdot m_2}{l^2} \cdot G$$

Où :

$m_1$  et  $m_2$  : 02 masses distantes de l.

G (N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>) : constante de gravitation,  $G = 6,67.10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>

\* forces d'attraction électromécanique (loi Coulomb) :

$$F_e = \frac{q_1 \cdot q_2}{l^2} \cdot k_c$$

$q_1$  et  $q_2$  : 02 charges distantes de l.

$k_c$  : constante de Coulomb ;  $k_c = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = 8,987.10^9$  N.m<sup>2</sup>.C<sup>-2</sup>

$\epsilon_0$  : permittivité du vide.  $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12}$

Le tableau suivant donne le résultat de calcul des 02 forces pour les 02 cas.



	Entre terre et lune	Entre électron et proton
Force massique	$1,98.10^{20}$ N	$3,5.10^{-47}$ N
Force électromécanique	0	$8,2.10^{-8}$ N

Remarque : pour que la force électromécanique entre la terre et la lune soit égale à celle massique ( $F_e = F_m$ ) entre les 02 planètes ; il faut que la terre et la lune dispose chacune d'une charge =  $3,58.10^{32}$  charges élémentaires.

## Chapitre 2 Coagulation

### 1-Définitions :

Un coagulant est considéré comme un déstabilisant ou un neutralisant.

La coagulation c'est la déstabilisation des particules colloïdales (neutraliser les charges électriques) et formation de micro-micelles constituées d'hydroxyde métallique et de colloïdes.

La coagulation s'effectue par l'ajout des substances ioniques (coagulants, sels de fer et d'aluminium), capables d'annuler les forces répulsives qui maintiennent les particules éloignées les unes des autres.

### 2-Structure des colloïdes (théorie de la double couche) :

Un colloïde peut être caractérisé par : un diamètre très faible, et une surface relativement élevée.

Dans l'eau ; les colloïdes portent des charges négatives situées à leur surface.

Selon la théorie de Helmholtz ; ces charges négatives attirent les ions positifs (cations) en solution, et de ce fait ; ces cations seront étroitement collés au colloïde et forment la couche liée (**couche de STERN ou couche liée**), qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations : c'est la couche diffuse (**couche de Gouy-Chapman ou couche diffuse**) ; voir figure 2-1.

Il se forme donc une double couche ionique : l'une accompagnant la particule lors de ces déplacements, et l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard.

Dans la couche de Stern (entre la surface du colloïde et la surface de la couche de Stern) : se crée un potentiel électrostatique dit **potentiel de Stern**.

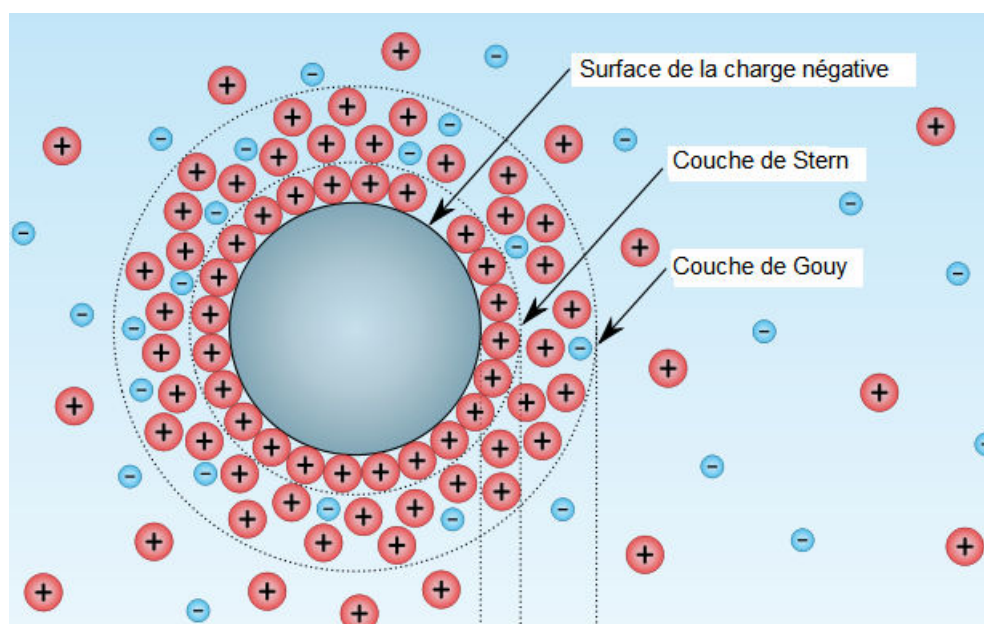


Figure 2-1 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale

Dans la couche de Gouy (entre la surface de la couche de Stern et la surface de la couche de Gouy) : se crée un potentiel électrostatique dit **potentiel de Nernst ou potentiel zêta**, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde.

Dans la couche de Gouy ; la force de répulsion électrostatique entre les charges ; est le résultat du potentiel zêta :

$$\zeta = \frac{4\pi qd}{D}$$

Où :

q : nombre de charges par unité de surface, d : épaisseur de la couche dans laquelle il y a un gradient de charges, D : constante diélectrique.

Au niveau de la couche de Gouy, le potentiel de Nernst (potentiel zêta) décroît linéairement car les cations constitutifs sont empilés uniformément.

Dans la couche de Stern, le potentiel électrostatique varie de manière non linéaire (selon la loi de Poisson), car la répartition ionique résulte d'un mélange aléatoire de cations et d'anions.

**\*Caractéristiques du potentiel de Nernst (potentiel zêta) :**

Le potentiel de Nernst est caractérisé par :

- il négatif car les colloïdes sont chargés négativement.
- dans les eaux naturelles, sa valeur varie de -30 à -35 mV.
- les particules de potentiel zêta se repoussent très fortement ; ce qui explique la stabilité des colloïdes, et leur résistance à toute agglomération.

### **3-Mécanismes de la coagulation [1] :**

La caractéristique principale des particules à coaguler est : la charge électrique et la couche d'eau qui entoure les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquence, à les stabiliser dans la solution.

Le but de la coagulation est la déstabilisation des particules en suspension (pour faciliter leur agglomération).

On peut décrire le mécanisme de coagulation (de déstabilisation) comme : l'enchaînement des 04 phases suivantes : i)-compression de la double couche, ii)-adsorption et neutralisation des charges, iii)-emprisonnement des particules dans un précipité, iv)-adsorption et pontage.

#### **3-1-Compression de la double couche :**

On peut expliquer la compression de la double couche dans les points suivants :

- si deux particules colloïdales s'approchent ; leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion.
- comme le potentiel électrostatique, le potentiel de répulsion chute plus rapidement si les deux particules s'éloignent surtout si la force ionique est élevée.
- par ailleurs ; il existe un potentiel d'attraction, entre les particules (force de Van Der Waals) ; qui dépend des atomes qui constituent les particules et de la densité de ces dernières.
- à l'inverse des forces de répulsion, les forces de Van Der Waals ne sont pas affectées par les caractéristiques de la solution.
- l'effet global, entre deux particules, est représenté par la résultante de ces deux forces.
- lorsque la distance qui sépare les particules est supérieure à une certaine distance critique, la force de répulsion l'emporte ; donc : les particules colloïdales en suspension sont continuellement en mouvement ; et les particules dont l'énergie cinétique est suffisante pour surmonter le

potentiel de répulsion s'agglomèrent (alors que les autres demeurent dispersées).

-afin de favoriser l'agglomération des particules, on peut soit augmenter l'énergie cinétique des particules, soit réduire le potentiel de répulsion entre les particules.

-pour réduire le potentiel de répulsion entre les particules, on peut augmenter la force ionique de la solution (l'addition d'ions de charge opposée à la charge initiale est plus efficace que la charge élevée de ces ions).

-les concentrations de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  et  $\text{Al}^{+3}$  requises pour déstabiliser une suspension de particules colloïdales négatives varient approximativement dans des rapports de  $1/10^{-2}/10^{-3}$ ).

-si on augmentant la force ionique d'une eau, on comprime la couche diffuse vers la particule.

-dans la zone située près de la particule, les forces de Van Der Waals sont alors assez importantes pour neutraliser la force de répulsion.

-la théorie de la compression de la double couche n'explique pas à elle seule tous les phénomènes observés lors de la déstabilisation des particules lorsqu'on augmente la quantité de coagulant.

### **3-2-Adsorption et neutralisation des charges :**

La restabilisation des particules colloïdales est peut être expliquée par l'hypothèse qui consiste à ce que : des charge issues d'un surplus de coagulant sont adsorbées à la surface des particules.

Les particules colloïdales ainsi restabilisées possèdent alors une charge inversée, ce qui est contraire au but recherché.

### **3-3-Emprisonnement des particules dans un précipité :**

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut les emprisonner dans une particule floc lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulants, (sels de métaux trivalents :  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou  $\text{FeCl}_3$  ; pour obtenir un précipité appelé floc.

Lorsque le pH de l'eau est situé dans une plage acide ou neutre, le floc, constitué de molécules de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , possède habituellement une charge positive .

La présence de certains anions et de particules colloïdales accélère la formation du précipité.

Lors de la formation du floc : les particules colloïdales jouent le rôle de noyaux.

Ce phénomène peut entraîner une relation inverse entre : la turbidité et la quantité de coagulant requise (une concentration importante de particules en suspension peut entraîner une diminution de la quantité de coagulant nécessaire).

### **3-4-Adsorption et pontage :**

Dans quelques cas, on peut réaliser le traitement le plus économique en utilisant un polymère anionique lorsque les particules sont chargées négativement.

Les molécules de polymère (très longues) contiennent des groupes chimique qui peuvent adsorber des particules colloïdales à l'une de ses extrémité, alors que d'autres sites sont libre pour adsorber d'autre particules (pontage : les molécules polymères forment des ponts entre les particules colloïdales.

### **4-Critères de choix d'un coagulant :**

Les critères de choix d'un coagulant sont :

- son efficacité à réduire la couleur.
- son efficacité à réduire la turbidité.
- son efficacité à réduire les matières organiques.

Le tableau 2-1, donne la liste des coagulants les plus fréquents ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau 2-1 : Liste des coagulants les plus fréquents

Coagulant	Phase	Prix (\$/tonne)	Quantité (g/m <sup>3</sup> )	Remarques
Sulfate d'Aluminium $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	solide	260 à 305	10 à 150 pour les eaux de surface	-obtention d'une eau de très faible turbidité
			50 à 300 pour les eaux résiduaires	-poudre irritante, corrode les métaux ferreux
Aluminate de Sodium $NaAlO_2$	-	-	5 à 50 pour les eaux de surface	-irritant pour les yeux et les muqueuses
			-	-corrode les métaux ferreux
Chlorure Ferrique $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	solide	300 à 350	5 à 150 pour les eaux de surface	-pour les eaux chargées en matière organique
			50 à 300 pour les eaux résiduaires	-réactif acide, oxydant corrosif, dissolution exothermique
Sulfate Ferrique $Fe(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	solide	-	10 à 250 pour les eaux de surface	-oxydant corrosif
			-	-produit tachant
Sulfate Ferreux $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	solide	150	5 à 150 pour les eaux de surface	-corrode les métaux ferreux, produit tachant
			100 à 400 pour les eaux résiduaires	-conservation à $T > 10^\circ C$

**Remarque :**

Le coagulant le plus utilisé dans le monde : sulfate d'aluminium (car c'est le moins cher).

## 5-Réduction de l'alcalinité lors de la coagulation par les coagulants courants :

La mise en solution de coagulant consomme de l'alcalinité de l'eau et produit de CO<sub>2</sub>, et donc conduit à la chute de pH ; voir tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Baisse d'alcalinité générée par la réaction d'un coagulant (sulfate d'Aluminium) avec les constituants courants de l'eau naturelle

*cas du bicarbonate de calcium :
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2 + 14H_2O$
*cas du bicarbonate de sodium :
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 6NaHCO_3 \rightleftharpoons 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 6CO_2 + 14H_2O$
*cas du carbonate de sodium :
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3Na_2CO_3 \rightleftharpoons 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 3CO_2 + 14H_2O$
*cas de l'hydroxyde de sodium :
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 6NaOH \rightleftharpoons 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 14H_2O$
*cas de l'hydroxyde de calcium :
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O + 3Ca(OH)_2 \rightleftharpoons 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 + 14H_2O$

## 6-Facteurs influençant la coagulation :

### a-pH :

Le pH est le facteur le plus important dans l'étape de la coagulation car le gamme optimale de pH est celle qui permet l'obtention de la forme précipitée [Al(OH)<sub>3</sub> ou Fe(OH)<sub>3</sub>] et évite l'existence de la forme dissoute (Al<sup>3+</sup> ; Fe<sup>3+</sup>).

Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH optimales s'étendent respectivement supérieure à 5 et de 6 à 7,4.

### b-Température :

Pour la température, l'expérience a montré que durant l'hiver les floccs se décantent plus difficilement à cause de l'augmentation de la viscosité de l'eau.

### c-Sels dissous et turbidité :

Les sels dissous dans une eau exercent des influences sur la coagulation. La coagulation à l'aide de sels d'aluminium ou de fer est plus affectée par les anions que les cations.



L'ajout d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  élargissait la plage de pH optimale vers l'acidité, alors que l'addition des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  exerce une influence minime.

La dose du coagulant augmente avec l'augmentation de la turbidité mais pas de façon linéaire.

### **7-Coagulation de la couleur :**

Généralement ; la couleur d'une eau est due à la décomposition de matières organiques contenues dans la matière humique.

Cette couleur dépend d'une grande variété de composés organiques (humiques : polymères de taille de 800 à 50000 daltons).

Environ de 90% des particules responsables de la couleur ont des diamètres supérieures à 3,5 nm (donc des colloïdes).

Les colloïdes les plus petits sont responsables de la turbidité (exemple : la glaise, où le diamètre de particules est  $d_p \approx 1\mu\text{m}$ ).

La plus part des particules responsables de la couleur possèdent des charges négatives à leur surface, dont l'intensité dépend du degré d'ionisation et du pH de l'eau.

Les mécanismes qui permettent l'élimination de la couleur ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour celle de la turbidité.

La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale : pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée.

Le pH optimal pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6, alors que le pH optimal pour celle de la turbidité varie entre 6,5 et 7,5.

Le pH optimal pour l'élimination de la couleur étant faible, on doit, dans certains cas, le relever avant la filtration, afin de faire précipiter les composés de fer et d'aluminium, qui sont solubles à des pH faibles [1].

### **8-Problèmes du coagulant le plus utilisé (sulfate d'aluminium) :**

Le sulfate d'aluminium est le coagulant le moins cher ; mais il possède certains inconvénients :

-les résidus d'aluminium jouent un rôle dans des maladies telles que l'Alzheimer.

-l'utilisation laisse dans l'eau traitée des résidus métalliques en traces.

-il est peu efficace dans les eaux froides.

-il consomme considérablement l'alcalinité ; ce qui conduit à une baisse du pH.

-son coût est insupportable pour certains pays pauvres.

Les alternatives du sulfate d'aluminium : sont les coagulants naturels (ex : Moringa Oleifera), qui sont peu coûteux et, en général, non toxique pour la santé et l'environnement ; voir tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Comparaison de coagulation avec sulfate d'aluminium (solution à 5% massique) et Moringa Oleifera comme coagulant naturel (solution à 5% massique)

	Sulfate d'aluminium	Moringa Oleifera
Quantité		50 à 100 fois moins de coagulant
pH	-consommation d'alcalinité. -chute du pH. -rééquilibrage nécessaire.	-pas de consommation d'alcalinité. -pas de modification du pH. -pas d'équilibrage.
Nature des boues produites	-Boues gélatineuses, acides, contenant des métaux traces -le traitement est nécessaire (coût élevé).	-boues constituées de matière organique biodégradable. -pas de métaux -possibilité d'utilisation en épandage (coût plus faible)
Volume des boues produites	-5 fois plus grand	-5 fois plus faible
Effet sur la teneur en matière organique	-pas d'effet.	-augmentation de la teneur en MO. -problèmes d'odeur, de couleur et de goût si le stockage dure plus de 24h. -réaction possible avec le chlore de la désinfection (formation des trihalométhanes carcérigènes)
Effet sur la teneur en $PO_4^{3-}$	-possibilité de la diminution en traitement des eaux résiduaires	-augmentation de la teneur en $PO_4^{3-}$

**Exercice 2-1 :**

8 mg de sulfate ferreux sept fois hydraté ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) sont consommés avec de la chaux dans un bassin de coagulation, par litre d'eau.

a-déterminez la quantité du sulfate ferreux et de la chaux vive nécessaire pour traiter 10 millions de litres d'eau.

b-calculer la quantité du sulfate d'aluminium 18 fois hydraté nécessaire pour traiter 18 millions de litres d'eau par jour.

La dose du sulfate d'aluminium est de 14 mg/l.

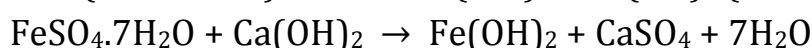
c-calculez également la quantité de  $\text{CO}_2$  émise par litre d'eau traitée.

**Solution de l'exercice 2-1 :**

a-quantité du sulfate ferreux nécessaire pour le traitement de 10 million de litres d'eau :

$$= 8 \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ mg} = 80 \text{ kg}$$

Les réactions chimiques :



$$\text{La masse moléculaire du sulfate ferreux} = 56 + 32 + 4 \cdot 16 + 7 \cdot (2 \cdot 1 + 16) = 278 \text{ g FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

$$\text{La masse moléculaire de la chaux active} = 40 + 16 = 56 \text{ g CaO}$$

Puisque une molécule du sulfate ferreux nécessite une molécule de la chaux vive

278 g du sulfate ferreux nécessitera 56 g de la chaux vive

$$1 \text{ g de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \text{ nécessite } \frac{56}{278} \text{ g de CaO}$$

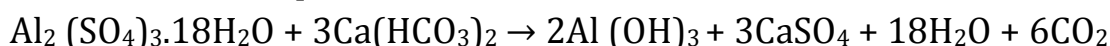
$$80 \text{ kg de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \text{ nécessite } \frac{56}{278} \cdot 80 \text{ kg de CaO} = 16,12 \text{ kg de CaO}$$

Donc la quantité de chaux vive pour traiter 10 million de litres d'eau est : 16,12 kg

b-quantité du sulfate d'aluminium 18 fois hydraté nécessaire pour traiter 18 millions de litres d'eau par jour :  $= (14 \cdot 18 \cdot 10^6) / 10^6 = 252 \text{ kg}$

c-quantité de  $\text{CO}_2$  émise par litre d'eau traitée :

La réaction chimique est la suivante :



$$2 \cdot 27 + 3 \cdot 32 + 36 \cdot 1 + 30 \cdot 16 = 666 \text{ g du Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O} ; \text{libèrent : } 6 \cdot 12 + 12 \cdot 16 = 264 \text{ g de CO}_2$$

$$14 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O} ; \text{libèrent : } (14 \cdot 264) / 666 = 5,55 \text{ mg de CO}_2$$

La quantité de  $\text{CO}_2$  émise par 01 litre d'eau traitée est : 5,55 mg.

**Exercice 2-2 :**

On projette de faire une coagulation-floculation par le chlorure de fer ( $\text{FeCl}_3$ ) comme coagulant, pour un débit d'eau de  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Le coagulant est injecté dans le bassin de coagulation sous forme d'une solution à l'aide d'une pompe doseuse.

La concentration de la solution du coagulant est de  $10 \text{ g/l}$ .

Le but est d'assurer une concentration du coagulant dans le bassin de  $20 \text{ mg/l}$ .

1) Calculer la quantité journalière de  $\text{FeCl}_3$  à utiliser en  $\text{kg/j}$  ?

2) Calculer le débit de la pompe doseuse en  $\text{l/h}$  ?

3) Calculer la perte d'alcalinité  $\text{HCO}_3^-$  en  $\text{mg/l}$  ?

4) Calculer la production de  $\text{CO}_2$  en  $\text{mg/l}$  ?

On donne :

Masse molaire du chlorure de fer :  $\text{MM}(\text{FeCl}_3) = 162,5 \text{ g/mole}$  ;

**Solution de l'exercice 2-2 :**

1-quantité journalière utilisée de  $\text{FeCl}_3$  :

Nous avons à travers la règle de trois :

$20 \text{ mg} (\text{FeCl}_3)$  ; correspond à :  $1 \text{ l}$  d'eau

qt ( $\text{FeCl}_3$ ) ; correspond à :  $36 \text{ m}^3 / \text{h}$

Donc : qt ( $\text{FeCl}_3$ ) =  $720 \text{ g/h} = 17,28 \text{ kg/j}$

2-débit de la pompe doseuse :

Nous avons à travers la règle de trois :

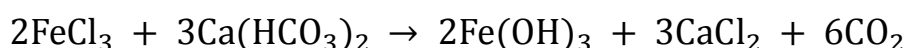
$1 \text{ l}$  de solution de  $\text{FeCl}_3$  ; correspond à :  $10 \text{ g FeCl}_3$

Débit de la pompe doseuse ; correspond à :  $720 \text{ g /h}$

Donc : débit de la pompe doseuse :  $72 \text{ l/h}$

3-perte d'alcalinité :

L'équation de réaction du chlorure de fer avec les bicarbonates est donnée par :



Donc on a :

$2 \text{ moles de FeCl}_3$  ; nécessite :  $6 \text{ moles de HCO}_3^-$

Donc on aura selon la règle de trois :

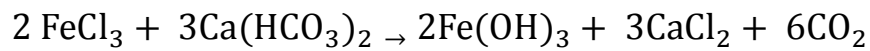
$2.162,5 \text{ g}$  ; nécessite :  $6 \times 61 \text{ g}$

$20 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$  ; nécessite : perte d'alcalinité

Donc : perte d'alcalinité =  $22,523 \frac{\text{mg HCO}_3^-}{\text{l}}$

4-production de CO<sub>2</sub> :

Selon l'équation de réaction du chlorure de fer avec les bicarbonates :



On formule la règle de trois :

2 moles de FeCl<sub>3</sub> ; correspond à : 6 moles de CO<sub>2</sub>

Donc on a :

2.162,5 g ; correspond à : 6 × 44 g

$20 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$  ; correspond à : production de CO<sub>2</sub>

Donc : production de CO<sub>2</sub> = 16,245 mg/l.

## **Chapitre 3**

### **Floculation**

#### **1-Définitions :**

La floculation s'effectue par l'ajout d'agent flocculant tout en appliquant une agitation.

La floculation est le rassemblement des micro-micelles sous forme séparable (flocs) ; en appliquant l'agitation mécanique

La floculation s'effectue par l'ajout de certains réactifs chimiques spécifiques qui sont les flocculants.

Un flocculant est un polymère (c'est-à-dire une longue molécule constituée par la répétition d'un motif de base) qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par sédimentation et peuvent être plus facilement arrêtés par les filtres.

#### **2-Mécanisme de la floculation :**

Les particules stables devenues déstabilisées par coagulation.

Le but de la floculation, est l'agglomération des particules (déjà déstabilisées par coagulation) ; donc le grossissement de ces particules.

La floculation est réalisée par l'ajout de réactif (flocculant).

L'activation de la floculation se fait par la mise en contact entre les différentes particules déstabilisées ; par le biais d'un mélange lent (agitateur).

Le regroupement des plusieurs particules déstabilisées ; forme un floc plus volumineux.

Les flocons formés ont tendance (selon leurs natures, tailles, masses volumiques) ; à se décanter ou à flotter, voir figure 3-1.

#### **3-Théorie de la floculation (modélisation du taux de floculation) :**

La théorie de floculation est basée sur les hypothèses suivantes :

- i)-les particules sont sphériques,
- ii)-la solution est mono-dispersée.



Figure 3-1 : Principe de la floculation.

### 3-1-Modes de floculation [2] :

Après déstabilisation, les particules colloïdales tendent à s'agglomérer après leur entrées 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 pour but : d'augmenter la probabilité des contacts.

Les contacts entre particules sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules.

Le gradient de vitesse (différence de vitesse) est provoqué selon le cas ; par (voir tableau 3-1) :

Tableau 3-1 : Comparaison entre Micro-floculation et Macro-floculation

Type	Micro-floculation (floculation péri-cinétique)	Macro-floculation (floculation ortho-cinétique)
Symbole	Fp	Fo
Moteur	Agitation thermique	Agitation mécanique
Source de contacts entre particules	Mouvement brownien des particules (mouvement aléatoire)	Mouvement d'une partie du fluide qui provoque le mouvement des particules
Taille des particules	Agglomération des micro-flocs (1 nm à 1 $\mu\text{m}$ ) pour former des macro-flocs (1 à 3 $\mu\text{m}$ )	Agglomération des macro-flocs (1 à 3 $\mu\text{m}$ ) pour former des floccs décantables ou séparables (>50 $\mu\text{m}$ )

### 3-2-Floculation péri-cinétique Fp :

Sous l'agitation thermique toutes les particules ont la même énergie cinétique : donc les plus petites ont les vitesses les plus élevées, c'est-à-dire ont la plus grande probabilité de rencontre.

Le taux de floculation des particules est décrit donc selon l'équation suivante :

$$F_p = \frac{dN}{dt} = - \frac{4\alpha \cdot K \cdot \theta}{3\mu} \cdot N^2$$

Où :

N : nombre total de particules dans 1 m<sup>3</sup> à l'instant t.

N<sub>0</sub> : nombre total de particules dans 1 m<sup>3</sup> à l'instant initial.

$\frac{dN}{dt}$  : taux de floculation (taux de variation de la concentration des particules, variation du nombre de particules agrégées au cours du temps).

$\alpha (-)$  : fraction des chocs efficaces (facteur de fréquence des collisions efficaces : nombre de collisions effectives/ nombre de collisions totales) ; il est inversement proportionnelle au taux de stabilité colloïdale.  $\alpha = 0$  à 1 ; voir tableau 3-2.

Tableau 3-2 : valeurs de  $\alpha$  (fraction des chocs efficaces)

$\alpha = 0$	suspension colloïdale totalement stable
$\alpha = 1$	suspension parfaitement coagulée

En traitement des eaux en prend couramment :

$\alpha = 0,2$  à  $0,5$  : qui signifie qu'un contact sur cinq (0,2) ou sur deux (0,5) conduit à une agglomération.

K : constante de Boltzmann ;  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/°K.

$\theta$  : température (°K).

$\mu$  : viscosité dynamique (Pa.s).

Après intégration, on obtient :

$$N = \frac{N_0}{1 + \frac{4\alpha \cdot K \cdot \theta \cdot N_0}{3\mu} t}$$



Si on pose :

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{3\mu}{4\alpha.K.\theta.N_0} :$$

Où :

$t_{\frac{1}{2}}$  : temps nécessaire pour réduire la concentration des particules en suspension à la moitié ; pour une eau à 25°C :

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{1,6.10^{17}}{\alpha.N_0}$$

$$\Rightarrow N = \frac{N_0}{1 + \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$$

### 3-3-Floculation ortho-cinétique Fo :

Le taux de floculation est lié à l'énergie mécanique dissipée dans la zone d'agitation, donc lié au gradient de vitesse G.

L'augmentation du gradient de vitesse augmente la probabilité de rencontre des micro-flocs.

Pour des valeurs trop élevées du gradient de vitesse, le floc formé subit un cisaillement mécanique entraînant sa destruction.

Le taux de floculation (taux de variation de la concentration des particules) suit le modèle de Van Smoluchowski :

$$Fo = \frac{dN}{dt} = -\frac{4\alpha.\Omega.G}{\pi}.N : \text{modèle de Smoluchowski}$$

Si on mit :  $-\frac{4\alpha.\Omega.G}{\pi} = k_0$

$$\Rightarrow \frac{dN}{dt} = k_0.N$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = k_0.t = \frac{4\alpha.\Omega.G}{\pi}.t$$

Où :

$k_0$  : constante ortho-cinétique.

$\Omega$  : rapport du volume des particules par le volume de la suspension (il est proportionnelle à la concentration en particules initialement présentes et formées lors de la coagulation). Ce rapport est donné par :

$$\Omega = \frac{\pi d^3 N_0}{6}$$

Si on remplace  $\Omega$  dans l'expression de  $\frac{dN}{dt}$  ; on obtient :

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{2\alpha \cdot G \cdot d^3 \cdot N \cdot N_0}{3}$$

Avec :

$d$  : diamètre de particules (m).

En traitement des eaux on prend couramment :  $\Omega = 10^{-5}$  à  $10^{-3}$  dans un flocculateur classique.

$G$  ( $s^{-1}$ ) : vitesse de rotation (nombre de tours/seconde, vitesse d'agitation, fréquence, gradient de vitesse). Cette vitesse de rotation est exprimée par le modèle de Camp-Stein comme :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} : \text{Modèle de Camp-Stein.}$$

Où :

$V$  : Volume de réacteur.  $\mu$  : viscosité dynamique du liquide.

S'il y a plusieurs pales, on doit intégrer la puissance transmise par chaque pale :

$$G_{moy} = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

Avec :

$P$  : puissance transmise par les pales (appliquée) au fluide dans le mélangeur.

### 3-4-Nombre de particules dans une solution colloïdale :

On peut exprimer le nombre de particules dans une solution colloïdale par :

$$N = \frac{\text{volume total des particules}}{\text{volume d'une particule}} = \frac{C/\gamma}{\pi d^3/6}$$

Où :

C : concentration des particules dans la solution (kg/m<sup>3</sup>).

γ : Densité des particules (-).

d : diamètre des particules.

### 3-5-Modèle de Smoluchowski modifiée (ou d'Argaman-Kaufmann) :

Le modèle de Smoluchowski modifiée ou bien d'Argaman-Kaufmann est exprimé par :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{4\alpha \cdot \Omega \cdot G}{\pi} N + k_c \cdot G^n$$

Où :

k<sub>c</sub> : constante de cassure des flocs.

n : exposant (n=2 à 4 selon la turbulence).

### 3-6-Calcul du volume du réacteur (bassin de floculation) et du temps de séjour :

Selon le modèle de Smoluchowski et pour un objectif d'abattement de la pollution de 50 % (c.à.d : N/N<sub>0</sub> =0,5) ; et pour une suspension parfaitement coagulée (α = 1) ; on obtient :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{2}{3} G \cdot d^3 \cdot N^2 \Leftrightarrow \frac{2}{3} G \cdot d^3 \cdot t = \frac{1}{N} - \frac{1}{N_0} = \frac{1}{N_0} \left( \frac{N_0}{N} - 1 \right)$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{3}{2G \cdot d^3} \cdot \frac{1}{N_0} \cdot \left( \frac{N_0}{N} - 1 \right) :$$

Où :

t : représente le temps de séjour dans le réacteur.

Le volume du réacteur (floculateur, mélangeur)  $V$  ; sera donc :

$$V = Q.t$$

Où :

$Q$  : débit d'eau traitée.

**\*Correction du temps de séjour en fonction de la température :**

Afin de bien calculer le volume du réacteur ; le temps de séjour doit être corrigé en fonction de la température.

De ce fait ; on doit multiplier la valeur le temps de séjour par le facteur de correction  $F_{Ct}$ .

Les valeurs de  $F_{Ct}$  sont données selon les cas suivants :

i)-cas de l'agitation rapide ; voir tableau 3-3 :

Tableau 3-3 : Facteur de correction  $F_{Ct}$   
en fonction de la température [3]

T (°C)	Facteur de correction $F_{Ct}$	T (°C)	Facteur de correction $F_{Ct}$
0	1,35	20	1,00
5	1,25	25	0,95
10	1,15	30	0,90
15	1,07		

ii)-cas de l'agitation douce :

On prend généralement :  $F_{Ct} = 2$ .

**3-7-Nombre de collisions (de chocs) :**

Le nombre de collisions est donné par :

$$N_c = G.t = G.\frac{V}{Q}$$

**3-8-Comparaison des floculations péri-cinétiques et ortho-cinétiques :**

Le rapport entre le taux de floculation des particules en floculation péri-cinétique et le taux de floculation des particules en floculation ortho-cinétiques est donné par :

$$\frac{F_o}{F_p} = \frac{-\frac{2\alpha.G.d^3.N.N_0}{3}}{-\frac{2\alpha.G.d^3.N.N_0}{3}} = \frac{\mu.G.d^3}{2.K.\theta}$$

Il est clair que ce rapport ne dépend que des 05 paramètres :  $\mu$ ,  $G$ ,  $d$ ,  $K$  et  $\theta$ .

### 3-9-Rendement de la coagulation floculation :

L'efficacité d'élimination (abattement) des colloïdes est évalué par le taux d'élimination (rendement) qui s'exprime par :

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100$$

Où :

$C_0$  et  $C_f$  : teneurs en colloïdes de l'eau brute et de l'eau traitée respectivement ( $C_0$  et  $C_f$  : sont exprimés en mg/l).

### 4-Types de floculation :

#### 4-1-Floculation à écoulement horizontal :

On peut décrire la floculation ortho-cinétique dans un bassin de floculation classique (à écoulement horizontal selon l'équation de Smoluchowski :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{G}{6} n_1 \cdot n_2 \cdot (d_1 + d_2)^3$$

Où :

$\frac{dN}{dt}$  : taux de collision entre les particules de type 1 et de type 2.

$n_1$  et  $n_2$  : nombre de particules de type 1 et de type 2 respectivement.

$d_1$  et  $d_2$  : diamètre de particules de type 1 et de type 2 respectivement.

Les particules de type 1 peuvent être des particules responsables de la couleur ou de la turbidité.

Les particules de type 2 peuvent être des particules de floc.

Dans un flocculateur classique, l'agitation est provoquée à l'aide d'un ensemble de pales parallèles à l'axe de rotation (où l'ensemble tourne à une vitesse constante).

\*cas de n bassins de floculation placés en série :

$$\frac{N_0}{N_n} = \left(1 + \frac{K \cdot \Omega \cdot G \cdot t}{n}\right)^n$$

Où :

$N_0$  et  $N_n$  : concentration de particules de type 1 à l'entrée du premier bassin et à la sortie du n<sup>ème</sup> bassin respectivement.

K : constante.

t : temps de rétention global.

n : nombre de bassins de floculation.

#### **4-2-Flocculateur à voile de boues :**

Dans ce flocculateur ; l'écoulement de l'eau se fait vers le haut (pour maintenir un voile de boues en suspension : ce voile de boues se situe dans une zone de légère turbulence, où les collisions entre les particules sont favorisées par la forte concentration de ces particules).

Les connaissances actuelles ne sont pas complètes.

Dans les deux types de flocculateurs, les collisions entre les particules sont favorisées par le brassage.

Dans le flocculateur à voile de boues, la concentration de particules est beaucoup plus élevées ; ce qui augmente les probabilités de collisions entre les particules.

Le taux d'abattement est donné par :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\frac{\alpha \cdot \Omega \cdot G \cdot t}{\pi}} : \text{modèle de Hudson.}$$

Le modèle de Hudson est valable pour les flocculateurs à écoulement horizontal et à voile de boues.

Beaucoup d'auteurs suggèrent de prendre :  $G \cdot \Omega \cdot t = 100$

La vitesse de chute du voile de boues  $V_v$  est fonction de la vitesse de chute d'une particule  $V_p$ , voir tableau 3-4.

Pour un floc produit par un sel d'aluminium ou de fer ; on a :

$$\frac{V_v}{V_p} = 1 - 2,78 \cdot \Omega^{2/3} : \text{modèle de Bond}$$

Pour un floc d'alun ou de chaux :  $\Omega = 0,06$  à  $0,1$  et avec  $\frac{V_v}{V_p} = 0,5$  ; on obtient :

$$3,16 \cdot \Omega = 0,076 ;$$

Ce qui nous permet de l'utiliser pour concevoir un flocculateur à voile de boues.

Tableau 3-4 : Vitesses de chute typiques pour des différentes particules de floc

Type de floc	Vitesse de chute à 15°C (mm/h)
Floc d'alun fragile (couleur)	0,61 - 1,22
Floc d'alun moyen (algue)	1,02 - 1,52
Floc d'alun résistant (turbidité)	1,22 - 1,78
Floc résistant (adoucissement chaux-soude)	1,22 - 1,78
Floc (précipité de CaCO <sub>3</sub> )	2,03 - 3,35

### 5-Floculants célèbres :

Le tableau 3-5 montre les réactifs de floculation couramment utilisés en : traitement de l'eau potable, traitement de l'eau usée, et traitement des eaux des piscines.

### 6-Adjuvants de floculation :

Les Adjuvants de floculation sont des composés agissant par pontage (encerclement), leur rôle est d'accélérer la floculation ou d'améliorer la densité des floes.

Certains adjuvants agissent plutôt sur la coagulation ; ils sont alors des adjuvants de coagulation, ils sont ajoutés avant l'introduction du coagulant.

Les doses d'adjuvants sont déterminées à l'aide des tests au laboratoire.

Les adjuvants de floculation les plus utilisés sont : l'argile (utile pour les eaux de faible turbidité), la silice activée (utile dans des eaux froides de la saison hivernale), et les polymères de synthèse (de masse moléculaire très élevée pour former des ponts pour l'élimination des colloïdes déstabilisés).

Tableau 3-5 : Floculants célèbres pour les différents domaines

<p>Traitement de l'eau potable</p>	<p>-polymères minéraux tels que la silice activée (SiO<sub>2</sub>), généralement associée au sulfate d'aluminium en eau froide.                  -polymères naturels extraits de substances animales ou végétales : amidons, alginates (obtenus à partir d'algues marines).                  -polymères de synthèse (produit récent) pouvant évoluer considérablement les performances de la floculation ; ils conduisent souvent à un volume de boue très inférieur.</p>
<p>Traitement de l'eau usée</p>	<p>-ils sont généralement des copolymères d'<u>b</u> et d'<u>acide acrylique</u> ou encore des <u>polyacrylamides</u>.</p>
<p>Traitement des eaux des piscines</p>	<p>-le floculant sert à améliorer la capacité de filtration des petites particules.                  -il existe 2 types de floculant : i)- le floculant de bassin : à verser directement dans le bassin (si l'eau contient des particules en suspension, ce qui témoigne d'un manque d'efficacité de la filtration). ii)- le floculant du filtre, à placé dans le skimmer (écumeur de surface : entrée de système de filtration). *Remarque : un excès de floculant aura pour effet de colmater les pores du filtre à sable et d'en atténuer fortement l'efficacité. Dans ce cas la seule solution est de nettoyer complètement le sable du filtre, voire de le remplacer.</p>



**Exercice 3-1 :**

Une solution colloïdale ayant un volume de 1 m<sup>3</sup>; de densité: 1,2 et concentrée dans l'eau à 5,33 mg/l; est constituée de particules sphériques de diamètre d = 2 µm.

1-Déterminer le nombre de particules par unité de volume à l'instant initial ?

2-Déterminer le temps nécessaire à l'agitation pour réduire le nombre de particules à la moitié ?

On donne :

Le gradient de vitesse (la vitesse d'agitation) :  $G = 260,84 \text{ s}^{-1}$

**Solution de l'exercice 3-1 :**

1-nombre de particules par unité de volume à l'instant initial :

$$\text{Volume d'une particule : } V_p = \frac{\pi d^3}{6} = \frac{\pi(2 \cdot 10^{-6})^3}{6} = \frac{4\pi \cdot 10^{-18}}{3} \text{ m}^3$$

$$\text{Masse d'une particule : } m_p = \gamma \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V_p = 1200 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-18}}{3} = \frac{4,8 \cdot \pi \cdot 10^{-15}}{3} = 1,6 \cdot \pi \cdot 10^{-15} \text{ kg} = 1,6 \cdot \pi \cdot 10^{-12} \text{ g}$$

$$\text{Nombre de particules par litre} = \frac{5,33 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot \pi \cdot 10^{-12}} = 1,06 \cdot 10^9 \text{ particules/l.}$$

$$\text{Nombre de particules par m}^3 = 1,06 \cdot 10^9 \cdot 10^3 = 1,06 \cdot 10^{12} \text{ particules/m}^3.$$

2-temps nécessaire à l'agitation pour réduire le nombre de particules à la moitié :

Pour un abattement de 50% :  $\left(\frac{N_0}{N} = 2\right)$  ;

$$t = \frac{3}{2G \cdot d^3} \frac{1}{N_0} \cdot \left(\frac{N_0}{N} - 1\right)$$

$$\Rightarrow t = \frac{3}{2G \cdot d^3} \cdot \frac{1}{N_0} = \frac{3}{2 \cdot 260,84 \cdot (2 \cdot 10^{-6})^3} \cdot \frac{1}{1,06 \cdot 10^{12}} = 678,14 \text{ s}$$

**Exercice 3-2 :**

Déterminer la vitesse d'agitation (la fréquence d'agitation) nécessaire pour assurer un taux d'abattement de 90% du nombre de particules d'un colloïde dans l'eau, au bout d'une heure ?

On donne :

Nombre initiale de particules colloïdales dans l'eau : 10<sup>15</sup> particules.

Les particules sont homogènes de forme sphérique ; de diamètre : 0,1 µm.

**Solution de l'exercice 3-2 :**

Nous avons :

$$t = \frac{3}{2G} \cdot \frac{1}{d^3} \cdot \frac{1}{N_0} \cdot \left( \frac{N_0}{N} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow G = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{t \cdot d^3} \cdot \frac{1}{N_0} \left( \frac{N_0}{N} - 1 \right)$$

Avec :

$$\frac{N_0}{N} = \frac{N_0}{(1 - 0,9) \cdot N_0} = 10$$

$$\Rightarrow G = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{t \cdot d^3} \cdot \frac{9}{N_0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{3600 \cdot (10^{-7})^3} \cdot \frac{9}{10^{15}} = \frac{3}{8 \cdot 10^{-4}} = 3750 \text{ s}^{-1}$$

## Chapitre 4

### Agitation mécanique

#### 1-Définition :

Un agitateur est un dispositif mécanique souvent vertical ; utilisé pour assurer l'homogénéisation d'un milieu liquide (solution ou suspension) plus ou moins visqueux.

#### 2-Rôle de l'agitation :

On peut décrire le rôle de l'agitation par les points suivants :

- mélanger, agiter ou malaxer des liquides.
- bien disperser les réactifs utilisés afin d'accélérer les réactions de coagulation ou de floculation, et de freiner des réactions de précipitation.
- fournir une agitation uniforme.
- assurer un bon contact entre les petites particules afin de favoriser leurs adhérences.

#### 3-Types d'agitateurs :

i)-Agitateur de type hélice à pales (hélice marine, hélice Mxflo 'Chmineer', hélice Lightinn, hélice à pales à profil mince), voir figure 4-1.

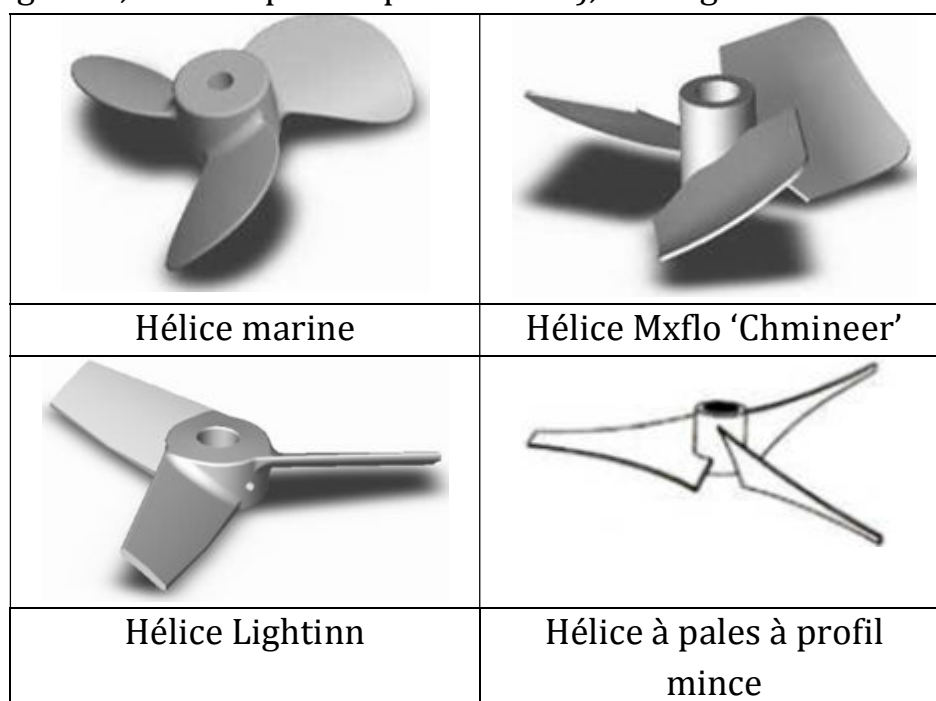


Figure 4-1 : Agitateur de type hélice à pales

ii)-Agitateur de type Turbine :

a-Turbine à pales montées sur disque (turbine Rushton ou à pales planes, turbine Scaba ou à pales courbées 'turbine de Smith'), voir figure 4-2.

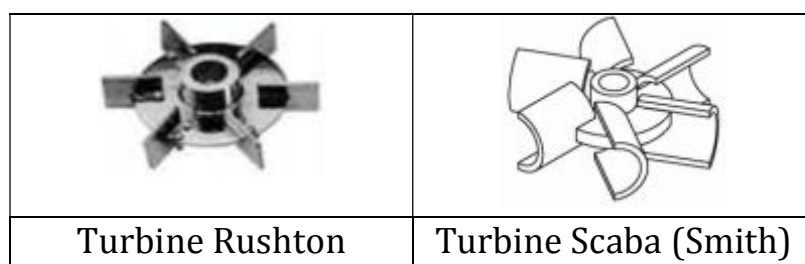


Figure 4-2 : Turbine à pales montées sur disque

b-Turbine à pales montées en bout d'arbre (turbine à pales plates, turbine à pales inclinées, turbine à pales incurvées), voir figure 4-3.

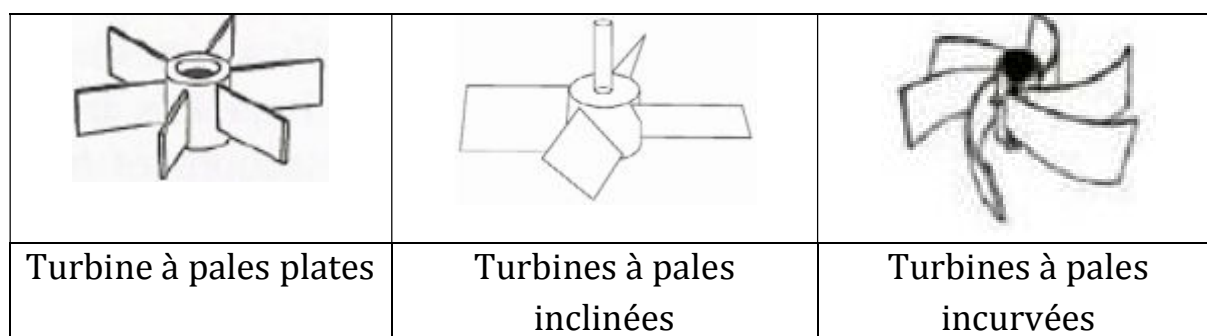
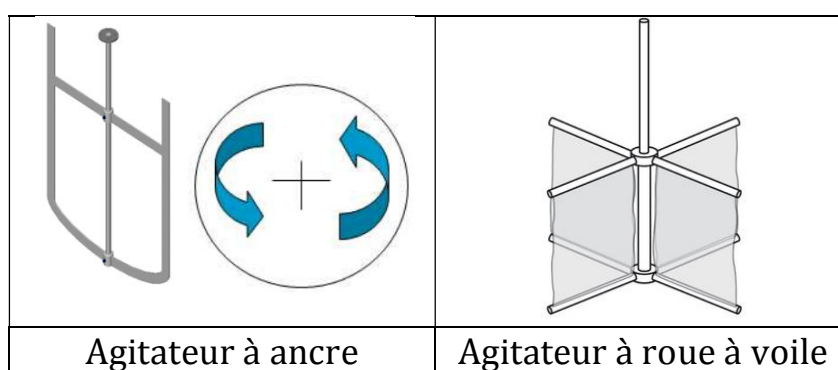


Figure 4-3 : Turbine à pales montées en bout d'arbre

iii)-Agitateur de type barrière (agitateur à pales, agitateur à ancre, agitateur grille, agitateur herse), voir figure 4-4.

iv)-Agitateur hélicoïdal (ruban hélicoïdal) : voir figure 4-5.

v)-Agitateur malaxeur (Malaxeur horizontal a pales sigma) : voir la figure 4-6.



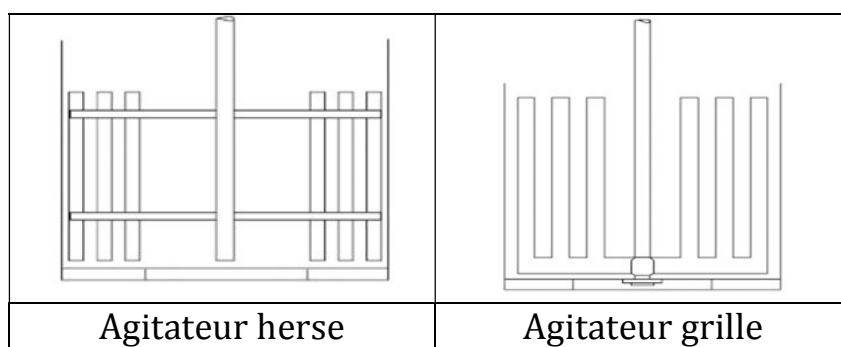


Figure 4-4 : Agitateur de type barrière

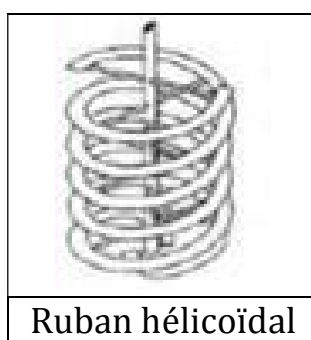


Figure 4-5 : Agitateur hélicoïdal



Figure 4-6 : Agitateur malaxeur

#### 4-Types d'agitations :

i)-Agitation mécanique :

a-Agitation verticale : se fait par le biais des agitateurs à hélices.

b-Agitation horizontale : se fait par le biais des agitateurs à pales.

ii)-Agitation statique (hydraulique) : se fait par le biais des canaux à chicanes.

#### 5-Puissance d'agitation :

**5-1-Cas d'un agitateur de type turbine (turbine à pales ou à palettes) :**

La puissance d'une seule pale de turbine est donnée par :

$$P(W) = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^3$$

Remarque : pour avoir la puissance de la turbine, il faut multiplier par le nombre de pales de la turbine.

Où :

$C_D$  : coefficient de traînée ( $C_D = 1,8$  pour des pales plates), voir tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Coefficient de traînée en fonction du rapport relatif à la géométrie de la pale [3]

Rapport L/B	$C_D$
5	1,2
20	1,5
> 20	1,9
Où : L : longueur de la pale, B : largeur de la pale	

A (m<sup>2</sup>) : surface de la pale.

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : masse volumique du liquide.

$V_r$  (m/s) : vitesse relative de la pale par rapport à la vitesse du liquide.

La vitesse relative de la pale est donnée par :

$$V_r = \frac{V_l}{V_p} \cdot V_p = C \cdot V_p$$

Où :

$V_l$  : vitesse du liquide.

$V_p$  : vitesse de la pale.

C : rapport entre vitesse du liquide et celle de la pale. Ce rapport est donné par :

$$C = \frac{V_l}{V_p}$$

Généralement on prend :  $C \approx 0,75$ .

**Interprétation :**

La floculation est meilleure si :  $\frac{N_0}{N}$  est petit.

La floculation est meilleure si les valeurs des paramètres :  $t$ ,  $G$  et  $\Omega$  ; sont élevées.

### 5-2-Cas d'un agitateur de type hélice :

La puissance de l'hélice est donnée par :

$$P = N_P \cdot \rho \cdot [G(s^{-1})]^3 \cdot d_{\text{hélice}}^5$$

Où :

$N_P$  : nombre de puissance, voir tableau 4-2, tableau 4-4 et figure 4-7.

$d_{\text{hélice}}$  : diamètre de la turbine (de l'agitateur).

Tableau 4-2 : Expressions du nombre de puissance  $N_P$  [4]

Régime	$N_P$	Remarque
Laminaire ( $Re < 10^1$ )	$N_P = A/Re$	$N_P = f(A, Re)$
Transitoire ( $10^1 < Re < 10^4$ )	$N_P = f(Re)$	$N_P = f(Re)$
Turbulent ( $10^4 < Re$ )	$N_P = B$	$N_P = f(B)$
A et B : constantes liés au régime laminaire et turbulent respectivement, qui dépendent uniquement de la géométrie du système d'agitation (mobile et sa position dans la cuve).		

\*cas du régime laminaire :

$$N_P = \frac{A}{Re} ; \text{ et } Re = \frac{d_{\text{hélice}}^2 \cdot G \cdot \rho}{\mu}$$

Par remplacement ; on aura :

$$P = A \cdot \mu \cdot G^2 \cdot d_{\text{hélice}}^3$$

Les valeurs du paramètre A sont données par le tableau 4-3 et le tableau 4-4.

Tableau 4-3 : Valeurs de la constante A pour certains types d'agitateurs [5]

Type d'agitateur	A
------------------	---

Turbine de Rushton, turbine sans disque à 6 pales droites ( $\frac{d_{\text{hélice}}}{W} = 5$ )	75
Turbine de Rushton, turbine sans disque à 6 pales droites ou inclinées ( $\frac{d_{\text{hélice}}}{W} = 8$ ) ; W : largeur de pale.	50
Hélice	35 à 50
Ancre	200 à 300

Tableau 4-4 : Valeurs des constantes A et B pour certains types d'agitateurs [6]

Type de l'agitateur	A = $N_p \cdot Re$	B = $N_p$
Hélice marine	40	0,35
Hélice à 3 pales minces	40	0,43
Turbine à 4 pales inclinées à 45°	80	1,50
Turbine à 4 pales droites	80	3,30
Turbine disque à 6 pales droites (Rushton)	80	5,50
Ancre	150	0,20

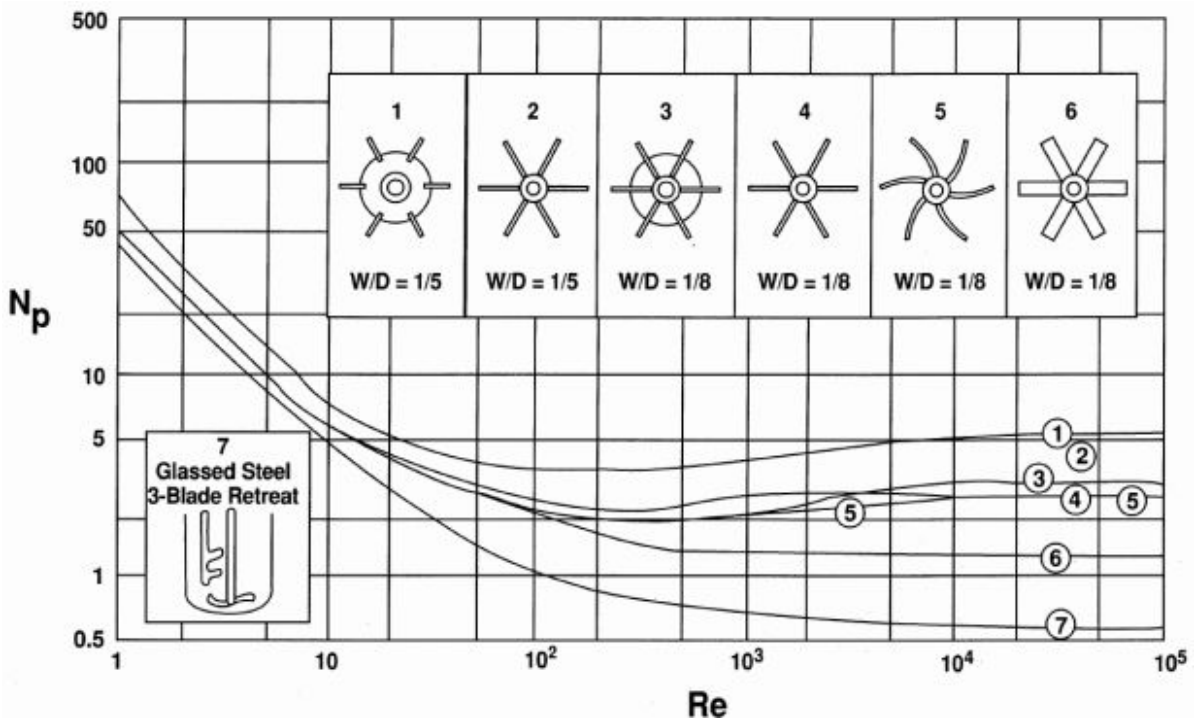


Figure 4-7 : Courbes de puissance pour différents agitateurs [7]



**Exercice 4-1 :**

Déterminer le gradient de vitesse d'un système d'agitation constitué de 4 pales où chaque pale ayant une surface unitaire de 0,5 m<sup>2</sup> ?

Le volume du liquide (l'eau) à agiter (volume du réacteur) est de 9 m<sup>3</sup>.

On donne :

Vitesse des pales :  $v_{pales} = 0,3$  m/s ; le coefficient de traînée :  $C_D = 1,5$ .

Masse volumique de l'eau :  $\rho_{eau} = 1000$  kg/m<sup>3</sup>.

Viscosité dynamique de l'eau :  $\mu_{eau} = 0,0015$  Pa.s.

**Solution de l'exercice 4-1 :**

Nous avons le modèle de Camp-Stein :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

Avec :

$$P = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_{eau} \cdot S_{pales} \cdot v_r^3$$

Et :

$$S_{pales} = 4 \cdot S_u = 2 \text{ m}^2$$

Avec :

$$v_r = 0,75 \cdot v_{pales} = 0,225 \text{ m/s}$$

Donc :

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 0,225^3 = 17,086 \text{ W}$$

$$\Rightarrow G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{17,086}{0,0015 \cdot 9}} = 35,57 \text{ s}^{-1}$$

**Exercice 4-2 :**

Dans un bassin d'agitation ; nous avons utilisé une turbine équipée de 03 pales planes identiques où chaque pale a une section rectangulaire de : 0,6 x 0,2 m<sup>2</sup>.

1-déterminer la puissance transmise par une pale ?

2-déterminer la puissance totale de la turbine ?

3-calculer le volume du bassin d'agitation (réacteur) pour traiter un débit de 10 l/s ?

4-déterminer la vitesse d'agitation (vitesse de rotation, fréquence) ?

On donne :

Le temps d'agitation est de : 678,14 s

Vitesse des pales :  $v_p = 1,5$  m/s.

Rapport entre la vitesse du liquide et celle de la pale :  $C = 0,75$ .

Coefficient de traînée :  $C_D = 1,8$ .

Masse volumique de l'eau :  $\rho_{eau} = 1000$  kg/m<sup>3</sup>

Viscosité dynamique de l'eau :  $\mu_{eau} = 10^{-3}$  Pa.s.

**Solution de l'exercice 4-2 :**

1-puissance transmise par une pale :

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \overset{\text{pales plates: } 1,8}{\widetilde{C}_D} \cdot \overset{1000}{\widetilde{\rho}} \cdot \overset{0,6 \cdot 0,2}{\widetilde{A}} \cdot \left( \overset{0,75 \cdot 1,5}{\widetilde{V}_r} \right)^3 = 153,77 \text{ W}$$

2-puissance totale de la turbine :

$$P_T = 3 \cdot P_p = 3 \cdot 153,77 = 461,31 \text{ W}$$

3-volume du bassin d'agitation pour traiter un débit de 10 l/s :

$$V = Q \cdot t = 0,01 \cdot 678,14 = 6,78 \text{ m}^3$$

4-vitesse d'agitation :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{461,31}{10^{-3} \cdot 6,78}} = 260,84 \text{ s}^{-1}$$

## Chapitre 5

### Mise en œuvre du traitement physico-chimique

#### 1-Essais du Jar-Test :

L'appareil Jar-Test est un équipement de laboratoire. Il est constitué d'un ensemble de poste (multipostes : couramment à 4 ou à 6 postes), et chaque poste est équipé d'un bécher équipé d'un agitateur (généralement à hélice), voir figure 5-1.

L'appareil de Jar-Test est équipé aussi d'un variateur de vitesse de l'agitateur et d'un compte-tours pour mesurer sa vitesse de rotation.



Figure 5-1 : Equipement d'un de Jar-Test à 06 postes

L'essai Jar-Test représente une procédure expérimentale simulant la coagulation/floculation/décantation.

Cet essai vise la détermination des conditions optimales de coagulation/floculation (dose de réactif à utiliser, pH, vitesse de rotation, durée, ...). A la fin de l'expérimentation, on détermine quels sont les paramètres optimaux qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats recherchés).

Le déroulement de l'essai Jar-Test se fait en 3 phases : i)-coagulation, ii)-floculation, iii)-et décantation.

Pendant le temps de décantation on estime : la vitesse de sédimentation des floes formés (rapide, moyenne, lente), et le chlore résiduel du surnageant.

Après la de décantation, le surnageant de chaque échantillon est récupéré pour mesurer : turbidité, et alcalinité.

### **1-1-Pratique du jar-test pour déterminer le pH optimal :**

L'utilisation du Jar-Test pour déterminer le pH optimal pour un coagulant donné ; se fait en suivant la procédure suivante :

- 1-remplir les béchers avec l'eau à traiter.
- 2-ajuster le pH de chaque bécher à une valeur prédéterminée (ex. pH: 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5) : une valeur de pH pour chaque bécher.
- 3-ajouter la même dose de coagulant dans chaque bécher (poste).
- 4-application de l'agitation forte pour la coagulation ( $G = 100$  à  $150 \text{ min}^{-1}$  ; pendant  $t = 1 \text{ min}$ ).
- 5-application de l'agitation faible juste après pour former les floccs ( $G = 25$  à  $30 \text{ min}^{-1}$  ; pendant  $t = 15$  à  $20 \text{ min}$ ).
- 6-pour décanter les floccs : arrêter l'agitation ; et laisse sédimenter pendant :  $t = 30$  à  $45 \text{ min}$ .
- 7-mesurer la turbidité dans chaque bécher (poste) à la fin du test.
- 8-le pH optimal est celui qui conduit à la turbidité minimale.

### **1-2-Pratique du jar-test pour déterminer la dose du coagulant :**

L'utilisation du Jar-Test pour déterminer la dose optimale d'un coagulant donné ; se fait en suivant la procédure suivante :

- 1-introduction du coagulant dans le liquide : tester différentes concentrations du coagulant (ex. C : 5 ; 7 ; 10 ; 12 ; 15 ; 20 mg/l) : une valeur de concentration pour chaque bécher (poste).
- 2-ajustement éventuel du pH (si possible avant l'introduction du coagulant).
- 3-application de l'agitation forte pour la coagulation ( $G : 100$  à  $200 \text{ tr/min}$  pendant 1 à 3 min)
- 4-application de l'agitation faible pour la floculation ( $G : 20$  à  $40 \text{ tr/min}$  pendant 10 à 20 min).
- 5-laisser reposer le liquide pour décantation (pendant 10 à 60 min : selon le décanteur utilisé).
- 6-mesurer la turbidité résiduelle dans chaque bécher (poste).
- 7-déduire les paramètres optimaux : doses de réactifs (ceux qui correspondent à la turbidité la plus faible).

### **2-Conception d'un système de coagulation-floculation :**

Les données requises pour la conception sont : la dureté calcique, la couleur, la COT, le Fer dissous, le Mg dissous.

De manière générale ; il faut concevoir 02 bassins de mixage en série : l'un pour la coagulation, et l'autre pour la floculation.

-l'objectif du bassin n°1 (bassin à agitation forte destiné à la coagulation) : est de bien disperser le coagulant.

-l'objectif du bassin n°2 (bassin à agitation douce destiné à la floculation) : est de favoriser la rencontre des particules sans les casser.

## **2-1-Conception du sous système de coagulation :**

### **2-1-1-Critères de choix de la géométrie du bassin :**

Le choix de la géométrie du bassin se fait selon les critères suivants :

-il faut éviter les bassins de formes circulaires.

-le volume du bassin : est en fonction du temps de séjour corrigé

-il est recommandé d'utiliser des chicanes pour favoriser la turbulence.

-un bassin à section carrée est préférable où on doit respecter un rapport profondeur/largeur = 2.

### **2-1-2-Critères de choix de l'agitateur :**

Le choix de l'agitateur se fait selon les critères suivants :

-l'injection du coagulant dans le bassin, se fait dans une zone de turbulence créée par des chicanes ou par un mélangeur mécanique avec des pales ou des hélices.

-il faut favoriser la circulation verticale du liquide ; donc de préférable on utilise un agitateur à hélice.

-si la profondeur du bassin d'agitation est supérieure à 02 fois le diamètre de l'hélice ; dans ce cas : de préférence choisir un agitateur à hélice.

-pour le nombre d'hélices ; de préférence choisir un agitateur à 02 hélices.

### **2-1-3-Critères de choix des conditions opératoires :**

Le choix des conditions opératoires se fait selon les critères suivants :

Type d'agitation : forte et courte.

Choix de G et t : en fonction des essais ; mais typiquement ; on prend :

Vitesse de rotation G ( $s^{-1}$ )= 400 à 1000.

Durée de coagulation t (min)= 0,2 à 5.

Produit G.t = 30 000 à 60 000, voir tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Couples (G, t) proposés [3]

t (s)	G (s <sup>-1</sup> )
20	1000
30	900
40	790
> 50	700

## **2-2-Conception du sous système de floculation :**

### **2-2-1-Critères de choix de la géométrie du bassin :**

Pour améliorer la floculation ; on peut ajouter :

- i)-des polymères pour améliorer l'agglomération des floccs,
- ii)-micro-sables pour lester les floccs et les rendre plus décantables.

Le choix de la géométrie du bassin se fait selon les critères suivants :

-de préférence : choisir plusieurs bassins en cascade (2 à 6, typiquement 3 à 4) : où G diminue d'un bassin à l'autre, et le transfert entre chacun des bassins se fait à une vitesse d'environ : 30 à 45 cm/s (à Q<sub>max</sub>).

-forme des bassins : carrée.

-profondeur des bassins = 3 à 4,5 m

-chaque bassin est séparé par des déversoirs.

### **2-2-2-Critères de choix de l'agitateur :**

Initialement ; on recommande d'utiliser des grands agitateurs couvrant une grande fraction de la largeur des bassins.

Le choix de l'agitateur ; se fait selon la technique à utiliser pour la séparation des floccs résultants de la floculation.

Il s'agit de deux techniques de séparation :

i)-séparation par décantation: dans ce cas ; la floculation est dite floculation conventionnelle ou traditionnelle.

ii)-séparation par filtration sur sable directement: dans ce cas ; la floculation est dite floculation à haute énergie.

#### **2-2-2-1-Cas de la floculation conventionnelle :**

Pour la floculation conventionnelle ; il est souhaitable de suivre les recommandations suivantes :

-type d'agitation : agitation horizontale (à l'aide des agitateurs à pales).

-forme du bassin : carrée.

-dimensions typiques du bassin :

Longueur = 6 à 30 m ; Largeur = 3 à 5 m ; Profondeur = Largeur.

$$\frac{\text{longueur des pales}}{\text{diamètre équivalent du bassin}} = 0,2 \text{ à } 0,4 \text{ m.}$$

-vitesse maximale des pales : 0,3 à 0,75 m/s.

-surface totale des pales : rayon des pales = 10 à 25% de la section du bassin.

-nombre de pales par agitateur : au moins 3 pales.

-G varie d'un bassin en cascade à l'autre ; et passe de 60 à 15 s<sup>-1</sup>.

#### **2-2-2-2-Cas de la floculation à haute énergie :**

Pour la floculation à haute énergie ; il est souhaitable de suivre les recommandations suivantes :

-type d'agitation : agitation verticale (à l'aide des agitateurs à hélices).

-forme du bassin : carrée.

-dimensions typiques du bassin :

Largeur maximale : 6 m ; Profondeur : 3 à 5 m.

-vitesse maximale des pales : 3 m/s.

$$\frac{\text{longueur des pales}}{\text{diamètre équivalent du bassin}} > 0,35 \text{ m.}$$

#### **2-2-3-Critères de choix des conditions opératoires :**

Les paramètres opératoires de la floculation sont principalement : la vitesse de rotation de l'agitateur G, le temps d'agitation t, et le produit G.t, Le choix des conditions opératoires ; se fait aussi selon la technique à utiliser pour la séparation des floccs : séparation par décantation (floculation conventionnelle) ou séparation par filtration sur sable directement (floculation à haute énergie).

Le tableau 5-2 ; résume le choix des paramètres opératoires selon le mode de floculation ; doc selon la technique à utiliser pour séparer les floccs résultants.

Tableau 5-2 : Choix de G, t et G.t selon la mode de floculation

Mode de floculation	Technique de séparation	Conditions
Floculation conventionnelle	Décantation	G = 10 à 60 s <sup>-1</sup> t = 1000 à 1500 s G.t = 30000 à 60000
Floculation à haute énergie	Filtration sur sable directement	G = 20 à 75 s <sup>-1</sup> t = 900 à 1500 s G.t = 40000 à 75000

### 3-Avantages et inconvénients de la coagulation-floculation :

#### 3-1-Avantages de la coagulation-floculation :

On peut regrouper les avantages de la coagulation-floculation dans les points suivants :

- elle ne nécessite qu'une petite surface car les dimensions des ouvrages sont réduites.
- elle ne nécessite que peu d'équipements mécaniques et électriques.
- sa consommation en d'électricité est faible.
- les dépenses d'investissements sont modérées.
- son fonctionnement est simple ; elle consiste à l'ajout de réactifs par une pompe doseuse, l'agitation mécanique par un agitateur (en 02 modes : forte et douce), et la séparation des floccs.
- son exploitation est très facile car la mise en service et l'arrêt sont instantanées.
- elle très efficace pour les colloïdes et efficace pour les oxydes métalliques.
- elle est qualifiée par une bonne validité des résultats expérimentaux en terrain exploitation.
- la possibilité d'appliquer le charbon actif en poudre en phase de coagulation (malgré sa délicate mise en œuvre), ce qui permet d'améliorer l'élimination de certains polluants.
- la possibilité d'améliorer les performances en utilisant des adjuvants.

#### 3-2-Inconvénients de la coagulation-floculation :

Les inconvénients de la coagulation-floculation sont sommairement les suivants :

- elle utilise souvent des réactifs chimiques dangereux (acides, bases) ; ce qui nécessite : un stockage sécurisé, et une main d'œuvre qualifiée.



- les couts des réactifs chimiques utilisés sont considérables (achat, transport, stockage).
- la coagulation est toujours accompagnée d'une modification du pH (par consommation de l'alcalinité), ce qui nécessite l'ajustement du pH à la sortie du procédé.
- elle est difficile à maîtriser si le débit d'eau à traiter est variable ; car tout les paramètres optimaux (doses, pH, vitesse de rotation, ...) ; changent selon la valeur du débit à traiter.
- son application produit des boues volumineuses (hydratées), ce qui nécessite d'appliquer toute la chaine de traitement des boues : déshydratation, traitement, stockage et évacuation.
- elle nécessite un suivi analytique rigoureux et un entretien régulier des différents instruments et équipements.
- pour les polluants dissous ; la coagulation-floculation n'est pas efficace; sauf si on exploite leur adsorption sur les floes formés pendant la floculation, ou dans le cas où on applique le charbon actif en poudre lors de la coagulation.
- dans le cas de traitement de plusieurs types de polluants en même temps ; les conditions de traitement peuvent être contradictoires.
- dans certains cas ; la coagulation-floculation nécessite un traitement supplémentaire de finition pour atteindre les objectifs souhaités.

**Exercice 5-1 :**

Lors d'un essai jar test pour déterminer la dose optimale de coagulant à utiliser où le coagulant est le sulfate d'alumine SA :  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  ; nous avons enregistré les données suivantes :

Poste	1	2	3	4	5	6
Dose de coagulant (ou taux de traitement) en ppm	0	5	7,5	10	12	15
pH	7,5	7,2	7	6,8	6,7	6,2
Taux MO (teneur en ppm)	8	2	1	0,5	0,5	0,5
Turbidité (NTU)	25	1,2	1	0,8	0,8	0,8

Si la solution mère de sulfate d'alumine SA a une concentration de 0,05 mol/l, avec une pureté de 98% ; calculer le volume de la solution du coagulant utilisé pour chaque poste ; et déterminer la dose optimale ?

**Solution de l'exercice 5-1 :**

-Volume utilisé :

Nous avons : 0,05.0,98 moles correspond à 1 l de solution

c.à.d :  $0,05 \cdot 0,98 \cdot (27 \cdot 2 + (32 + 16 \cdot 4) \cdot 3 + 18 \cdot (2 \cdot 1 + 16)) = 0,05 \cdot 0,98 \cdot 666 = 32,634$  g correspond à 1 l de solution

donc : 1 ppm de dose SA correspond à :  $1 \cdot 1 / 32,634 = 0,0306$  ml de solution SA/l de solution traitée.

Les résultats sont récapitulés sur le tableau suivant :

Poste	1	2	3	4	5	6
Volume de la solution du coagulant (SA : sulfate d'alumine) en ml/l	0	0,15	0,23	0,03	0,37	0,46

-dose optimale : il est clair que le taux de traitement optimal est de 10 ppm ; car à partir de cette dose ; l'augmentation du coagulant ne donne aucun changement ; ni sur MO, ni sur la turbidité.

**Exercice 5-2 :**

Calculer le rendement de la coagulation-floculation si la teneur en colloïdes de l'eau brute est de 5,33 ppm ; et la teneur en colloïdes de l'eau traitée est de 0,1 ppm ?

**Solution de l'exercice 5-2 :**

$C_0 = 5,33$  ppm ;  $C_f = 0,1$  ppm.

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 = \frac{5,33 - 0,1}{5,33} \cdot 100 = 98,1\%$$

### Références bibliographiques

- 1-[Raymond Desjardins, le traitement des eaux, édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997].
- 2-[Raymond Desjardins, Traitement des eaux, 2<sup>ème</sup> édition revue et enrichie, presses internationales polytechnique, Canada, 2007].
- 3-[Hubert Cabana, La coagulation, la floculation et l'agitation, 2015, at : <https://studylibfr.com/doc/5990858/coagulant>].
- 4-[Manon Lassaigne, Etude expérimentale du mélange solide-liquide : caractérisation des suspensions concentrées en milieu visqueux, Mémoire de Maîtrise en génie chimique de l'université de Montréal, 2015].
- 5-[Kamla Youcef, Simulation de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une cuve agitée: influence des chicanes sur la formation des vortex, Thèse de l'université Mohamed Boudiaf-Oran, 2017].
- 6-[BEKRENTCHIR Khalida, Contribution à l'étude de l'hydrodynamique dans un réacteur torique, Thèse de l'université Mohamed Boudiaf-Oran, 2016].
- 7-[Herrajani, R., & Tattersson, G. B. (2004). Mechanically Stirred Vessels. In E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, & S. M. Kresta (Eds.), Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice (pp. 345-390)].

# Sommaire

<b>Préface</b>	
<b>Chapitre 1 : Turbidité et colloïdes</b>	
1-Turbidité	1
2-Types de colloïdes	1
3-Problématique liée aux colloïdes	2
4-Mesure de la turbidité	2
5-Domains d'applications du traitement physico-chimique	3
Exercice 1-1	4
Solution de l'exercice 1-1	4
Exercice 1-2	5
Solution de l'exercice 1-2	5
<b>Chapitre 2 : Coagulation</b>	
1-Définitions	7
2-Structure des colloïdes (théorie de la double couche)	7
3-Mécanismes de la coagulation	9
3-1-Compression de la double couche	9
3-2-Adsorption et neutralisation des charges	10
3-3-Emprisonnement des particules dans un précipité	10
3-4-Adsorption et pontage	11
4-Critères de choix d'un coagulant	11
5-Réduction de l'alcalinité lors de la coagulation par les coagulants courants	13
6-Facteurs influençant la coagulation	13
7-Coagulation de la couleur	14
8-Problèmes du coagulant le plus utilisé (sulfate d'aluminium)	14
Exercice 2-1	16
Solution de l'exercice 2-1	16
Exercice 2-2	17
Solution de l'exercice 2-2	17
<b>Chapitre 3 : Flocculation</b>	
1-Définitions	19
2-Mécanisme de la flocculation	19
3-Théorie de la flocculation (modélisation du taux de flocculation)	19

3-1-Modes de floculation	20
3-2-Floculation péri-cinétique $F_p$	21
3-3-Floculation ortho-cinétique $F_o$	22
3-4-Nombre de particules dans une solution colloïdale	24
3-5-Modèle de Smoluchowski modifiée (ou d'Argaman-Kaufmann)	24
3-6-Calcul du volume du réacteur (bassin de floculation) et du temps de séjour	24
3-7-Nombre de collisions (de chocs)	25
3-8-Comparaison des floculations péri-cinétiques et ortho-cinétiques	25
3-9-Rendement de la coagulation floculation	26
4-Types de floculation	26
4-1-Floculation à écoulement horizontal	26
4-2-Floculateur à voile de boues	27
5-Floculants célèbres	28
6-Adjuvants de floculation	28
Exercice 3-1	30
Solution de l'exercice 3-1	30
Exercice 3-2	30
Solution de l'exercice 3-2	31
<b>Chapitre 4 : Agitation mécanique</b>	
1-Définition	32
2-Rôle de l'agitation	32
3-Types d'agitateurs	32
4-Types d'agitations	34
5-Puissance d'agitation	35
5-1-Cas d'un agitateur de type turbine	35
5-2-Cas d'un agitateur de type hélice	36
Exercice 4-1	39
Solution de l'exercice 4-1	39
Exercice 4-2	39
Solution de l'exercice 4-2	40
<b>Chapitre 5 : Mise en œuvre du traitement physico-chimique</b>	
1-Essais du Jar-Test	41
1-1-Pratique du jar-test pour déterminer le pH optimal	42
1-2-Pratique du jar-test pour déterminer la dose du coagulant	42

2-Conception d'un système de coagulation-floculation	42
2-1-Conception du sous système de coagulation	43
2-1-1-Critères de choix de la géométrie du bassin	43
2-1-2-Critères de choix de l'agitateur	43
2-1-3-Critères de choix des conditions opératoires	43
2-2-Conception du sous système de floculation	44
2-2-1-Critères de choix de la géométrie du bassin	44
2-2-2-Critères de choix de l'agitateur	44
2-2-2-1-Cas de la floculation conventionnelle	44
2-2-2-2-Cas de la floculation à haute énergie	45
2-2-3-Critères de choix des conditions opératoires	45
3-Avantages et inconvénients de la coagulation-floculation	46
3-1-Avantages de la coagulation-floculation	46
3-2-Inconvénients de la coagulation-floculation	46
Exercice 5-1	48
Solution de l'exercice 5-1	48
Exercice 5-2	49
Solution de l'exercice 5-2	49
<b>Références bibliographiques</b>	<b>50</b>