



Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Elimination de la couleur et de la turbidité d'une eau de surface par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium : cas de la retenue d'eau de l'Okpara en République du Bénin

D. ZOGO¹, L. M. BAWA^{2*}, H.H. SOCLO³ et D. ATCHEKPE¹

¹ Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB)

² Laboratoire de Chimie de l'Eau, Faculté des Sciences, Université de Lomé, BP 1515, Lomé, Togo.

Tel : (228) 320 24 30, Fax : (228) 221 85 95 ; Email : bawamoktar@yahoo.fr

³ Unité de Recherche en Ecotoxicologie et Etude de Qualité (UREEQ, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

* Auteur correspondant, E-mail : bawamoktar@yahoo.fr

RESUME

Cette étude nous a permis de déterminer les meilleures conditions d'élimination de la turbidité et de la couleur de l'eau de la retenue de l'Okpara. Le traitement appliqué est la coagulation-floculation au moyen d'un jar test. Les essais ont été réalisés à pH de l'eau brute ou à pH 6,5. Les principaux résultats obtenus sont présentés comme suit : à pH de l'eau brute et pour des doses de coagulant comprises entre 10 et 60 mg l⁻¹, la couleur est mieux éliminée que la turbidité. Les rendements d'élimination sont de l'ordre de 15 à 80% pour la couleur et de 5 à 18% pour la turbidité ; à pH 6,5 les rendements d'élimination des deux paramètres pour les mêmes doses de coagulant sont très importants (82 à 88% pour la turbidité et 50 à 84% pour la couleur). Deux mécanismes sont envisageables. A pH libre, le mécanisme de neutralisation des charges est dominant et à pH 6,5, le mécanisme d'adsorption l'emporte.

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Eau de surface, clarification de l'eau, coagulant chimique, mécanisme de coagulation-floculation.

INTRODUCTION

La turbidité et la couleur sont les principaux paramètres d'appréciation visuelle de la qualité d'une eau. La turbidité est due aux particules organiques et inorganiques en suspension ou à l'état colloïdal dans l'eau; ces particules peuvent être douées de propriétés d'adsorbant ou d'échangeur d'ions. Ainsi, par adsorption ou par échanges d'ions, les particules en suspension peuvent contribuer à la contamination de l'eau en composés chimiques et en microorganismes. La couleur provient de la présence dans l'eau de

composés en solution ou en suspension. Dans les filières de traitement des eaux, ces paramètres doivent être systématiquement éliminés.

Il existe plusieurs procédés d'élimination de la couleur et de la turbidité d'une eau. On peut citer la filtration sur des matériaux poreux (filtration sur sable ou sur charbon actif en grains, filtration sur membrane), la coagulation-floculation simple ou couplée avec des procédés physicochimiques comme la microfiltration ou la nano filtration (Riera-Torres et al.,

2010 ; Pikkarainen et al., 2004) ou par oxydation chimique comme la chloration ou l'ozonation (Quinghua et al., 2008 ; Bosea et al., 2007 ; Purnendu and Reckhow, 2007) . La coagulation-floculation peut être réalisée aux moyens de sels de fer (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ou d'aluminium (Al^{3+}) sous forme de chlorure ou de sulfate avec ou sans adjuvants de floculation qui sont généralement des poly électrolytes organiques ou inorganiques. Tout récemment, on a évoqué l'utilisation des sels de zirconium (Zr^{4+}) comme pouvant être de bons coagulants (Matilainen et al., 2010).

De nouveaux types de coagulants ont été mis au point. Il s'agit des coagulants composites à base de fer ou d'aluminium et d'adjuvants organiques. Ces coagulants conjuguent les forces des coagulants et des adjuvants (Mingquan et al., 2008 ; Jincheng et al. 2009). Des substances naturelles comme les extraits aqueux des graines de *Moringa oleifera* (Bawa et al., 2008 ; Krishna, 2009) ou le chitosane, un polyoside (Rizzo et al., 2008) sont aussi utilisés. Ces derniers temps, le chlorure de magnésium est de plus en plus utilisé pour éliminer la couleur des effluents industriels (Bao-Yu et al, 2007 ; Boon et al., 2000). L'électrocoagulation est également utilisée dans le traitement des eaux résiduaires et des eaux de consommation (Matilainen et al., 2010 ; Malpass et al., 2008).

L'efficacité de la coagulation-floculation dépend des caractéristiques de l'eau à traiter, de la dose de coagulant et du pH ; plusieurs mécanismes peuvent intervenir dans le processus de traitement.

Dans les filières de traitement des eaux de consommation à partir d'une eau de surface, la coagulation-floculation est de très loin l'étape la plus importante de la clarification de l'eau. Dans cette étude, nous avons déterminé les conditions favorables à l'élimination de la couleur et de la turbidité par coagulation-floculation au moyen du sulfate d'aluminium d'une eau de retenue en milieu tropical.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

La retenue d'eau est construite à Parakou au nord-est du Bénin et à 450 km de Cotonou, sur un affluent du fleuve Mono appelé Okpara. Le sous-bassin versant de cette retenue est situé dans la partie orientale de la ville et déborde sur les communes de Tchaourou, Pèrèrè, Nikki, N'Dali puis sur une partie au sud-est de la commune de Bembérékè (Figure 1). Parakou est situé à 09°21 latitude nord et 02°36 longitude est. La retenue d'eau est la prise d'eau de la station de traitement d'eau de consommation de la ville de Parakou.

Méthodes d'analyse et d'essai

L'eau brute est prélevée en surface (0,20 m) ou à des profondeurs comprises entre 2,0 et 4,5 m dans des bidons en plastique de 25 litres. Les essais ont porté sur des échantillons fraîchement prélevés. La conductivité électrique, la turbidité et le pH de l'eau sont mesurés respectivement à l'aide du conductimètre LF 340-A/SET, du turbidimètre Hach 2100 Turbidimeter 21446 et du pH-mètre WTW pH 340/ion SET. La couleur est mesurée à 436 nm sur le spectrophotomètre DR 4000U modèle 48100. L'alcalinité est obtenue par titrage volumétrique.

Les essais de coagulation et floculation ont été réalisés selon le protocole de jar test à l'aide d'un mini-floculateur à six postes de marque Orchidis équipé de minuterie et de tachymètre. Les volumes d'eau dans les béchers sont fixés à 1 litre.

Les différentes phases de la coagulation-floculation sont les suivantes :

- une phase d'agitation rapide à 150 tours/mn pendant 3 min ;
- une phase d'agitation lente à 25 tours/min pendant 15 min ;
- une phase de décantation pendant au moins 30 min.

Les ajouts des réactifs comme le coagulant constitué de sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) et de la chaux éteinte pour

la correction au besoin du pH sont réalisés pendant la phase d'agitation rapide.

Analyse statistique

Les données ont été analysées à partir des valeurs du coefficient de variation (CV) obtenues à l'aide du logiciel Xlstat. Le coefficient de variation (en %) permet de montrer le degré d'homogénéité des mesures. Il est obtenu par l'expression ($CV = 100 \frac{\sigma}{\text{moy}}$). Dans cette expression, σ est l'écart type et moy, la moyenne arithmétique. On montre que (Ossey et al., 2008):

- si $CV < 2\%$, les mesures sont très homogènes ;
- si $2\% < CV < 30\%$, les mesures sont homogènes ;
- si $CV > 30\%$, les mesures sont hétérogènes.

RESULTATS

Des essais de coagulation-floculation ont été réalisés pour déterminer les meilleures conditions d'élimination de la turbidité et de la couleur de l'eau à pH libre (pH de l'eau brute) ou à pH 6,5.

L'eau à traiter est caractérisée par une faible salinité totale (40 à 80 mg.l^{-1}) et une faible alcalinité (30 à 50 $\text{mg.l}^{-1} \text{CaCO}_3$). Le pH varie de 6,7 à 5,6. Le Tableau 1 donne les valeurs extrêmes de la turbidité et de la couleur de l'eau. Ces résultats montrent une variation énorme de ces paramètres ($CV > 30\%$). Les saisons de l'année ont un effet remarquable sur les caractéristiques de l'eau. Les plus fortes valeurs de la turbidité et de la couleur sont obtenues dans les mois de juillet à septembre (temps de pluies).

Coagulation-floculation à pH libre

Des exemples de résultats obtenus pour des valeurs de turbidité initiale de 22 NTU et de 90 NTU sont indiqués sur la Figure 2 et la Figure 3. Ces résultats montrent une diminution régulière de la valeur de la couleur quand la dose de coagulant augmente (10 à 60 mg.l^{-1}). L'élimination de la turbidité diminue

également et se stabilise pour des doses de coagulant supérieures à 40 mg.l^{-1} .

Les rendements d'élimination de la turbidité sont beaucoup plus faibles que les rendements d'élimination de la couleur. Par exemple, pour une dose de coagulant de 40 mg.l^{-1} , et pour des valeurs initiales de turbidité et de couleur de 22 NTU et de 6 UCV respectivement, on a obtenu des rendements d'élimination de l'ordre de 76% pour la couleur et de 27% pour la turbidité (Figure 2). Pour la même dose de coagulant, la Figure 3 montre des rendements d'élimination de la turbidité légèrement plus importants (32%) quand la turbidité initiale est relativement plus forte (90 NTU). La couleur quant à elle est éliminée à 43%. La forte turbidité de l'eau a réduit l'efficacité du traitement sur l'élimination de la couleur.

On remarque donc que les rendements d'élimination dépendent des valeurs initiales de la turbidité et de la couleur.

Coagulation-floculation à pH 6,5

Les essais de jar tests ont été également réalisés à pH 6,5. Les résultats obtenus (Figures 4 et 5) montrent que les valeurs des deux paramètres (couleur et turbidité) diminuent régulièrement quand la dose de coagulant augmente. La plage de la dose optimale observée dans le cas des essais à pH libre est conservée (entre 30 et 40 mg.l^{-1}).

Les résultats montrent alors que le pH n'a pas modifié la zone de coagulation optimale. Les rendements d'élimination sont toutefois nettement plus importants à pH 6,5. La turbidité est éliminée à plus de 80%.

Le Tableau 2 montre les pourcentages d'élimination de la turbidité et de la couleur à pH libre et à pH 6,5 pour une dose de coagulant de 40 mg.l^{-1} . Les résultats montrent que les rendements d'élimination de la turbidité et de la couleur sont plus élevés à pH 6,5. La turbidité est mieux éliminée que la couleur. Dans la plage de 20 à 100 NTU les rendements d'élimination de la turbidité sont compris entre 82 et 88% contre 36 à 84% d'élimination de la couleur (plage de 5 à 50 UCV).

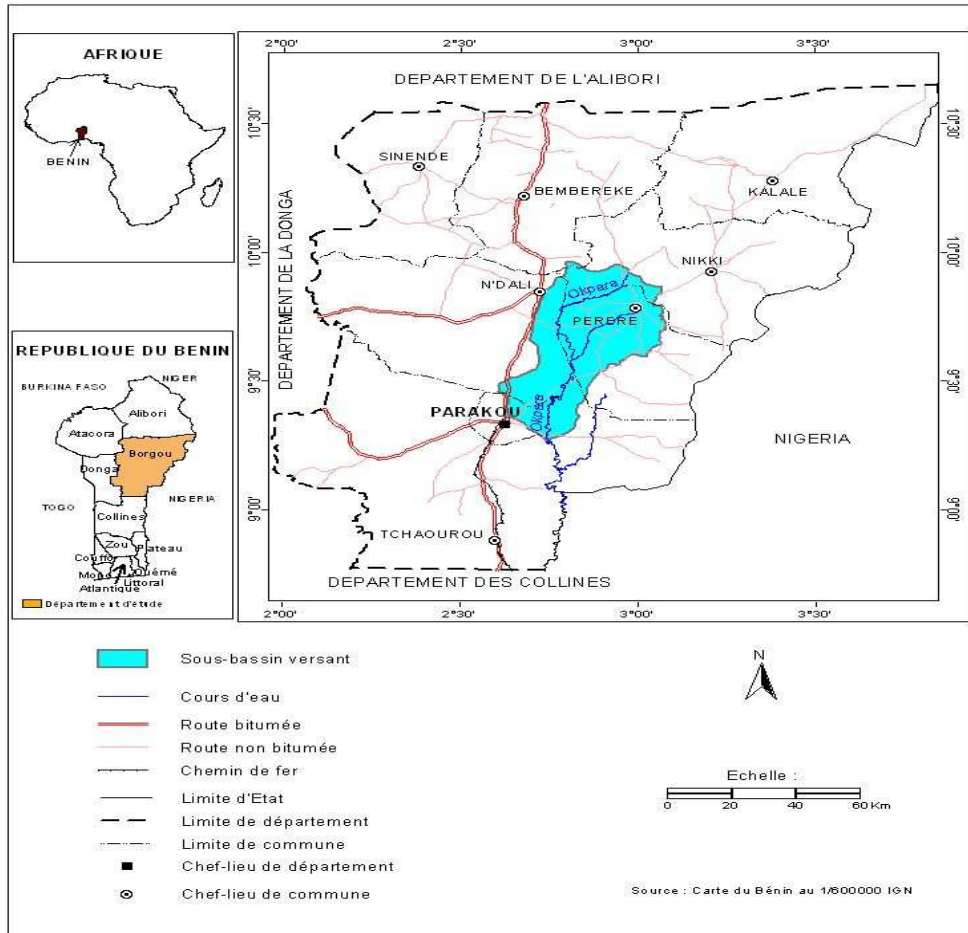


Figure 1 : Localisation de la ville de Parakou et du sous bassin de la retenue de l'Okpara.

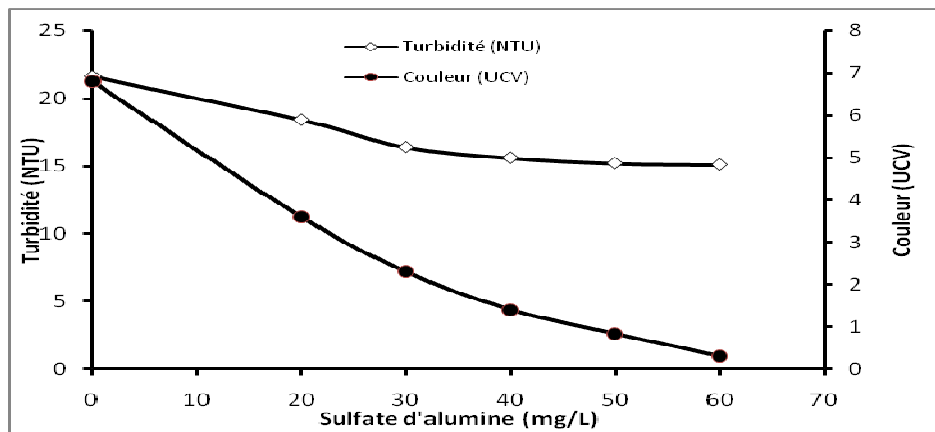


Figure 2 : Elimination de la turbidité et de la couleur à pH libre. $[Turbidité]_0 = 22$ NTU, $[Couleur]_0 = 6$ UCV.

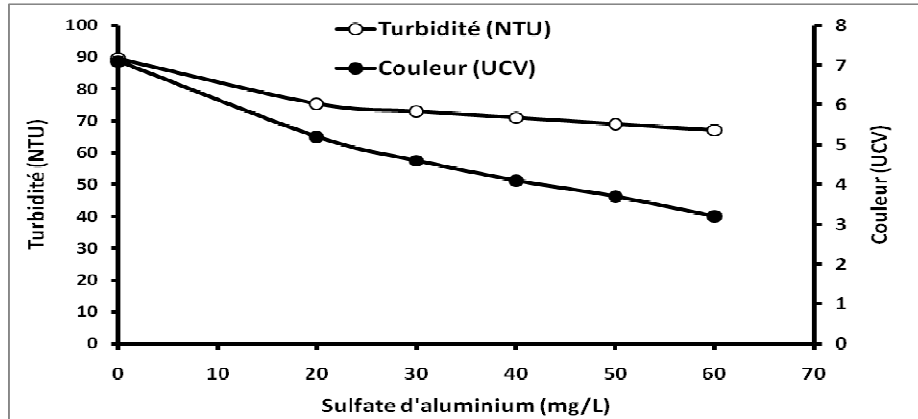


Figure 3 : Elimination de la turbidité et de la couleur à pH libre.
 $[\text{Turbidité}]_0 = 90 \text{ NTU}$, $[\text{Couleur}]_0 = 7 \text{ UCV}$.

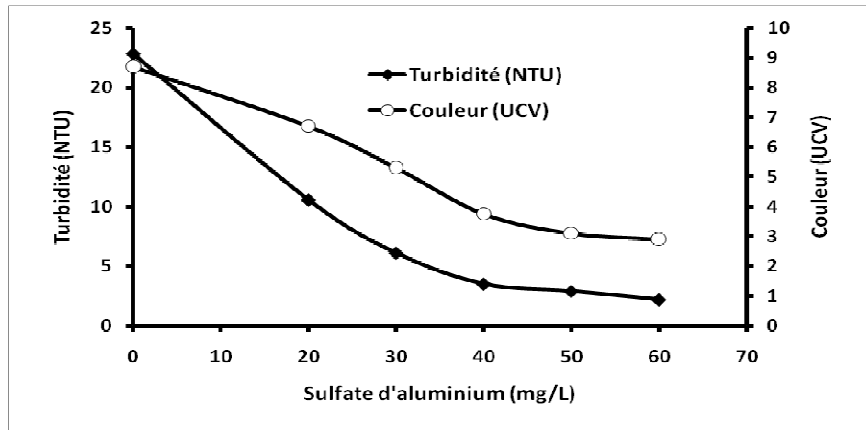


Figure 4 : Elimination de la turbidité et de la couleur à pH 6,5.
 $[\text{Turbidité}]_0 = 23 \text{ NTU}$, $[\text{Couleur}]_0 = 8.7 \text{ UCV}$.

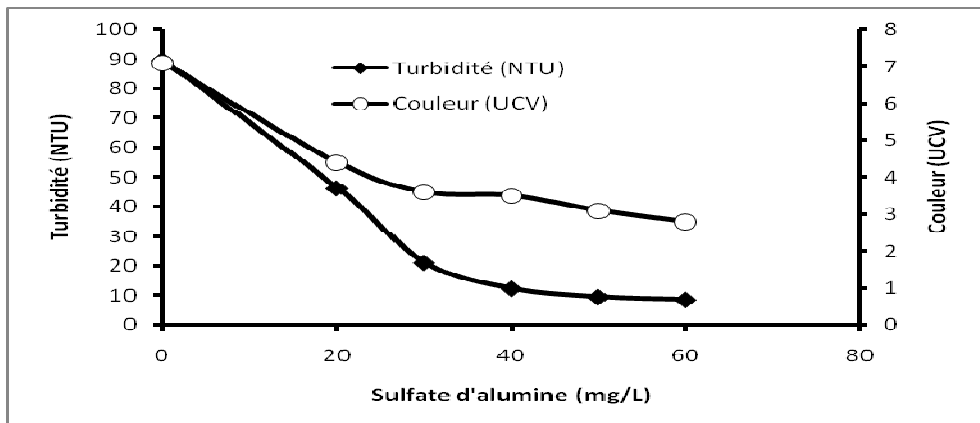


Figure 5 : Elimination de la turbidité et de la couleur à pH 6,5.
 $[\text{Turbidité}]_0 = 90 \text{ NTU}$, $[\text{Couleur}]_0 = 7.1 \text{ UCV}$.

Tableau 1 : Valeurs extrêmes de la turbidité et de la couleur de l'eau à la surface de la retenue (σ est l'écart type, CV est le coefficient de variation).

	Minimum	Maximum	Moyenne	σ	CV (%)
Turbidité	3,3 NTU	102,2 NTU	35,3	27,9	79
Couleur	5,0 UCV	32,5 UCV	11,7	7,9	68

Tableau 2 : Rendements d'élimination de la turbidité et de la couleur pour 40 mg.l⁻¹ de coagulant à pH libre et à pH 6,5.

Turbidité Initiale (NTU)	Couleur Initiale (UCV)	% d'élimination /Coagulation à pH libre		% d'élimination /Coagulation à pH 6,5	
		Turbidité	Couleur	Turbidité	Couleur
20 à 25	5 à 10	5 - 12	76 - 79	82 - 87	46 - 79
25 à 50	10 à 25	10 - 12	78 - 79	82 - 88	46 - 84
50 à 100	25 à 30	5 - 18	15 - 78	82 - 88	36 - 84

DISCUSSION

A pH libre de l'eau ou à pH 6,5, nous avons déterminé au moyen du jar test, la dose optimale de coagulant. L'influence du pH n'a pas été systématiquement étudiée car plusieurs études ont montré que la plage de pH favorable à la coagulation par le sulfate d'aluminium se situe entre pH = 5,5 et pH = 6,5, voire entre pH= 5,0 et pH= 7,0 (Gregor et al., 1997 ; Zhong et al., 2010 ; Mingquan et al., 2008; Jian-Jun et al., 2006). On précise tout de même que les pH optimum d'élimination de la turbidité et de la matière organique peuvent être légèrement différents (Mingquan et al., 2008). Gregor et al. (1997) ajoutent que la plage de pH entre 5,0 et 7,0 assure une élimination maximale de la matière organique mais une concentration importante en aluminium résiduelle peut accompagner l'eau traitée. Ils ont montré par ailleurs que la plage optimale est celle pouvant assurer à la fois une bonne élimination de la matière organique et du coagulant résiduel. La plage du pH entre 6,0 et 7,0 peut permettre d'obtenir ce compromis.

La turbidité de l'eau de la retenue a varié entre 20 et 100 NTU et la couleur entre 5 et 30 UCV. Les doses de coagulant appliquées ont varié entre 10 et 60 mg/L. Les rendements d'élimination à pH libre sont plus importants pour l'élimination de la couleur de l'eau (entre 15 et 80%) que pour l'élimination de la turbidité (5 à 20%). Cette différence peut s'expliquer par les types de particules et de composés responsables de la couleur et de la turbidité de l'eau et des modes de coagulation et de floculation engagés dans les processus d'élimination de ces paramètres. La turbidité résiduelle peut provenir en partie des agrégats (flocs) de très petites tailles et de faible décantabilité formés lors de la floculation des composés responsables de la couleur de l'eau. Ce phénomène a été observé par Yu et al., 2008 lors d'une étude d'élimination de la DCO (Demande Chimique en Oxygène), de la couleur et de la turbidité d'un effluent secondaire. Dans notre étude, nous avons observé que l'élimination de la turbidité tend à se stabiliser à partir de 30 à 40 mg/L de coagulant appliqué. Les doses supérieures,

pouvant atteindre 60 mg/L n'améliorent pas nettement l'élimination de la turbidité et ne provoquent non plus la restabilisation des floes. Christopher et al. (2009) ont également obtenu une élimination maximale de la turbidité et de la couleur des eaux de quatre retenues pour des doses de coagulant (sulfate d'aluminium) comprises entre 40 et 60 mg.l⁻¹ (pH entre 5,0 et 6,0). Gregor et al. (1997) ont obtenu une élimination maximale de la matière organique des eaux de rivières (mesure de l'absorbance UV à 254 nm) pour des doses de sulfate d'aluminium comprises entre 25 et 40 mg.l⁻¹ à pH compris entre 5,75 et 6,75.

A pH 6,5, bien que l'efficacité du traitement soit nettement améliorée (rendement entre 65 et 95% pour l'élimination de la turbidité et 60 et 85% pour la couleur), les tendances d'évolution de la turbidité et de la couleur résiduelles sont pratiquement identiques qu'à pH libre. L'efficacité du traitement à pH 6,5 a été plus sensible dans le cas de l'élimination de la turbidité que celle de la couleur.

Plusieurs mécanismes d'élimination des particules par coagulation (complexation entre les formes hydrolysées solubles des métaux et la matière organique ou colloïdale, réduction de la double couche, adsorption sur les floes d'hydroxydes métalliques, neutralisation des charges, piégeage des particules dans les mailles et coprécipitation) sont généralement évoqués dans les travaux de coagulation-floculation. Les conditions de traitement, en particulier le pH, peuvent privilégier certaines voies. Ainsi, Jian-Jun et al. (2006), et Zhong et al. (2010), ont montré que, entre pH 4,5 et 5,2, la contribution du mécanisme par neutralisation des charges est plus importante. A pH supérieur à 5,5, la contribution de la coagulation par neutralisation baisse et le mécanisme de coagulation par adsorption conjugué avec les phénomènes de piégeage et de coprécipitation domine.

Il est donc probable que dans cette étude le mécanisme de neutralisation des particules a dominé au cours de la coagulation à pH libre de l'eau (le pH diminue rapidement après ajout de coagulant vers pH 4,5 à 5,4). Le mécanisme par adsorption a été prédominant à pH 6,5 (pH ayant varié entre 6,5 et 6,0). L'adsorption peut être directe sur l'hydroxyde d'aluminium solide ou indirecte après la formation de complexes. On a montré tout récemment qu'à pH compris entre 4,5 et 9,0, l'aluminium sous forme de sulfate dans l'eau s'hydrolyse et conduit à la libération de huit (8) produits d'hydrolyse (Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_4^-$, $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_3(OH)_4^{5+}$ et $AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}^{7+}$). La forme solide d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ est l'espèce dominante de l'aluminium total ajouté dans l'eau et le cation à 13 atomes d'aluminium ($AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}^{7+}$) est le plus intéressant pour la neutralisation et la déstabilisation des colloïdes généralement chargés négativement (Xiao et al., 2008).

Franceschi et al. (2002) ont montré également qu'entre pH 6 et 8, le mécanisme d'élimination des argiles responsable de la turbidité de l'eau est l'adsorption et la neutralisation. Ils ont montré par ailleurs que l'élimination des argiles de faible capacité d'échange d'ions comme la kaolinite par les sels d'aluminium et à pH 6,3 est peu efficace. Ce travail peut expliquer la faible élimination de la turbidité à pH libre observée dans cette étude (pH initial entre 5,6 et 6,7 et pH final entre 4,5 et 5,4).

Conclusion

Nous avons montré que l'efficacité du traitement de coagulation-floculation de l'eau de la retenue dépend du pH. Le traitement à pH 6,5 donne les meilleurs résultats. A ce pH, et pour une dose de 40 mg.l⁻¹ de sulfate d'aluminium, on élimine plus de 80% de la turbidité. A pH libre, une filtration efficace de l'eau peut contribuer à augmenter les

rendements d'élimination de la couleur et de la turbidité.

REFERENCES

- Bao-Yu G, Qin-Yan Y, Yan W, Wei-Zhi Z. 2007. Color removal from dye-containing wastewater by magnesium chloride. *J. Environ. Manage.* **82**(2): 167-172.
- Bawa LM, Djanéyé-Boundjou G, Soulémane AG, Kpékpassi L. 2008. Etude de la clarification d'une eau de surface par une substance naturelle (les extraits de *Moringa Oleifera* Lam) : Incidence sur la demande en chlore. *Phys. Chem. News* **42**: 133-138.
- Boon HT, Tjoon TT, Mohd OAK. 2000. Removal of dyes and industrial dye wastes by magnesium chloride. *Water Res.* **34**(2): 597-601.
- Bosea P, Reckhow DA. 2007. The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation. *Water Res.* **41**(7): 1516-1524.
- Christopher WKC, van Leeuwena JA, Rolando F, Mary D. 2009. Optimised coagulation using aluminium sulfate for the removal of dissolved organic carbon. *Desalination*, **245**(1-3): 120-134.
- Franceschi M, Girou A, Carro-Diaz, AM, Maurette MT, Puech-Costes E. 2002. Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method. *Water Res.*, **36**: 3561-3572.
- Gregor JE, Nokes CJ, Fenton E. 1997. Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation. *Water Res.*, **31**(12): 2949-2958.
- Jian-Jun Q, Maung HO, Kiran AK, Frans K, Peter M. 2006. Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water. *Sep. Purif. Technol.*, **49**(3): 295-298.
- Jincheng W, Baoyu G, Qinyan Y, Yan W. 2009. Effect of dosing method on color removal performance and flocculation dynamics of polyferric-organic polymer dual-coagulant in synthetic dyeing solution. *Chem Eng J.*, **151**(1-3): 176-182.
- Krishna PR. 2009. Color removal from distillery spent wash through coagulation using *Moringa oleifera* seeds: Use of optimum response surface methodology. *J. Hazard. Mater.*, **165**(1-3): 804-811.
- Malpass GRP, Miwa DW, Machado SAS, Mothe AJ. 2008. Decolourisation of real textile waste using electrochemical techniques: Effect of electrode composition. *J. Hazard. Mater.*, **156**(1-3): 170-177.
- Matilainen A, Vepsäläinen M, Sillanpää M. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Adv Colloid Interface Sci (2010)*, doi:10.1016/j.cis.2010.06.007.
- Mingquan Y, Dongsheng W, Jiuhui Q, Jinren N, Christopher WKC. 2008. Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization. *Water Res.*, **42**(8-9): 2278-2286.
- Ossey YB, Mambo V, Abiba ST, Houenou PV. 2008. Etude analytique des caractéristiques chimiques d'un lac eutrophe en milieu tropical: La conductivité comme indicateur de trophie du lac de Buyo (Côte d'Ivoire). *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, **25**: 87-108.
- Pikkarainen AT, Judd SJ, Jokelab J, Gillberg L. 2004. Pre-coagulation for microfiltration of an upland surface water. *Water Res.*, **38**(2): 455-465.
- Purnendu B, Reckhow DA. 2007. The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation. *Water Res.*, **41**(7): 1516-1524.

- Qinghua J, Huijuan L, Chengzhi H, Jiuhui Q, Dongsheng W, Jing L. 2008 Removal of disinfection by-products precursors by polyaluminum chloride coagulation coupled with chlorination. *Sep. Purif. Technol.*, **62**(2): 464-469.
- Riera-Torres M, Gutiérrez-Bouzána C, Crespia M. 2010. Combination of coagulation-flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. *Desalination*, **252**(1-3): 53-59.
- Rizzo L, Di Gennarob A, Gallob M, Belgiorno V. 2008. Coagulation/chlorination of surface water: A comparison between chitosan and metal salts *Sep. Purif. Technol.*, **62**(1): 79-85.
- Xiao F, Zhang B, Lee C. 2008. Effects of low temperature on aluminum (III) hydrolysis: Theoretical and experimental studies. *J. Environ. Sci.*, **20**: 907-914.
- Yu Z, Zhen L, Yanxin W. 2008. Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate *Desalination*, **225**(1-3): 301-311.
- Zhong LY, Bao-Yu G, Qin-Yan Y, Yan W. 2010 Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water *J. Hazard. Mater*, **178**(1-3): 596-603.