



HAL
open science

Les clarifloculateurs plus particulièrement utilisés en traitement tertiaire

J.P. Canler, Jean-Marc Perret

► **To cite this version:**

J.P. Canler, Jean-Marc Perret. Les clarifloculateurs plus particulièrement utilisés en traitement tertiaire. Cemagref Editions, pp.80, 2007. hal-02586948

HAL Id: hal-02586948

<https://hal.inrae.fr/hal-02586948>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Ministère de l'Écologie, du Développement
et de l'Aménagement Durables**

FNDAE N°35

Document technique



Jean-Pierre Canler – Jean-Marc Perret



Département Milieux Aquatiques, qualité et rejets

Unité de recherche Qualité des Eaux et Prévention des Pollutions

Groupement de Lyon

3 bis, Quai Chauveau - CP 220

69336 LYON cedex 09

Tél. 04 72 20 87 87 - Fax 04 78 47 78 75

Cemagref 2007 ISBN : 978 2 85362 671 7

Ce document de synthèse a pu aboutir grâce au soutien financier de la Direction de l'eau du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables.

Il est issu du travail de l'équipe traitement des eaux résiduaires du groupement de Lyon, avec l'aide importante d'Olivier Peyronnard, stagiaire de l'INSA de Lyon.

Nous tenons aussi à remercier les Maîtres d'ouvrages pour la mise à disposition de leur installation ainsi que les exploitants des stations étudiées pour leur aide dans le bon déroulement de l'étude : installations de Aix en Provence (13), Bourg en Bresse (01), Divonnes les bains (01) et Reims (51). Enfin, un dernier remerciement est adressé à l'équipe du laboratoire d'analyses physico-chimiques des milieux aquatiques « paramètres majeurs et micro polluants inorganiques » du Cemagref de Lyon pour leur importante participation au volet analytique de cette étude.



Préambule 6

Chapitre 1 – Rappels sur l'évolution des différents composés au sein d'une filière de traitement de type biologique en un seul étage..... 7

Rappels et commentaires sur les limites concernant les niveaux d'exigences de qualité des rejets en phosphore et en matière organique 9

Chapitre 2 – Le traitement tertiaire par clarifloculation..... 12

Rappel du principe du traitement physico-chimique 13

Rôle des réactifs physico-chimiques : étapes dites de Coagulation puis de Floculation..... 13

Présentation des principaux systèmes commercialisés en France..... 15

Les possibilités d'insertion dans la filière de traitement des eaux..... 17

Les paramètres de dimensionnement 19

Chapitre 3 – Résultats des mesures 25

Les performances mesurées en Tertiaire 25

Analyse des paramètres de fonctionnement 28

Rappels des principaux paramètres de fonctionnement et d'exploitation 34

Principales difficultés rencontrées et propositions de recours 36

Contraintes d'exploitation 39

Conclusion41

Fiches techniques.....	43
Fiche n°1 - Rappel des différentes formules et tests utilisés sur ce type d'ouvrage.....	44
Fiche n°2 - Calcul de la réduction du TAC sur une filière de traitement.....	51
Fiche n°3 - Calcul du volume de coagulant en solution commerciale à apporter par jour.....	55
Fiche n°4 - Démarche de la vérification des taux de traitement.....	57
Fiche n°5 - Calcul de la production de boue issue du traitement physico-chimique tertiaire.....	59
Fiche n°6 - Conséquence d'une mauvaise optimisation du dosage de coagulant sur la production de boue physico-chimique.....	62
Fiche n°7 - Exemples de type d'asservissement pour l'injection des réactifs en vue de l'optimisation des quantités à injecter.....	64
Annexes.....	69
Annexe 1 - Evolution des concentrations sur des procédés de traitement poussés situés à l'amont d'un clari-floculateur.....	70
Annexe 2 - Estimation des concentrations minimales envisageables en sortie de clarifloculation en traitement tertiaire à partir d'une Eau Usée Domestique normalement concentrée.....	71
Annexe 3 - Niveaux de rejet demandés pour les STEP équipées d'un tertiaire.....	72
Annexe 4 - Les étapes de Coagulation et Flocculation.....	73
Annexe 5 - Concentrations mesurées en Fer.....	74
Annexe 6 - Liste (non exhaustive) des collectivités françaises équipées de clarifloculateurs en 2004.....	75
Annexe 7 - Résultats des mesures sur site.....	77
Bibliographie.....	80



6

Afin de protéger le milieu récepteur, les services de l'état imposent à certaines collectivités des niveaux de rejet plus poussés en sortie de stations d'épuration, en particulier pour le traitement du phosphore et de la matière organique. Pour répondre à ces nouvelles contraintes, des traitements complémentaires se sont implantés à l'aval de l'étage de traitement biologique secondaire. Parmi les différentes technologies disponibles en traitement tertiaire, le clari-floculateur basé sur un traitement physico-chimique est un des procédés récemment développés.

Ce traitement complémentaire, de type tertiaire, nécessite :

- Pour répondre à une réduction de la matière organique, d'intervenir d'abord sur la fraction particulaire ce qui permet de réduire les éléments constitutifs de cette fraction : DCO, DBO₅, azote et phosphore.
- Et pour réduire la pollution phosphorée, d'intervenir sur la fraction soluble composée d'ortho-phosphates dont l'élimination se fera par précipitation à l'aide de sels métalliques (fer ou aluminium).

Cette technologie, appelée clari-floculateur, est basée sur un principe de décantation associé à un traitement chimique dont certaines particularités permettent de travailler à des vitesses plus élevées, d'où la notion de réacteurs à grande vitesse, permettant la mise en place d'ouvrage compact.



Les eaux résiduaires urbaines (ERU) admises en entrée des stations d'épuration des collectivités véhiculent conventionnellement trois grands types de pollution : la pollution carbonée représentée par la DCO, la DBO₅ et les MES, la pollution azotée représentée principalement par l'azote kjeldahl (NTK) composé d'azote organique et d'azote ammoniacale (N-NH₄⁺) et la pollution phosphorée avec le phosphore total (PT)

composé de phosphore organique et d'orthophosphate (P-PO₄³⁻). Ces trois types de pollution se répartissent sous trois classes physiques : particulaire, colloïdale et soluble. Les caractéristiques moyennes d'une eau résiduaire urbaine normalement concentrée (collectée par réseau séparatif) et les flux polluants apportés par habitant sur des installations importantes sont rassemblés dans le tableau suivant :

7

Type de pollution	Paramètres	Concentrations en mg/L	Habitant * pour une collectivité importante en g/Hab.j ⁻¹	Equivalent-Habitant en g/EH.j ⁻¹
Carbonée	DCO	700 - 750	de l'ordre de 115	145
	DBO ₅	300	de l'ordre de 50	60
	MES	250	de l'ordre de 45	55
Azotée	NTK = NT	75 - 80	de l'ordre de 10-12	12 à 15
	N-NH ₄ ⁺	60		
Phosphorée	PT	12 - 13	de l'ordre de 2,5	2,5 à 3
	P-PO ₄ ³⁻	8 - 10		

Tableau 1 – Caractéristiques moyennes d'une eau résiduaire urbaine normalement concentrée (Source Cemagref)

* fonction de la taille de la collectivité

L'abattement de cette pollution fait appel à des procédés physiques (décantation) pour éliminer la

pollution particulaire, à des procédés physico-chimiques pour les fractions particulaire, colloïdale

et soluble précipitable (négligeable à l'exception des orthophosphates) et à des procédés biologiques pour l'ensemble des fractions (filrière de traitement indispensable pour abattre la partie soluble).

Compte tenu de l'application de la loi sur l'eau, les procédés mis en place sont de type biologique et la filrière la plus implantée est le procédé boue activée en aération prolongée. En dehors de son traitement poussé, il permet de produire une quantité de boue limitée associée à un taux de matière organique (MVS) bas. Ce procédé permet de traiter :

- **La matière carbonée** de façon poussée. L'élimination de la fraction soluble est obtenue par assimilation par des bactéries aérobies (besoins d'oxygène) afin de former de nouvelles bactéries (synthèse cellulaire). Cette assimilation (métabolisme bactérien) s'accompagne de besoins azotés sous forme d'azote ammoniacal et de besoins phosphorés sous forme d'orthophosphates dans la proportion suivante : $DBO_5 / N-NH_4^+ / P-PO_4^{3-}$ de 100 / 5 / 1 ce qui signifie que l'abattement de 100 mg de DBO_5 s'accompagne d'une diminution de 5 mg d'azote et de 1 mg d'ortho-phosphate par assimilation. Dans le cas d'un traitement biologique d'une ERU, l'abattement en azote et en phosphore sont de l'ordre de 20% à 25%. Au-delà de ces abattements, des traitements spécifiques de l'azote et du phosphore devront être mis en place.
- **L'azote** [Document Technique FNDAE n°25] : Il est traité par le procédé boues activées dimensionnées dans le domaine de l'aération prolongée pour maintenir la biomasse autotrophe, responsable du traitement de

l'azote. Dans cette filrière, l'azote est transformé en azote gazeux par nitrification et dénitrification pour atteindre des concentrations en sortie inférieure à 2 mg $N-NH_4^+$ /L et inférieure 5 mg $N-NO_3^-$ /L et des rendements globaux en NGL de 90 %, y compris la part assimilée.

- **Et le phosphore** selon deux techniques : biologiques et physico-chimiques [Document technique FNDAE n°29]. Le traitement du phosphore par sur-accumulation, appelé aussi déphosphatation biologique, permet un rendement d'élimination de l'ordre de 60 à 70 % pour une eau résiduaire normalement concentrée. Le mécanisme du processus de sur-accumulation aboutit à une teneur en Phosphore pouvant atteindre 5 à 6 % des MVS soit 2 à 3 fois celui d'une biomasse classique. Le traitement physico-chimique du phosphore peut également être utilisé, avec différents lieux d'ajout du réactif (avant le réacteur biologique : pré précipitation, après le réacteur : post précipitation ou dans le réacteur : précipitation simultanée). Avec ce type de traitement, seule la forme dissoute ($P-PO_4^{3-}$) disponible est précipitée avec le Fer. Les performances obtenues dépendent de la concentration en $P-PO_4^{3-}$ des eaux résiduaires et du ratio molaire $Fe / P-PO_4^{3-}$ appliqué.

Sur une filrière de type boue activée en un seul étage bien dimensionnée avec un traitement poussé du carbone par assimilation, de l'azote par nitrification-dénitrification et du phosphore par traitement biologique et physico-chimique et traitant des eaux normalement concentrées, les concentrations résiduelles attendues en sortie sont les suivantes :

Sortie du procédé boue activée en temps sec : traitement du C, du N et du P (avec déphosphatation biologique et physico-chimique)								
	C			N			P	
	DCO	DBO_5	MES	NTK	Noxy	NGL	PT	$P-PO_4^{3-}$
En mg/L	60 - 70	10 - 15	15 - 20	< 5-6	2	< 8	1,2 - 1,5	0,2 - 0,3
Rendement moyen %	91	96	93	93		90	89	

Tableau 2 – Concentrations résiduelles en sortie du procédé boue activée : traitement du C, du N et du P en temps sec

A ce stade du traitement secondaire, un léger résiduel en ortho-phosphates s'avère inévitable pour permettre un traitement biologique suffisant. Une pré-précipitation poussée pourrait bloquer ou limiter le processus biologique compte tenu d'une insuffisance de composés nutritionnels (en particulier le $P-PO_4^{3-}$) indispensable au métabolisme bactérien.

Des niveaux de rejet plus bas (en particulier le PT inférieur à 1 mg/L et la DCO inférieure à 50 mg/L) nécessitent un traitement complémentaire appelé Tertiaire. Les MES est sortie de la filière boue activée avec traitement physico-chimique du phosphore étant constituées de 4,5% de Phosphore, l'obtention de valeurs plus faibles nécessite d'éliminer le particulaire (MES).

En effet, il faut rappeler qu'un gramme de MES en sortie de traitement secondaire poussé représente, par de la perte de biomasse, un rejet de :

1,2 g de DCO et 0,5 g de DBO_5 ,

0,065 g d'azote (6 à 7%),

et 0,045 g de P (4,5% en raison d'un traitement biologique et physico-chimique amont du phosphore).

Suite à un traitement secondaire poussé, la mise en place d'un traitement tertiaire pour éliminer principalement le particulaire (de l'ordre de 10 mg de MES éliminé/L, soit une sortie proche de 5 mg MES/L) donne, par exemple, une très bonne qualité d'eau de sortie suivante :

	DCO	DBO_5	MES	NGL	PT
Entrée tertiaire en Temps sec en mg/L	60	10	15	8	1,2
L'élimination de 10 mg de MES/L donne					
Sortie tertiaire en mg/L	48	5	5	7,2	0,75

Tableau 3 – Concentrations résiduelles en sortie du traitement tertiaire pour l'élimination de 10 mg/L de MES sur l'étage

Cet exemple montre que l'élimination de la fraction particulaire permet le respect des normes de rejet poussées sur le phosphore (PT < à 1 mg/L) et sur la DCO (DCO < à 50 mg/L, sauf pour une DCO soluble réfractaire anormale et supérieure à 35 mg de DCO dure/L).

Remarque :

Notion de flux de Phosphore à traiter et ratio PT / Eq Hab

Lors du dimensionnement des installations, le ratio PT / EH fréquemment utilisé pour les calculs de charge à traiter en entrée de station d'épuration est encore souvent de 4 g P/EH .

Les résultats des nombreuses mesures sur sites montrent que ce ratio est en baisse depuis plus d'une dizaine d'années avec la mise sur le marché de lessives « sans phosphates ».

En prenant pour hypothèse de calcul qu'un équivalent habitant rejette 60 g de DBO_5 /jour, la quantité moyenne de phosphore rejetée par un EH, est de l'ordre de 2,5 g P/EH soit un ratio DBO_5/PT proche de 25. En période de pluie, la

charge en phosphore est augmentée et peut atteindre en moyenne 30% de plus.

Ainsi, le calcul des flux de phosphore réels à traiter en entrée station est à relativiser pour les stations existantes (avec généralement une charge annoncée de dimensionnement nettement supérieure à la réalité).

Lors des projets de dimensionnement des nouvelles installations, une valeur de 2,5 g P/EH devra être utilisée.

RAPPELS ET COMMENTAIRES SUR LES LIMITES CONCERNANT LES NIVEAUX D'EXIGENCES DE QUALITE DES REJETS EN PHOSPHORE ET EN MATIERE ORGANIQUE

D'un point de vue réglementaire, une partie du territoire français est classée en « zones sensibles » en raison de la sensibilité du milieu naturel aux paramètres Azote et Phosphore, notamment pour les zones sujettes à l'eutrophisation.

Les rejets de phosphore au milieu naturel doivent bien entendu être réduits dans ces zones et des contraintes d'élimination sont définies pour les stations d'épuration recevant des charges à traiter

en DBO₅ supérieures à 600 kg/j (soit 10 000 EH). Ces contraintes de traitement sont bien entendu des valeurs minimales.

Charge brute traitée par l'installation (en kg DBO ₅ / j)	Charge brute traitée (en EH)	[PT] maximale en moyenne annuelle	Ou rendement mini en PT en moyenne annuelle
600 à 6000	10 000 à 100 000	2 mg PT/L	80 %
> 6000	> à 100 000	1 mg PT/L	

Tableau 4 – Contraintes d'élimination du P pour les installations recevant des charges à traiter en DBO₅ > à 600 kg/j.

Pour les stations d'épuration recevant des charges inférieures à 600 kg de DBO₅, les objectifs de traitement sont également fixés par arrêté préfectoral suivant le milieu naturel récepteur. Ainsi, pour le phosphore, une grande variabilité des exigences de qualité est rencontrée.

La concentration en phosphore demandée en sortie d'installation peut être exprimée en une moyenne annuelle uniquement ou en une valeur à atteindre durant une période donnée. Ce point est important et doit bien être précisé dans le cahier des charges.

La notion de rendement est toujours délicate dans le cas d'eaux à traiter fortement diluées par des eaux parasites en période sèche ou par temps de pluie. Parfois, la prise en compte de cette notion de rendement peut impliquer des exigences de concentration en PT en sortie irréalistes, la concentration en entrée étant excessivement faible, due à un facteur de dilution trop élevé aggravé par des eaux de teneur en phosphate de plus en plus faible.

Une collectivité située hors zone sensible peut aussi avoir des contraintes fortes sur le rejet compte tenu d'un milieu récepteur très fragile et non répertorié comme zone sensible.

A l'exception de la notion de rendement qui dépend de la concentration d'entrée et peut être très exigeant pour des eaux usées très diluées, on parlera de contraintes fortes lorsque la concentration demandée du rejet est inférieure à 1,2 à 1,5 mg de PT/L et d'une DCO totale inférieure à 70 mg/L. Dans ces deux cas, un traitement tertiaire devient indispensable avec toutes les conséquences qui en découlent : coûts

d'investissement et d'exploitation pour une fraction éliminée sur l'étage relativement faible.

La limite des principaux paramètres est la suivante :

➤ **Pour la DCO totale :**

La composition d'une eau de sortie après une filière de traitement biologique (boue activée ou biofiltration) issue d'une eau usée domestique normalement concentrée est composée :

- D'une fraction soluble appelée DCO dure ou réfractaire (non biodégradable) qui peut représenter 30 à 35 mg de DCO soluble / L.
- D'une autre fraction soluble biodégradable mais non biodégradée. Sa concentration peut être approchée par la valeur mesurée en DBO₅ soluble multipliée par 2,4 (valeur issue du ratio DCO/DBO₅ des eaux à traiter).
- Et d'une fraction particulaire composée de biomasse rejetée dont la concentration est obtenue par la concentration en MES multipliée par 1,2 (valeur issue de la mesure de la DCO particulaire en sortie station).

Des rejets inférieurs à 30 à 40 mg de DCO/L demandés sur des eaux normalement concentrées nécessiteraient d'éliminer toute la fraction particulaire (techniques membranaires) ainsi que la fraction totale biodégradable. Ce dernier point est aussi difficilement envisageable car on observe pour des traitements poussés un résiduel biodégradable en DCO de l'ordre de 3 mg/L lié aux variations journalières et à de mineurs courts circuits hydrauliques.

Rappelons que pour le milieu récepteur, c'est bien la fraction biodégradable représentée par les MES et la DBO_5 qui est néfaste au milieu.

➤ **Pour le phosphore total :**

Au niveau du rejet au milieu naturel en sortie de station d'épuration, on retrouvera essentiellement le phosphore, à des concentrations variables suivant la filière de traitement retenue, sous les formes suivantes :

- Le $P-PO_4^{3-}$ résiduel qui n'a pas été éliminé biologiquement et chimiquement. Dans le cas d'un traitement poussé amont, la valeur d'orthophosphates peut atteindre 0,2 à 0,3 mg/L.

- Le Phosphore des MES composé de P constitutif de la biomasse (MVS) et de P non solubilisé adsorbé. Ce phosphore particulaire peut atteindre une concentration de l'ordre de 0,8 mg/L dû à 15 à 20 mg de MES avec un taux de P de 4,5 % (en raison d'une déphosphatation biologique et physico-chimique à l'amont).

Rappelons que pour les milieux récepteurs sensibles à l'eutrophisation, la fraction pénalisante est représentée par les orthophosphates dont les concentrations sont déjà très faibles.



Photo : Goulotte de récupération des eaux décantées



Un traitement tertiaire par clariflocculation permet uniquement :

- Une élimination (voir un affinage en raison des faibles concentrations à l'entrée de l'ouvrage) de la pollution particulaire par la réduction des MES du rejet en sortie de traitement secondaire. L'abattement de ces MES (principalement composées de floccs) permet une réduction des paramètres constitutifs de la biomasse éliminée (appelée aussi MVS) :

1 mg de MVS permet un abattement de l'ordre de :

de 0,6 mg DBO₅

de 1,45 mg de DCO

de 0,09 mg d'azote (9% des MVS)

et de 0.02 à 0.06 mg de Phosphore (2 à 6 % des MVS en fonction du type de traitement du phosphore à l'amont).

- Et une réduction des formes solubles du phosphore représentées par les ortho-phosphates, par l'ajout de sels métalliques (de fer ou d'aluminium) conduisant à la formation d'un précipité décantable.

Dans le cas des eaux résiduaires domestiques normalement concentrées, la clariflocculation tertiaire à l'aval d'un traitement biologique permettrait d'atteindre les concentrations suivantes :

DCO totale	MES	PT
<p>45 à 50 mg DCO_T /L</p> <p>En raison d'un talon dur ou réfractaire de 30-35 mg/L, de la DCO liée aux MES de l'ordre de 10 mg/L (8 mg MES/L x 1,2), et de la DCO soluble biodégradable de l'ordre de 5 mg/l (2 mg DBO₅ / L x 2,4)</p>	<p>8 mg MES/L</p>	<p>0,7 à 0,8 mg PT/L</p> <p>En raison d'un résiduel de 0,1 à 0,2 mg de P-PO₄³⁻/L et de 0,5 mg/L de P organique (cas d'une déphosphatation biologique à l'amont (8 mg MES/L x 0.06)</p>

Compte tenu des concentrations moyennes rejetées par un traitement biologique classique

poussé, les rendements escomptés par un clarifloculateur sont les suivants :

Paramètres	Concentration à l'entrée du clarifloculateur (ou en sortie traitement biologique secondaire poussé) en mg/L	Concentration escomptée en sortie clarifloculateur en mg/L	D'où les rendements escomptés moyens pour un traitement tertiaire par clari-floculateur %
DCO totale	60 - 70	45	30
MES	15 - 20	8	55
PT	1,2 - 1,5	0,75	50

Tableau 5 – Rendements escomptés sur un clari-floculateur en tertiaire

On observe des rendements globalement faibles en raison du traitement poussé sur la filière amont.

RAPPEL DU PRINCIPE DU TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE

Le traitement physico-chimique est effectué par la mise en place d'un décanteur de type lamellaire associé à l'introduction de réactifs chimiques couramment utilisés. Cet abattement physico-chimique met en jeu trois mécanismes dont deux essentiels :

- La précipitation des fractions particulaire et colloïdale après neutralisation des particules par l'ajout d'un coagulant.
- La précipitation des ortho-phosphates (forme soluble) par l'ajout d'un sel métallique.
- On observe aussi l'adsorption de quelques composés solubles (matière organique) dont l'abattement est relativement négligeable.

En traitement tertiaire, l'élimination est plus délicate en raison des faibles concentrations à l'entrée de l'ouvrage en particulier pour l'abattement des fines.

ROLE DES REACTIFS PHYSICO-CHIMIQUES : ETAPES DITES DE COAGULATION PUIS DE FLOCCULATION

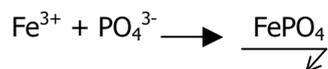
COAGULATION :

Le but de la coagulation est de neutraliser les charges électriques des particules colloïdales afin de favoriser la formation d'un agglomérat. Ces

particules sont en suspension dynamique dans l'eau et le coagulant injecté déstabilise les particules en limitant les forces stabilisatrices des colloïdes : la charge superficielle des colloïdes (charge négative) est neutralisée par l'apport d'un cation (le coagulant), des sels métalliques sont généralement utilisés pour leur forte charge cationique. Les particules vont alors pouvoir s'approcher les unes des autres et se lier convenablement lors d'éventuels phénomènes de contact. Cette réaction nécessite un brassage rapide pour faciliter ce contact.

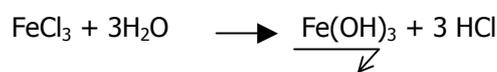
Les réactifs utilisés sont des sels métalliques (fer ou aluminium) qui permettent également la précipitation des orthophosphates.

A titre d'exemple, la réaction du chlorure ferrique avec les ortho-phosphates est la suivante :



Formation d'un précipité appelé phosphate de fer

Une réaction « parasite » a également lieu en parallèle avec l'eau avec la formation d'un hydroxyde de fer :



Formation d'un précipité appelé hydroxyde de fer

Cette seconde réaction nécessite de travailler avec des excès de sels métalliques par rapport à la stœchiométrie pour atteindre le degré d'épuration (ou rendement) souhaité. Ces excès s'expliquent par « la compétition » entre la réaction de précipitation des phosphates et celle des hydroxydes.

La quantité de fer injecté est donc toujours utilisée pour la précipitation simultanée des

phosphates et des hydroxydes qui s'accompagne d'une baisse du pH et d'une augmentation de la conductivité.

FLOCCULATION :

La floculation représente l'étape où les particules déstabilisées sont rassemblées en agrégats (flocs). Cette réaction est réalisée par l'apport de floculants en raison de leur très haut poids moléculaire et de leur charge ionique qui permet de rassembler les particules déstabilisées.

La floculation est généralement réalisée en 2 temps :

- Injection du floculant : un brassage rapide permet une bonne répartition.
- Maturation du floc : un brassage plus lent permet la formation et le rassemblement du floc.

Remarque : un décalage dans le temps de 1 à 3 minutes entre les injections de coagulant et de floculant est souhaitable pour permettre une meilleure efficacité.

QUANTITES A INJECTER :

La quantité de fer à apporter est principalement dictée par les rendements d'élimination souhaités en $P-PO_4^{3-}$ et en pollution particulaire.

La bibliographie validée par des expérimentations sur site préconise des ratios molaires sels métalliques/phosphore initial (Fe/P) différents pour atteindre un même rendement suivant la concentration en orthophosphates au point d'injection, d'où des différences de dosage selon le type de traitement retenu : primaire ou tertiaire.

Le tableau 6 suivant montre bien que la concentration initiale en orthophosphate est un facteur important pour l'obtention d'un rendement d'élimination donné. Ainsi, pour un même rendement d'élimination, le ratio Fe/P initial sera plus faible pour des eaux concentrées que pour des eaux peu chargées (cf. fiche n°3 - Calcul de la dose de coagulant à apporter et fiche n°4 - Vérification du taux de traitement).

Pour un rendement en P de 90 %			
Concentration en $P-PO_4^{3-}$ en mg/L	2 - 5	5 - 10	15
Ratio molaire Fe/P préconisé	3,5	2,5	1,5

Tableau 6 – Ratio molaire Fe/P appliqué utilisé en fonction de $[P-PO_4^{3-}]$ pour un même rendement de 90%

En résumé, pour atteindre un abattement en PT de l'ordre de 80%, on retiendra en première approche :

- En traitement primaire ou traitement secondaire, pour une concentration en P de l'ordre de 12 à 15 mg/L, un ratio molaire Fe / P appliqué de l'ordre de 1,5 à 2 pour une précipitation physico-chimique seule et un ratio molaire Fe / P appliqué de l'ordre de 1,2 à 1,5 pour une déphosphatation combinée (physico-chimique et biologique).
- Par contre, en traitement tertiaire, pour des concentrations en $P-PO_4^{3-}$ en entrée d'ouvrage plus faibles, souvent inférieures à 5 mg/L, un ratio Fe / P initial de l'ordre 2,5 à 3.

Ces différents ratios seront ensuite ajustés régulièrement en fonction de la concentration en $P-PO_4^{3-}$ obtenue en sortie d'ouvrage. Des ratios élevés auront des conséquences importantes sur la production de boues physico-chimiques, sur la consommation supérieure de TAC pouvant entraîner une baisse du pH, sur des risques de corrosion et sur les coûts d'exploitation.

PRESENTATION DES PRINCIPAUX SYSTEMES COMMERCIALISES EN FRANCE

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CLARI-FLOCCULATEURS :

Ils sont caractérisés par un décanteur lamellaire précédé d'une étape de coagulation-floculation optimisée.

Le procédé fonctionne en trois étapes :

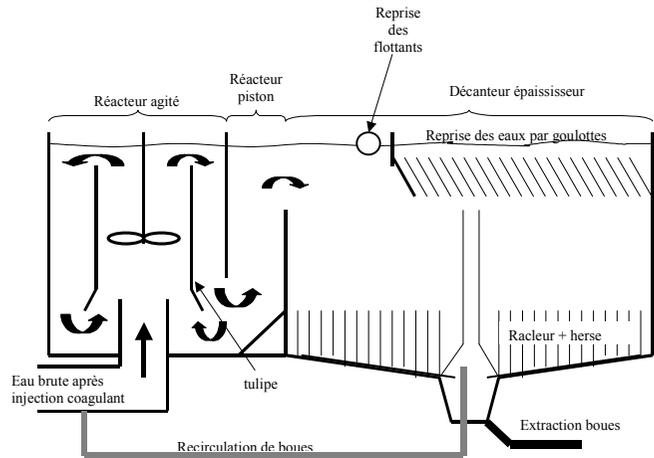
- **Coagulation** avec apport de sels métalliques.
- **Floculation** réalisée en deux temps : injection du floculant associée à un brassage rapide puis maturation du floc associée à un brassage plus lent, soit la présence de deux zones plus ou moins distinctes en série.
- **Décantation** par sédimentation du floc au sein d'un **décanteur lamellaire**. Cette décantation est optimisée par des techniques différentes suivant le procédé.

<ul style="list-style-type: none"> • Nom commercial des procédés existants en France et leur constructeur : 		
Densadeg® Degrémont	Delreb® Stéreau	Actiflo® OTV - Véolia
<ul style="list-style-type: none"> • Particularités : 		
Procédé Densadeg® / Delreb® La floculation est optimisée par une recirculation des boues prélevées en fond de décanteur lamellaire qui sont réinjectées dans ou en amont du flocculateur. Cette recirculation permet une amélioration de la capture des MES (dites fines), une meilleure floculation, un lestage du floc par formation du nouveau floc autour du floc recirculé et une optimisation de la quantité de réactifs utilisés. Les boues extraites sont suffisamment concentrées pour être envoyées directement vers la filière déshydratation.		Procédé Actiflo® La floculation et plus particulièrement sa sédimentation est optimisée par l'apport de micro-sable dans le flocculateur. Celui-ci, avec l'aide des réactifs utilisés, joue le rôle de noyau pour le floc qui sera ainsi fortement lesté du fait de la densité élevée du sable. Les boues sableuses décantées sont dirigées vers un hydrocyclone qui sépare le sable (pour sa recirculation) des boues extraites. La faible concentration des boues impose généralement leur passage par un épaisseur avant la filière de déshydratation.
Décanteur équipé de lamelles Hexagonales « nid d'abeille »		

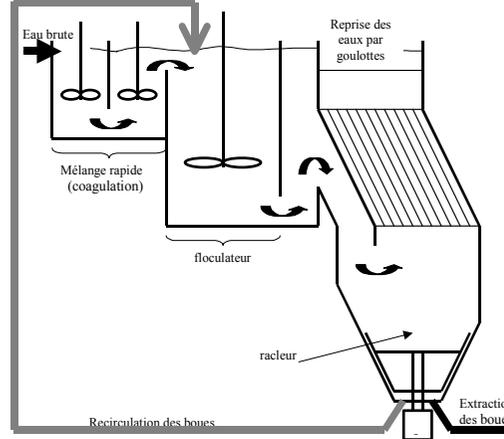
Tableau 7 – Particularité des trois principaux procédés existants en France

• Schémas de principe des trois procédés

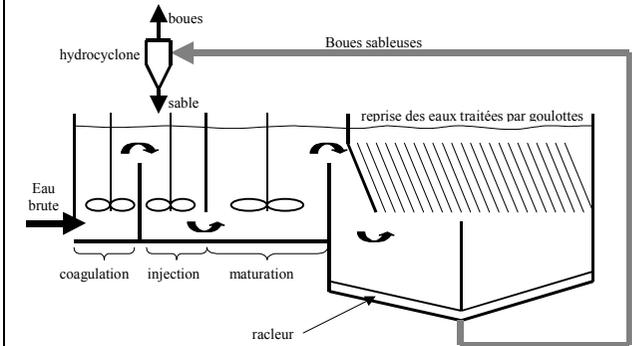
Densadeg®



Delreb®



Actiflo®



Points d'injection :

- **FeCl₃** : apporté soit dans la canalisation d'alimentation soit en tête du bassin de coagulation,
- **Floculant** : apporté sous l'hélice du flocculateur – dans certains cas, une seconde injection est prévue au niveau de la canalisation de la recirculation des boues,
- **Boues** sont recirculées en sortie de coagulation ou dans le bassin de floculation

- **FeCl₃** : apporté dans la canalisation d'alimentation ou en surface du bassin de coagulation,
- **Floculant** : apporté en tête de la cuve d'injection ou de la cuve de maturation,
- **Sable** : il est réintroduit en tête de la cuve d'injection

Certains points de conception ne seront pas abordés dans ce document afin de respecter la confidentialité des données spécifiques aux constructeurs.

Autres particularités de certains de ces systèmes :

- En surface de certains réacteurs, une écope manuelle (ou automatique) est installée pour l'élimination des flottants au niveau de la zone d'admission des boues.



Photo : Blocs lamellaires vue de dessus (ouvrage vide)

En conclusion, à l'exception des rendements souhaités, les arguments mis en avant par les constructeurs pour la mise en place de ces procédés sont généralement les suivants :

- Ouvrage compact, de faible emprise au sol et donc facile à couvrir (intégration paysagère, traitement des odeurs).
- Procédé physico-chimique s'adaptant aux variations de charge qui permet des ouvrages en traitement mixte (tertiaire / pluvial), ce qui évite des ouvrages spécifiques au temps de pluie.
- Etage modulaire permettant un agrandissement futur de l'installation de traitement.
- Procédé permettant une sécurité vis à vis du milieu récepteur en cas de nécessité de by-pass temporaire du traitement biologique (lors des réhabilitations d'installation par exemple)

- En fond de décanteur lamellaire, on note la présence continue d'un lit de boue avec en partie supérieure de la fosse une zone de concentration des boues plus faible pour leur recirculation en tête du procédé et en partie inférieure une zone pour leur épaissement avant extraction.
- L'épaississement est favorisé par la présence d'une herse fixée sur le racleur.



Photo : Décanteur lamellaire en fonctionnement vue de dessus

ou lors de problèmes de dysfonctionnement biologiques (bulking : bactéries filamenteuses).

- Déphosphatation à l'aval du traitement Biologique qui évite les risques de déséquilibre nutritionnel par abattement trop poussé du phosphore en primaire.
- Démarrage immédiat du traitement.
- Gain de performance de la désinfection par UV située à l'aval lorsqu'elle est demandée.

LES POSSIBILITES D'INSERTION DANS LA FILIERE DE TRAITEMENT DES EAUX.

Ces procédés peuvent s'intégrer à différents niveaux dans la filière de traitement des eaux usées :

EN TRAITEMENT PRIMAIRE

Installés après les prétraitements poussés en raison du bloc lamellaire (dégrillage, dessablage et déshuilage), ils fonctionnent en traitement primaire et permettent de « soulager » l'étage biologique aval par un abattement de la pollution organique (MES et fraction colloïdale) et des orthophosphates (fraction soluble).

On peut noter que dans certains cas, les prétraitements peuvent être entièrement intégrés au procédé comme par exemple pour le Densadeg® "4D".

EN TRAITEMENT TERTIAIRE

Ils sont installés en aval d'un traitement secondaire biologique (boue activée + clarificateur ou biofiltres).

Leur implantation en tertiaire a deux objectifs principaux :

- Réaliser une déphosphatation physico-chimique par abattement du phosphore résiduel dissous en sortie du traitement biologique dans les cas où des rejets très faibles en P sont demandés,
- Affiner le traitement biologique amont par rétention des MES (et donc de la fraction particulaire des autres pollutions) présentes en sortie du clarificateur.

Dans certains cas, les niveaux de rejet en PT demandés sont déjà atteints à l'entrée de l'ouvrage tertiaire. Sur ces sites, le traitement tertiaire par temps sec devra être mis à l'arrêt avec un fonctionnement en traversier :

- Pour l'Actiflo® : un fonctionnement sans réactif ni recirculation ou avec réactifs et une recirculation occasionnelle pour permettre l'évacuation des boues stockées.
- Pour le Densadeg® : un fonctionnement sans réactif mais avec recirculation des boues.

Le by-pass total de l'étage peut être envisagé pour une période importante dans le cas par exemple d'installations récentes sous chargées.

EN TRAITEMENT MIXTE :

TRAITEMENT PRIMAIRE EN TEMPS DE PLUIE ET TERTIAIRE EN TEMPS SEC

Différentes configurations existent pour cette implantation en traitement mixte. Par temps de pluie, le traitement des eaux peut être réalisé sur un clari-floculateur destiné à un traitement tertiaire par temps sec. Celui-ci peut alors traiter la totalité des eaux brutes prétraitées, seulement le volume en provenance de la filière de traitement biologique ou le mélange des eaux en provenance de la filière de traitement biologique et de la filière de traitement primaire.

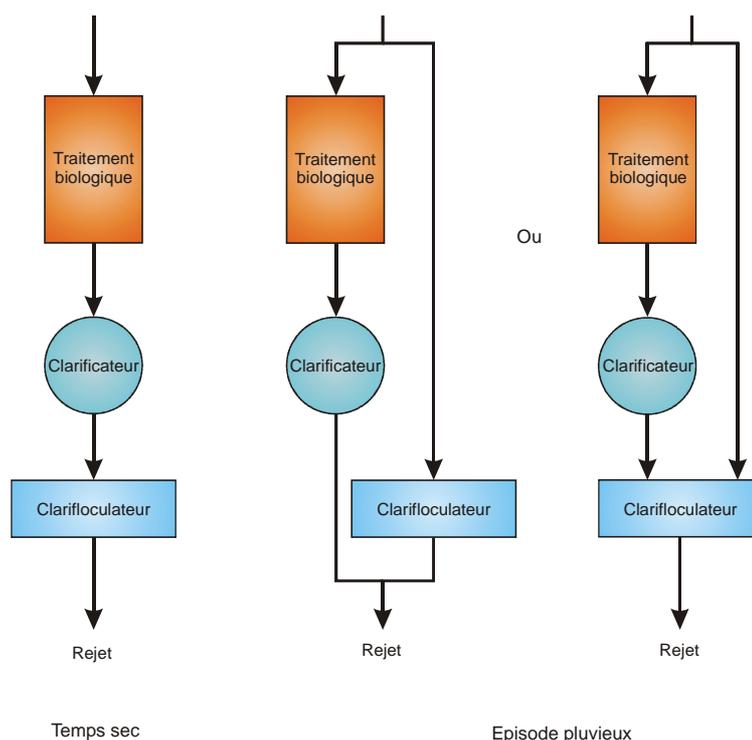


Figure 1 – Différentes configurations d'implantation en traitement mixte

Remarque : Gestion des ouvrages mixtes tertiaire / pluvial

Le fonctionnement des clarificateurs en traitement mixte, tertiaire et pluvial, peut induire des contraintes de gestion et d'exploitation plus importantes.

Les préconisations des constructeurs pour ce type de fonctionnement sont souvent abandonnées sur les sites visités en raison de l'accroissement des contraintes d'exploitation :

- Le changement de floculant suivant la période (temps sec / temps de pluie) n'est pas réalisé : un seul floculant anionique adapté à des caractéristiques moyennes des eaux à traiter est utilisé.
- De plus, la période d'attente, de l'ordre de 30 minutes, pour la préparation d'un nouveau floculant plus adapté au temps de pluie ne milite pas pour l'utilisation de floculant spécifique.

Après de véritables épisodes pluvieux, le floc est déstabilisé par lessivage (flocs plus petits, pertes importantes de fines). Le retour à un fonctionnement stable n'est pas instantané et un rejet dégradé est observé durant quelques heures (perte de fines).

Enfin, le démarrage rapide du procédé semble également être difficile : la création de flocs suffisamment importants est le facteur limitant du procédé Densadeg®, l'Actiflo® pouvant peut-être mieux convenir à un fonctionnement discontinu par l'apport de micro-sable qui joue le rôle de support immédiatement utilisable et facilite ainsi la création de flocs fortement lestés.

EN TRAITEMENT SPECIFIQUE

L'ouvrage peut également être dédié à un traitement spécifique au sein de la filière, comme par exemple le traitement des eaux de lavage de biofiltres nitrifiants.

AUTRES SYSTEMES POUVANT REMPLACER LE CLARI-FLOCULATEUR EN TRAITEMENT TERTIAIRE

En traitement tertiaire, en aval des boues activées, ces clari-floculateurs peuvent être remplacés par un ouvrage ayant un rôle unique

de filtration (abattement prioritaire du particulaire). Dans cette option, le rôle de sécurité vis à vis du milieu naturel est privilégié à l'abattement du phosphore.

Deux filières sont actuellement disponibles pour cette configuration :

- **La mise en place de membranes** en remplacement du clarificateur. Dans ce cas, l'effluent rejeté ne contient pas de MES et donc aucune forme de phosphore particulaire. Seul le phosphore sous forme dissoute est rejeté à une concentration pouvant être très faible si la filière amont est équipée d'une déphosphatation (0,2 à 0,3 mg de P/L est envisageable). Dans le cas d'une déphosphatation physico-chimique amont, une surveillance accrue du procédé devra être effectuée pour éviter les risques de colmatage.
- **La mise en place d'une filtration sur sable** à l'aval d'une clarification secondaire. Cette filière permet une bonne rétention des MES (avec un rejet de l'ordre de 7 à 8 mg MES/L) et donc un rejet en PT faible et inférieur à 0,8 mg/L. Par contre, cette filière nécessite, pour une même gamme de débit, une surface plus élevée.

LES PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT

RAPPELS DES BASES DE DIMENSIONNEMENT PROPOSEES PAR LES CONSTRUCTEURS

Dans la suite de ce document, seulement deux technologies sont présentées en raison d'un nombre d'installations équipées significatif : les procédés **Densadeg®** et **Actiflo®**. Le procédé **Delreb®** étant encore peu commercialisé et les données disponibles insuffisantes, ses performances pourront être approchées de celles du procédé Densadeg® dont le principe de fonctionnement est relativement proche.

Aspects Hydrauliques

Les données de dimensionnement des constructeurs sont annoncées par rapport au débit de pointe horaire, paramètre retenu lors du dimensionnement de ce type d'ouvrage.

		Densadeg®	Actiflo®
Temps de passage minimum (en minutes)			
Coagulation	de l'ordre de	2	1
Floculation	de l'ordre de	Au moins 2 fois plus long en floculation 4,5 à 5	2 à 3
Décantation	de l'ordre de	15 à 20	4 à 6
Temps de séjour minimum dans l'ouvrage	de l'ordre de	25	8

Puissance de brassage		
Coagulation	de l'ordre de	Besoin de 50% d'efficacité de brassage en plus pour l'Actiflo® par rapport au Densadeg®
Floculation		De 2 à 3 fois plus faible en floculation

La vitesse ascensionnelle ou vitesse de Hazen, exprimée en $m^3/m^2.h$, est obtenue par le ratio du débit de pointe horaire appliqué sur l'ouvrage sur une surface donnée.

En décantation lamellaire, selon la surface retenue, deux vitesses de dimensionnement peuvent être calculées. On parlera de vitesse au

miroir, lorsqu'on tient compte de la surface horizontale du bloc lamellaire, dite standard, et de vitesse STP lorsqu'on tient compte de la Surface Totale Projetée des plaques (cf. Fiche technique n°1 : Rappel des différentes formules utilisées sur ce type d'ouvrage).

	Densadeg®	Actiflo®
Vitesse au Miroir ($m^3/m^2.h$)		
Ordre de grandeur de la vitesse ascensionnelle au miroir maximale de dimensionnement sur le décanteur lamellaire (en m/h) pour une efficacité équivalente et sans rejet « dégradé »		
En primaire	30	100
En tertiaire	30	60
En pluvial seul	40 à 100	140

Tableau 8 – Principaux paramètres hydrauliques de dimensionnement

Les ordres de grandeur annoncés varient en fonction de l'emplacement du procédé dans la filière de traitement.

On observe des vitesses ascensionnelles nettement supérieures sur le procédé Actiflo®. Elles s'expliquent essentiellement par l'utilisation

du micro-sable qui leste fortement les floccs et permet une vitesse de sédimentation des floccs supérieure.

Ceci autorise des vitesses ascensionnelles de dimensionnement plus élevées et des ouvrages plus compacts.

Des vitesses ascensionnelles plus importantes sont rencontrées dans la bibliographie, mais elles sont annoncées « en situation exceptionnelle » ou dans le cas de l'acceptation « d'un rejet dégradé ».

Dans notre configuration en traitement tertiaire avec physico-chimie, la vitesse ascensionnelle au miroir est la référence de dimensionnement hydraulique (avec prise en compte de la surface du bloc lamellaire où circule l'eau - cf. fiche n°1). La vitesse ascensionnelle STP, représentant la vitesse de séparation des particules dans les lamelles, a moins d'intérêt dans notre problématique, les lamelles assurant surtout l'équilibre de la répartition hydraulique sur l'ouvrage.

Consommation de réactifs

En France, le réactif de coagulation le plus communément utilisé est le **Chlorure ferrique (FeCl₃)**. Néanmoins, d'autres réactifs peuvent le remplacer comme par exemple les sels d'aluminium (Polychlorure d'aluminium - AlCl₃ ; Aluminate de sodium – AlO₂⁻Na⁺).

Les doses de réactifs apportées sont principalement fonction du lieu d'insertion de l'ouvrage dans la filière, donc de la concentration en phosphore, en matières colloïdales et décantables à traiter, et de l'abattement escompté.

Ainsi, on notera des quantités plus élevées en coagulant et floculant pour le traitement Primaire et pour le réglage en « période pluvieuse » des ouvrages mixtes (Tertiaire / temps de pluie).

Les ordres de grandeur des taux de traitement de dimensionnement observés sont les suivants, en mg de produit par Litre d'eau à traiter (ou g/m³) :

En traitement primaire	Densadeg®	Actiflo®
FeCl ₃ pur	30 à 50 mg /L	
Polymère anionique	0,5 à 1,5 mg /L *	
Sable (pertes)	/	3 à 6 g /m ³ **

* avec des doses croissantes en fonction des concentrations en particulaire en entrée

** suivant le taux de sable

Tableau 9 – Taux de traitement de dimensionnement en I^{aire}

avec :

1 litre de solution commerciale de FeCl₃
 = 0,41 Litre de FeCl₃ pur
 = 205 g de Fer (soit 14% en poids de la solution commerciale)

(pour une solution commerciale à 41% de FeCl₃ – 34.5% de Fe dans FeCl₃ et Masse Volumique de 1,45 kg/L)

Spécificité du traitement primaire

Selon la filière aval, la dose de réactifs est fonction du traitement souhaité mais un résiduel en orthophosphates est indispensable pour l'activité biologique

En cas d'apport trop important de coagulants, les dysfonctionnements possibles sont dus à :

- Un déséquilibre nutritionnel par une élimination trop élevée de Phosphore sur l'étage (ratio C/ N/P nécessaire à la biomasse à rééquilibrer).
- Une acidification de l'effluent préjudiciable au traitement biologique, en particulier sur des installations où le pouvoir tampon des eaux à traiter est faible.
- Une augmentation de la conductivité.

Un poste fixe d'apport de Chaux peut être installé en complément du traitement primaire. Cet apport est indispensable pour maintenir un pH correct nécessaire au processus de coagulation floculation sur les sites où le TAC est particulièrement faible. En l'absence de compensation du pH et pour des

eaux faiblement tamponnées, l'alcalinité de l'eau diminue et peut devenir un facteur limitant pour les processus de nitrification du procédé biologique aval. (cf. fiche n°2 : Réduction du TAC sur une filière de traitement).

Spécificité du traitement tertiaire et du traitement temps de pluie

Les doses moyennes sont les suivantes :

Densadeg® et Actiflo®	En traitement tertiaire	En traitement temps de pluie
FeCl ₃ pur	10 à 90 mg/L	50 mg/L
Polymère anionique	0,5 à 1,5 mg/L *	
Sable (pertes) pour l'Actiflo®	3 à 6 g/m ³ **	

* avec des doses croissantes en fonction des concentration en particulaire en entrée

** suivant le taux de sable

Tableau 10 – Taux de traitement de dimensionnement en III^{aire} et en temps de pluie

On note des doses plus élevées pour le procédé Actiflo® (valeurs hautes du tableau ci-dessus) qui s'expliquent par la ré-injection de sable lavé suite au passage dans l'hydrocyclone d'où un dosage supérieur pour faciliter la cohésion des particules entrantes avec le sable.

A signaler aussi, une fuite de sable continue avec les boues extraites et l'eau traitée (répartition des pertes de l'ordre de 50/50) qui implique le suivi in-situ de ce paramètre et le « rechargement » régulier en sable de l'ouvrage pour fonctionner à un taux constant. Une perte de sable d'un ratio de 1/1000^{ème} du taux de sable mesuré dans le floculateur est annoncé par le constructeur.

Résultats attendus

Les performances de ces systèmes sont variables et dépendent des doses de réactif apportées, de

la composition des effluents d'entrée (en particulier sur la répartition entre les différentes fractions caractéristiques que sont le particulaire, le colloïdale et le dissous) et du taux de dilution de l'effluent à traiter.

Les performances de traitement escomptées sur ces procédés sont les suivantes :

En Traitement Primaire

Les performances annoncées sont proches voir légèrement supérieures de celles obtenues sur un traitement primaire physico-chimique classique. Le gain est plus en terme de compacité de l'ouvrage.

Concentration (mg/L)	Traitement primaire Physico-chimique classique	
	Rendement	Concentration de sortie (sur la base d'une E.R.U normalement concentrée)
MES	> 75%	< à 65 mg de MES/L
DCO	> 55%	< à 310 mg de DCO/L
DBO	> 55%	< à 130 mg de DBO ₅ /L
NK	proche de 10%	Proche de 65 mg de NTK/L
P _T	variable en fonction du taux de traitement et pouvant atteindre 80%	< à 2,5 mg de PT/L

Tableau 11 – Résultats et performances attendues en traitement Primaire

Ces rendements, légèrement supérieurs au décanteur classique, sont principalement dus à une meilleure optimisation des différents étages

composant le système (brassage, point d'injection, mode d'injection,...).

En Traitement Tertiaire

	Densadeg®	Actiflo®
P-PO₄³⁻	Concentration de sortie en P-PT < 1 mg de PT/L	
P-PT	Concentration de sortie en P-PO ₄ ³⁻ < 0.5 mg/L et Rendement > 80%	
MES	Concentration de sortie en MES < 10 mg/L et Rendement de 60%	
DCO	Abattement de la fraction particulaire seule : Concentration de sortie et rendement fonction de la capture des MES sur l'ouvrage	
DBO₅		
NK		

Tableau 12 – Résultats et performances attendues en traitement III

Ces performances dépendent fortement des doses de réactifs apportées, de la charge en MES et du phosphore à traiter.

En Traitement des eaux de pluie

Pour les eaux de pluies, les performances sont très voisines de celles obtenues en traitement primaire, voir légèrement supérieures, avec des vitesses ascensionnelles annoncées plus importantes. Elles s'expliquent surtout par une fraction particulaire en début d'épisode pluvieux plus élevée qui permet l'obtention d'un abattement plus important. Par contre, au cours de l'épisode pluvieux, cet abattement diminue fortement compte tenu d'un flux de pollution décroissant (et d'une concentration très faible) suite au nettoyage du réseau.

Concentration et production de boues

Concentration des boues extraites

Les concentrations des boues à l'extraction diffèrent fortement entre les deux procédés comme le montre les valeurs rassemblées dans le tableau ci-dessous :

	Densadeg®	Actiflo®*
Primaire	40 - 80 g/L	3 - 10 g/L
Tertiaire	30 - 60 g/L	0,6 - 1,4 g/L
Eaux Pluviales**	35 - 80 g/L	4 - 20

* en sortie de l'hydrocyclone

** suivant la période de l'épisode pluvieux (début/fin)

Tableau 13 – Concentrations des boues extraites des clari-floculateurs

Les concentrations sont liées au flux particulaire entrant et à la technologie retenue:

- Pour le Densadeg®, l'objectif est d'obtenir une concentration de boue donnée dans le floculateur pour permettre un bon contact entre les boues recirculées et les eaux à traiter et faciliter ainsi le piégeage des fines particules. On conseille dans le floculateur une concentration supérieure à 0,5 g/L.

On travaillera avec une hauteur de lit de boue donnée qui permettra de maintenir une quantité de boue nécessaire au procédé, avec un taux de recirculation dépendant de la concentration dans le lit de boue et de l'objectif fixé dans le floculateur.

- La conception de l'Actiflo® est très différente compte tenu de l'utilisation du micro-sable. La boue est évacuée régulièrement puisque l'objectif est de maintenir un taux donné de sable dans le flocculateur et non une concentration en boue. La boue sableuse extraite à la base du clari-flocculateur est recirculée vers un hydrocyclone (fonction de séparation du sable de la boue) avec récupération du sable en sous-verse et évacuation continue des boues en sur-verse. Le bon fonctionnement de l'hydrocyclone nécessite un débit donné (élevé), ce qui entraîne les faibles concentrations observées sur les boues d'extraction. L'objectif est de maintenir un taux de sable donné dans l'ouvrage.

Production de boue

La production de boue sur l'ouvrage de Clariflocculation est fonction de la quantité de MES abattue, de la quantité de $FePO_4$ et de $Fe(OH)_3$ formés ainsi que par les pertes de sable pour l'Actiflo® (le sable extrait avec les boues via les hydrocyclones, représente une quantité inférieure à 5% du poids des extractions d'après le constructeur).

L'utilisation de fortes doses de coagulant voir de surdosages est à l'origine d'importantes quantités de boues produites par production élevée d'hydroxyde ferrique (cf. fiche n°5 : Calcul de la production de boue).

Les productions de boues annoncées sont les suivantes :

Production de boue primaire	Jusqu'à 80% de la quantité de boue totale pour une installation équipée d'une filière boue activée (cas particulier des charges variables). De l'ordre de 75% de la quantité de boue totale pour une installation équipée d'une filière biofiltres.
Production de boue tertiaire	Sur une installation équipée d'une boue activée, de l'ordre de 8 % (temps sec) à 30% (période pluvieuse) de la quantité de boue totale. Sur une installation équipée de biofiltres (avec un étage primaire avec physico-chimique) : de l'ordre de 10% de la quantité de boue totale et peut atteindre 15 à 20% si l'étage primaire fonctionne sans physico-chimique.

Tableau 14 – Production de boues

Les proportions de productions de boue sont uniquement des ordres de grandeur moyens car elles peuvent varier considérablement selon les rendements réels obtenus par étage.

En tertiaire, les différences de pourcentage annoncées s'expliquent principalement :

- Sur une filière boue activée, la production spécifique de boue est plus faible car elle dépend de la charge massique (C_m en kg de DBO_5 appliquée par kg de MVS et par jour), avec une production spécifique de boue (PSB en kg de MVS produite par kg de DBO_5 éliminé et par jour) plus faible pour les faibles C_m (mécanisme d'auto oxydation).

- Sur une filière biofiltration, la production de boue à l'amont du traitement biologique est plus élevée pour les raisons suivantes : présence systématique d'un traitement primaire avec ou sans réactifs physico-chimiques et d'un procédé biologique intensif d'où une Charge volumique importante ce qui entraîne une production spécifique de boue (PSB) plus élevée.

- La conception de l'Actiflo® est très différente compte tenu de l'utilisation du micro-sable. La boue est évacuée régulièrement puisque l'objectif est de maintenir un taux donné de sable dans le flocculateur et non une concentration en boue. La boue sableuse extraite à la base du clari-flocculateur est recirculée vers un hydrocyclone (fonction de séparation du sable de la boue) avec récupération du sable en sous-verse et évacuation continue des boues en sur-verse. Le bon fonctionnement de l'hydrocyclone nécessite un débit donné (élevé), ce qui entraîne les faibles concentrations observées sur les boues d'extraction. L'objectif est de maintenir un taux de sable donné dans l'ouvrage.

Production de boue

La production de boue sur l'ouvrage de Clariflocculation est fonction de la quantité de MES abattue, de la quantité de $FePO_4$ et de $Fe(OH)_3$ formés ainsi que par les pertes de sable pour l'Actiflo® (le sable extrait avec les boues via les hydrocyclones, représente une quantité inférieure à 5% du poids des extractions d'après le constructeur).

L'utilisation de fortes doses de coagulant voir de surdosages est à l'origine d'importantes quantités de boues produites par production élevée d'hydroxyde ferrique (cf. fiche n°5 : Calcul de la production de boue).

Les productions de boues annoncées sont les suivantes :

Production de boue primaire	Jusqu'à 80% de la quantité de boue totale pour une installation équipée d'une filière boue activée (cas particulier des charges variables). De l'ordre de 75% de la quantité de boue totale pour une installation équipée d'une filière biofiltres.
Production de boue tertiaire	Sur une installation équipée d'une boue activée, de l'ordre de 8 % (temps sec) à 30% (période pluvieuse) de la quantité de boue totale. Sur une installation équipée de biofiltres (avec un étage primaire avec physico-chimique) : de l'ordre de 10% de la quantité de boue totale et peut atteindre 15 à 20% si l'étage primaire fonctionne sans physico-chimique.

Tableau 14 – Production de boues

Les proportions de productions de boue sont uniquement des ordres de grandeur moyens car elles peuvent varier considérablement selon les rendements réels obtenus par étage.

En tertiaire, les différences de pourcentage annoncées s'expliquent principalement :

- Sur une filière boue activée, la production spécifique de boue est plus faible car elle dépend de la charge massique (C_m en kg de DBO_5 appliquée par kg de MVS et par jour), avec une production spécifique de boue (PSB en kg de MVS produite par kg de DBO_5 éliminé et par jour) plus faible pour les faibles C_m (mécanisme d'auto oxydation).

- Sur une filière biofiltration, la production de boue à l'amont du traitement biologique est plus élevée pour les raisons suivantes : présence systématique d'un traitement primaire avec ou sans réactifs physico-chimiques et d'un procédé biologique intensif d'où une Charge volumique importante ce qui entraîne une production spécifique de boue (PSB) plus élevée.



Les résultats abordent uniquement le traitement tertiaire car son dysfonctionnement a des conséquences immédiates sur le non-respect des rendements escomptés et donc sur la qualité des eaux rejetées. Par contre, l'étude du traitement primaire (à l'exception de l'analyse des dossiers de dimensionnement) n'a pas été retenue car, lors de périodes d'anomalie du traitement, l'étape de traitement secondaire aval de type biologique permet de réduire fortement ce dysfonctionnement sur la qualité des eaux rejetées.

LES PERFORMANCES MESUREES EN TERTIAIRE

Les mesures des performances des clari-floculateurs en traitement tertiaire se sont déroulées sur quatre installations différentes

	DCO*	DBO ₅ *	MES*	NGL**	PT**
Concentration (mg/L)	65 à 125	20 à 25	20 à 35	10 à 15	0,8 à 1
Rendement (%)	75 à 95	90 à 95 %	90 à 95 %	90 à 95	90

* en moyen journalier

** en moyenne annuelle

Tableau 15 – Qualité de l'effluent demandée pour les sites étudiés

De plus, les sites doivent répondre aux deux contraintes concentration et rendement (exigence retenue élevée). Des valeurs rédhitoires de concentration pour chaque paramètre sont précisées pour deux installations :

équipées des deux principaux procédés : deux en Densadeg® et deux en Actiflo®.

Les clari-floculateurs suivis sont installés à l'aval d'un traitement biologique de type boue activée, avec ou sans déphosphatation biologique. Ils sont tous dimensionnés pour un traitement mixte temps sec / temps de pluie ce qui signifie qu'hydrauliquement, ils sont sous chargés en temps sec et en temps de pluie, ils traitent sur les sites étudiés les eaux issues de la filière biologique (100 % de sa charge) et le complément retenu sur le tertiaire est assuré par les eaux de temps de pluie après passage par le poste prétraitements.

QUALITE DES EAUX REJETEES ET RENDEMENTS D'ELIMINATION

Les niveaux de rejet demandés en sortie tertiaire des installations étudiées sont les suivants :

- DCO : 90 mg/L ; DBO₅ : 30 mg/L ; MES : 80 mg/L ; NGL : 20 mg/L ; PT : 3 mg/L (cas très exigeant)
- DCO : 250 mg/L ; DBO₅ : 50 mg/L ; MES : 85 mg/L

L'analyse des valeurs de la qualité des eaux demandée peut être pour certain dossier très exigeante voir trop importante en raison des conséquences impliquées et plus particulièrement des coûts d'investissement. A titre d'exemple, l'obtention d'un rendement en DCO totale de 95 % est quasiment impossible compte tenu d'un talon réfractaire (ou DCO dure) de l'ordre de 30 – 35 mg/L ce qui signifie un rejet nul en MES et en DCO biodégradable.

Le choix du traitement tertiaire pour les installations suivies s'explique principalement par le niveau de rejet demandé en Phosphore total, inférieur à 1 mg/L. Dans ces cas, un traitement tertiaire s'avère indispensable. Il faut noter que la notion de rendement de 90% est également un paramètre difficile à tenir sur les installations traitant des eaux usées fortement diluées où les flux à traiter en phosphates sont en nette régression.

Les taux de charge hydraulique des installations suivies lors de nos mesures étaient variables avec deux sites proches de 50 % de leur charge de dimensionnement de temps sec (53 / 64 %) et 2 sites plus proches de leur nominale de temps sec (86% et 105% avec des effluents très dilués).

On observe parfois un niveau de rejet pour le temps sec et un niveau moins poussé pour le temps de pluie. Le passage en temps de pluie est souvent associé à un dosage différent au niveau des réactifs injectés.

Les ouvrages étant dans une configuration Tertiaire, l'effluent à traiter est issu d'un traitement biologique par boue activée.

La fourchette de concentrations mesurées en entrée et sortie sur des prélèvements moyens journaliers proportionnels au débit, ainsi que les performances obtenues, sont les suivantes :

	DCO	MES	PT	PO₄³⁻
Entrée tertiaire en mg/L	23 à 41	5 à 18	1 à 1,95	0,84 à 1,45
Sortie en mg/L	20 à 33	2 à 8	0,18 à 0,65	0,05 à 0,24
Niveau de rejet demandé en mg/L	65 à 125	20 à 30	0,8 à 1	/
Rendement mesuré en %	2 à 35	19 à 55	61 à 84	74 à 94

Tableau 16 – Performances mesurées durant les suivis

On observe à l'entrée du tertiaire le respect des niveaux de rejet demandés à l'exception du PT. Ces résultats confirment bien le créneau d'application du traitement tertiaire (réduction des phosphates et des MES). En poussant l'analyse et plus particulièrement l'impact du phosphore sur le milieu récepteur, ce sont les orthophosphates qui interviennent sur les mécanismes d'eutrophisation et la valeur de 1 mg de PT/L est composé principalement de Phosphore constitutif lié à la perte de MES (20 mg de MES /L à l'entrée tertiaire avec 4,5 % de P /g de MES apporte 0,9 mg de PT /litre). Dans certains cas, la réflexion pourrait être menée sur les orthophosphates (et non sur le PT) et sur les MES, DCO et DBO₅ limite.

Les concentrations des eaux d'entrée dépendent essentiellement du traitement biologique situé à l'amont. On remarque de faibles concentrations en particulaire (MES) malgré des Indices de Boue variant de 85 à 190 mL/g, qui illustrent le bon

dimensionnement des clarificateurs secondaires amont. Cette bonne rétention du particulaire est confirmée par les concentrations en Phosphore total mesurées. Les concentrations d'entrée tertiaire en orthophosphate sont également peu élevées suite à l'utilisation d'une déphosphatation biologique sur certains sites, mais pas toujours suffisante pour pouvoir se passer de l'étage tertiaire. Rappelons qu'une boue activée avec déphosphatation biologique associée à une co-précipitation permet d'atteindre des concentrations de 0,2 à 0,3 mg de P-PO₄³⁻/L.

Les concentrations des eaux de sortie sont également faibles avec des rejets en moyen journalier inférieurs à 0,65 mg/L de PT et sont conformes aux niveaux de rejet demandés.

Au niveau des rendements obtenus, leur variabilité est essentiellement due :

- Aux faibles concentrations en MES et en PT d'entrée,
- Et aux paramètres de fonctionnement de l'ouvrage, comme le taux de chlorure ferrique apporté, le taux de sable ou de boue, qui

dictent directement le rendement d'élimination en $P-PO_4^{3-}$.

Après un traitement tertiaire bien dimensionné et optimisé, les concentrations attendues en sortie sont de l'ordre de :

	DCO	MES	PT
Niveaux de rejet escomptés en mg/L	< à 40 - 45	7 – 10	< 0,8

Tableau 17 – Concentrations attendues en sortie de traitement tertiaire

CONCENTRATION ET PRODUCTION DE BOUES

Les concentrations mesurées à l'extraction des boues de l'étage tertiaire sont les suivantes :

	Densadeg®	Actiflo®*
Concentration en MES en g/L	20 à 34	0,2 à 1,06
Taux de MVS en %	30 à 49	20 à 33

* en sortie des hydrocyclones

Tableau 18 – Concentrations mesurées des boues extraites des clari-floculateurs

Les différences observées sont inhérentes au procédé :

- Sur le Densadeg®, les boues sont concentrées en fond du décanteur lamellaire équipé d'une herse. La concentration des boues extraites va donc dépendre du taux de recirculation en tête de l'ouvrage et de son aptitude à l'épaississement.
- Pour l'Actiflo®, l'extraction des boues est continue via les hydrocyclones, il n'y a pas de phase d'épaississement au sein de l'ouvrage. Les variations sont dues au flux de MES éliminées et au flux de précipité lié à l'apport de coagulant.

Les taux de MVS très bas sont liés au procédé physico-chimique accentué par des boues (MES à l'entrée de l'ouvrage) bien minéralisées. La teneur en fer présent dans ces boues tertiaires a également été mesurée, le ratio Fe / MES se situant entre 16 et 40 %.

Le suivi de la production de boue a été réalisé par l'échantillonnage en entrée / sortie de l'étage de traitement (rétention des MES et élimination des orthophosphates), par le suivi des extractions des boues tertiaires et des taux de traitement appliqués à l'étage ; la hauteur du lit de boue et la concentration en boue dans le floculateur étant constant (cf. fiche n°5 : Calcul de la production de boue).

Ils donnent, pour le procédé une production spécifique de boue tertiaire de l'ordre de 17 à 55 kg de MES / kg de $P-PO_4^{3-}$ éliminé.

Sites	Production spécifique de boue tertiaire	
	kg de MES extraites / kg de P-PO ₄ ³⁻ éliminé	g de MES extraites / m ³ d'eau traitée
A	17 à 18	16 à 17
C	50 à 55	45 à 50
D	32,5	20
Moyenne	35	28

Tableau 19 – Productions spécifiques de boue mesurées

On note une très forte variabilité des résultats car cette production est très dépendante de la qualité des eaux d'entrée (traitement plus ou moins poussé à l'amont), et surtout du taux de coagulant réellement appliqué (cf. fiche n°6 : Conséquence d'une mauvaise optimisation du dosage de coagulant sur la production de boue).

En général, pour le Densadeg®, la production de boue tertiaire est composée en moyenne de :

- 20% des MES retenues sur l'ouvrage
- 75% de boues physico-chimiques (FePO₄ et Fe(OH)₃)
- et de 5 % de polymère

Pour le procédé Actiflo®, cette production de boue est supérieure du fait d'une perte continue de sable avec les boues via l'hydrocyclone, de l'ordre de 2,5 g/m³ d'eau traitée. Durant nos suivis, cette production spécifique est à augmenter de 10 à 15% par la fuite de sable dans les boues en excès.

Les productions de boues calculées sur l'étage tertiaire sont ramenées à la production de boue totale des installations. Ainsi les productions de boues de l'étage tertiaire sont de l'ordre de 7 à 25% de la production de boue totale de la station d'épuration, sans boue primaire.

ANALYSE DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT

ASPECT HYDRAULIQUE ET DETECTION DES LIMITES

Les campagnes de mesures se sont déroulées sur plusieurs jours, en fonctionnement « normal » par temps sec. Quand l'installation était équipée de plusieurs files en parallèle, le système a été poussé hydrauliquement une journée par fermeture d'une file lorsque cela était possible pour se rapprocher de la vitesse de pointe retenue.

Les vitesses ascensionnelles au miroir mesurées durant les suivis sont résumées ci-dessous :

Vitesse ascensionnelle au miroir en m/h	Densadeg®	Taux de Charge	Rappel du dimensionnement Temps de pluie	Actiflo®	Taux de charge	Rappel du dimensionnement Temps de pluie
Moyenne	8 à 9	30%	29	15 à 18	20%	77 à 88
Maximales	14,7	50%		54	60%	

Tableau 20 – Vitesses ascensionnelles mesurées lors des suivis

Les essais sont réalisés avec des charges hydrauliques à traiter nettement inférieures à celle prévues au dimensionnement, ceci même en fermant une file lorsque cela était possible.

A ces charges hydrauliques maximales mesurées, aucune différence de qualité du rejet n'est observée en comparaison des mesures à débit plus faible. La qualité des eaux rejetées est largement conforme aux exigences demandées.

Durant les mesures, les résultats d'hydraulique maximale obtenus sur les sites sont uniquement des tendances spécifiques. En effet, les installations existantes sont rarement à leur charge hydraulique de dimensionnement (Q pointe de Temps sec) et les véritables épisodes pluvieux sont de courte durée et donc difficiles à mesurer.

Les visites de nombreux sites montrent des pertes de fines variables en durée :

- Lors du passage d'un temps sec en temps de pluie,
- Suite à un nettoyage du système,
- Et lors d'un colmatage d'une partie du module principalement par les algues.

De plus, les limites d'hydraulique maximale sont spécifiques à chaque site étudié. En effet, la qualité du rejet pour une vitesse ascensionnelle donnée dépend énormément de l'état de fonctionnement du système au moment de cette pointe, avec en particulier :

- La quantité de floc formé et son état de maturation (taille du floc),
- Le taux de traitement appliqué et son asservissement,
- Le taux de sable ou taux de boue effectif dans l'ouvrage et plus particulièrement au niveau du flocculateur,
- Le degré d'encrassement ou de colmatage du bloc lamellaire,
- Le flux de particulaire à traiter et ses caractéristiques...

Ainsi, des valeurs de limites hydrauliques pour chaque système n'ont pas pu être arrêtées, l'état et l'historique du système étant prépondérants.

En exemple, les données d'auto surveillance sur une période de deux années consécutives d'une installation équipée d'un clari-flocculateur en tertiaire permettent l'illustration suivante :

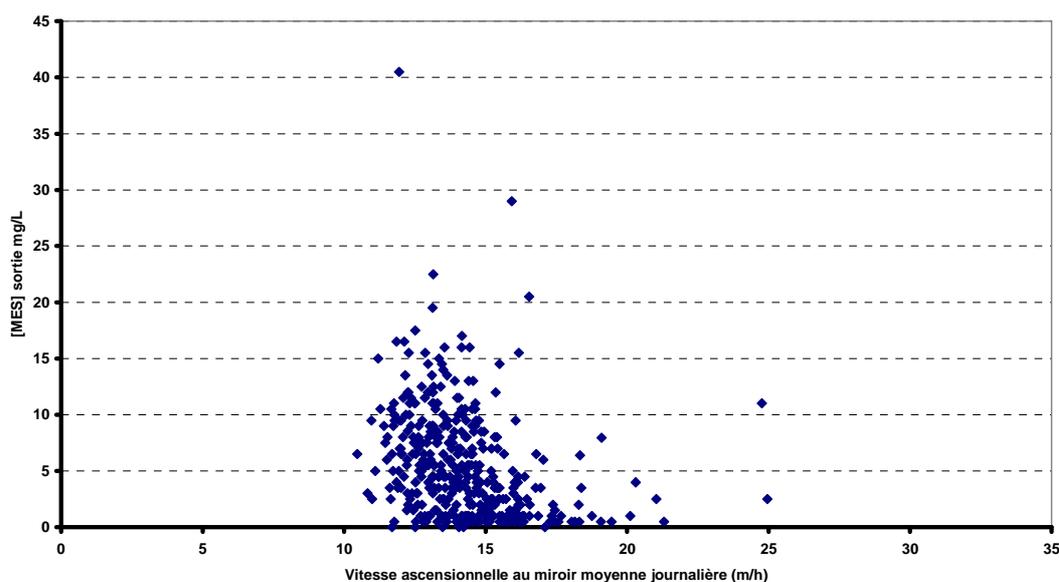


Figure 2 – Concentration moyenne journalière en MES de sortie en fonction de la vitesse au miroir moyenne journalière

Pour ce site, la vitesse ascensionnelle au miroir de dimensionnement retenue est de 29 m/h en pointe de temps de pluie (21 m/h en pointe de temps sec) avec une qualité d'eau de sortie en MES de 35 mg/L en moyenne journalière.

On observe que la dispersion des points obtenus (MES de sortie) n'est pas en relation avec la gamme de vitesse ascensionnelle appliquée. Des débits importants sur une durée de 24 heures sont inexistantes et les paramètres de fonctionnement de l'étage varient dans le temps et influent sur la qualité du rejet.

Il est à noter que le dépassement des limites hydrauliques de l'ouvrage sur une courte durée (de l'ordre de l'heure) peut induire une dégradation des rejets qui est difficile à mettre en

évidence au niveau du prélèvement moyen journalier de sortie (dilution des prélèvements de pointe sur 24 heures).

Cette dégradation ponctuelle du rejet durant la journée a été observée lors de nos mesures par le suivi des enregistrements en continu de la turbidité, des phosphates et de la DCO. La turbidité et la DCO augmentent au sein de la journée avec les débits traités accompagnés de pics de rejets en phosphate.

En deuxième exemple, un clari-floculateur a été instrumenté pour son suivi spécifique en période de fonctionnement de la file orage (vitesse ascensionnelle élevée). Les résultats obtenus au niveau de l'épisode pluvieux et non de la journée sont regroupés sur la figure suivante :

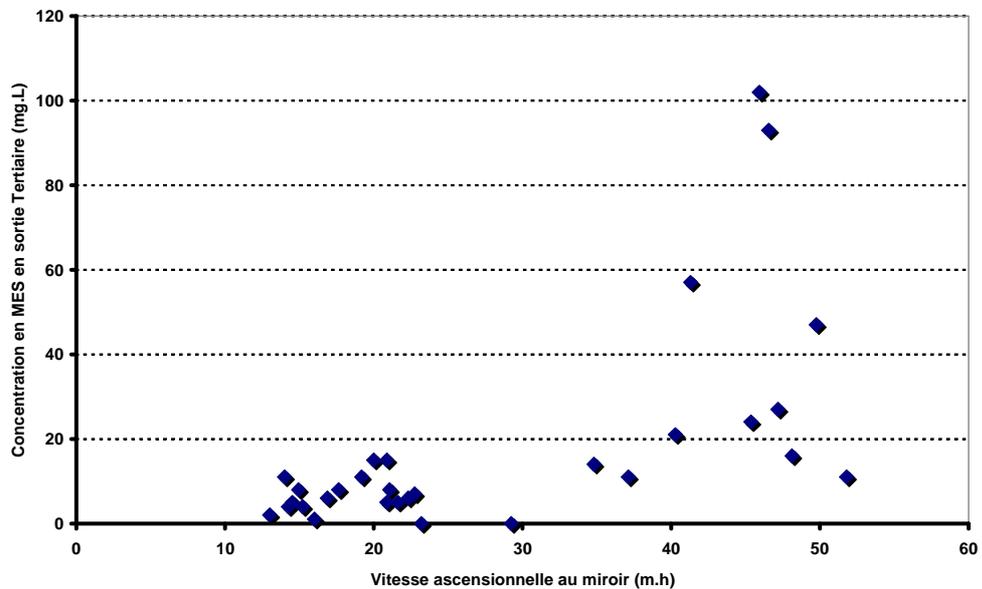


Figure 3 – Concentration ponctuelle en MES de sortie en fonction de la vitesse ascensionnelle au miroir

Pour ce site, la vitesse ascensionnelle au miroir de dimensionnement retenue est de 77 m/h en pointe d'orage, avec une qualité d'eau de sortie en MES de 20 mg/L en moyenne journalière.

On observe, sur ce site, une nette dégradation du rejet au niveau des MES lorsque les vitesses ascensionnelles augmentent. La gamme suivie en période pluvieuse est de 35 à 55 m/h au miroir et correspond au fonctionnement hydraulique maximum de l'installation.

La dispersion des points obtenus pour cette même gamme de vitesse est à rapprocher des paramètres de fonctionnement qui varient dans le

temps comme la charge particulaire à traiter suivant l'épisode pluvieux, le taux de sable effectif dans l'ouvrage, la durée de la pointe hydraulique, le taux traitement,....

CHARGE PARTICULAIRE APPLIQUEE : COMPOTEMENT FACE A UNE PERTE DE BOUES (/ MES)

Deux essais successifs ont été réalisés pour tester l'impact d'une perte de boue du clarificateur secondaire sur le clari-floculateur tertiaire. Les essais sont réalisés avec pompage continu de boues du bassin d'aération vers l'alimentation du

tertiaire, avec une alimentation proche de 50 mg/L de MES durant plus de quatre fois le temps de séjour dans l'ouvrage, simulant ainsi

une perte accidentelle mais continue des boues. Les résultats obtenus sont les suivants :

	1 ^{er} essai			2 ^{ème} essai		
	Entrée	Sortie	Rendement	Entrée	Sortie	Rendement
MES en mg/L	48	8	83 %	50	6	88%
DCO en mg/L	65	< 30	> 54%	70	< 30	< 57%
PT en mg/L	1,7	0,42	75%	1,45	0,25	83%
P-PO ₄ ³⁻ en mg/L	0,88	0,18	79%	0,26	0,08	69%
ratio P-PO ₄ ³⁻ / PT	51,8	42,9		17,9	32	
Vitesse au miroir	15 m/h			17 m/h		
Temps de séjour	42 mn.			38 mn.		
Taux de traitement	15 g de FeCl ₃ pur / m ³ d'eau traitée 1 g / m ³					
Coagulant FeCl ₃						
Polymère						

Tableau 21 – Résultats des essais de pertes de MES du clarificateur

Les rendements d'abattement sont excellents et confirment l'efficacité de ces systèmes lors de pertes accidentelles de boue.

Les mesures et l'observation des eaux traitées ne montrent aucune dégradation pour des faibles vitesses ascensionnelles (17 m/h au miroir pour 77 m/h de dimensionnement en temps de pluie).

Le clarificateur permet une sécurité vis à vis du milieu récepteur pour des pertes de boues de l'ordre de 50 mg/L de MES.

La visite de différents sites nous a permis de confirmer ce comportement face aux pertes de MES, certains exploitants utilisant volontairement cette sécurité lors de travaux temporaires sur les clarificateurs secondaires à l'amont ou pour l'évacuation des flottants (boues en anaérobies dues essentiellement à une dénitrification sauvage) en surface de ces clarificateurs.

Ce type de fonctionnement induit par contre la présence importante de flottants en surface de la zone de tranquillisation qu'il faut évacuer régulièrement.

Par contre le fonctionnement des clari-floculateurs peut être perturbé lors des épisodes de dysfonctionnement biologiques : IB élevé, vitesse de décantation moindre pénalisant la décantation des floccs au sein de l'ouvrage.

Pour une installation où l'ouvrage était à l'arrêt (fonctionnement en traversier uniquement) des difficultés très importantes sont rencontrées lors du démarrage pour obtenir un floc bien formé.

PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT ET REGLAGES SPECIFIQUES

Les réglages des principaux paramètres de fonctionnement du process sont synthétisés ci-après :

Taux de boue, de recirculation et de sable

	mesuré	préconisé
Taux de Recirculation (Densadeg®) (Actiflo®)	4,3% du débit entrant 10 à 11% du débit entrant	2 à 5% du débit de pointe 6% du débit de pointe
Densadeg® : Taux de boue dans le flocculateur	0,4 à 0,7 g/L	0,5 g/L
Actiflo® : Taux de sable dans le décanteur	1,3 à 1,7 kg/m ³	2 à 4 kg/m ³

Tableau 22 – Paramètres de fonctionnement durant nos mesures

La recirculation des boues ou du sable est asservie au débit entrant ou traité par le fonctionnement soit d'une ou des pompes à débit variable pour le procédé Densadeg® ou de une ou plusieurs pompes pour le procédé Actiflo®. Pour ce dernier, un débit donné doit être appliqué sur l'hydrocyclone pour permettre la bonne séparation du sable et de la boue.

Les taux de recirculation observés sont supérieurs à ceux préconisés et s'expliquent par le fonctionnement en sous-charge hydraulique des sites.

Les quantités de boues dans le flocculateur sont suffisantes, par contre les taux de sable mesurés

sont inférieurs à ceux préconisés. Ces faibles taux n'ont pas eu d'influence sur les performances du système du fait des débits d'alimentation durant les suivis très inférieurs aux limites hydrauliques (50 à 60% du dimensionnement).

Consommation de réactifs

Le fonctionnement des clari-flocculateurs nécessite l'apport continu de coagulant et de flocculant. Ceux ci sont asservis le plus souvent au débit traité.

Lors de nos mesures en fonctionnement « normal » par temps sec, les apports de réactifs, ou taux de traitement, étaient les suivants :

	FeCl ₃ pur	Polymère anionique
Taux de traitement	De 15 à 70 mg/L	De 0,5 à 1,1 mg/L
Ratio molaire Fe/P	2,5 à 13,8	/

Tableau 23 – Taux de traitement mesurés lors des suivis

Le coagulant utilisé sur l'ensemble des sites (mesuré et visité) est toujours le chlorure ferrique. Les taux de traitement mesurés correspondent plus ou moins aux valeurs de consigne entrées dans l'automate de gestion du procédé. On note souvent une absence d'optimisation de ce poste pourtant fortement conseillée.

La plage de variation présentée reflète bien la diversité des objectifs retenus par l'exploitant et du fonctionnement des sites. En effet, le taux de traitement découle du rendement de déphosphatation désiré sur l'étage et donc du

ratio molaire Fe / P visé. On note des taux appliqués proches de ceux préconisés par le constructeur (en particulier lors du dimensionnement), avec des valeurs extrêmes de 70 mg de FeCl₃ pur /L qui impliquent un ratio molaire Fe/P de 13,8 et des rendements sur le phosphore supérieurs à 92% avec une concentration résiduelle en fer au rejet importante qui se traduit par une légère coloration du milieu récepteur. Sur ce site, l'apport en FeCl₃ n'est pas adapté à la concentration en P entrant, une réduction des doses doit être réalisée par l'exploitant.

Le polymère utilisé sur ces ouvrages en tertiaire est toujours un polymère anionique, à poids moléculaire important, de fournisseur variable suivant le site. Son choix a généralement été réalisé suite à des tests en jar-test effectués parallèlement par le fournisseur et l'exploitant.

La plage des taux de traitement mesurés est nettement plus faible que pour le coagulant. Les consignes sont plus homogènes entre les sites et restent généralement dans la gamme 0,5 à 1,2 mg/L, soit légèrement plus faible que celle préconisée par les constructeurs.

Remarque :

REPARTITION DE L'APPORT DE $FeCl_3$ ENTRE LE BASSIN D'AERATION ET LE TERTIAIRE

De nombreuses installations équipées d'un traitement tertiaire physico-chimique sont également dimensionnées pour effectuer une co-précipitation du phosphore au sein du bassin d'aération (contrainte poussée en phosphore du rejet, stockage du $FeCl_3$ sur le site).

La répartition de l'apport de coagulant entre le bassin d'aération et le traitement tertiaire est toujours difficile à trancher pour l'exploitant.

Ainsi, l'apport de $FeCl_3$ doit être prioritairement réalisé dans le bassin d'aération :

- En effet, à ce stade du traitement, la concentration en $P-PO_4^{3-}$ est plus importante qu'en entrée tertiaire, l'abattement de phosphore sera donc plus élevé pour une quantité moindre de produit apporté.
- Le bassin d'aération « joue » un rôle tampon beaucoup plus important que le clarifloculateur en tertiaire (temps de séjour très court sur ces ouvrages). Le $FeCl_3$ non utilisé immédiatement permet de faire face à une variation de charge à venir.
- Enfin, une co-précipitation permet un gain de l'IB de 10 à 30 points, toujours appréciable pour une bonne clarification à l'aval et une sécurité vis à vis du rejet au milieu naturel.

La répartition entre les deux ouvrages est alors un compromis pour chaque site suivant les concentrations en MES et $P-PO_4^{3-}$ mesurées et voulues en entrée de traitement Tertiaire. Sur les sites visités, différents réglages ont été observés :

- 3/4 dans le Bassin d'Aération - 1/4 en traitement tertiaire
- 2/3 dans le Bassin d'Aération - 1/3 en traitement tertiaire
- 1/2 dans le Bassin d'Aération - 1/2 en traitement tertiaire

Des réglages avec un apport supérieur au niveau du bassin d'aération (les 2 premiers cas) semblent aller vers une meilleure optimisation du système de traitement.

Il est à noter que les retours en tête des eaux du traitement des boues peuvent être « riches » en fer et jouer le rôle de co-précipitation lors des surdosages avérés sur l'étage tertiaire et occasionné une déphosphatation physico-chimiques partielle sur l'étage biologique.

FONCTIONNEMENT OCCASIONNEL DE L'OUVRAGE

On observe souvent que la mise en place d'un tertiaire est liée à l'objectif traitement du phosphore et à l'affinage des MES. Sur un certain nombre d'installations en fonctionnement, les niveaux de rejets lors du temps sec sont déjà atteints en raison du taux de charge hydraulique et de la dilution. Deux possibilités de fonctionnement doivent être envisagées : le by-pass de l'étage ou l'utilisation de l'ouvrage uniquement en traversier.

La gestion de l'arrêt occasionnel de l'ouvrage est différente selon le procédé retenu, mais cette gestion doit être envisagée compte tenu des consommations importantes des réactifs et des productions de boue qui en découlent. Si les niveaux de rejet sont toujours respectés, l'ouvrage pourra être isolé et mis à l'arrêt.

Fonctionnement occasionnel					
	Arrêt en Période de temps sec :				Marche en Temps de pluie
	Densadeg®		Actiflo®		Densadeg® / Actiflo®
	Traversier	By passé	Traversier	By passé	
Asservissement du dosage des réactifs	Dosage occasionnel ou très limité en fonction de l'état du floc	Non conseillé (dégradation de l'état de fraîcheur de la boue)	Arrêt	Arrêt	Oui Dosage variable et fonction des objectifs recherchés
Agitateurs	Marche		Arrêt	Arrêt	Marche
Recirculation du Sable	/		Arrêt et stockage du sable au niveau du flocculateur	Arrêt et stockage du sable au niveau du flocculateur	Oui
Recirculation des boues	Marche		Pompage occasionnel pour évacuer les MES décantées	Arrêt	Marche

Tableau 24 – Gestion de l'arrêt occasionnel des clari-floculateurs

Pour l'Actiflo®, un fonctionnement en traversier est préféré au by-pass complet sur les grosses installations si le redémarrage de l'ouvrage est attendu. En effet, les bonnes performances de l'étage sont plus rapidement atteintes dans cette configuration de fonctionnement, l'ouvrage étant déjà rempli en « eau traitée ». Par contre, pour les sites nettement sous chargés, où le niveau de rejet est déjà atteint à l'entrée du tertiaire, le by-pass complet de l'étage, avec vidange de l'ouvrage, est préconisé pour des contraintes d'exploitation inutiles.

RAPPELS DES PRINCIPAUX PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT ET D'EXPLOITATION

Les principaux paramètres de fonctionnement et d'exploitation du procédé clarifloculation, insérés en traitement primaire ou tertiaire, sont synthétisés ci-après.

	Densadeg®	Actiflo®
Taux de recirculation Objectif : Concentration en boue ou en sable donnée dans le flocculateur pour piéger au maximum les particules entrantes.		
Débit recirculé	Continu pour ramener de la boue Q variable et asservi au Q entrant 2 à 5 % du Q pointe	Continu pour ramener du sable Q constant et fonction du nombre d'hydrocyclone en fonctionnement 6 % du Q pointe
Lieu d'injection des réactifs et mode d'asservissement Objectif : abattement du P et des MES		
Coagulant (FeCl₃)	A l'amont des boues recirculées (directement dans la canalisation ou dans le bassin de coagulation) - Asservi au débit entrant voir au flux de phosphate à traiter	En amont ou en surface de la cuve de coagulation - Asservi au débit entrant voir au flux de phosphate à traiter
Polymère anionique	Sous l'hélice du flocculateur par l'intermédiaire d'un tore de distribution. Une seconde injection est possible dans la canalisation de la recirculation des boues. Asservi au débit entrant	En entrée ou en sortie de la cuve d'injection. Asservi au débit entrant voir au flux de MES
Sable	-	A l'entrée de la cuve d'injection grâce à la sous verse de l'hydrocyclone Complément : Apport manuel en entrée de la cuve d'injection ou de coagulation
Extraction des boues et mode d'asservissement Objectif : Concentration en boue ou en sable donnée dans le flocculateur		
Extraction des boues	Discontinues, extraction fonction soit : - d'une durée déterminée tous les x m ³ d'eaux traités ou sur horloge. - extraction sur hauteur du lit de boues dans le décanteur.	Continues et à débit constant – possibilité de varier le nombre d'hydrocyclone en fonctionnement suivant le débit à traiter. Les faibles concentrations nécessitent un épaissement spécifique avant la filrière boue.

EQUIPEMENTS EN OPTION

	Densadeg®	Actiflo®
Option	Mesure continue de la hauteur du voile de boue.	Mesure continue du taux de sable (en développement).
	Turbidimètre en sortie Analyseur de P-PO ₄ ³⁻ en ligne en entrée et/ou sortie d'ouvrage Préleveur automatique en entrée d'ouvrage (existe en sortie)	

Il est à noter que peu de sites sont équipés de préleveur automatique en entrée d'ouvrage. Il convient d'étudier à l'entrée du tertiaire l'évolution des paramètres clés pour le procédé en particulier pour l'évolution au cours de la journée des orthophosphates et des MES d'où la mise en place d'un préleveur portable. Puis, dans le temps, les analyses chimiques pourront être réalisées sur des échantillons ponctuels et comparés avec les courbes types obtenus avec l'échantillonneur. Elles permettront d'identifier une éventuelle évolution des charges en phosphore et en particulaire à traiter sur l'ouvrage et aideront ainsi à l'optimisation du procédé par une meilleure adéquation des taux de traitement.

Les principaux paramètres de réglage accessibles à l'exploitant pour optimiser le fonctionnement du procédé sont donc les suivants :

- **Dosage du coagulant et du floculant**, c'est à dire le taux de traitement (cf. fiche n° 3 : calcul de la dose de coagulant à apporter).
- **Maîtrise d'un taux de sable constant** dans l'Actiflo® et d'un taux de boue constant dans le floculateur.
- **Réglage de la fréquence des extractions** de boue pour le Densadeg® afin de maintenir un taux de boue constant dans le floculateur et éviter aussi l'engorgement de l'ouvrage par un niveau de boue trop important (proche des lamelles) avec des risques de pertes de boue...

Une part importante du diagnostic de fonctionnement des clari-floculateurs en tertiaire est réalisée en exploitation par l'observation

visuelle de la boue et du rejet au milieu naturel lors du contrôle journalier de l'ouvrage.

En effet, l'aspect du floc (sa couleur, sa taille et ses mouvements au sein de la cuve de maturation), ainsi que l'aspect de l'eau traitée, (sa couleur, sa turbidité, les pertes de fines) donnent une indication essentielle sur le dosage des réactifs et donc sur ses performances.

PRINCIPALES DIFFICULTES RENCONTREES ET PROPOSITIONS DE RECOURS

Les principales difficultés observées sur les sites sont listées ci-après suivant trois grands groupes : difficultés dues à la conception, difficultés d'exploitation et celles inhérentes à l'asservissement.

EN CONCEPTION

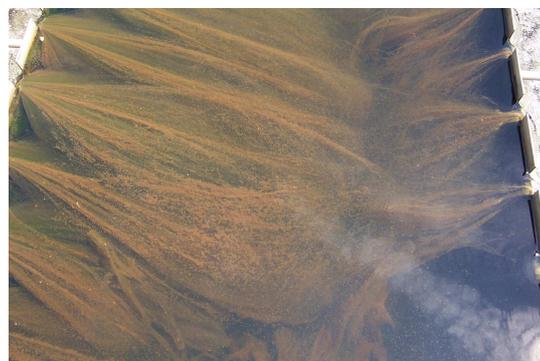
Apport des coagulants, floculants et sables :

- Le chlorure ferrique, utilisé comme coagulant sur ces ouvrages, est un produit corrosif. Sur certains sites, les canalisations d'origine en inox ont rapidement été remplacées par des canalisations en PEHD suite à leur corrosion au FeCl₃.
- Le poste « Préparation du polymère » doit être optimisé pour son exploitation aisée, sa surveillance et sa maintenance. De même, la zone et le volume de stockage du polymère doivent être bien identifiés afin d'éviter au maximum les contraintes de manipulation.

- Pour l'utilisation du sable (Actiflo®), trois principales difficultés de conception sont relevées :
 - Compte tenu du fort pouvoir abrasif du sable, le choix du matériau des canalisations et des pompes et de son diamètre devra bien être pris en compte.
 - Les contraintes de manipulation du sable sur l'installation doivent être minimisées. Sur certains sites, on a pu observer l'absence de lieu de stockage ou un accès difficile aux ouvrages (présence d'escaliers, espace restreint au niveau de la cuve d'injection). Un choix en fonction du site entre la manipulation de sacs de 25 Kg et celle de big-bag est à faire dès le stade projet et des aménagements sont maintenant proposés dès l'origine pour faciliter cet apport (mise en place d'une trémie équipée d'une vis doseuse par exemple). Sinon des solutions sont trouvées par l'exploitant pour en diminuer les contraintes suivant le site: utilisation de pompe, d'air lift....
 - La mesure du taux de sable en sous verse des hydrocyclones n'est pas toujours aisée et de très nettes améliorations par le constructeur devront être proposées. Des aménagements doivent également être prévus sur ce poste comme par exemple la ré-hausse des hydrocyclones à hauteur d'homme, la mise en place de systèmes dédiés à cette mesure.

Décanteur :

- Il faut noter que les lamellaires sont fragiles. On a observé dans le temps des détachements de blocs qui imposent leur ré-accrochage. Leur nettoyage à forte pression est à proscrire. Le revêtement des lamelles peut également se détériorer et faciliter alors l'accrochage des boues. Suite à cette difficulté, un changement régulier de tous les blocs de lamelles est réalisé sur un site.
- Pour les systèmes Densadeg®, le dimensionnement des fenêtres d'alimentation du réacteur piston sur certains sites est trop juste, et des colmatages sont observés à ce niveau qui créent des passages préférentiels au niveau du décanteur lamellaire.
- En tertiaire, un développement très important d'algues vertes au niveau des lamelles et des goulottes de récupération situées en surface du décanteur est observé sur l'ensemble des sites. Bien que leur présence importante affine le traitement par filtration de l'eau traitée, il est également la cause de colmatages partiels du bloc qui induisent des vitesses ascensionnelles plus fortes sur l'ouvrage et des pertes de fines. Ce développement oblige le nettoyage manuel du bloc lamellaire au jet d'eau sous pression. La fréquence de ces lavages peut varier en fonction de la période de l'année et est hebdomadaire en période estivale. Ils nécessitent l'arrêt temporaire de l'ouvrage et la baisse du niveau d'eau sous les plaques.



Photos – Développement d'algues en surface du décanteur lamellaire

De nombreux essais de lutte contre le développement de ces algues sont réalisés

localement sans grands effets (apport de chlore, de sulfate de cuivre,...).

La couverture des ouvrages s'avère donc indispensable dès leur construction, et cette couverture ne doit pas « cacher » complètement l'ouvrage et doit permettre l'accès et l'observation de sa surface par l'exploitant.

En l'absence de couverture, la contrainte d'exploitation devra être bien intégrée et son nettoyage manuel en particulier : la possibilité de baisser rapidement le niveau d'eau pour le nettoyage du bloc lamellaire, un point d'eau avec une pression suffisante et un chemin d'accès sur l'ensemble de l'ouvrage. Ce nettoyage manuel régulier des blocs lamellaires milite également pour la mise en place de plusieurs ouvrages en parallèle interconnectables pour ne pas pénaliser le rejet lors de son nettoyage.

Divers :

On note enfin une absence systématique de préleveur automatique installé en entrée de l'étage tertiaire. Il permettrait une bonne connaissance des flux à traiter en particulier la charge en phosphore pour optimiser l'apport de chlorure ferrique dont les conséquences d'un surdosage sont importantes en terme de coûts d'exploitation.

EN EXPLOITATION

Produits :

- L'apport régulier de produits (coagulant, floculant et sable) est à l'origine de nombreuses difficultés d'exploitation. En effet le paramétrage de valeurs de consignes de traitement sont rarement étudiées et optimisées. Des valeurs incorrectes ont de rapides répercussions sur le traitement : Colmatage du bloc lamellaire suite à des apports trop importants de polymère, fuite de fines par défaut d'un des trois produits, production de boue, etc.

De plus, de fréquents colmatages de l'anneau d'injection du polymère par le développement d'une gangue gélatineuse sont observés. Afin de palier cette difficulté, les remèdes actuels sont l'instauration d'un débit d'eau propre continu et/ou la vidange régulière de l'ouvrage pour le nettoyage poussé de l'anneau.

- Afin de minimiser la perte de sable, le réglage des cônes équipant les hydrocyclones n'est pas possible. Par contre, l'exploitant peut

gérer le bon fonctionnement de l'appareil (suivi des pressions, des débits recirculés), le taux et les apports de sable dans l'ouvrage. Ces derniers doivent être réguliers et sans à-coups. Il est à noter que la répétabilité de la mesure du taux de sable au sein de l'ouvrage n'est pas toujours évidente.

A ce niveau, une mesure réelle des réactifs consommés doit être effectuée et analysée en vue de l'optimisation du dosage.

Décanteur :

- Le colmatage ou l'encrassement des blocs lamellaires, inévitable avec le temps, induit des fuites de floccs en sortie de traitement. Leur observation conduit alors à un nettoyage manuel du bloc lamellaire. Afin de minimiser ces pertes, un lavage régulier et programmé doit être réalisé avec abaissement du plan d'eau sous les blocs lamellaires.
- La présence de dépôts de boues en fond de flocculateur, avec fermentation de celles-ci, est parfois suspectée. Afin d'éviter cette accumulation, la remise en suspension des éventuels dépôts en augmentant progressivement la vitesse de rotation de l'agitateur du flocculateur doit être effectuée de façon régulière. Lors de cette manipulation, les remontées de boues noires sont synonymes de dépôts fermentés déjà anciens.

Extraction des boues :

- L'asservissement de l'extraction des boues sur la hauteur du voile ne semble pas toujours fiable : la détection du voile de boue (remontées du voile de boue générées par des à-coups hydrauliques ou lors d'évènements pluvieux) est parfois difficile. Des difficultés au niveau du calage de ces sondes sont aussi annoncées (mesure du voile de boue ou du halo supérieur ?). Suite à une mauvaise détection du voile (présence d'algues ou de floccs au niveau de la mesure par exemple), l'extraction automatique des boues sur cette mesure peut s'enclencher, purgeant l'ouvrage de ces boues durant la nuit. En recours, certains exploitants renouvellent régulièrement les sondes, d'autres abandonnent cet asservissement et utilisent cette mesure en information pour

affiner le calage des tableaux horaires d'extraction.

- Le suivi du niveau du voile de boue par sonde et par le biais des piquages permet de s'assurer du bon réglage du procédé. Par contre, un niveau trop haut ou trop bas est toujours difficile à appréhender par l'exploitant : défaut ou excès de floculant (boues trop ou pas assez dense), extraction insuffisante ou pas assez importante ?

Divers :

La majorité des analyseurs en lignes installés en tertiaire que nous avons rencontrés sur les sites sont à l'arrêt. Leur maintenance et exploitation sont jugées trop lourde pour le gain apporté au niveau de l'asservissement. Le suivi des réglages est réalisé à partir d'analyses ponctuelles en sortie (temps de séjour court) couplées parfois à un suivi de la turbidité en sortie d'ouvrage.

EN ASSERVISSEMENT

Le traitement du phosphore par clari-floculateurs est un procédé conçu pour fonctionner de façon automatique. Afin d'optimiser ses performances, certains paramètres sont asservis à des mesures physiques comme le débit d'eau traité, la hauteur du voile de boue, la mesure de la concentration en MES ou en $P-PO_4^{3-}$ de l'eau traitée.

Ainsi, l'apport de coagulant et floculant est généralement asservi au débit d'eau traité lorsque le procédé est installé en aval d'un traitement biologique de type boue activée (fluctuation des ortho-phosphates réduite sur la journée en raison du temps de séjour élevé). Afin d'éviter une surconsommation de produits (et donc de maîtriser les coûts en consommable) ou une baisse de performance par manque de coagulant, cet asservissement doit être fiable et correctement paramétré.

L'objectif est d'apporter le coagulant de façon quasi-continue sur la journée et en fonction du débit à traiter. A cette fin, le choix de la pompe et de sa gamme de débit est primordiale : Le débit minimal de pompage doit pouvoir assurer un apport régulier de coagulant en période de faibles débits nocturnes et éviter les périodes sans injection. De même, le débit maximal d'injection doit permettre de couvrir les périodes de débit de pointe des eaux à traiter.

Pour plus de souplesse, le nombre de pompes disponibles peut être augmenté pour assurer un apport correct sur une gamme de débit à traiter avec le fonctionnement d'un nombre de pompe différent en fonction de la plage de débit traité.

Dans le cas de fortes fluctuations des ortho-phosphates sur la journée, lorsque le procédé est installé en aval de biofiltres par exemple, un asservissement au débit n'est pas suffisant et la mise en place d'un analyseur en entrée de l'ouvrage, dont la valeur est associée à la mesure du débit, permettra l'optimisation dans le temps de l'injection du $FeCl_3$ (cf. fiche n°7 : Exemples de type d'asservissement pour l'injection des réactifs en vue de l'optimisation des quantités à injecter)

Les postes de recirculation et d'extraction des boues peuvent également être asservis au débit traité ou à la hauteur du voile de boue (mais ce dernier fonctionnement est souvent abandonné suite à une possible mauvaise réponse de la sonde de mesure de hauteur de voile qui peut induire une vidange totale des boues de l'ouvrage).

Pour l'asservissement de la recirculation des sables dans l'Actiflo®, le fonctionnement d'un nombre différent d'hydrocyclone suivant des gammes de débit est généralement préconisé, dont le débit est fonction de la capacité précise de l'hydrocyclone installé. De plus, en période de temps sec, le fonctionnement d'appareils différents par basculement des hydrocyclones entre eux permet d'éviter la création de zones de dépôts en fond d'ouvrage (si différents points de prélèvements par pompe installée) et de répartir le degré d'usure des équipements.

CONTRAINTES D'EXPLOITATION

Elles sont basées sur les discussions avec les exploitants, sur les consignes d'exploitation fournies par les constructeurs et sur nos propres observations sur sites.

CONTRAINTES GENERALES COMMUNES AUX DEUX SYSTEMES

De manière quotidienne

Le contrôle journalier de l'ouvrage est primordial pour un diagnostic rapide de dysfonctionnement par l'observation visuelle de la boue au niveau de

la maturation ou en entrée du décanteur lamellaire (aspect du floc) et du rejet au milieu naturel (fuite de floc, turbidité).

Ce contrôle permet de repérer une éventuelle anomalie de fonctionnement au niveau des apports de réactifs, une répartition hydraulique anormale. Il est généralement réalisé avec le contrôle visuel de la préparation automatique du floculant et avec l'évaluation des consommations journalières de réactifs (FeCl_3 et floculant) pour vérifier le bon fonctionnement de l'automate, l'absence de fuite ou de colmatage des canalisations.

De manière hebdomadaire :

Un entretien de l'instrumentation en place sur l'étage (nettoyage voir étalonnage des sondes, analyseurs en lignes, capteur de hauteur de voile de boue) est fortement conseillé. Cette maintenance est particulièrement importante lorsque les informations délivrées par les capteurs sont utilisées en asservissement.

De plus, le contrôle du bon fonctionnement des postes de préparation du polymère : Débit d'eau et de la vis, concentration de la solution mère, bon fonctionnement de l'éventuel aspirateur de polymère est à réaliser.

Enfin, le nettoyage manuel du bloc lamellaire au jet d'eau sous pression est indispensable. Les constructeurs annoncent des lavages mensuels mais un lavage plus fréquent est nécessaire pour éviter les fuites de floc et limiter la formation d'algues en surface des blocs.

De plus un étalonnage du débit des pompes (polymère, chlorure ferrique, recirculation) suffisamment régulier pour avoir un asservissement cohérent est préconisé par les constructeurs. Cet étalonnage est particulièrement important pour les pompes susceptibles de s'user fortement (recirculation des boues sableuses ou de chlorure ferrique).

Il faut aussi ajouter à ces contraintes toutes celles relatives à l'approvisionnement en réactifs : gestion des stocks, dépotage du chlorure ferrique, stockage et remplissages éventuels des trémies du polymère et du sable.

Contraintes particulières au Densadeg® dues essentiellement à la recirculation et à l'épaississement des boues

Lors du contrôle journalier de l'ouvrage, la collecte des flottants en surface du réacteur piston si l'écope est manuelle (généralement le cas en tertiaire) est à effectuer.

Un contrôle quotidien de la hauteur du voile de boue dans le décanteur lamellaire est également à réaliser par le biais des différents piquages. A partir des résultats obtenus, une modification du réglage des extractions peut être envisagée.

De plus, une mesure de la quantité de boues dans le flocculateur (décantation en éprouvette durant 10 minutes) doit être réalisée plusieurs fois par semaine. Une mesure régulière de la concentration en MES est également judicieuse pour vérifier la correspondance entre le taux de boues mesuré et sa concentration.

Enfin, une remise en suspension d'un éventuel dépôt dans le flocculateur en augmentant progressivement la vitesse de rotation de l'agitateur du flocculateur peut être effectuée de façon hebdomadaire. Les remontées de boues noires sont synonymes de dépôts au fond du décanteur, qui pourrait être à l'origine du colmatage des fenêtres débouchant sur le réacteur piston.

Degrémont préconise de plus une vérification de l'aspect de l'hélice du flocculateur (absence de filasse) en même temps que le lavage du lamellaire, cependant la pompe de vidange n'abaisse pas toujours suffisamment le niveau d'eau.

Ces procédés, en traitement tertiaire, nécessitent un temps d'exploitation important qu'il ne faut pas négliger. En effet, un passage régulier sur l'ouvrage ainsi qu'une optimisation poussée de ses réglages et performances (concentration de rejet, taux de traitement, asservissement) sont nécessaires à son bon fonctionnement, malgré son automatisation importante.

Le nettoyage manuel régulier des blocs lamellaires est à intégrer en exploitation (1/2 journée par semaine en période estivale) et milite pour la mise en place de plusieurs ouvrages en parallèle interconnectables et d'une couverture des bassins tout en maintenant leur accessibilité. La possibilité de baisser rapidement le niveau d'eau pour le nettoyage du bloc lamellaire est à prévoir dès le dimensionnement des ouvrages.



Les clari-floculateurs sont basés sur le principe de décantation associée à un traitement chimique dont certaines particularités (recirculation interne de floccs bien formés ou apport de micro-sable) permettent de travailler à des vitesses élevées.

Ces procédés sont proposés en traitement primaire, en tertiaire, en traitement des eaux de pluie et/ou pour des traitements spécifiques comme les eaux de lavage de la filière biofiltration.

En tertiaire et pour des eaux brutes à dominante domestique et normalement concentrées, les clarifloculateurs sont implantés uniquement sur des sites où les niveaux de rejet sont très contraignants, en particulier lorsque le phosphore total demandé sur un échantillon moyen 24 heures est inférieur à 1 – 1,2 mg/L et la DCO inférieure à 50 - 60 mg/L. Dans ces conditions (et pour des ERU normalement concentrées), ces valeurs ne peuvent être garanties avec un traitement biologique classique. L'obtention de valeurs plus faibles nécessite donc souvent la mise en place de ce type d'ouvrage pour l'élimination du particulaire qui participera à l'élimination des éléments constitutifs des MES (DCO, DBO₅, NK et PT) et des orthophosphates (fraction dissoute) par précipitation à l'aide de sels métalliques.

Les niveaux de rejets poussés doivent être bien appréciés car au-delà des valeurs annoncées, les conséquences sont importantes au niveau des coûts d'investissement (ouvrage supplémentaire) et d'exploitation (Coûts en réactifs, production de

boue, temps en personnel) pour une fraction éliminée sur l'étage relativement faible.

Dans certains cas, les niveaux de rejet demandés sont déjà atteints à l'entrée de l'étage tertiaire et cet ouvrage pourra alors fonctionner uniquement en traversier. Dans d'autres cas, le dépassement du niveau de rejet est seulement dû aux MES. La concentration en P-PO₄³⁻ est déjà très faible à l'entrée et le non-respect est lié à la part de phosphore particulaire (P peut représenter 4,5% des MES pour certains traitements amont).

PERFORMANCES MESUREES EN TERTIAIRE

Des mesures sur site ainsi que l'exploitation des données d'auto surveillance sur plusieurs années de différentes installations équipées de clari-floculateurs en tertiaire montrent de bonnes performances de ces systèmes avec des rejets conformes en Phosphore total et en MES pour la grande majorité du temps.

Concentration en PT < 0,8 mg/L

Avec une concentration en P-PO₄³⁻ < 0,3 mg/L

et une Concentration en MES < à 10 mg /L (de l'ordre de 7 mg/L)

Les rendements sur cet ouvrage sont très variables d'un site à l'autre car ils dépendent principalement de la concentration d'entrée des effluents. Les rendements obtenus sur les sites étudiés sont les suivants :

	DCO	MES	PT
Rendement en %	De 5 à 35	De 20 à 55	De 60 à 85

Tableau 25 – Performances mesurées durant les suivis

Ces résultats sont obtenus avec des ratios molaires Fe/P très élevés de 3,5 à 13, l'optimisation sur les installations visitées n'ayant pas été réalisée. Ces dosages élevés occasionnent de nombreux inconvénients comme les dépenses en réactifs, la production de boue,...

Cette absence d'optimisation à ce niveau est principalement due à l'automatisation quasi totale de l'ouvrage et bien souvent, d'autres problèmes sur la filière de traitement sont beaucoup plus prioritaires pour l'exploitant.

La contrainte de rendement sur l'ensemble de la filière de traitement (> à 80%) est problématique sur certains sites du fait des très faibles concentrations en phosphore en entrée d'installation (dilution importante et baisse significative des flux d'entrée). Ce critère de rendement n'est pas adapté aux cas des eaux diluées.

De plus, lorsque la concentration des effluents bruts est faible et qu'un traitement poussé du phosphore sur l'étage biologique par une suraccumulation biologique et précipitation simultanée est réalisé, la concentration de l'effluent en sortie biologique (ou entrée tertiaire) peut être en moyenne annuelle inférieure à 1 mg/L de PT. Dans ce cas, l'intérêt de maintenir l'étage tertiaire en fonctionnement est limité et son arrêt par by-pass peut être temporairement envisagé (réduction des coûts des consommables en exploitation).

Occasionnellement, des pics accidentels de concentration en PT atteignant 2 voir 3 mg/L en sortie des clarificateurs sont parfois observés en auto-surveillance.

Ils s'accompagnent généralement de rejets chargés en MES s'expliquant par des fuites de floccs dues à des colmatages partiels du bloc lamellaire ou à un défaut d'apport de sable ou de réactifs (colmatage de canalisation, défaut de préparation de réactifs).

Lorsque cet étage fonctionne, il est une réelle sécurité vis à vis de certains dysfonctionnements de la filière biologique amont pour les équipes d'exploitation. En effet, des problèmes ponctuels de pertes de boues des clarificateurs secondaires par dénitrification sauvage ou par bulking ont moins de répercussion sur la qualité du rejet grâce à la présence des clariflocculateurs. De même, sur les installations importantes, l'étage tertiaire permet une certaine souplesse pour

l'exploitation : évacuation des flottants des clarificateurs secondaires, by-pass partiel et temporaire d'une file amont.

La production de boues de l'étage tertiaire n'est pas négligeable et peut atteindre 20 % de la production de boue totale de la station d'épuration, sans boue primaire.

LIMITES DU PROCEDE

Les résultats d'hydraulique maximale obtenus sur les sites sont uniquement des tendances spécifiques au site étudié.

En effet, la qualité du rejet pour une vitesse ascensionnelle donnée dépend énormément de l'état de fonctionnement du système lors de cette pointe, avec en particulier :

- La concentration du flocc et son état de maturation,
- Le taux de traitement appliqué et son asservissement,
- Le taux de sable ou de boue effectif dans l'ouvrage,
- Le degré d'encrassement ou de colmatage du bloc lamellaire,
- Le flux de particulaire à traiter et ses caractéristiques.

Ainsi, des valeurs de limites hydrauliques pour chaque système n'ont pas pu être arrêtées, l'état de fonctionnement du système étant prépondérant.

CONTRAINTES D'EXPLOITATION

Ces procédés, en traitement tertiaire, nécessitent un temps d'exploitation non négligeable. En effet, un passage régulier sur l'ouvrage ainsi qu'une optimisation poussée de leurs réglages et performances (concentration de rejet, taux de traitement, asservissement) sont nécessaires à son bon fonctionnement.

Le nettoyage manuel régulier des blocs lamellaires est à intégrer en exploitation courante et milite pour la mise en place de plusieurs ouvrages en parallèle interconnectables et d'une couverture des bassins tout en maintenant leur accessibilité.



FICHE N°1 : RAPPEL DES DIFFERENTES FORMULES ET TESTS UTILISES SUR CE TYPE D'OUVRAGE

Mesure de la surface au miroir et de la surface totale projetée (symbolisée S.T.P.)

La vitesse ascensionnelle ou vitesse de Hazen est exprimée en $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ et est obtenue par le ratio du débit de pointe horaire appliqué sur l'ouvrage sur une surface donnée. Selon la surface retenue, les vitesses de dimensionnement peuvent être très différentes.

On parlera de vitesse au miroir, lorsqu'on tient compte de la surface horizontale de l'ouvrage (cette surface retenue n'est pas toujours une surface bien définie) dite standard retenue par les constructeurs.

Le schéma suivant présente les différentes surfaces qui peuvent être utilisées pour le calcul de la vitesse ascensionnelle dans un décanteur lamellaire :

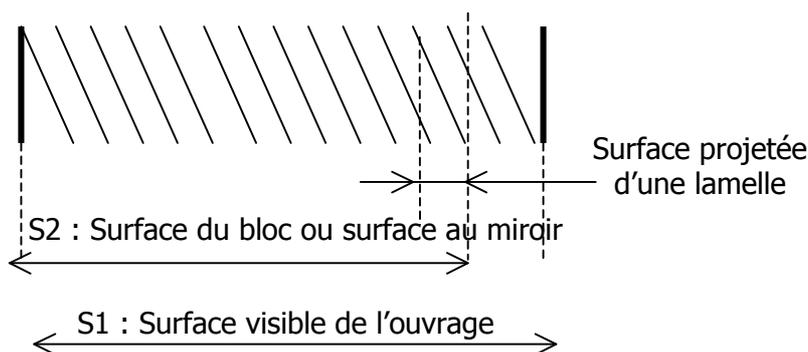


Figure 4 – Schéma de la surface au miroir et de la surface STP

Avec :

S1 : surface du bloc lamellaire + projetée de la dernière plaque (m^2) = surface visible de l'ouvrage.

S2 : surface du bloc lamellaire seul ($S2 < S1$) = surface du bloc lamellaire seul où circule l'eau = surface au miroir.

Ces deux surfaces ne prennent pas réellement en compte les surfaces disponibles pour la décantation des particules (cas des boues activées par exemple [document technique FNDAE n°18]) car elles n'intègrent pas la hauteur du module de décantation. Le seul intérêt de présenter les vitesses avec la surface au miroir est l'obtention de vitesses très élevées. Les zones de coagulation, de floculation ne sont pas prise en compte dans les surfaces au miroir.

S3 : surface totale projetée des plaques = somme des surfaces projetées de chaque plaque du bloc lamellaire. La vitesse calculée à partir de cette surface ne peut pas être contestée car elle intègre l'ensemble des plaques mises à disposition pour la décantation des floes.

La vitesse au miroir : $V_{\text{miroir}} = Q_e / S_2$

Avec : Q_e : débit de pointe en entrée du décanteur lamellaire (en m^3/h) sans prise en compte du débit de recirculation

S_2 : surface au miroir (surface du bloc lamellaire où circule réellement l'eau)

La vitesse au miroir correspond à une vitesse de remontée de l'eau à travers la section de l'ouvrage au miroir. Cette vitesse, supérieure à la vitesse dans les plaques, est en particulier utilisée par les constructeurs pour annoncer leurs performances hydrauliques mais elle ne peut pas être retenue comme référence pour le comparatif avec d'autres dimensionnement.

La vitesse dans les plaques : $V_{\text{STP}} = Q_e / \text{STP}$

Avec : Q_e : débit de pointe en entrée du décanteur lamellaire (m^3/h)

STP : surface totale projetée (m^2) = $(n-1) S \cos \Theta$

n : nombre de plaques (lamelles)

S : surface élémentaire d'une plaque

Θ : angle d'inclinaison des plaques par rapport à l'horizontale.

Dans cette expression, toute la surface développée des lamelles est prise en compte. La vitesse STP est plus précise pour la décantation du floc que la vitesse au miroir. Elle représente mieux la vitesse effective dans les lamelles et facilite la comparaison des vitesses retenues par les constructeurs lors du dimensionnement en boue activée.

Rôle des plaques :

Les plaques ou lamelles servent essentiellement :

- A une meilleure répartition hydraulique afin d'exploiter au maximum l'ouvrage et donc de limiter la vitesse de remontée des particules.
- A tendre vers un régime laminaire caractérisé par le nombre de Reynolds.

En traitement tertiaire, compte tenu d'un floc lesté et bien formé, la séparation des floccs de l'eau de sortie s'effectue sous le bloc lamellaire, la vitesse au miroir correspondant à la vitesse dans le module lamellaire d'où la vitesse de remontée des particules.

Formules spécifiques au Densadeg® / Delreb®

(ouvrages à recirculation de boue) :

LA CHARGE AU RADIER :

$$= ([MES] \text{ des eaux d'entrée} \times Q_e) + ([MES] \text{ des boues recirculées} \times Q_r) / \text{Surface du fond du décanteur (qui correspond à la surface du radier pour les boues)}$$

La charge au radier est le produit horaire du flux de MES appliqué par les eaux d'entrée et les boues recirculées sur la surface disponible pour l'épaississement des boues (proche de la zone hersée).

CONCENTRATIONS DES BOUES DANS LE FLOCLATEUR :

Pour obtenir une efficacité maximale, une concentration optimale en MES dans le flocculateur du Densadeg® ou équivalent doit être maintenue. Il est conseillé une concentration supérieure à 0,5g/L.

46

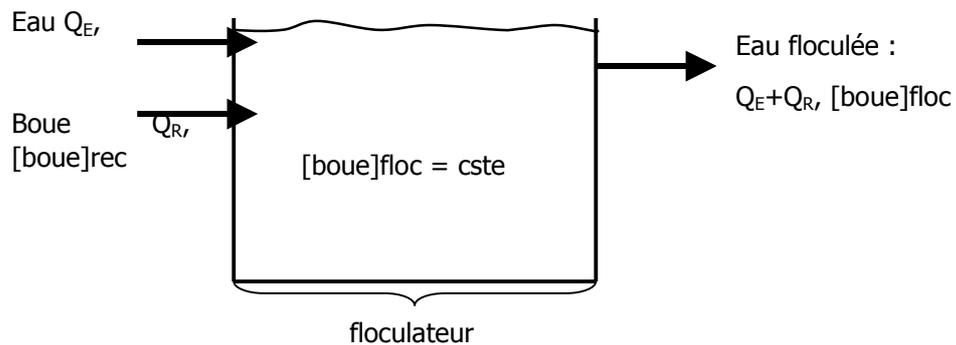


Figure 5 – Schéma d'équilibre des flux dans le flocculateur

La concentration en boue dans le flocculateur

$$= (\text{flux de MES recirculées par les boues} + \text{flux de MES apporté par les eaux à traiter}) / (Q_E + Q_R)$$

Avec Q_E : volume d'eau à traiter
 Q_R : Volume de boue recirculée

En émettant l'hypothèse que le flux de MES apporté par les eaux à traiter est négligeable,

$$[\text{MES des Boues}]_{\text{floculateur}} = \text{Flux de MES recirculé} / Q_E + Q_R = Q_R \times C_r / Q_E + Q_R$$

$$= C_r \times Q_R / Q_E + Q_R$$

$$= C_r \times Tr / (1 + Tr)$$

avec Tr : Taux de recirculation = Q_r/Q_e

$$Tr = ([\text{Boue floculateur}]/[\text{boues recirculées}]) / (1 - ([\text{Boue floculateur}]/[\text{boues recirculées}]])$$

Exemple :

On recherche une concentration dans le floculateur de 0,5 g de MES/L.

La concentration des boues obtenue en sortie du clarifloculateur sur la conduite boue recirculée est de 40 g de MES/litre.

D'où un taux de recirculation de $Tr = 1,26 \% = (0,5 / 40) / (1 - (0,5 / 40)) = 0,0126$ d'où 1,26 %

En résumé, les taux de recirculation sont de l'ordre :

Concentration des boues recirculées En g de MES/L	Concentration des boues dans le floculateur En g de MES/L	Taux de recirculation à fixer
20	0,5	2,6 %
30		1,7 %
40		1,3 %
20	1	5,3 %
30		3,4 %
40		2,6 %

Taux de recirculation :

On appelle le **taux de recirculation**, le rapport du débit recirculé sur le débit entrant. Il est exprimé en % et correspond au ratio (Q_r / Q_E) en m^3/h .

Le taux de recirculation préconisé par le constructeur est compris entre 2 et 5% du débit de pointe. Il fixe la concentration en boue dans la clarificateur.

Cette valeur est très faible par rapport aux taux de recirculation utilisés en clarification secondaire.

Décantation des boues du floculateur :

Un **test de décantation** des boues du floculateur permet un contrôle simple et rapide de la concentration approchée du floculateur. L'obtention d'un volume de 10 à 15 % de volume relatif de boue après 10 minutes

de décantation est conseillé par le constructeur et serait équivalent à une concentration supérieure à 0,5 g/L.

Ce test n'est qu'un indicateur compte tenu des hypothèses prises en comptes (IB de l'ordre de 100 à 150 mL/g MES, la boue a effectué 50% de son trajet de décantation au bout de 10 minutes) mais en exploitation il peut-être un outil de compréhension qui peut pousser l'exploitant à d'éventuels contrôles comme par exemple le débit recirculé et sa concentration en boue.

Explication :

Sur la base qu'à 10 minutes de décantation, on atteint approximativement 50 % de la hauteur parcourue par la boue obtenu en 30 minutes (Cas de l'Indice de boue).

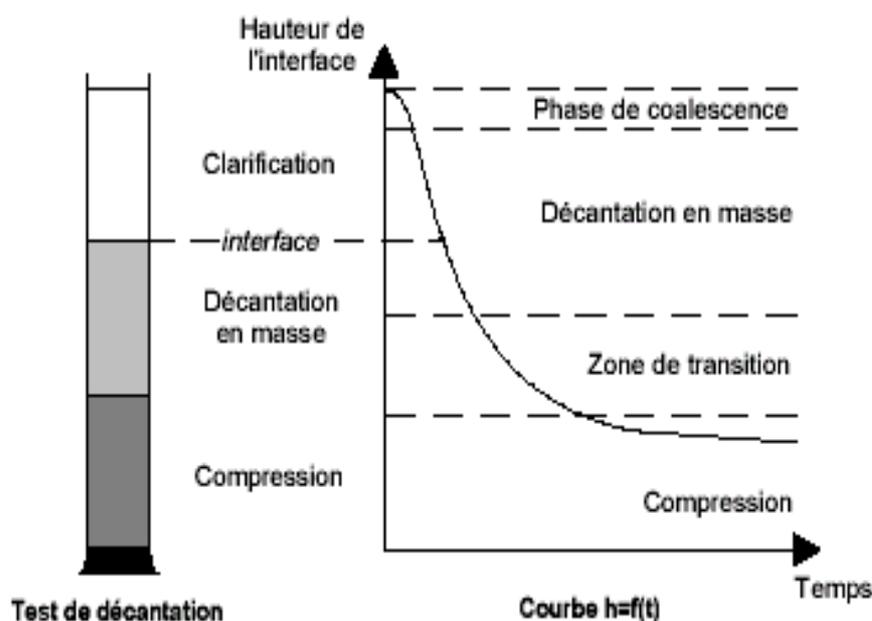


Figure 6 – Test de Kynch

Sur la base d'un indice de boue de 100 mL/g de MES, l'obtention de 0,5 g/L impliquerait un volume décanté de 50 mL au bout de 30 minutes et de 100 mL au bout de 10 minutes.

Formules spécifiques à l'Actiflo® :

LA CONCENTRATION EN SABLE :

Une concentration en sable suffisante dans l'ouvrage, ou **taux de sable**, est importante pour son bon fonctionnement. Elle nécessite des mesures de la quantité de sable sous l'hydrocyclone et est calculée à partir de la formule suivante :

$$Cs = ((1000 / V) \times Vs \times 1,4)$$

Avec : Cs : concentration en sable en sous verse de l'hydrocyclone (g/L)

V : volume de liquide prélevé (pour une éprouvette de 1 litre)

Vs : volume du sable décanté sans l'éprouvette au bout de 3 min (mL)

1,4 : densité du sable

Ensuite, en connaissant le débit en sortie de l'hydrocyclone (sous verse) et celui en entrée Actiflo®, on détermine la **concentration de sable dans le décanteur** :

$$Csable = (Cs \times Qhydrocyclone) / Q Actiflo®$$

Avec : Csable : concentration dans le décanteur ou taux de sable (g/L)

Cs : concentration en sable en sous verse de l'hydrocyclone (g/L)

Qhydrocyclone : Q sous verse hydrocyclone , il est évalué avec le temps de remplissage d'un récipient

Q Actiflo® : Débit d'entrée de l'Actiflo® (m³/h)

LES PERTES DE SABLE :

Elles sont annoncées par le constructeur de l'ordre de 1/1000 du taux de sable soit par exemple 3 g /m³ d'eau traitée pour un taux de sable de 3 kg / m³. Elles peuvent être vérifiées par la mesure du taux de sable et de son évolution au cours du temps. Il conviendra de maintenir le bon taux de sable et d'effectuer des compléments réguliers en fonction du taux de sable mesuré.

La quantité de sable dans le décanteur doit donc être suivie dans le temps. Cette quantité est calculée à partir du volume de sable injecté au démarrage (Csable (t)× Qe (t)) à laquelle on soustrait la perte de sable au pas de temps t+1 (Csable (t + 1)× Qe (t + 1)). On obtient alors la formule suivante :

$$Perte (t) = Csable (t) \times Qe (t) - Csable (t + 1) \times Qe (t + 1)$$

Avec : Perte (t) : la perte de sable à l'instant t (kg/h)

Csable (t) : concentration du sable à l'instant t (kg/m³)

Csable (t+1) : concentration du sable à l'instant t+1 (kg/m³)

Qe (t) : débit d'entrée de l'Actiflo® à l'instant t (m³/h)

Qe (t + 1) : débit d'entrée de l'Actiflo® à l'instant t + 1 (m³/h)

La concentration de sable dans le décanteur à l'instant $t + 1$ est supposée plus faible qu'à l'instant t , le signe de la perte de sable est alors positif.

En exploitation courante, l'Actiflo® doit être régulièrement rechargé en sable. Les pertes de sable sont constantes et dépendent de différents paramètres comme sa granulométrie, sa concentration dans le décanteur, le débit de recirculation et la concentration de la boue (notice OTV).

Bilan de la quantité de sable dans l'ouvrage

Les pertes en sable sont calculées à partir des taux de sable mesurés en sous verse des hydrocyclones. Pour un bon fonctionnement du décanteur, le taux de sable doit être maintenu supérieur à 2 kg/m^3 (donnée constructeur). Le taux de sable est calculé à partir de trois paramètres :

- **Le volume décanté dans une éprouvette d'un litre** : la précision de ce volume dépend de la façon dont l'éprouvette est placée en dessous de l'hydrocyclone. Il faut donc répéter l'opération plusieurs fois et faire la moyenne des différents volumes trouvés.
- **Le débit de souverse de l'hydrocyclone** : ce débit est recalculé à chaque mesure du taux de sable. Il est mesuré avec la durée de remplissage d'un seau placé en dessous de l'hydrocyclone. Cette mesure est répétée plusieurs fois pour obtenir plus de précision.
- **Le débit instantané pris au moment de la manipulation.**

L'incertitude sur le taux de sable est donc importante. De plus, lorsqu'il y a permutation automatique des hydrocyclones (tableau horaire ou variation de débit à traiter), un taux de sable juste après une permutation est peu représentatif et à proscrire.

50

Le « bilan sable » le plus sûr est le suivi des apports de sable dans le temps sur une période la plus longue possible.

FICHE N°2 : CALCUL DE LA REDUCTION DU TAC SUR UNE FILIERE DE TRAITEMENT

Cette approche de consommation de TAC (Titre Alcalimétrique Complet) par les réactifs physico-chimiques et les cinétiques de nitrification est rappelée dans cette fiche car une carence en TAC peut être néfaste pour certains processus :

- Un manque de substrat (mg de HCO_3^-) pour les germes autotrophes responsables de la nitrification entraîne un blocage de la nitrification.
- Cet abaissement de TAC diminue le pouvoir tampon du système (pH) et occasionne une acidité du milieu pouvant pénaliser le mécanisme de coagulation- floculation (pH minimum recommandé de l'ordre de 7) et la nitrification compte tenu de la sensibilité des germes autotrophes au pH.

Quelques rappels :

Unités : 1° F (1 degré français) = 12,2 mg de HCO_3^- /litre

1 mg de N-NH₄⁺ à nitrifier consomme 8,5 mg de HCO_3^-

Consommation d'alcalinité pour le traitement physico-chimique :

On a une consommation de 1,85 mg de HCO_3^- /mg de Fer précipité en FePO_4^{3-}

On a une consommation de 3,3 mg de HCO_3^- /mg de Fer précipité en $\text{Fe}(\text{OH})_3$

Consommation d'alcalinité pour une nitrification-dénitrification complète ($[\text{N-NO}_3^-] < 2 \text{ mg/L}$)

On a une consommation de 8,7 mg de HCO_3^- / mg d'azote nitrifié

On a une restitution de 4,36 mg de HCO_3^- / mg d'azote dénitrifié

D'où une consommation de 4,34 mg de HCO_3^- / mg d'azote nitrifié-dénitrifié.

Mesure du TAC de l'eau brute (en période de dilution des eaux et en période sèche)

Alcalinité initiale de l'eau à traiter :

Période pluvieuse	Période sèche
9 °F	27 °F
Soit $9 \times 12,2 = 110 \text{ mg/L } \text{HCO}_3^-$	Soit 330 mg/L HCO_3^-

Apport de FeCl₃ sur l'étage primaire

Calcul de l'alcalinité consommée par l'apport de FeCl₃

Données :

3 (période pluvieuse) et 5 (période sèche) mg de P à précipiter –

Ratio molaire Fe/P = 1,3 (exemple de ratio utilisé en primaire)

Quantité de Fer à injecter pour précipiter les orthophosphates

= 1,3 (ratio molaire) x 1,81 (ratio massique = 56/31) x 3 ou 5 mg de P à précipiter

= 7,1 mg ou 12 mg de Fer/L

52

Période pluvieuse	Période sèche
3 mg/L de P à précipiter	5 mg/L de P à précipiter
7,1 mg/L de Fe	12 mg/L de Fe
On a utilisé :	On a utilisé :
(Cf. Fiche technique 5 : production de boue)	
5,4 mg/L de Fer pour précipiter le FePO ₄ ³⁻	9,04 mg/L de Fer pour précipiter le FePO ₄ ³⁻
car FePO ₄ ³⁻ / P = 4,87	car FePO ₄ ³⁻ / P = 4,87
soit 4,87 x 3 = 14,6 mg de FePO ₄ ³⁻ /L	soit 4,87 x 5 = 24,35 mg de FePO ₄ ³⁻ /L avec
avec 37,1% de Fe	37,1% de Fe
+ 1,7 mg/L de Fe sont utilisés pour précipiter les Fe(OH) ₃	+ 2,96 mg/L de Fe sont utilisés pour précipiter les Fe(OH) ₃
car 7,1 mg de fer/L moins 5,4 utilisé par les FePO ₄ ³⁻	car 12 mg de fer/L moins 9,04 utilisé par les FePO ₄ ³⁻
Bilan du TAC consommé :	Bilan du TAC consommé :
Soit 5,4 x 1,85 mg de HCO ₃ ⁻ /mg de Fer précipité en FePO ₄	Soit 9,04 x 1,85 mg de HCO ₃ ⁻ /mg de Fer précipité en FePO ₄
+	+
1,7 x 3,3 mg de HCO ₃ ⁻ /mg de Fer précipité en Fe(OH) ₃	2,96 x 3,3 mg de HCO ₃ ⁻ /mg de Fer précipité en Fe(OH) ₃
= 15,6 mg HCO₃⁻ / litre	= 26,5 mg HCO₃⁻ / litre

Calcul de l'alcalinité consommée par la nitrification

La nitrification d'1 mg de N-NH₄ consomme 8,7 mg HCO₃⁻

Période pluvieuse	Période sèche
On a nitrifié 15 mg/L de N en N-NO ₃ ⁻ Soit 15 mg/L de N nitrifié x 8,7 = 130,5 mg/L HCO₃⁻	35 mg/L de N en N-NO ₃ ⁻ Soit 35 mg/L de N nitrifié x 8,7 = 304,4 mg/L HCO₃⁻

Calcul de l'alcalinité restituée par la dénitrification

La dénitrification d'1 mg de N-NO₃⁻ restitue 4,36 mg HCO₃⁻

Dans notre exemple, avec **une dénitrification totale** :

Période pluvieuse	Période sèche
15 mg/L de N dénitrifié Soit 15 mg/L de N dénitrifié x 4,36 = 65,4 mg/L HCO₃⁻	35 mg/L de N dénitrifié Soit 35 mg/L de N dénitrifié x 4,36 = 152,6 mg/L HCO₃⁻

53

SYNTHESE DE LA CONSOMMATION DE TAC

	Période pluvieuse	Période sèche
Apports : Eau usée	110 mg/L HCO ₃ ⁻	330 mg/L HCO ₃
Consommation :		
Physico-chimique	- 15,6 mg HCO ₃ ⁻ /litre	- 26,5 mg HCO ₃ ⁻ /litre
Nitrification	- 130,5 mg HCO ₃ ⁻ /litre	- 304,4 mg HCO ₃ ⁻ /litre
Restitution :		
Dénitrification	+ 65,4 mg HCO ₃ ⁻ /litre	+ 152,6 mg HCO ₃ ⁻ /litre
Bilan :	29,3 mg/L HCO₃⁻	151,7 mg/L HCO₃⁻

CONCLUSION

La **consommation trop importante d'hydrogéo-carbonates** (HCO_3^-) a des conséquences importantes, en particulier sur :

- **Le blocage de la nitrification** par absence de substrat et aussi acidification du milieu dont les germes autotrophes sont très sensibles au pH acide du milieu.
- **L'acidité de l'eau** peut aussi pénaliser les réactions de coagulation et de floculation du traitement physico-chimique et éventuellement le pH des eaux rejetées.

Dans le cas d'un manque d'hydrogéo-carbonates ou afin d'éviter sa perte au cours du traitement, la démarche suivante peut être retenue :

Sur l'étage physico-chimique, la perte d'hydrogéo-carbonates est due à l'acidité du milieu compte tenu de la solution acide de FeCl_3 apportée. Cette acidité pourra être évitée ou compensée par **l'ajout d'une base** telle que l'injection d'une solution de chaux éteinte sachant que l'on compense 1,65 mg de HCO_3^- / g de chaux éteinte; ou par l'utilisation d'autres réactifs moins acides comme par exemple l'aluminate de sodium.

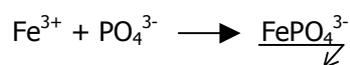
Sur l'étage biologique, en l'absence d'hydrogéo-carbonate, **la complémentation s'avère indispensable** et les principaux produits envisageables pour apporter de l'alcalinité (HCO_3^-) sont :

- L'hydrogéo-carbonate de sodium, a priori le moins cher
- L'hydrogéo-carbonate de potassium

FICHE N°3 : CALCUL DU VOLUME DE COAGULANT EN SOLUTION COMMERCIALE A APPORTER PAR JOUR **CAS DU CHLORURE FERRIQUE : FeCl₃**

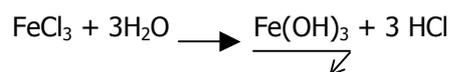
Afin de précipiter la quantité de P-PO₄³⁻ voulue au niveau du clarifloculateur, une quantité de Fer doit être injectée : une partie est utilisée pour former des phosphates de fer et une autre pour former des hydroxydes de Fer (réaction parasite).

La réaction du chlorure ferrique avec les orthophosphates est la suivante :



Formation d'un précipité appelé phosphate de fer

La réaction « parasite » du chlorure ferrique avec l'eau est la suivante :



Formation d'un précipité appelé hydroxyde de fer

Cette quantité de Fer apportée est calculée de la façon suivante :

Rappels :

Le ratio massique (mole / mole) Fe / P est constant et est égal à 1,81:

Avec la masse atomique du Fer = 56 g/mole

Et la masse atomique du P (phosphore) = 31 g/mole d'où Fe / P = 56 / 31 = 1,81

Le ratio molaire (Fe à appliquer / P à traiter, donc entrant) est fixé en fonction du rendement recherché.

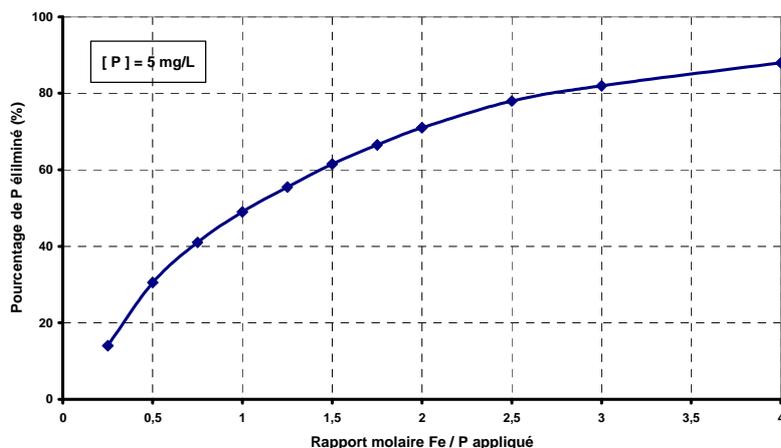


Figure 7 – Evolution du rendement d'élimination du P en fonction du ratio molaire Fe apporté/P appliqué

Pour d'autres concentrations d'entrée, la figure 6 page 25 du document FNDAE n°29 fournit cette information.

On sait que pour un même rendement, les ratios sont plus élevés lorsque la concentration en ortho-phosphates des eaux à traiter est plus faible.

A titre d'exemple : En traitement primaire (10 mg P/L), les ratios sont de l'ordre de 1,5 à 2.

En traitement tertiaire (1,2 mg P/L), les ratios sont de l'ordre de 3.

En traitement tertiaire, la consommation de réactif par rapport à la quantité de phosphate éliminée est beaucoup plus élevée.

Par exemple, on peut retenir un ratio molaire (Fe à appliquer / P) de 3,45 en tertiaire afin d'obtenir un rendement élevé sur le $P-PO_4^{3-}$ de l'ordre de 85 %.

Exemple : données de base

Flux journalier d'ortho-phosphate appliqué sur l'ouvrage = 29 kg de $P-PO_4^{3-}$ /jour.

Rendement escompté de l'ouvrage = 85 % d'où un ratio molaire de 3,45 ce qui nécessite de piéger 24,65 kg de $P-PO_4^{3-}$ /jour arrondi à 25 kg de $P-PO_4^{3-}$ /jour.

Caractéristiques de la solution commerciale de chlorure ferrique utilisée sur le site : 41 % de $FeCl_3$ avec une masse volumique de 1,45 kg/litre.

- Calcul de la quantité de Fer pur à apporter chaque jour pour éliminer 25 kg de $P-PO_4^{3-}$
= Flux de phosphore à éliminer x ratio molaire choisi x ratio massique
= $25 \times 3,45 \times 1,81 = 156,1$ kg de Fer/jour

56

- Calcul du volume de la solution commerciale à injecter par jour pour apporter 156,1 kg de Fer nécessaires.

La solution de chlorure ferrique commerciale est dosée à 204,5 g Fe par Litre arrondi à 205 g Fe par Litre (solution à 41% de $FeCl_3$).

En effet, dans 1 litre de solution commerciale, on a 41 % de $FeCl_3$ composé de 34,5 % de Fer (Masse atomique du Fe = 56 et du Cl = 35,5 d'où $56/162,5 = 34,5$) et de masse volumique de la solution commerciale égale à 1,45 kg/litre.

Ce qui donne :

1 L de solution commerciale x 41 % x 34,5 % x 1,45 = 0,205 kg de Fer/L de solution commerciale (ou 0,594 kg de $FeCl_3$ /L de solution commerciale).

En raison d'un besoin de 156,1 kg de Fer à apporter chaque jour et d'une solution commerciale concentrée à 205 g Fer/L ou kg/m^3

d'où $156,1 / 0,205 = 0,762 m^3 / jour$ de solution commerciale de chlorure ferrique ou de 1,104 tonne de solution commerciale de chlorure ferrique / jour ($0,762 \times$ masse volumique de 1,45).

Le volume de solution commerciale de chlorure ferrique à apporter chaque jour est de 763 Litre / jour.

FICHE N°4 : DEMARCHE DE LA VERIFICATION DES TAUX DE TRAITEMENT

EXEMPLE DE CALCUL POUR LE COAGULANT : CAS DU CHLORURE FERRIQUE (FeCl_3)

En exploitation, le relevé des quantités de produits consommés (coagulant et floculant) doit être réalisé régulièrement pour optimiser et limiter les coûts d'exploitation : consommation de réactifs, production de boue,... L'optimisation de l'apport des réactifs doit être également analysée avec les résultats obtenus en sortie du procédé de traitement.

Ce relevé, comparé avec les apports recherchés ou annoncés par l'automate, permet :

- De détecter des anomalies de fonctionnement comme : les fuites, le colmatage de la canalisation ou le mauvais rendement de la pompe (débit plus faible). Cette quantité réelle de produits consommés peut être facilement obtenue par la différence de hauteur mesurée sur le bac de stockage dont le volume est obtenu par le produit de cette hauteur par la surface du bac ramené à une durée donnée.
- Et de réagir sur les quantités apportées afin de mieux les optimiser.

A partir de la quantité de produit réellement apportée, le ratio molaire Fe/P peut être vérifié et optimisé en fonction de la concentration en orthophosphates mesurée en sortie. L'objectif est d'atteindre le niveau de rejet demandé. Au-delà, les réactifs non piégés en phosphates de fer compte tenu de l'absence de P-PO_4^{3-} participent à la production de boue par la précipitation en hydroxyde de Fer et à une consommation de réactifs inutile.

Le taux de traitement appliqué s'exprime couramment en g de Fe ou g de FeCl_3 pur / m^3 d'eau traitée.

En prenant par exemple les mêmes données que précédemment, on obtient :

Données :

Volume journalier de solution commerciale apporté = 763 L de solution commerciale/j

Volume journalier traité : 26 000 m^3 /jour

Flux journalier de P-PO_4^{3-} appliqué : 29 kg de P-PO_4^{3-} /j

Flux journalier de P-PO_4^{3-} à éliminer : 25 kg de P-PO_4^{3-} /j

TAUX DE TRAITEMENT : ATTENTION AUX UNITES

En g de Fer pur/ m^3 d'eau traitée :

On apporte 156,1 kg de Fer pur/jour ($25 \times 3,45 \times 1,81 = 156,1$ ou 763 L de solution à 204,5 g Fer/L) ce qui donne un taux de traitement de 6 g de Fe pur / m^3 d'eau traitée ou 6 mg de Fer pur/Litre.

En g de FeCl_3 pur/ m^3 d'eau traitée

On apporte 454 kg de FeCl_3 par jour (= 763 l x 41 % x 1,45) ce qui donne un taux de traitement de 17,4 g de FeCl_3 pur/ m^3 d'eau traitée ou 17,4 mg de FeCl_3 pur/Litre.

Ce taux de traitement est à comparer avec celui annoncé au dimensionnement.

Les mêmes calculs sont réalisés régulièrement avec le polymère.

VERIFICATION DU RATIO MOLAIRE REELLEMENT APPLIQUE

Chaque jour, on apporte 156,1 kg de Fer pur (= 763 L x 204,5 g/L) pour éliminer 25 kg de P-PO_4^{3-} ce qui donne une consommation de 6,24 kg de Fer par kg de P-PO_4^{3-} éliminé.

Compte tenu du ratio massique Fe /P de 1,8 (= 55,8 / 31), le ratio molaire est de 3,45 ($156,1/25 = 6,24$ et $6,24 / 1,81 = 3,45$).

Cette valeur est à comparer avec le ratio théorique fixé par l'exploitant en vue de son optimisation (fonction des résultats de sortie).

FICHE N°5 : CALCUL DE LA PRODUCTION DE BOUE ISSUE DU TRAITEMENT

PHYSICO-CHIMIQUE TERTIAIRE

La quantité de boue produite sur cet étage de traitement est fonction de deux paramètres :

- De la quantité de MES piégées dans l'ouvrage,

Cette quantité de MES piégées par l'ouvrage exprimée en kg de MES/jour

= flux de MES éliminé

= Q journalier en m³ /j x ([MES] entrée - [MES] sortie en mg/L x 1000)

Sachant que la concentration en MES des échantillons d'entrée et sortie doit être mesurée à partir d'échantillons journaliers proportionnels aux débits.

- Et de la quantité de boue formée par les réactifs physico-chimiques.

La quantité de boues physico-chimiques produites est liée à la quantité de FePO₄³⁻ et de Fe(OH)₃ formé plus la quantité de polymère apportée. Dans un bilan boue, très souvent, la quantité de polymère apportée n'est pas prise en compte du fait des faibles valeurs en jeu et les quantités de FePO₄³⁻ et Fe(OH)₃ formés dépendent du flux en P-PO₄³⁻ à précipiter, de l'excès de fer par rapport aux orthophosphates à éliminer d'où une formation d'hydroxyde importante.

La différence entre la quantité de boue produite (calcul théorique) et la quantité de boue mesurée peut s'expliquer :

- Soit par la quantité de polymère injectée (non comptabilisé dans la production de boue compte tenu des doses appliquées faibles),
- Soit par la quantité de sable perdu par le système au niveau de l'évacuation des boues en excès (cas de l'actiflo®). On parle d'une perte de boue de l'ordre de 5 g/m³ d'eau traitée avec 50% vers la filière boue et 50% vers les eaux de sortie.

Un bilan boue doit être effectué sans stockage ou déstockage des boues de l'ouvrage (voile de boue ou taux de sable équivalent).

RAPPEL DU PROCESSUS DE DEPHOSPHATATION PHYSICO-CHIMIQUE :



Avec les masses atomiques suivantes :

Fe : 56 P : 31 O : 16 d'où FePO₄³⁻ : 151

H : 1 d'où Fe(OH)₃ : 107

Dans une mole de FePO₄³⁻, on a 20,5 % de P (= 31/151) et 37,1 % de Fe

Dans une mole de Fe(OH)₃, on a 52,3 % de Fe

Les ratios massiques sont les suivants :

$$\text{FePO}_4^{3-} / \text{P} = 151/31 = 4,87$$

$$\text{FePO}_4^{3-} / \text{Fe} = 151/ 56 = 2,7$$

$$\text{Fe(OH)}_3 / \text{Fe} = 107 / 56 = 1,91$$

Avec X = kg de P-PO₄³⁻ à éliminer par jour

Y = kg de Fer apporté par jour

FORMULES D'ÉVALUATION DE LA PRODUCTION DE BOUE PHYSICO-CHIMIQUE :

- La quantité de FePO₄³⁻ formé est = 4,87 . X (flux de P-PO₄³⁻ apporté) car le ratio massique FePO₄³⁻ / P = 151/31 = 4,87
- La quantité d'hydroxyde de Fer est fonction de la quantité de Fer non utilisé pour la précipitation des orthophosphates.

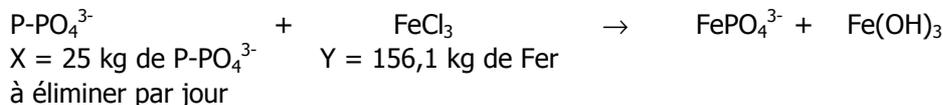
Le fer utilisé par les ortho-phosphates est de : 37,1 % des FePO₄³⁻ formés

Le fer disponible pour la formation des hydroxydes est de : Quantité de Fer apporté (Y) moins le fer utilisé pour la précipitation des orthophosphates d'où Fer disponible (37,1% de FePO₄³⁻ formés = 4,87.X).

Sachant que la masse atomique Fe(OH)₃/Fe est = 1,91, la quantité de boue liée aux hydroxydes de Fer est de : Fe disponible aux hydroxydes x 1,91.

60

Exemple :



Données de base :

Flux journalier de P-PO₄³⁻ apporté = 29 kg de P-PO₄³⁻ /j

Flux journalier de P-PO₄³⁻ à éliminer = 25 kg de P-PO₄³⁻ /j ce qui entraîne un rendement de 86 % d'où un ratio molaire de l'ordre de 3,45 (cf. figure n°7 dans le document).

Quantité de Fer à apporter chaque jour pour éliminer 25 kg de P-PO₄³⁻ :

$$25 \times \text{ratio molaire choisi} \times \text{ratio massique} = 25 \times 3,45 \times 1,81 = 156,1$$

CALCUL DE LA PRODUCTION DE BOUE PHYSICO-CHIMIQUE :

- La quantité de FePO₄³⁻ formé est = 4,87 x X car le ratio massique FePO₄³⁻ / P = 151/31 = 4,87
- La quantité de FePO₄³⁻ formé est = 4,87 x 25 = 121,75 kg de FePO₄³⁻
- La quantité d'hydroxyde de Fer est fonction de la quantité de Fer non utilisé pour la précipitation des orthophosphates.

Le fer utilisé par les orthophosphates est de : 37,1 % des FePO₄³⁻ formés

$$= 121,75 \times 37,1\% = 45,17 \text{ kg de Fer}$$

Le fer disponible pour la formation des hydroxydes est de : Quantité de Fer apporté (Y) moins le fer utilisé pour la précipitation des orthophosphates

$$\text{d'où Fer disponible} = 156,1 - 45,17 = 110,9 \text{ kg de Fer disponible pour les hydroxydes.}$$

Sachant que la masse atomique $\text{Fe(OH)}_3/\text{Fe}$ est = 1,91, la quantité de boue liée aux hydroxydes de Fer est de : Fer disponible aux hydroxydes x 1,91

$$= 110,9 \times 1,91 = 211,9 \text{ kg de Fe(OH)}_3 \text{ sont formés en parallèle.}$$

Afin de précipiter en totalité 25 kg de P-PO_4^{3-} par jour, la production de boue physico-chimique est, sans perte de fer en sortie, est de :

$$121,75 \text{ kg de FePO}_4^{3-} \text{ formé (36,5 \% du total)} + 211,9 \text{ kg de Fe(OH)}_3 \text{ formés (63,5 \% du total)} = 333,65 \text{ Kg de boues physico-chimiques.}$$

On a produit 13,3 kg de boue physico-chimique/ kg de P-PO_4^{3-} précipité (333,65 kg de Boues /25 kg de P-PO_4^{3-}).

Avec 47 % de Fer (156,1 kg de Fer pour 333,65 kg de boue formée)

METHODE DE CALCUL RAPIDE :

Production de boue physico-chimique = ratio ($\text{FePO}_4^{3-} / \text{P} = 4,87$) + [((ratio molaire Fe / P choisi) - 1) x (ratio $\text{Fe(OH)}_3 / \text{P} = 3,45$)] x flux de P à éliminer

Production de boue physico-chimique = [4,87 + ((Fe / P choisi) - 1) x 3,45] x flux de P à éliminer

Dans notre exemple, cette formule rapide donne :

Production de boue physico-chimique = [4,87+ (3,45-1) x 3,45] x 25 = 13,32 x 25 = 333 Kg de boues physico-chimiques

FICHE N°6 : CONSEQUENCE D'UNE MAUVAISE OPTIMISATION DU DOSAGE DE COAGULANT SUR LA PRODUCTION DE BOUE PHYSICO-CHEMIQUE

A partir de notre exemple abordé dans les fiches précédentes :

Pour éliminer 25 kg de P-PO₄³⁻ sur la clarificateur avec un ratio molaire de 3,45, soit une consommation de 156,1 kg de fer par jour, la production totale de boue physico-chimique est de 333 kg de boues.

$$\text{Formule rapide} = [4,87 + (3,45 - 1) \times 3,45] \times 25 = 13,32 \times 25 = 333 \text{ Kg de boues}$$

(cf. fiche n°5 précédente)

ETUDE DE DEUX CAS FREQUEMMENT OBSERVES SUR LES INSTALLATIONS ETUDIEES :

1^{er} cas : Dysfonctionnement du dosage de FeCl₃

L'installation est à sa charge nominale, soit 25 kg de P-PO₄³⁻ à éliminer.

Mauvais réglages des pompes d'injection de FeCl₃ avec une dose de Fer appliqué de 226 kg de Fer /jour.

2^{ème} cas : Sous charge de l'installation (50 % de taux de charge)

Flux de P-PO₄³⁻ à éliminer = 12,5 kg / jour

Avec un même réglage soit 156,1 kg de Fer / jour

62

	Référence (Fiche tech. n°5)	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas
Flux de P-PO₄³⁻ à éliminer	25 kg	25 kg	12,5 kg
Quantité de Fer injecter	156,1 kg	226 kg	156,1 kg
Ratio molaire ((Quantité de fer / Flux de P-PO ₄ ³⁻) / 1,81)	3,45	5	6,9
Production totale de boue physico-chimique (voir formule rapide)	333 kg de boue	467 kg de boue soit 40 % de plus	315 kg de boue soit 5 % de moins.
Production spécifique Kg de boue/kg de P-PO₄³⁻ précipité	13,3	18,7 (+ 40%)	25,2 (+ 89%)

La production spécifique de boue de ce type d'ouvrage sera exprimé en kg de boue produite par kg de phosphore éliminé compte-tenu que l'objectif prioritaire du clarificateur est l'élimination des

orthophosphates. Pour la production de boue physico-chimique, on exprimera la production spécifique de boues physico-chimiques / kg d'ortho-phosphates éliminé.

Dans ces différents scénarios, on observe qu'une mauvaise optimisation du dosage du coagulant entraîne des productions de boue supplémentaire très importante (+ 40 et + 89%) Ces résultats militent pour une optimisation poussée du poste réactifs afin d'apporter la quantité nécessaire de fer en évitant le sous ou le sur dosage.

Si la quantité de $P-PO_4^{3-}$ en sortie d'ouvrage est supérieure à la quantité désirée, un apport supérieur de Fer est nécessaire.

Par contre, si la quantité de $P-PO_4^{3-}$ en sortie est inférieure à la quantité désirée, une diminution du dosage du chlorure ferrique est possible afin d'éviter une fuite de fer vers le milieu naturel ainsi qu'une surproduction de boue physico-chimique.

Le suivi des quantités de Phosphore en entrée, en sortie de l'ouvrage et des réactifs réellement consommés sont donc des points importants du suivi de ce type d'ouvrage.

FICHE N°7 : EXEMPLES DE TYPE D'ASSERVISSEMENT POUR L'INJECTION DES REACTIFS EN VUE DE L'OPTIMISATION DES QUANTITES A INJECTER.

CAS DU COAGULANT : $FeCl_3$ - PRESENTATION DES PRINCIPALES DIFFICULTES RENCONTREES.

Dans les fiches techniques précédentes, nous avons abordé le calcul de la quantité journalière de réactifs à injecter en insistant bien sur les conséquences de son excès sur la production de boue et donc sur les coûts d'exploitation. A ce niveau, les consommations en réactifs sont souvent très élevées en raison des deux principales difficultés suivantes :

- Faible concentration d'entrée et rendement demandé très élevé (> 80%),
- Fluctuations pouvant être très importantes du flux de P entrant au cours de la journée.

Cette optimisation nécessite d'apporter le réactif en fonction de la charge en orthophosphates à traiter ce qui implique d'adapter les apports en fonction de la charge entrante.

Différentes possibilités d'asservissement sont rencontrées sur ce type d'ouvrage et la plus courante est un asservissement en fonction du débit. Dans certains cas, des analyseurs de $P-PO_4^{3-}$ ont été installés lors de la construction ce qui permet réellement d'adapter les quantités injectées en fonction du flux entrant à condition que la réponse du système (asservissement au flux, c'est à dire au produit de la concentration donnée par l'analyseur par le débit) soit rapide compte tenu du temps de séjour très court des eaux à traiter dans l'ouvrage (quelques minutes). Ce dernier type d'asservissement est rapidement mis à l'arrêt en raison des fortes contraintes d'exploitation. Il pourra être fortement recommandé dans les cas où la charge à traiter au cours de la journée varie fortement et ne peut être prédite compte tenu d'un traitement amont très compact (absence de pouvoir tampon du réacteur amont)) et les flux entrée station très variables liés au type de réseau, à des activités industrielles. Dans les autres cas et plus particulièrement en traitement tertiaire, il est préférable d'établir des courbes de référence de l'évolution de la concentration et du flux en ortho-phosphates à traiter. Ce type de courbes peut permettre de définir d'éventuelles périodes de la journée où l'ajout de réactifs peut être fortement limité voir arrêté.

Nous allons présenter deux cas en traitement tertiaire en étudiant les possibilités d'asservissement et surtout les difficultés rencontrées.

- **Cas n° 1** : Filière boue activée à l'amont du clari-floculateur.
- **Cas n°2** : Filière biofiltration

Remarque : on observe des variations en terme de concentrations très limitées sur des systèmes de type Boue Activée en aération prolongée en raison d'un temps de séjour des effluents de l'ordre de 24 heures (fort pouvoir tampon). Inversement, les systèmes Biofiltration avec un temps de séjour de l'ordre de l'heure, occasionnent des variations importantes de concentrations sur la journée.

Le mode d'asservissement retenu et le type d'équipement installé (plage de réglage de débit des pompes d'injection Q minimal / maximal) est fonction des besoins calculés.

EXEMPLE DE METHODE DE CALCUL

Données :

Type d'effluent à traiter : eau usée domestique majoritairement

Charges hydrauliques :

	Volume journalier	Débit mini.	Débit moyen	Débit maxi.
Charge hydraulique	50 000 m ³ /j	1000 m ³ /h	2083 m ³ /h	4000 m ³ /h

Cp hydraulique = 1,92

Flux de Phosphore total à traiter : 600 kg de PT/jour (concentration en PT de 12 mg de PT/L).

Niveau de rejet demandé : concentration en PT < 1 mg/L

1^{er} Cas : Filière amont : Boue activée - aération prolongée avec une déphosphatation biologique et physico-chimique.

La concentration en PT obtenue en sortie de la boue activée peut être variable suivant le traitement plus ou moins poussé retenu à l'amont (physico-chimique et/ou biologique). On retiendra le scénario moyen suivant :

Traitement amont moyen : 71% d'abattement sur le Ptotal d'où en sortie de filière boue activée, 3,5 mg/L de PT avec 2,5 mg/L de P-PO₄³⁻

L'objectif de l'étage tertiaire (respect de [PT] < 1 mg/L) est d'obtenir une concentration moyenne journalière en P-PO₄³⁻ en sortie d'installation de l'ordre de 0,3 mg/L. A cette teneur en orthophosphate s'ajoute la part de phosphore total lié aux matières en suspension (sur la base d'un rejet de 10 mg de MES/L avec 5 % de PT par g MES) soit 0,5 mg de PT constitutif d'où un rejet vers le milieu récepteur de 0,8 mg de PT/L.

Remarque importante : Dans le cas d'un traitement amont très poussé, l'objectif du 0,2 – 0,3 mg d'orthophosphate par litre est déjà atteint et une simple clarification pour éliminer les MES donc le phosphore constitutif peut suffire pour le respect du niveau de rejet demandé.

Calculs :

	Volume journalier	Débit mini.	Débit moyen	Débit maxi.
Charge hydraulique	50 000 m ³ /j	1000 m ³ /h	2083 m ³ /h	4000 m ³ /h
[PT] sortie boue activée	3,5 mg/L	2,95 mg/L	3,5 mg/L	4,2 mg/L
Estimation du P constitutif 20 mg/L MES x 4,5 % de P = 0,9 mg/L				
Avec des variations de concentration en MES fonction du débit				
Concentration en MES en sortie Boue activée	20 mg/L (soit 0,9 mg P constitutif /L)	10 mg/L (soit 0,45 mg P constitutif /L)	20 mg/L (soit 0,9 mg P constitutif /L)	30 mg/L (soit 1,35 mg P constitutif /L)
Objectif : 0,3 mg/L de P-PO₄³⁻ en sortie				
[P-PO₄³⁻] Entrée tertiaire	2,6 mg/L	2,5 mg/L	2,6 mg/L	2,85 mg/L
[P-PO₄³⁻] à éliminer	2,3 mg/L	2,2 mg/L	2,3 mg/L	2,55 mg/L
Flux de P-PO₄³⁻ à éliminer	115 kg/j	2,2 kg/h	4,8 kg/h	10,2 kg/h
Rendement en P-PO₄³⁻	88 %	88%	88%	89 %
Ratio massique Fe / P = 1,81				
Ratio molaire Fe / P correspondant : 3,5				
Quantité de Fer = Flux de P-PO ₄ ³⁻ à éliminer x 1,81 (ratio massique) x 3,5 (ratio molaire)				
Quantité de Fer à apporter	728 kg/j	13,9 kg/h	30,4 kg/h	64,6 kg/h
Solution commerciale de FeCl₃ est aux alentours de 204 g de Fer/L				
Volume de solution commerciale de FeCl₃ à apporter	3,57 m ³ /j	68 L/h	149 L/h	316 L/h

On note un débit variable de la pompe d'injection de 68 L/h à 316 L/h, soit un coefficient de 4,6. Ce coefficient est relativement faible en raison du ratio hydraulique de 4 (débit maxi sur le débit de pointe) et du ratio de concentrations de 1,16 (Concentration maximum sur concentration minimum). Sur cette installation, le coefficient de variation global (de 4,6) est relativement faible pour le choix de la pompe et l'asservissement sur le débit sera bien adapté compte tenu du poids de ce coefficient hydraulique sur le global (facteur 4).

2ème Cas : Filière amont : Biofiltration avec une déphosphatation physico-chimique sur l'étage primaire.

La concentration moyenne journalière en PT obtenue en sortie de la filière biofiltration peut varier suivant le traitement plus ou moins poussé retenu à l'amont (traitement physico-chimique sur l'étage primaire) avec obligatoirement une concentration suffisante en $P-PO_4^{3-}$ à l'entrée biofiltration pour maintenir l'activité biologique du biofiltre. On retiendra sur le scénario présenté une concentration moyenne en PT de 2,9 mg/L soit un rendement de 76 % :

Sortie de la filière biofiltre : 2,9 mg/L de PT avec 2,7 mg/L de $P-PO_4^{3-}$

Compte tenu de l'estimation du P constitutif à 0,2 mg de P/L (avec 12 mg/L MES x 80% de MVS x 2% de P = 0,2 mg/L). Dans ce cas, le taux de P constitutif est de 2 % compte du rejet de biomasse issu des biofiltres sans traitement spécifique (boue biologique de sur accumulation ou perte de boue physico-chimique).

L'objectif de l'étage tertiaire est d'obtenir une concentration moyenne journalière en $P-PO_4^{3-}$ en sortie d'installation de l'ordre de 0,3 mg/L. A cette teneur en orthophosphates s'ajoute la part de phosphore total lié aux matières en suspension (sur la base d'un rejet de 10 mg de MES/L avec 5 % de PT par g MES compte tenu ici de pertes de boue physico-chimique) soit 0,5 mg de PT constitutif d'où un rejet vers le milieu récepteur de 0,8 mg de PT/L.

Remarque importante : Sur une filière biofiltration où une partie de la déphosphatation physico-chimique se fait sur l'étage primaire. Un traitement très poussé sur cet étage est difficilement envisageable (objectif du 0,2 mg d'ortho-phosphates par litre) car il présente un risque important de carence en P indispensable pour l'activité biologique aval.

Calculs :

	Volume journalier	Débit mini.	Débit moyen	Débit maxi.
Charge hydraulique	50 000 m ³ /j	1000 m ³ /h	2083 m ³ /h	4000 m ³ /h
[PT] sortie biofiltre	2,9 mg/L	1 mg/L	2,9 mg/L	6 mg/L
Estimation du P constitutif 12 mg/L MES x 2 % de P = 0,24 mg/L				
Avec des variations de concentrations en MES fonction du débit importante compte tenu des temps de séjour hydrauliques très courts sur ce type de filière.				
Concentration en MES en sortie Boue activée	12 mg/L	8 mg/L	12 mg/L	20 mg/L
Objectif : 0,3 mg/L de P-PO₄³⁻ en sortie milieu récepteur.				
[P-PO₄³⁻] Entrée tertiaire	2,7 mg/L	0,85 mg/L	2,7 mg/L	5,6 mg/L
[P-PO₄³⁻] à éliminer	2,4 mg/L	0,55 mg/L	2,4 mg/L	5,3 mg/L
Flux de P-PO₄³⁻ à éliminer	120 kg/j	0,55 kg/h	5 kg/h	21,2 kg/h
Rendement en P-PO₄³⁻	89 %	65 %	89 %	95 %
Ratio massique Fe / P = 1,81				
Ratio molaire Fe / P correspondant : 3,5				
Quantité de Fer = Flux de P-PO ₄ ³⁻ à éliminer x 1,81 (ratio massique) x 3,5 (ratio molaire)				
Quantité de Fer à apporter	760 kg/j	3,5 kg/h	31,7 kg/h	134,3 kg/h
Solution commerciale de FeCl ₃ est aux alentours de 204 g de Fer/L				
Volume de solution commerciale de FeCl₃ à apporter	3,72 m ³ /j	17 L/h	155 L/h	658 L/h

On note un débit variable de la pompe d'injection de 17 L/h à 658 L/h soit un coefficient de 38. Ce dernier est relativement élevé en raison du ratio hydraulique de 4 (débit maxi sur le débit minimum) et du ratio de concentrations de 9,6 (Concentration maximale sur concentration minimale). Sur cette installation, le coefficient de variation global (de 38) est très élevé pour le choix de la pompe et l'asservissement sur le débit très complexe nécessitera la mise en place de plusieurs pompes pour atteindre le débit souhaité.



ANNEXES

Annexe 1 – Evolution des concentrations sur des procédés de traitement poussés situés à l’amont d’un clarifloculateur

Annexe 2 – Estimation des concentrations minimales envisageables en sortie de clarifloculation en traitement tertiaire à partir d’une Eau Usée Domestique normalement concentrée

Annexe 3 – Niveaux de rejets demandé pour les STEP équipées d’un tertiaire

Annexe 4 – Les étapes de Coagulation et Flocculation

Annexe 5 – Concentrations mesurées en Fer

Annexe 6 – Liste (non exhaustive) des collectivités françaises équipées de clarifloculateurs en 2004

Annexe 7 – Résultats des mesures sur site

ANNEXE 1 - ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS SUR DES PROCÉDES DE TRAITEMENT POUSSÉS SITUÉS À L'AMONT D'UN CLARI-FLOCCULATEUR

Caractéristiques :

En mg/L	DCO	DBO ₅	MES	N			P	
				NK	Noxy	NGL	PT	PO ₄ ³⁻
Eau Usée Domestique normalement concentrée								
Temps sec (talon réfract.)	700 (30-35)	290	260	70 (1,5)	0	70 (1,5)	12-15	10-12
Tps de pluie								
Fact. de charge	x 1,8	x 1,5	x 2	X 1,3			X 1,3	
Sortie du Procédé Boues Activées : traitement du C + N + P (avec déphosphatation biologique et physico-chimique)								
Temps sec	60-70	10-15	15-20	5-6	2	8	1,2-1,5	0,2-0,3
D'où Rendement %	90-91	95-96	92-94	91-93		88	90-92	
Tps de pluie	50-60	15-20	20-25				1,5	
D'où Rendement %	86-88	86-90	88-91				77	
Sortie du Procédé Biofiltration en traitement poussé C + N (avec un traitement I physico-chimique et donc une déphosphatation)								
Temps sec	70	15	12-15	5		10-15	1,5-2	
D'où Rendement %	90	95	94-95	93		78-86	87-90	

Conclusions :

Dans le cas des eaux résiduaires domestiques normalement concentrées, la clarifloculation tertiaire sera envisagée lorsque les concentrations demandées en sortie seront, suivant les paramètres :

DCO < à 60 mg/L

MES < à 15 mg/L

PT < 1,5 mg/L

ANNEXE 2 : ESTIMATION DES CONCENTRATIONS MINIMALES ENVISAGEABLES EN SORTIE DE CLARIFLOCCULATION EN TRAITEMENT TERTIAIRE A PARTIR D'UNE EAU USEE DOMESTIQUE NORMALEMENT CONCENTREE

Les niveaux de rejet escomptés en tertiaire par le procédé clariflocculation pour les différents paramètres sont étroitement liés entre eux, comme le montre le tableau ci-dessous.

Sur la base d'une concentration en MES de sortie tertiaire de l'ordre de 8 à 10 mg/L de MES :

Paramètres	Les différentes fractions en sortie en mg/L			Valeur totale basse envisageable en sortie en mg/L
	Part liée aux MES	Fraction non biodégradable (part réfractaire)	Fuite sous forme soluble	
DCO	$8 \times 1,2 = 9,6$	30 à 35	$2 \text{ mg DBO}_5 \times 2,4 = 4,8$	45 à 55
DBO₅	$8 \times 0,5 = 4$	-	1 à 2	5 à 7
PT	$8 \times 4,5\% = 0,36$	-	0,2 à 0,3	0,6 à 0,7
NK	$8 \times 50\% \text{MVS} \times 9\% = 0,36$	$70 \times 2\% = 1,4$	2	4

71

Le clarifloculateur en position tertiaire permet :

- Une réduction du phosphore et plus particulièrement des ortho-phosphates par l'ajout des sels métalliques,
- Une réduction des MES pouvant atteindre une concentration résiduelle de 8 mg/L (avec 50% de MVS). Cet abattement des MES permet également une réduction des paramètres constitutifs de la biomasse.

La mise en place d'un clari-floculateur doit être envisagée lorsque les niveaux de rejet demandés sont faibles, en particulier :

- Pour le paramètre phosphore, lorsque les valeurs demandées sont inférieures à 1,5 mg/L (le clarifloculateur a une action sur les ortho-phosphates et sur le P particulaire grâce à l'abattement des MES)
- Pour le paramètre DCO avec des valeurs en MES < à 15 mg/L et en DCO < à 60 mg/L

Ainsi, en sortie de clari-floculateur, les concentrations envisageables sont les suivantes :

DCO	DBO ₅	MES	NGL	PT
45 à 55 mg/L	5 à 7 mg/L	8 à 10 mg/L	9 mg/L	< à 0,8 mg/L

ANNEXE 3 : NIVEAUX DE REJET DEMANDES POUR LES STEP EQUIPEES D'UN

TERTIAIRE

Sites	Niveau de rejet			
	DCO	DBO	MES	PT
Metz	100	25	30	1
	75%	90%		90%
Aix-en-Provence	125	25	35	1
	95%	95%	95%	90%
Limoge	90	25	30	2
Divonne	65	22	20	0,8
	75%	86%	90%	90%
Bourg-Bresse ^{*2}	90	25	30	1
Reims	70	20	30	1
	90%	90%	90%	90% (= 0,6 mg)
Sarreguemine ^{*3}	75	15	15	2
	100	20 / 25	25 / 30	2
	75%	90%	90%	80%
Marne aval	70 / 75	15 / 25	15 / 25	1,3 / < 1 (6 mois)
Nimes	50	15	20	1
Aurillac ^{*1}	125	25	35	2
	85%	80%	90%	84%
St Etienne en Dévoluy	70	15 / 25	15 / 25	1,3
Oudar	125	25	35	1

*1 Aurillac : réhabilitation – argument clarificateur existant limite – facilités (hydraulique, travaux, coûts) de mettre un étage III – en plus traitement du P, durant la phase travaux eaux prétraitées + traité physico-chimique + sécurité si étage biologique doit être By-passé

2 : Bourg : + pluie

*3 : Sarreguemines – biofiltres sans physico-chimique en I^{aire}.

En orange, les paramètres qui ont occasionné le choix d'un traitement tertiaire.

ANNEXE 4 : LES ETAPES DE COAGULATION ET FLOCCULATION

Caractéristiques des réactifs et des additifs

Le coagulant : On utilise des sels métalliques de sulfate d'alumine (alun), le sulfate ferreux ou le chlorure ferrique. Le choix du réactif se fait selon sa facilité de mise en œuvre : les réactifs liquides sont donc préférés bien que plus chers et son rapport performances / prix.

Les performances épuratoires de chaque réactif dépendent essentiellement du pH qui induit la solubilité des précipités :

- Le sulfate d'alumine : pH optimal entre 5,5 et 6,5
- Le sulfate ferreux : pH entre 7 et 8
- Le chlorure ferrique : pH assez faible : 4,5 - 5, mais il reste efficace à pH plus élevé.

Les précipités de phosphates ferriques seraient ceux décantant le mieux, le chlorure ferrique permettrait donc une meilleure épuration. Il est très fréquemment utilisé en Europe pour cette raison. Aux Etats-Unis, l'alun est préféré pour que les eaux traitées contiennent moins de résiduels métalliques (limite de solubilité plus basse). En France, l'ensemble des sites équipés d'un clari-floculateur en tertiaire utilise le FeCl_3 comme coagulant.

Le polymère : Le choix du polymère et du dosage à appliquer dépendent essentiellement de la nature des eaux à traiter (pH), en général ce choix est déterminé par Jar-Test.

Les polymères anioniques sont préconisés pour des eaux fraîches et diluées, les cationiques pour des eaux concentrées et septiques.

Le poids moléculaire du polymère joue un rôle dans le lestage du floc. Il faut que ce poids moléculaire soit assez important pour être capable de capter les MES représentées par des fines et de former un floc gros sans toutefois former des floccs à forte porosité et peu denses qui décantent mal.

En traitement tertiaire, les polymères les plus couramment utilisés sont donc des polymères anioniques à très haut poids moléculaires.

Caractéristiques des Clarifloculateurs : optimisation de la flocculation

Le lestage par la boue : La flocculation est optimisée par une recirculation en tête de boues prélevées en fond du décanteur. Cette recirculation de la boue permet tout d'abord d'avoir plus de matières dans le décanteur et elle améliore ensuite la capture des MES : les particules vont s'agglomérer lors de leur collision avec les floccs recirculés. Il y a formation du floc autour du floc recirculé. Ces floccs seront alors plus denses et leur vitesse de sédimentation sera augmentée.

Le lestage par le sable : La flocculation est optimisée par l'apport externe de sable, de densité comprise entre 1,4 et 1,5. Ce dernier sert de noyau pour la formation de floccs qui seront ainsi fortement lestés. Le sable a aussi une fonction d'initialisateur de flocculation, les micro-floccs s'agglutinant rapidement autour du sable sous l'effet combiné de l'agitation, favorisant les contacts, et du polymère qui forme des ponts entre le sable et les floccs.

ANNEXE 5 : CONCENTRATIONS MESUREES EN FER

	% Mesurés	% de Fer dans les MES (Fer/MES)	% de MVS dans les MES (% MVS)	% de PT dans les MES (PT/MES)
Etage secondaire	Boues Activées	2 à 8 %	60 à 66%	
Etage tertiaire	Recirculation des boues	31 %	26%	
	Extraction des boues	25%	30 à 33%	5%
	Sortie tertiaire	20 à 30%	/	3%

Eau traitée

Sur certaines installations, le taux de traitement en FeCl_3 n'est pas optimisé et des surdosages en fer sont régulièrement rencontrés (canal de sortie et milieu naturel sur plusieurs centaines de mètres très colorés, boues biologiques rouges).

Une analyse de l'eau traitée en sortie d'un traitement tertiaire connaissant un surdosage avéré de FeCl_3 a donné sur un échantillon moyen journalier, une concentration en Fer de 1,1 à 1,7 mg/L ; 6 mg/L de MES soit un ratio Fer / MES de 20 à 30%.

74

Taux limites au niveau du milieu naturel

Le fer fait partie des substances indésirables dans les eaux destinées à la consommation humaine – En annexe 1 - C du décret du 3 janvier 1989 relatif aux code de la santé public les eaux destinées à la consommation humaine la concentration en fer doit être inférieure ou égale à 0,2 mg/L (200 $\mu\text{g/L}$).

Aucun taux limite maximal n'est fixé au niveau du milieu naturel.

Par contre un excès de fer, vis à vis du milieu naturel, peut engendrer non pas une pollution chimique, mais une pollution mécanique. En effet les Fe^{3+} rejetés vont former des hydroxydes, précipités très fins et donc très colmatant vis à vis du milieu (sédiment, vie aquatique).

Cette pollution peut être rapprochée des pollutions accidentelles causées par les unités de traitement des eaux potables (apport de Fer + filtration – les eaux utilisées lors des rétro-lavages des filtres, chargées en fer, partent au milieu naturel).

Boues Primaires et Tertiaires

Différentes analyses sur les boues physico-chimiques de ces systèmes (25 à 35 % MVS) ont donné des ratios de l'ordre de 25 à 30 % de Fer dans les MES.

Pour les boues de station d'épuration, aucun taux limite maximale en fer n'est fixé. Le Fer ne fait pas partie de la liste des éléments traces métalliques.

**ANNEXE 6 : LISTE (NON EXHAUSTIVE) DES COLLECTIVITES FRANÇAISES EQUIPEES
DE CLARIFLOCULATEURS EN 2004**

Actiflo®

Sites	Configuration	nombre
Achères I et II Aurillac	Tertiaire + Pluvial	8 + 1
Houplain-Ancoisne	Tertiaire	1
Le Mans	Tertiaire	2
Reims	Tertiaire + lavage biof	2 + 1
Valenton	Tertiaire	3
Cap d'Agde	Tertiaire + Pluvial	3 +1
Sarreguemines	Primaire	1
Divonne les bains	Tertiaire + lavage biof	2 + 1
Luneville	Tertiaire + Pluvial	1
Maxeville	Lavage biof	1
Toulouse Ginestous	Tertiaire	3
St Maxime	Lavage biof	1
Cluse	Primaire	2
Boulogne sur mer	Primaire + lavage biof	2
	Lavage biof	1
etc.		

Densadeg®

Villefranche-sur-Saône	Primaire + Pluvial + lavage biof.	2 + 1
Flers	Tertiaire	1
Metz	Tertiaire + Pluvial	2 + 1
Limoges	Tertiaire + Pluvial	2 + 1
Tours	Tertiaire	3
Contrexeville	Tertiaire	1
Bourg-en-Bresse	Primaire ou Tertiaire	2
Aix en Provence	Tertiaire + Pluvial	2
Saint Chamond	Primaire + pluvial ou Tertiaire	2
Etampes	Tertiaire	1
Versonnex	Tertiaire	1
Bonneuil	Primaire + pluvial ou Tertiaire Tertiaire	2
Etampes	Primaire	1
Beaufort sur Doron	Primaire + Pluvial	2
Colombes		9
etc.		

76

Delreb®

Chambéry	Primaire	3
Forges-les-eaux	tertiaire	1

ANNEXE 7 : RESULTATS DES MESURES SUR SITE

Des mesures sur sites ont été réalisées sur 4 stations différentes équipées des deux principaux procédés.

Les campagnes de mesures se sont déroulées sur plusieurs jours, en fonctionnement « normal » par temps sec. Quand l'installation était équipée de plusieurs files en parallèle, le système a été poussé hydrauliquement par fermeture d'une file lorsque cela était possible.

Densadeg®	A	B
Vitesse ascensionnelle au miroir		
moyen	8 m/h	
maxi	12,5 m/h	
Taux de traitement		
FeCl ₃ pur	15 mg/L	15 mg/L
Polymère	0,5 mg/L	1,1 mg/L
Ratio Fe/P	2,5	3,6
Taux de recirculation	4,3 % Qe	
[boues]	21 g/kg	14,5 g/L
IB en mL/g MVS	85 à 105	160
Concentrations entrée/sortie en mg/L (rdt d'élimination)		
MES	7 / 4,5 (35 %)	18 / 8 (55 %)
P-PO ₄	1,1 / 0,18(83 %)	1,45 / 0,18 (87 %)
PT	1,3 / 0,3 (77 %)	1,95 / 0,65 (67 %)
Remarques	Dé P biologique amont	DéP physico amont non utilisée

Actiflo®	C	D
Vitesse ascensionnelle au miroir		
moyen	18,3 m/h	15 m/h
maxi.	54 m/h	18 m/h
Taux de traitement		
FeCl ₃ pur	70 mg/L	16,8 mg/L
Polymère	1 mg/L	1,06 mg/L
	(+ épais ≈ 2g.m ⁻³ boue)	
Ratio Fe/P	13,8	6,9
Taux de recirculation	11% Qe	10,5 % Qe
[Boues]	/	200 mg/L
Taux de sable	1,3 g.m ³	1,66 g.m ³
IB en mL/g MVS	190	110
Concentrations entrée/sortie en mg/L (rdt d'élimination)		
MES	6,25/ 5,3 (19 %)	7,5 / 4,5 (40 %)
P-PO ₄	0,96 / 0,065 (93 %)	0,84 / 0,21 (75 %)
PT	1,1 / 0,19 (84 %)	1 / 0,37 (63 %)
Remarques	DéP biologique amont	DéP physico amont non utilisée

VARIATION DE CONCENTRATIONS AU NIVEAU DE LA JOURNEE

Pointes horaires en entrée d'installation (sortie réacteur biologique)

Lors de 2 jours de mesures sur site, des pointes hydrauliques de 3 heures consécutives sont échantillonnées en entrée d'installation et analysées :

Site D	Q m³/h	Vit asc. STP m/h	PT g/L	P-PO₄³⁻ g/L
1^{er} Jour –20h/23h	247	2,9	1	0,85
1^{er} Jour –8h/11h	274	3,22	0,96	0,67
2^{ème} Jour – 20h/23h	269	3,16	1,55	1,5
2^{ème} Jour – 8h/11h	281	3,3	0,72	0,6

Au niveau de la journée, la concentration en PT en entrée d'installation varie de 0,72 à 1,55 mg/L.

Site C	Q m ³ /h	Vit asc. STP m/h	P-PO ₄ ³⁻ g/L
2^{ème} Jour -h/h	2565	4,9	0,809
2^{ème}-h/h	2245	4,3	1,04
2^{ème}-h/h	1515	2,9	1,27
2^{ème}-h/h	1640	3,1	1,26
3^{ème} Jour -h/h	2520	9,6	0,84
3^{ème}-h/h	2417	9,2	0,86
3^{ème}-h/h	2120	8,05	0,99
3^{ème}-h/h	1070	4,1	0,92

Au niveau de la journée, la concentration en P-PO₄³⁻ en entrée d'installation varie de 0,84 à 1,27 mg/L.



- **Deronzier G., Choubert J-M.** Cemagref, Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées. Comparaisons techniques et économiques des voies de traitement biologique et physico-chimique. 2002, Coll. Document technique FNDAE n°29.
- **Deronzier G., Schétrite S., Racault Y., Canler J.P., Liénard A., Héduit A., Duchène Ph.** Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités. 2002, Coll. Documentation technique FNDAE, n° 25.
- **Cemagref**, La décantation lamellaire. 1994, Coll. Documentation technique FNDAE, n° 18.
- **Peyronnard O.**, Traitement tertiaire sur Clarifloculateurs « rapides ». Rapport de stage ingénieur 4^{ème} année INSA de Lyon.
- **Duchène P., Vanier C.**, Réflexion sur les paramètres de qualité exigés pour les rejets de stations d'épuration ; Ingénieries n°29 ; p 3 à 16 ; mars 2002.
- **Brun J-M., Maric C., Le Poder N., Binot P., Bacquet G.**, Actiflo process very high speed lamellar settling with microsand (Amman conference), janvier 1996.
- **Boissonnade G., Duchamp I., Le Poder N.**, Optimisation des ouvrages de décantation et d'épaississement : une combinaison innovante et judicieuse; l'eau, l'industrie, les nuisances n° 213.
- **Haarbo A., Dahl C., Rineau S.**, Successful applications, WQI novembre/décembre 1998.
- **Feng-Ying C., Gutshall M., Skradski R.**, Microsand enhanced clarification for wastewater treatment : result from pilot studies in primary, tertiary and CSO applications, Water environment federation (wastewater treatment research) volume 1, octobre 1998.
- **Gousailles M., Binot P.**, Cutting wet weather pollution of the river Seine, WQI mai/juin 1999.
- **Binot P., Gadbois A.**, Le procédé Actiflo pour la décantation à grande vitesse des eaux résiduaires, Compte rendu du symposium international sur la réhabilitation des cours d'eau en milieu urbain, 1998.
- **Binot P., Delsalle F., Guibelin E.**, Le traitement des eaux de temps de pluie par décantation rapide en floc lesté.
- **Pearson R., Murphy S., Gilroy F.**, A new innovative water and wastewater treatment process.
- **Jimenez B., Chavez A., Hernandez C.**, Alternative for wastewater destined for agricultural reuse, AWT98 – advanced wastewater treatment, recycling and reuse, septembre 1998
- **Dauthuille P.**, Un nouveau décanteur à hautes performances : le DENSADEG; T.S.M.- l'eau 82^e année n°2, 1988
- **Briat P., Delporte C.**, Le traitement des rejets urbains par temps de pluie au moyen de la décantation lamellaire; l'eau, l'industrie, les nuisances n°182.
- **Vion P., Westrelin J-L.**, Treatment of stormwater in DENSADEG 2D TGV and 4D TGV.
- **Vallance B., Adamus T.** (associated engineering, Calgary), Spent lime as an aid to phosphorus removal.
- **Bridoux G., Villeroux A., Riotte M., Deguin A.**, Optimisation d'un décanteur lamellaire au traitement des eaux pluviales, 1998, version anglaise disponible : Optimised lamellae settling process for run off water treatment, Water Science Technology vol 38, 1998.