

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN - MOHAMED BOUDIAF
FACULTÉ DE CHIMIE
Département de Génie Chimique

Module : Production d'eaux potables
M1-GPE

Production d'eau potable

Coagulation –Floculation

BENHAMOU Abdellah
DJEDIAI.H

Lorsque la décantation naturelle des matières en suspension dans l'eau est trop lente pour obtenir une décantation efficace, on utilise les processus de coagulation et de floculation. Le but de ces techniques complémentaires est de faciliter l'élimination des matières non dissoutes (suspensions, colloïdes). L'élimination de ces particules se fera au cours d'une étape ultérieure (filtration, décantation, flottation,...). Une partie importante de ces solides non décantables peut être colloïdale. La surface des particules est chargée négativement, ce qui leur permet de se repousser les unes les autres et les empêche de former des masses plus larges, appelées des floccs. Elles ne peuvent donc pas décanter.

Solutions colloïdales

Généralités

Les systèmes colloïdaux sont définis comme étant des dispersions dont les particules possèdent des dimensions moyennes comprises entre 0,001 et 1 μ m et des vitesses de sédimentation si faibles que leur chute est rendue impossible par l'agitation thermique du milieu.

Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles, ...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les microorganismes tel que les virus. Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.

COMPOSES A ELIMINER

1. Les colloïdes.
2. Les métaux toxiques.
3. Une partie des micropolluants minéraux autres que les métaux toxiques.
4. La majeure partie des micropolluants organiques.
5. Une grande partie des micro-organismes.

Les colloïdes:

Ce sont des particules chargées négativement (argiles, acides humiques). Les solutions colloïdales sont très stables. Pour neutraliser ces colloïdes, il faut ajouter à l'eau des colloïdes chargés positivement. Ensuite, ces colloïdes peuvent se rencontrer, grossir et précipiter. Pour cela, on pourra utiliser des réactifs chimiques ou des bactéries de l'eau fixées sur support qui émettent des polysaccharides qui sont des colloïdes positifs.

IMPORTANTANCE DES COLLOIDES:

- ❖ Adsorbent les micropolluants organiques et minéraux
- ❖ Adsorbent les micro-organismes
- ❖ Protègent les micro-organismes vis-à-vis des bactéricides utilisés pour la désinfection des eaux
- ❖ Ont un pouvoir réducteur vis-à-vis des oxydants utilisés pour la désinfection des eaux.

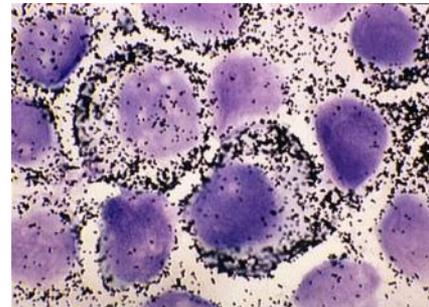
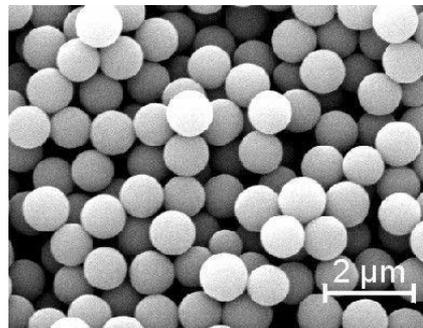
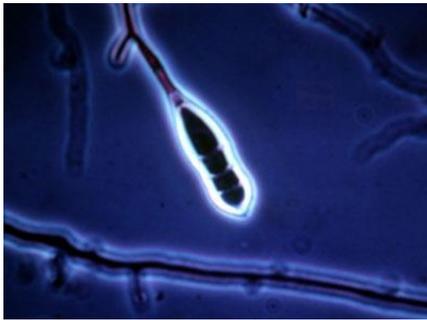
Colloïdes (particules de 0,001 à 1 μm de diamètre)

Particules trop petites pour sédimenter dans un temps raisonnable
Surface chargée négativement; répulsion, prévention de collisions

Origines variées :

- substances minérales / végétales
- virus
- biopolymères
- bactéries

Diamètre du colloïde (μm)	Temps de décantation pour 1 m d'eau à 20°C (années)
0.1	2
0.01	20
0.001	200



Caractérisation des colloïdes

Les colloïdes sont classés en deux catégories en fonction de leur affinité vis-à-vis de l'eau. Ils distinguent les colloïdes hydrophiles et les colloïdes hydrophobes.

Les colloïdes hydrophiles ont, comme leur nom l'indique, une grande affinité pour l'eau et adsorbent donc une couche d'eau protectrice qui se fixe à la matière solide par des liaisons physico-chimiques avec des groupements OH^- , NH_2^- , -COOH^- , totalement ou partiellement ionisés. Dans cette catégorie on trouve les protéines, les carbohydrates et les produits organiques généralement présents dans les eaux.

Les colloïdes hydrophobes qui n'ont aucune affinité pour l'eau, n'ont pas de couche protectrice. Leur stabilité est due à la charge électrique développée par les particules qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant toutes agrégations. Ils proviennent des substances peu ou pas solubles tels que les produits minéraux et en particulier les métaux, leurs oxydes et leurs hydroxydes dont la stabilité dépend de l'interaction entre deux particules mettant en jeu deux forces contraires. Une force de répulsion qui dépend de la charge électrique entre deux particules de même signe et une force d'attraction (type de Van Der Waals) qui tend à rassembler les particules afin d'atteindre une énergie potentielle minimale, fonction de la distance interarticulaire.

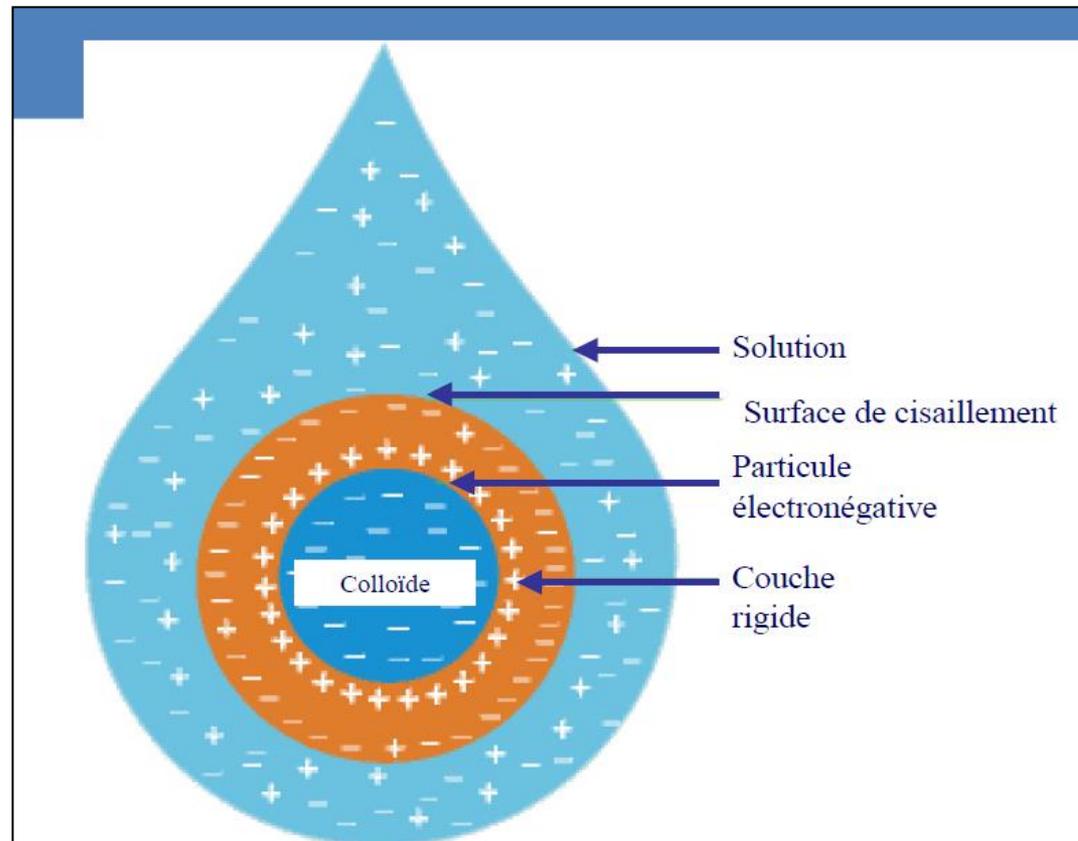
Pour déstabiliser les colloïdes et entraîner ainsi leur agglomération en floes, on peut augmenter la force ionique du milieu par l'introduction d'un électrolyte. Ceci a pour effet de diminuer l'épaisseur de la double couche électrochimique en abaissant la barrière du potentiel existant autour du colloïde et faciliter cette agglomération. On peut aussi augmenter l'énergie cinétique des particules.

Comportement hydrophile / hydrophobe

- ❑ Forment une dispersion stable
- ❑ Capacité des particules à rester en solution sous forme d'entités distinctes

Cette stabilité est due à :

1. la présence de charges à la surface de la particule
2. hydratation de la surface par des molécules d'eau



Coagulation – Flocculation

La coagulation-flocculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tout ou partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires inertes ou vivantes, les fractions flocculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales.

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10 mm et une surface spécifique de $6.10^2 \text{m}^2.\text{m}^{-3}$ à 20 ans pour du colloïde de $10^{-2} \mu\text{m}$ ayant une surface spécifique de $6.10^8 \text{m}^2.\text{m}^{-3}$. Il est donc impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement. Pour obtenir la décantation de ces particules, il faudrait assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100 μm .

Malheureusement, ces particules exercent entre elles des forces de répulsion de nature électrostatique empêchant leur assemblage. C'est ce phénomène qui rend certaines suspensions totalement stables.

Théorie de la double couche

Théorie de la double couche :

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent ce phénomène .

1- **théorie de Helmholtz** : une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche fixée) ;

2- **théorie de Gouy-Chapman** : la couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à une plus grande distance (couche diffuse) ;

3 - **théorie de Stern** qui combine les deux théories précédentes et considère la formation d'une double couche : la première formée d'ions du liquide mais adhérente au colloïde, la seconde diffuse dans le liquide environnant. Comme illustré sur la figure I.1 (courbe 3), le potentiel subit une première chute significative dans la couche fixée, puis diminue plus lentement à mesure que la distance augmente jusqu'à son annulation au point A (point isoélectrique).

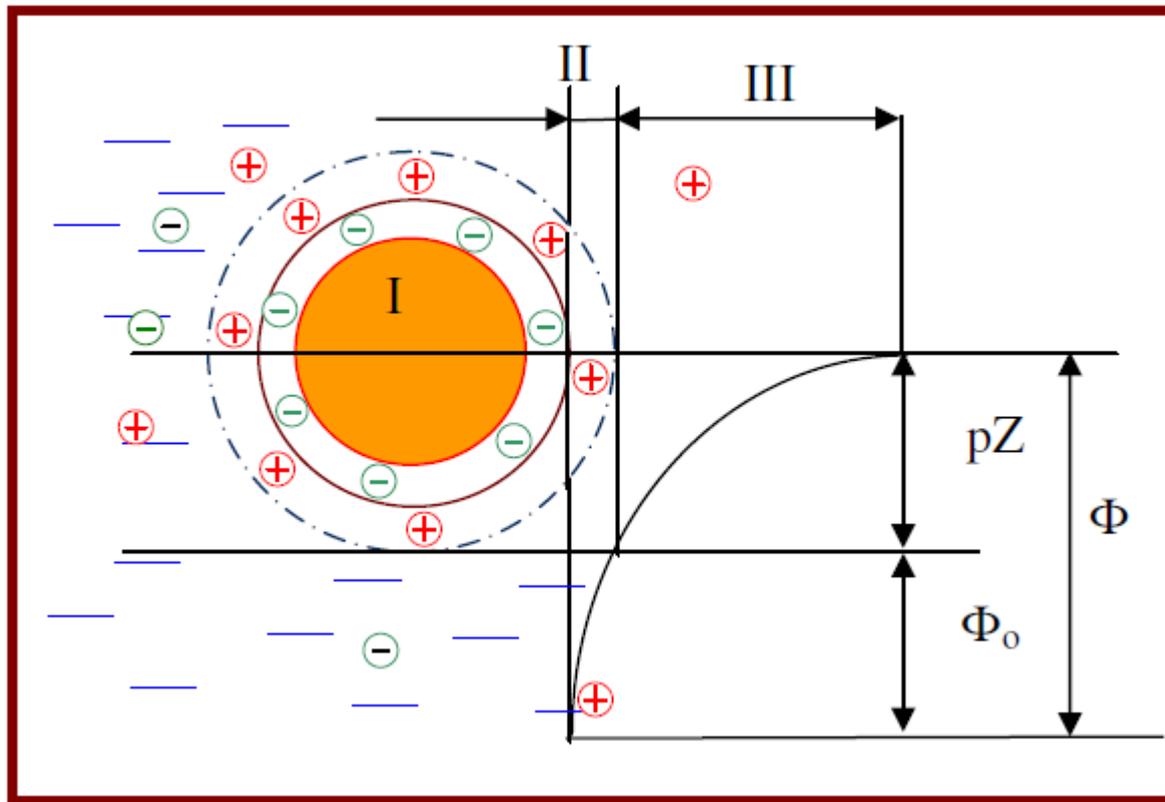


Figure 1 : Potentiel électrique de particules colloïdales

I - Particule colloïdale

II - Couche adhérente de Stern

III- Couche diffuse de Gouy-Chapman

Φ : Potentiel total à l'interface

Φ_0 : Potentiel différentiel dans la couche adsorbée

pZ : Potentiel zéta

Un colloïde se caractérise par deux potentiels:

- Potentiel thermodynamique ou potentiel de Nernst ;
- Potentiel zêta ou potentiel électrocinétique.

Le potentiel thermodynamique est présent à la surface même du colloïde mais est malheureusement non mesurable par des méthodes simples.

Le potentiel zêta reste négatif comme la charge générale des colloïdes. Il donne le niveau de l'interaction mutuelle des colloïdes et se mesure par électrophorèse.

$$\zeta = \frac{\kappa \cdot \mu}{\epsilon} \cdot m \cdot e$$

- κ : fonction du diamètre de la particule
- μ : Viscosité dynamique (Pa.s);
- ϵ : constante diélectrique du milieu;
- m : mobilité électrophorétique ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$)

Cette relation simple existe entre l'électrophorèse et le potentiel zêta permettant de déterminer ce dernier. Un appareil de mesure directe du potentiel existe et est appelé zétamètre.

Mécanismes de déstabilisation des suspensions colloïdales par la coagulation.

Les colloïdes sont, comme souligné précédemment, chargés négativement. Etant de même signe, deux particules colloïdales se repoussent. Elles sont soumises à deux types de force de direction opposée :

- Force d'attraction gravitationnelle de van der Waals F_A , liée à la surface spécifique et à la masse des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu.
- Force de répulsion électrostatique F_R , liée aux charges superficielles des colloïdes et donc à leur potentiel zêta (ζ).

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

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

L'énergie totale d'interaction (E) entre les particules colloïdales est la somme de l'énergie répulsive E_R due au potentiel électrique et l'énergie attractive E_A (figure 2). E et F sont des grandeurs proportionnelles.

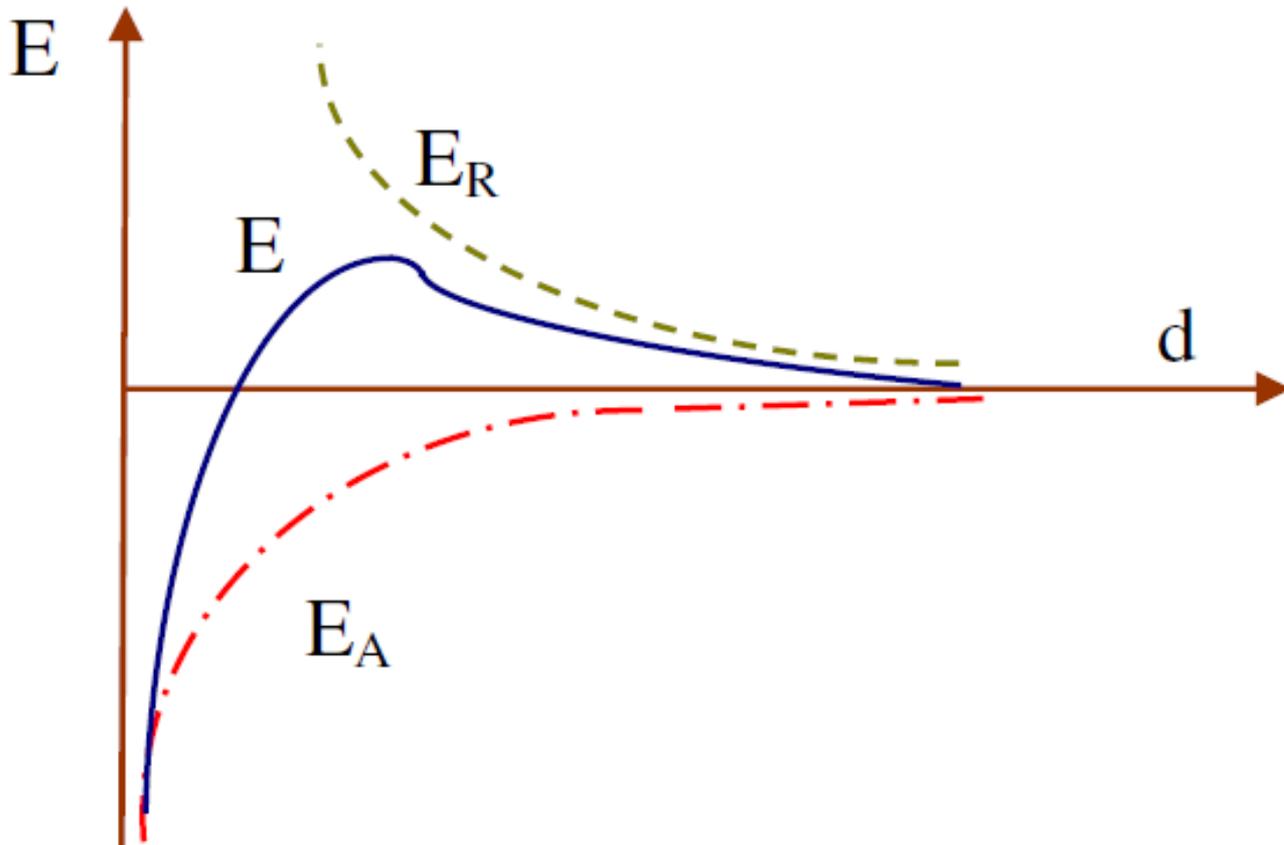


Figure 2 : Energie d'interaction entre deux particules lipophiles en fonction de la distance depuis la surface de la particule

Les étapes de l'agrégation

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le coagulant, qui apporte au milieu des cations multivalents, libres ou liés à une macromolécule organique. Ces cations sont attirés et adsorbés sur la couche de Stern. Le potentiel zêta s'annule ou avoisine le zéro avec la neutralisation de toutes les charges avoisinantes. Il faudra donc que le coagulant se disperse dans l'eau pour obtenir une répartition homogène avant toute précipitation d'hydroxyde. Cela demande une forte agitation en un temps court ou, en d'autres termes, utiliser un gradient de vitesse très élevé.

En régime turbulent, le gradient de vitesse est défini par la formule :

$$G = \left(\frac{P}{V\mu} \right)^{1/2} = \kappa \left(\frac{P}{V} \right)^{1/2}$$

G = Gradient de vitesse moyen (s^{-1})

P = Puissance mécanique dissipée (W)

V = Volume occupé par le fluide (m^3)

μ = Viscosité dynamique (Pa.s)

L'agrégation se fait à travers trois phénomènes successifs que sont l'hydrolyse (formation des radicaux hydroxydes métalliques), la coagulation et la floculation (figure 3).

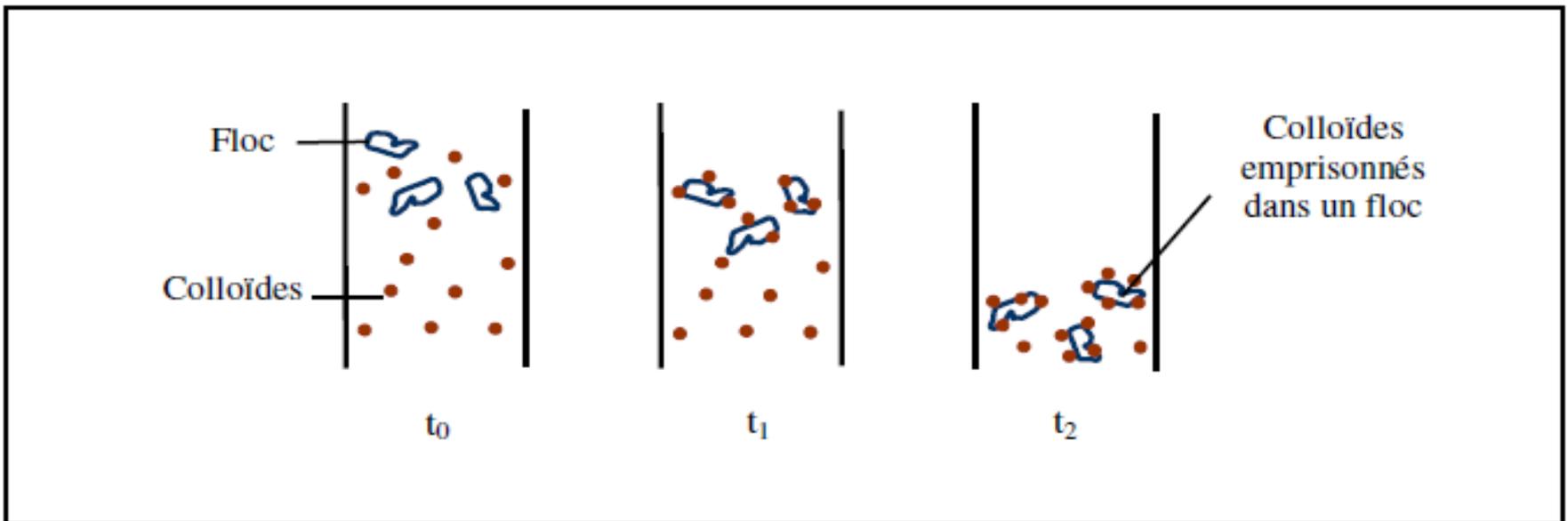


Figure 3 : Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation

Quand les particules préalablement déchargées s'agglomèrent en microflocs par partage, soit par les hydroxydes résultant de l'hydrolyse du coagulant minéral, soit par les macromolécules de polyélectrolytes cationiques, on parle de floculation. En effet les microflocs s'agrègent en flocons plus volumineux et décantent. Il arrive qu'un adjuvant de floculation soit ajouté.

L'agrégation successive des particules est régie par des phénomènes de transport de la floculation :

Il y a la floculation péricinétique liée à l'agitation brownienne, où toutes les particules ont la même énergie cinétique et donc les plus petites ont les vitesses les plus élevées, d'où une plus grande probabilité de rencontre. La vitesse de floculation au cours du temps est donnée par :

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha \left[\left(\frac{8KT}{3\mu} \right) n^2 \right]$$

n = Nombre de particules par unité de volume (1/m³)
 a = Fraction des chocs efficaces
 K= Constante de Boltzmann (SI)
 T= Température absolue (K)

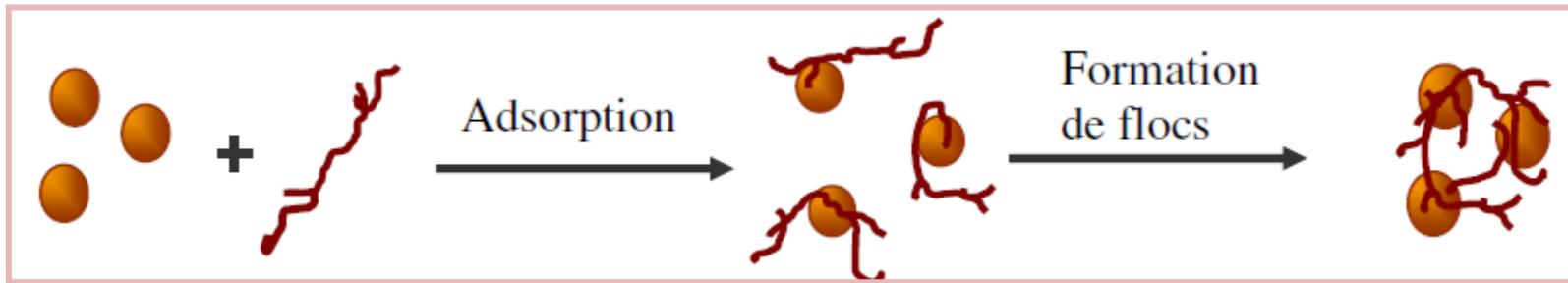


Figure 4 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères

On remarque l'influence très grande de la densité des particules définie comme le nombre de particules par unité de volume. Cette formule n'est valable qu'avec les particules dont la taille est inférieure à 10 µm.

La floculation orthocinétique est, quant à elle, liée à l'énergie mécanique dissipée dans la zone de floculation. Elle permet d'obtenir un floc volumineux facilement séparable. La loi la décrivant est fonction du régime d'écoulement.

$$\text{En régime laminaire, } \frac{dn}{dt} = \left(-\frac{1}{6}\right) \alpha n^2 d^3 G$$

$$\text{En régime turbulent, } \frac{dn}{dt} = -K n^2 d^3 G$$

Dans ce cas, c'est le gradient de vitesse qui est un paramètre très important. Le gradient de vitesse agit sur la probabilité de rencontre des microflocs mais il n'est pas possible de l'augmenter exagérément. Pour des valeurs élevées de G, les flocs subissent un cisaillement mécanique qui les détruit. En coagulation, on admet une valeur de G comprise entre 400 et 1000 s⁻¹ mais en floculation le gradient ne peut excéder 100 s⁻¹ et beaucoup moins quand les flocs sont de taille supérieure au millimètre. La coagulation se produit de façon rapide (quelques secondes) alors que la floculation requiert plus de temps (20 min et plus).

Selon la théorie de Schulze-Hardy, l'efficacité de la coagulation est proportionnelle à la valence du cation.

$$C = \kappa \cdot z^{-6}$$

où C représente la demande en réactifs et z la valence du contre ion utilisé. Le choix du réactif tient donc compte de sa valence. C'est ce qui justifie l'utilisation courante des sels de fer et d'aluminium qui sont trivalents.

Au cours du traitement par coagulation, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau telles que le pH, le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et la conductivité sont modifiées.

L'efficacité du traitement dépend du pH. Le pH optimal constitue un compromis entre le pH nécessaire à la coagulation des colloïdes (leur nature et leur point isoélectrique) et le pH nécessaire à la floculation (correspondant au minimum de solubilité du métal).

Par exemple, le pH optimal de coagulation-floculation est compris entre 6 et 7,4 pour l'aluminium et est supérieur à 5 pour le fer.

La quantité de coagulants à ajouter peut être optimisée par une étude du potentiel zêta, le traitement idéal correspondant à un pZ de zéro.

Pour rendre le traitement plus efficace, certains adjuvants contribuant à former des floccs résistants de plus grand diamètre sont utilisés.

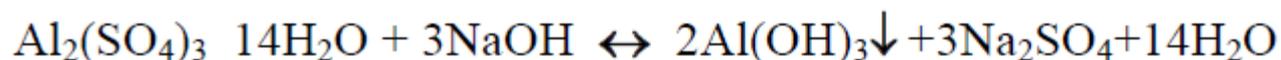
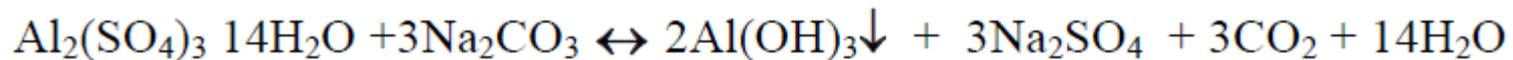
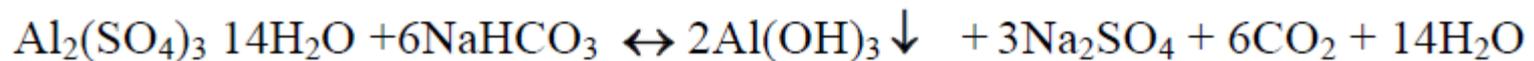
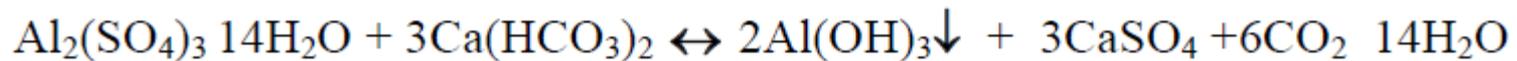
Coagulants utilisés

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulant les plus efficaces sont des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer. Ils sont cités dans le tableau ci - dessous

Dérivés des sels d'aluminium et de fer.

Sels d'aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formule chimique
Sulfate d'aluminium (alun)	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Chlorure ferrique	FeCl_3
Chlorure d'aluminium	AlCl_3	Sulfate ferrique	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Aluminate de sodium	NaAlO_2	Sulfate ferreux	FeSO_4

Les produits les plus utilisés sont l'alun et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation. Par exemple, lorsque l'alun est utilisé, plusieurs radicaux hydroxy-alumineux monomères ou polymères sont formés. Ces produits complexes ont une solubilité qui varie avec le pH. Dans le cas de l'alun. Les réactions suivantes décrivent comment est formé le précipité :



L'hydrolyse de l'alun se traduit par la formation d'espèces différentes susceptibles d'intervenir dans la coagulation. Ces espèces interviennent selon différents mécanismes tels que représentés dans l'organigramme. Ce schéma décrit les quatre différents mécanismes de la coagulation. En effet, l'hydrolyse de l'alun permet de former des radicaux hydroxy-alumineux (monomères) qui à leur tour forment le précipité $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou des espèces polycationiques. Les espèces polycationiques agissent sur les particules colloïdales par compression, neutralisation et adsorption ce qui permet la formation de floccs. La formation de précipités $\text{Al}(\text{OH})_3$, voie principale en coagulation, implique des doses élevées d'alun et favorise l'emprisonnement des particules dans un précipité. Parallèlement à la formation de radicaux hydroxy-alumineux, il y a complexation avec des ligands contenus dans l'eau s'ils sont en quantité suffisante. Le degré de complexation varie en fonction du pH. La complexation avec des ligands expliquerait, dans plusieurs cas, la présence d'aluminium résiduel dans l'eau décantée.

Les précipités à base de fer sont formés de la même façon. Ils forment la base des floccs qui emprisonnent les particules colloïdales. L'efficacité de ces coagulants avec ou sans aide-coagulant, selon le pH et la température de l'eau.

FLOCCULATION

Principe

La phase de floculation correspond à une lente agglomération des particules coagulées : autrement dit, c'est la phase de grossissement du floc. La floculation est la réaction qui permet le grossissement de ce floc afin qu'il devienne plus facilement séparable. Le floc qui se forme par l'agglomération de plusieurs colloïdes peut ne pas être suffisamment large pour décanter ou pour se déshydrater à la vitesse souhaitée. Cette floculation sera améliorée soit par des procédés purement hydrauliques, soit mécaniques soit accrue par l'adjonction de réactifs chimiques, les flocculants. En effet, un flocculant n'est en général efficace que lorsque la phase de coagulation est achevée. Pour choisir les flocculants, il faut considérer la taille, la cohésion et la vitesse de décantation du floc. Comme pour les coagulants, le taux de traitement à mettre en œuvre est donné par un essai de floculation.

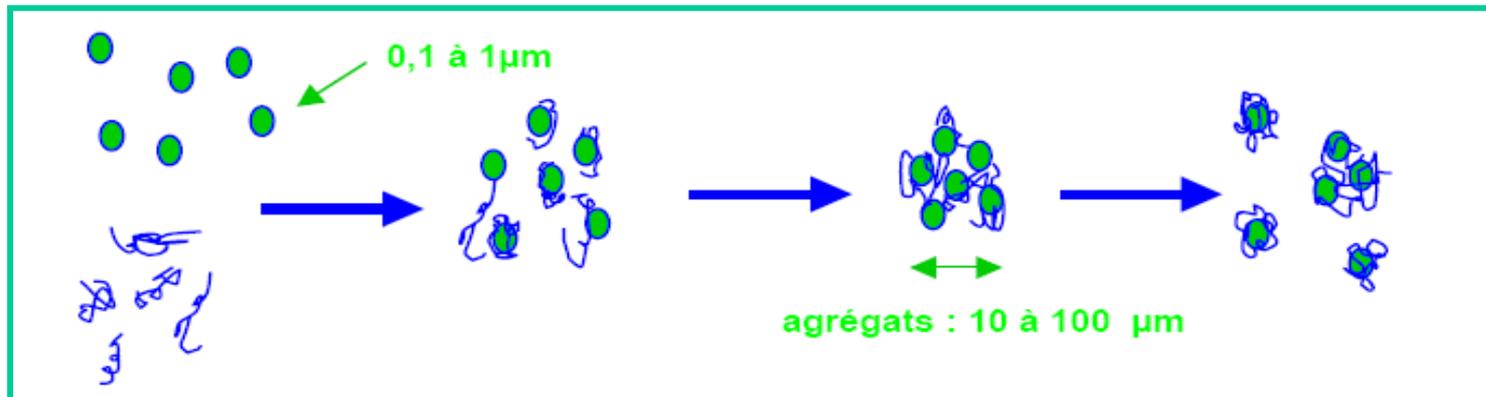
La floculation consiste en deux phénomènes de transport successifs :

- la floculation péricinétique: n'intervenant que sur les particules colloïdales, elle favorise la formation du microfloc. Elle est liée à la diffusion brownienne, c'est-à-dire à l'agitation thermique. Le mouvement brownien correspond au déplacement désordonné des colloïdes par le bombardement de chaque molécule d'eau,
- la floculation orthocinétique: elle permet d'obtenir le floc volumineux séparable. Elle est liée à l'énergie dissipée.

Elle est formé par adsorption des colloïdes neutralisés sur les particules d'hydroxyde métallique.

Floculant: polymère de haut poids moléculaire à structures linéaires et solubles dans l'eau. Les floculants existent sous forme solide, en billes ou en solution

Les particules vont se retrouver piéger dans les mailles du floculant pour ainsi créer des floccs



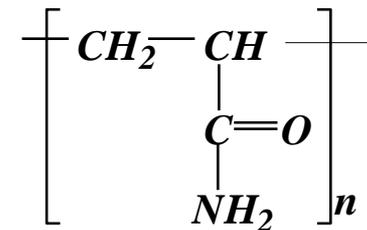
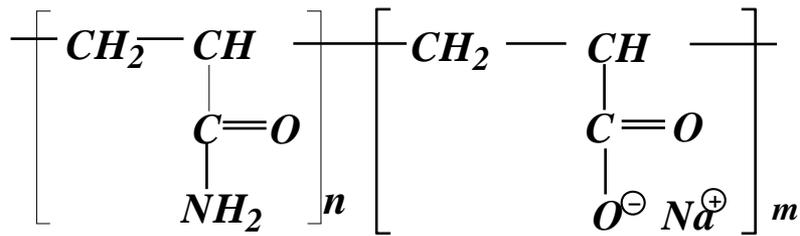
Les différents Flocculants Utilisés

☐ *Les flocculants minéraux :*

- La Silice activée
- Silico-aluminate
- Certaines argiles (bentonite, kaolin)
- Blanc de Meudon ou carbonate de calcium précipité
- Charbon actif en poudre
- Diatomées

☐ *Les flocculants organiques:*

- Les polymères organiques d'origine naturelle : Aqualgine, Sobalgine, Cellalgine, Carboxyméthyl-cellulose de sodium,
- Les polymères organiques de synthèse :
 1. Anioniques: Ce sont généralement des polymères de l'acrylamide et d'acrylate.
 2. Neutres ou non ioniques: ce sont essentiellement des polyacrylamides



Coagulation et floculation sont des processus souvent indissociables. En effet, la coagulation, en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise les collisions et la formation d'agrégats ; et la floculation, en permettant la croissance des agrégats accélère la séparation des phases. Ils éliminent près de 80% des matières en suspension.

Paramètres liés à la coagulation-floculation

Pour optimiser Le procédé de coagulation-floculation, il faut tenir compte de plusieurs variables en relation, comme le pH, la dose de coagulant, les conditions de mélange et la température.

a) L'influence du paramètre pH

Le pH a une influence primordiale sur la coagulation. Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau. Cette variation est à prendre en compte afin de ne pas sortir de la plage optimale de précipitation du coagulant. La plage du pH optimal est la plage à l'intérieur de laquelle la coagulation a lieu suffisamment rapidement. En effet, une coagulation réalisée à un pH non optimal peut entraîner une augmentation significative du temps de coagulation. En général, le temps de coagulation est compris entre 15 secondes et 3 minutes. Le pH a également une influence sur l'élimination des matières organiques.

b) L'influence de la dose de coagulant

La dose de réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base. Une dose de coagulant excessive entraîne une resalinisation des particules et augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante. La quantité de réactifs ne peut se déterminer facilement.

Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée soit par l'emploi de la mesure du potentiel zêta (nécessite un matériel très coûteux), soit par un test au laboratoire, connu sous le nom de "Jar-Test"

c) L'influence de la température

La température joue un rôle important. En effet, une température basse, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau, crée une série de difficultés dans le déroulement du processus : la coagulation et la décantation du floc sont ralenties et la plage du pH optimal diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons.

d) L'influence de la turbidité

La turbidité est, elle aussi, un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation. Dans une certaine plage de turbidité, l'augmentation de la concentration en particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant.

Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles. Dans le cas de fortes pluies, l'augmentation des *MES* favorise une meilleure décantation. Enfin, pour grossir et alourdir le floc, on ajoute un adjuvant de floculation.

e) L'influence des conditions de mélange

Les deux étapes de formation du floc consistent en une phase d'agitation rapide suivie d'une phase d'agitation lente permettant la maturation du floc. Néanmoins, il faut éviter que l'agitation soit trop intense car elle empêche l'agrégation, ni trop prolongée car elle entraîne la restabilisation des colloïdes.

La notion de gradient hydraulique : $G = (P/\mu V)^{1/2}$

G : gradient hydraulique (s^{-1}).

μ : viscosité dynamique du liquide ($kg\ m^{-1}\cdot s^{-1}$).

V : volume du liquide (m^3).

P : puissance dissipée dans le liquide (W).

Dans le cas où l'agitation est mécanique, la puissance est exprimée par la relation : $P = 1/2\ Ct\ A\ \rho\ Vr^3$

Ct : coefficient de traînée (il est égal à 1,8 pour des pales plates)

A : surface de la pale (m^2).

ρ : masse volumique du liquide (kg/ m^3).

Vr : vitesse relative de la pale par rapport à la vitesse du liquide qui l'entoure.

Soit $\approx 0,75 \times$ vitesse périphérique de la pale (Vp) ; $Vp = 2\pi\ d\ N/60$

Où "d" représente la distance de l'extrémité de la pale à l'axe de rotation.

Les valeurs généralement admises pour G sont :

-- En coagulation : jusqu'à 100 voire 500 s^{-1}

-- En floculation de l'ordre de 20 à 60 s^{-1}

L'expérience démontre que produit adimensionnel Gt_s (t_s est le temps de séjour de l'eau dans le flocculateur) doit se situer entre 10^{+4} et 10^{+5} pour une floculation bien réalisée (agitation lente).

Mécanismes de la coagulation floculation

On peut considérer qu'il existe quatre grands mécanismes qui agissent individuellement ou ensemble dans la coagulation floculation.

1. Réduction de l'épaisseur de la couche ionique : transportée par les particules, par augmentation de la force ionique de la Solution.
2. Neutralisation des charges ioniques : par ajout d'un réactif chimique contenant des contres ions du colloïde.
3. Pontage entre les particules : par utilisation des polymères de haut poids moléculaire.
4. Piégeage des particules : par formation de polymères d'hydroxydes minéraux volumineux

Réservoir pour la coagulation :

- Objectif: disperser les produits chimiques de façon égale
- Vitesse rapide
- Fort débit à l'entrée
- Temps de résidence hydraulique court

Basin de Flocculation:

- Objectif: formation de floccs
- Mélange uniforme et doux
- Vitesse adéquate requise pour avoir des collisions entre particules
- Temps de résidence hydraulique long
- Particules ne doivent pas descendre au fond (basin de sédimentation).

Efficacité de la coagulation-floculation dans le traitement des Eaux de Rejets

Résultats des analyses de l'eau de rejet

Paramètres de pollution	Résultats	Normes
Matières en suspension (mg/l)	varient de 1486 à 10960	35
Conductivité $\mu\text{s}/\text{cm}$	4433	1500
Demande chimique en oxygène (mg/l)	235	80
Demande biochimique en oxygène (mg/l)	62	35
Zinc (mg/l)	18	3

*Les résultats trouvés montrent que les valeurs du rapport DCO/
DBO₅ sont comprises entre 3 et 4,66 qui nous amène à prévoir
une épuration physico-chimique située à la norme car le rapport
DCO/DBO₅ est compris entre 3,2 et 5,2*

Analyse de l'eau de rejets après une décantation

Paramètres physiques	L'eau de rejet	L'eau après décantation
MES (mg/l)	12500	3500
Turbidité (NTU)	14000	3750

Les résultats obtenus montrent un abattement de la turbidité de 73 %. On conclue qu'un traitement simple par décantation a contribué à l'abaissement des matières en suspension et la turbidité mais reste insuffisant puisque la teneur de ces paramètres est supérieure à la norme donc un traitement chimique s'avère nécessaire.

Etude expérimentale de la coagulation-floculation

Introduction: L'étude expérimentale de la coagulation-floculation a pour but de déterminer le choix d'un réactif et les concentrations optimales nécessaire à une réduction maximale de la turbidité de l'eau de rejet après une simple décantation. Une étude comparative entre deux sels métalliques, à savoir le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique est présentée. Des adjuvants de floculation de diverses natures ont été associés aux sels métalliques afin d'améliorer le rendement de réduction de la turbidité des eaux de rejet. Afin de satisfaire cet objectif, on a choisi le jar-test comme technique expérimental. Le contrôle du degré de clarification de l'eau a été fait à l'aide d'un turbidimètre, afin de nous permettre le suivi du processus de clarification de l'eau

Choix du coagulant et du flocculant :

- 1. Choix des coagulants :*** Il est basée sur : -Large disponibilité. -Utilisation répandue dans le domaine de traitement des eaux. -Coût des réactifs. - Bonne efficacité de coagulation.
- 2. -Choix des flocculants :*** En règle générale la clarification des eaux résiduaires industrielles est meilleur par les flocculants anioniques, les quels sont influencés en terme d'efficacité par de nombreuses caractéristiques tel que, le pH, la conductivité électrique, la concentration et la granulométrie des particules solides en suspension.

Les différents paramètres étudiés sont:

- Le pH de l'eau à épurer
- La dose de coagulant
- La vitesse d'agitation lors de la coagulation
- La durée de coagulation
- La dose du flocculant
- La vitesse d'agitation lors de la floculation
- La durée de floculation

La détermination de ces paramètres nous a permis de maximiser le degré de clarification des eaux résiduaires après une étape de décantation

Dispositif expérimental et préparation des échantillons :

Jar-test : Les essais au laboratoire à l'aide d'un Jar-test restent jusqu'à ce jour la méthode la plus couramment utilisée pour le choix des réactifs et de leurs concentrations.

Le Jar-test que nous avons utilisé, comporte 6 agitateurs dont la vitesse de rotation peut varier entre 15 et 200 tr/min. Les pales sont de type à hélices (75mm × 20mm) (figure 2) et le volume des béchers est de 1 litre.



Réactifs utilisés :

Les sels métalliques utilisés lors des essais en Jar-test sont le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3, 18\text{H}_2\text{O}$) et le chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$). Les solutions de sels métalliques sont préparées journalièrement à une concentration de 10 g/l. Taux de traitement (mg/l) = la concentration de la solution mère (10 g/l) \times le volume prélevé de la solution mère Les adjuvants de floculation utilisés sont :

- Alcools polyvinyliques : Polymère non ionique
- Polyélectrolyte cationique
- Polyélectrolyte anionique

Les adjuvants de floculation sont préparés journalièrement à des concentrations de 1g/l. Taux de traitement (mg/l) = la concentration de la solution mère (1 g/l) \times le volume prélevé de la solution mère.

Autre réactifs :

La soude et l'acide chlorhydrique utilisés pour ajuster le pH. Les solutions de ces réactifs sont préparées dans l'eau distillée.

Protocole expérimental :

Après avoir rempli chacun des 6 béchers d'un litre d'eau à traiter, les échantillons sont mélangés à grande vitesse 180 tr/min, en fixant au départ le pH en ajoutant une base (soude à 0,1 N) ou un acide (acide chlorhydrique à 0,1 N), puis on verse le coagulant. La vitesse d'agitation de mélange est maintenue pendant 1min. Cette étape est suivie d'une agitation lente effectuée à 40 tr/min pendant 20 minutes. On laisse reposer pendant 20 minutes, puis on prélève 50 ml du surnageant à l'aide d'une pipette placée à une profondeur constante dans chaque bécher. L'addition des polyélectrolytes se fait juste après la phase d'agitation rapide. Les mesures de turbidité et du pH se font après chaque prélèvement.

Détermination de la concentration optimale de coagulant :

1-Sulfate d'aluminium : Une première série d'essais est effectuée pour approcher la concentration optimale de sulfate d'aluminium

Réduction de la turbidité pour différentes concentrations de sulfate d'aluminium.

C (mg/l)	100	150	200	250	300	350
Turbidité (NTU)	160	68,9	37,8	15,15	9,25	12,3
% de Réduction	95,73	98,16	98,99	99,59	99,75	99,67
MES (mg/L)	164	45	22	10	7	9
pH	7,9	7,8	7,6	7,3	7,2	6,9

2-Chlorure ferrique :

Une deuxième série d'essais est effectuée pour approcher la concentration optimale de chlorure ferrique.

Réduction de la turbidité pour différentes concentrations de chlorure ferrique.

C (mg/l)	100	150	200	250	300	350
Turbidité (NTU)	190	79,50	37,5	14,1	9,02	12
% de Réduction	94,93	97,88	99,00	99,62	99,75	99,68
MES (mg/L)	176	70	21	10	7	10
pH	8,0	7,6	7,5	7,3	7,1	7,0

Pour une concentration de 300 mg/l des deux sels, le pourcentage de réduction de la turbidité est de 99,75%, tous les deux ont donné de bons résultats donc on ne peut pas faire une sélection. D'après l'expérience on remarque que les floccs formés ne sont pas rigide, donc un ajout d'un flocculant s'avère nécessaire. Une troisième série d'essais est effectuée pour approcher la concentration optimale de flocculant anionique avec une concentration en coagulant (alun) de 300 mg/l.

Réduction de la turbidité pour différentes concentrations de polyélectrolyte anionique

C (mg/l)	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5
Turbidité (NTU)	22	12,27	10,01	8,62	7,58	9,85
% de Réduction	99,41	99,67	99,73	99,77	99,79	99,73
MES	25	12	8	7	5	6

La concentration optimale est déterminée à partir du tableau du pourcentage de réduction en fonction de la concentration de flocculant, d'après le tableau cette concentration est de 2 mg/l qui correspond à un pourcentage de réduction de 99,79%. A partir des concentrations optimales déterminées précédemment, une série d'essais avec différents flocculants ont été réalisés.

Pour le choix final on s'est basé sur les résultats des autres paramètres physico-chimiques qui sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres	Eau après décantation	Après ajout de	
		$Al_2(SO_4)_3$	$FeCl_3$
T (°C)	29,61	29,6	29,8
Conductivité ($\mu s/cm$)	4270	4580	4650
Turbidité (NTU)	3750	4,44	4,02
% de Réduction de la turbidité	/	99,88	99,88
MES (mg/L)	3500	3	2
Salinité (%)	2,2	2,4	2,4
TDS (mg/L)	1872,80	2008,77	2039,47
TA (°F)	00	00	00
TAC (°F)	79,5	31	34,5
TH (°F)	30	19,2	22,75
Turbidité (NTU)	3750	4,44	4,02

On constate que :

- La conductivité augmente à cause des ions sulfates ou chlorures suivant les sels utilisés pour la coagulation,
- Le pH baisse par suite de l'hydrolyse de l'aluminium (ou de fer), le titre alcalimétrique TAC et la dureté TH diminuent également, des meilleurs résultats sont obtenus pour le sulfate d'aluminium

-Il faut signaler que les sels de fer sont généralement plus coûteux que le sulfate d'aluminium, ce qui explique leur emploi plus restreint. Sur la base de ces constatations le mélange « sulfate d'aluminium + PA », a été retenu. Pour la mise en point d'une clarification efficace de l'eau de rejet on doit optimiser certains paramètres qui rentrent en jeu lors de processus de coagulation-floculation.

Recherche des paramètres de clarification des eaux résiduaires traitées par coagulation-floculation :

Les paramètres de clarification des eaux résiduaires après l'étape de décantation à l'échelle laboratoire sont présentés ci-dessous :

- La dose optimale du coagulant sulfate d'aluminium,
- La dose optimal du flocculant anionique,
- La vitesse d'agitation durant la coagulation,
- La durée de coagulation,
- La vitesse d'agitation durant la floculation,
- La durée de floculation.

La dose du coagulant $Al_2(SO_4)_3$:

Les paramètres de clarification tel que le pH, le temps de coagulation et le temps de floculation, ainsi que la vitesse d'agitation durant la coagulation et la vitesse d'agitation durant la floculation ont été maintenus constants dans le jar-test. Pour une concentration constante de 2 mg/l de floculant anionique, on a étudié l'évolution du degré de clarification (turbidité) en fonction de la dose du coagulant.

Réduction de la turbidité pour différentes concentrations de sulfate d'aluminium.

C (mg/l)	50	100	150	200	250	300
Turbidité (NTU)	29	11,4	5,23	4,31	4,65	5,96
% de Réduction	99,22	99,69	99,86	99,88	99,87	99,84
MES (mg/L)	20	10	5	4	5	6

D'après les résultats obtenus, une dose de floculant de 1,5 mg/l permet d'obtenir une bonne clarification correspond à un rendement de 99,90%, ils agissent par adsorption et pontage entre les particules colloïdales. Un excès de floculant isole la surface des micelles qui aurait pu constituer des ponts de liaisons ce qui inhibe la floculation. On conclue que :

- ❖ Une dose inférieure à 0,1 mg/l s'avère trop faible pour une bonne clarification.
- ❖ Une dose allant de 1 à 2 mg/l assure une clarification fiable.
- ❖ Une dose supérieure à 2 mg/l ne fait qu'inhiber la floculation pour des raisons citées ci-dessus.

Vitesse et durée d'agitation durant la coagulation :

Réduction de la turbidité pour différentes vitesses durant la coagulation

Vitesse d'agitation (trs/min)	100	120	140	160	180	200
Turbidité (NTU)	8,33	8,27	7,90	7,57	4,32	6,68
% de Réduction	99,77	99,77	99,78	99,79	99,88	99,82
MES (mg/L)	10	10	9	7	5	7

Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation durant la coagulation

Temps (s)	30	45	60	75	90	120
Turbidité (NTU)	5,17	4,92	3,59	4,08	4,34	4,82
% de Réduction	99,86	99,86	99,90	99,89	99,88	99,87
MES (mg/L)	4	3	1	2	3	3

Le processus de coagulation est très rapide, et il nécessite un temps très court pour la déstabilisation des colloïdes, en maintenant une agitation intense de 180 tr/min et un temps de coagulation de 60 secondes un degré de clarification de 99,90% a été obtenu.

Vitesse et durée d'agitation durant la coagulation :

Réduction de la turbidité pour différentes vitesses d'agitation durant la floculation.

Vitesse (trs/min)	20	30	40	50	60	70
Turbidité (NTU)	13	5,71	4,77	3,82	5,25	5,82
% de réduction	99,65	99,84	99,87	99,89	99,86	99,84
MES (mg/L)	7	6	5	3	4	6

Réduction de la turbidité pour différents temps d'agitation durant la floculation

Temps (min)	15	20	25	30	35	40
Turbidité (NTU)	5,17	4,92	3,59	4,08	4,34	4,82
% de réduction	99,86	99,86	99,90	99,89	99,88	99,87
MES (mg/L)	4	3	1	2	3	3

Le processus de floculation est très lent, et il nécessite un temps très long pour l'agglomération des floccs, en maintenant une agitation faible de 50 tr/min et un temps de coagulation de 25 minutes, un degré de clarification de 99,90 % a été obtenu.

Le but recherché de cette étape est l'agglomération des colloïdes déjà déstabilisés par le coagulant $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. L'agglomération des colloïdes en flocons de taille et de rigidité suffisante est une action nécessaire pour faciliter toute séparation solide-liquide, soit qu'il s'agit de décantation ou de filtration. Cette agglomération des colloïdes déstabilisés exige deux fonctions principales :

Une interaction intense entre les particules déchargées en vue d'augmenter la probabilité de rencontre et des collisions, ce qui permettra la formation des flocons.

- ❑ Eviter la destruction des flocons formés par voie mécanique et on sait que le nombre de collisions entre particules est proportionnel au gradient de vitesse, mais les forces de cisaillement le sont aussi.
- ❑ Ainsi la recherche d'un gradient de vitesse optimum est très important lors de la floculation ce qui explique que la durée et la vitesse d'agitation lors de cette étape pour assurer non seulement la formation des flocons mais aussi leur murissement. Pour une meilleure réduction de la turbidité, la vitesse optimale durant la floculation a été maintenue à 50 trs/min et cela durant un temps de 25 min

Les paramètres de clarification des eaux de rejet traitée par le traitement chimique.

La dose du coagulant $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	200 mg/l.
La dose du flocculant anionique	1,5 mg/l
La vitesse d'agitation durant la coagulation	180 tours/min
Le temps de coagulation	75 secondes
La vitesse d'agitation durant la floculation	50 tours/min
Le temps de floculation	25 minutes
Le pH de l'eau après correction	6,6

Les résultats du traitement chimique

Paramètres	Eau de rejet	Après décantation	Après coagulation-floculation	Nomes
T (°C)	30,6	30	29,5	-
pH	8,7	-	6,4	5-8
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	5030	4840	4910	1500
Turbidité (NTU)	5632	3574	2,45	-
MES (mg/l)	4125	2485	8	30
RS (mg/l)	5200	4120	2150	1500

Pour une concentration de 200 mg/l en sulfate d'aluminium et de 1,5 mg/l en flocculant anionique, le pourcentage de réduction de la turbidité est de 99,90%.