



**HAL**  
open science

## La flottation en sortie de réacteur biologique MBBR. Performances, avantages et limites

Jean-Marc Perret, J.P. Canler

► **To cite this version:**

Jean-Marc Perret, J.P. Canler. La flottation en sortie de réacteur biologique MBBR. Performances, avantages et limites. pp.48, 2014. hal-02600927

**HAL Id: hal-02600927**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02600927>**

Submitted on 16 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.

# **La Flottation en sortie de réacteur biologique MBBR.**

**Performances, avantages et limites**

Perret J.M. ; Canler J.P.





# **La Flottation en sortie de réacteur biologique MBBR.**

**Performances, avantages et limites**

Perret J.M. ; Canler J.P.

## Remerciements

Ce document de synthèse est le fruit d'un travail collectif de deux équipes d'Irstea Lyon-Villeurbanne, l'équipe Epure pour la partie collecte des données sur sites et leur traitement, avec plus particulièrement l'implication de Olivier Garcia ; et l'équipe du laboratoire d'analyses physico-chimiques des milieux aquatiques pour la partie analytique. Nous remercions également Mlle M. Meudre pour le travail réalisé en 2011 durant son stage de fin d'étude de Master (Université de Franche-Comté – Master Qualité des Eaux, des Sols et Traitements- option Procédés, Traitements et Dépollution) sur ce sujet.

Ce document a pu être réalisé grâce à l'aide financière de l'Agence de l'eau Rhône, Méditerranée Corse.

Nos remerciements s'adressent également :

- aux constructeurs, et plus particulièrement à la direction technique de VINCI Environnement, OTV France Sud et de KWI France,
- aux maîtres d'ouvrage, aux services déconcentrés de l'état : SATESE et Police des eaux et surtout aux exploitants des différentes installations visitées et étudiées pour toute l'aide apportée pour le bon déroulement de cette étude.

# Sommaire

I.	Introduction.....	7
II.	Etat des connaissances sur la flottation .....	8
1.	PRINCIPE .....	8
2.	LES DIFFERENTS TYPES DE FLOTTATION PROVOQUEE EN TRAITEMENT DES EAUX USEES.....	9
a.	<i>La génération des bulles d'air</i> .....	9
b.	<i>L'attachement des bulles d'air aux particules solides</i> .....	9
3.	LA FLOTTATION A AIR DISSOUS .....	10
a.	<i>Le flottateur à air dissous (FAD)</i> .....	10
b.	<i>La production des microbulles</i> .....	10
c.	<i>Les réactifs utilisés</i> .....	11
4.	FONCTIONNEMENT DU SYSTEME .....	12
a.	<i>Paramètres essentiels au fonctionnement du système</i> .....	12
b.	<i>Dispositifs déterminants pour la performance d'un flottateur</i> .....	14
5.	INTERETS D'UTILISER UN SYSTEME DE FLOTTATION .....	14
a.	<i>Avantages</i> .....	14
b.	<i>Inconvénients</i> .....	14
6.	APPLICATIONS DE LA FLOTTATION.....	14
7.	STATIONS FRANÇAISES EQUIPEES DU PROCEDE DE FLOTTATION.....	15
a.	<i>Flottation utilisée en sortie de réacteur biologique MBBR</i> .....	15
b.	<i>Flottation utilisée en traitement tertiaire</i> .....	17
8.	PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES TECHNOLOGIES DEVELOPPEES .....	17
a.	<i>Flottateur PURAC</i> .....	17
b.	<i>Flottateurs KWI</i> .....	18
c.	<i>Flottateur IDRACOS</i> .....	21
d.	<i>Synthèse des principales différences entre les flottateurs</i> .....	22
III.	Les mesures sur site.....	23
1.	PRESENTATION DES SITES RETENUS.....	23
2.	CARACTERISTIQUES DES FLOTTATEURS .....	24
a.	<i>Principales caractéristiques de dimensionnement (données constructeurs)</i> .....	24
b.	<i>Performances demandées</i> .....	26
c.	<i>Exploitation</i> .....	27
3.	RESULTATS DES MESURES.....	28
a.	<i>Performances moyennes des flottateurs (bilan en 24h)</i> .....	28
b.	<i>Performances des flottateurs sur des pointes hydrauliques courtes</i> .....	31
c.	<i>Impact des variations hydrauliques et flux associés</i> .....	32
d.	<i>Impact des redémarrages (arrêt complet des flottateurs)</i> .....	35
e.	<i>Principales caractéristiques de fonctionnement</i> .....	36
f.	<i>Impact de la concentration en polymère</i> .....	39
g.	<i>Consommation énergétique</i> .....	40
4.	RECOMMANDATIONS ET EXPLOITATION.....	41
a.	<i>Dysfonctionnements rencontrés</i> .....	41
b.	<i>Recommandations</i> .....	42
c.	<i>Exploitation</i> .....	43
5.	AVANTAGES / INCONVENIENTS DU PROCEDE .....	44
a.	<i>Avantages</i> .....	44
b.	<i>Inconvénients</i> .....	44
IV.	Conclusion.....	45
	Bibliographiques.....	47

## Liste des figures

Figure 1 : Principe général de fonctionnement d'un flottateur à air dissous (ABABOU et al) .....	10
Figure 2 : Schéma du flottateur PURAC.....	17
Figure 3 : Schéma du flottateur KWI Megacell H.....	18
Figure 4 : Schéma du flottateur KWI Megacell V.....	19
Figure 5 : Principe de fonctionnement des flottateurs KWI .....	20
Figure 6 : Principe de fonctionnement du flottateur Idratlot de Idracos .....	21
Figure 7 : Concentration moyenne en MES de sortie en fonction des charge hydraulique et massique appliquées (échantillon moyen 24h). .....	29
Figure 8 : Concentration en MES de sortie en fonction de la vitesse et de la charge appliquée sur l'ouvrage (pointes multi-horaires). .....	32
Figure 9 : Evolution horaire des débits et des concentrations en MES en entrée/sortie de deux flottateurs. ....	32
Figure 10 : Concentration en MES de sortie flottateur en fonction de la vitesse appliquée sur l'ouvrage (échantillons horaires).....	33
Figure 11 : Concentration en MES en sortie flottateur en fonction de la charge en MES appliquée sur l'ouvrage (échantillons horaires) .....	34
Figure 12 : Evolution des débits de sortie et des concentrations en MES en entrée/sortie d'ouvrage lors d'à-coups hydrauliques .....	35
Figure 13 : Evolution des débits de sortie et des concentrations en MES en entrée/sortie d'ouvrage suite au redémarrage d'un flottateur .....	36
Figure 14 : Concentrations en MES de sortie flottateur en fonction de la charge en MES appliquée sur l'ouvrage avec et sans apport de $FeCl_3$ .....	38
Figure 15 : Concentrations en MES mesurées en sortie flottateur en fonction de 3 taux de traitement .....	40

## Liste des tableaux

Tableau 1. Table simplifiée de la saturation de l'air dans l'eau en fonction de la température.....	12
Tableau 2. Stations d'épuration françaises équipées d'un système de flottation en traitement secondaire en 2013 ...	16
Tableau 3 : Station d'épuration française équipée d'un système de flottation en traitement tertiaire.....	17
Tableau 4 : Principales caractéristiques des flottateurs selon les constructeurs .....	22
Tableau 5. Caractéristiques de dimensionnement des sites retenus.....	23
Tableau 6. Dimensionnement hydraulique des flottateurs étudiés .....	24
Tableau 7. Performances moyennes des flottateurs étudiés .....	28
Tableau 8. Synthèse des caractéristiques des boues.....	30
Tableau 9. Moyenne des performances obtenue en pointe multi-horaires .....	31
Tableau 10. Fabrication de l'eau blanche.....	36
Tableau 11. Réactifs utilisés .....	37
Tableau 12. Synthèse des consommations énergétiques des flottateurs étudiés .....	40

## I. Introduction

A l'aval du traitement biologique, les stations d'épuration des eaux usées sont équipées d'un ouvrage de clarification permettant de séparer les eaux traitées des boues biologiques produites.

Actuellement, cette séparation est le plus fréquemment réalisée dans un clarificateur secondaire au sein duquel les boues décantent et sont récupérées au fond d'ouvrage pour être ensuite soit recirculées vers le bassin biologique soit extraites vers la file de traitement des boues.

Depuis quelques années, le procédé de traitement à culture fixée MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) se développe dans le domaine du traitement des eaux résiduaires urbaines.

Permettant de répondre au traitement du carbone et de l'azote, il peut être retenu sur des sites dont le niveau de rejet en azote est fixé en NK et non en N total, ce qui induit des concentrations en Nitrate importantes en entrée d'ouvrage de clarification. De plus, l'absence de recirculation des boues induit un effluent en sortie de réacteur MBBR caractérisé par une faible concentration en MES (50 à 300 mg MES/l) associé à des floccs de petite taille.

Ces différents points, possibilité d'une dénitrification sauvage dans l'ouvrage de clarification et floccs difficilement décantable, sont défavorables au bon fonctionnement d'une clarification statique classique.

Afin d'éviter ces risques de dysfonctionnement, les deux technologies retenues par les constructeurs en aval du traitement MBBR sont la décantation lamellaire hersée avec physico-chimie en tête ou la flottation à air dissous (FAD). Toutes les deux compactes, ces technologies sont en cohérence avec le choix du procédé MBBR (Cf. Document technique FNDAE n°38).

Contrairement à la décantation lamellaire, la flottation est un procédé peu rencontré en filière de traitement des eaux, mais nettement plus connu comme épaisseur dynamique en traitement des boues.

Le premier brevet déposé pour une utilisation industrielle d'un dispositif de flottation date de 1860. Il s'agissait alors d'un procédé de séparation de minerai avec utilisation d'huile. Il faut attendre le début du XXème siècle pour voir apparaître les premiers flottateurs à air. Ceux-ci ont subi, par la suite, plusieurs améliorations avec notamment, la mise en place d'un système poreux pour l'insufflation d'air.

Le développement d'agents chimiques et de moyens de production de bulles a permis la diversification des domaines d'application, tout d'abord pour le traitement des eaux résiduaires industrielles (industries minières, traitement de surface...), puis dans les années soixante pour la potabilisation de l'eau. Finalement, par les progrès apportés au procédé et les avantages qu'il peut présenter, la flottation s'est étendue à l'épaississement des boues et aux eaux résiduaires urbaines dans le cas d'effluents faiblement concentrés en MES (HAMI *et al* 2007) ou en remplacement d'un clari-floculateur dans le cas d'un traitement tertiaire (SARROT 2006).

Toutefois, cette technologie est encore peu connue pour le traitement d'eaux résiduaires urbaines et on observe de la part de la profession une certaine réticence en raison des fortes variations hydrauliques qui nécessitent un asservissement poussé du flottateur. De plus, quelques installations déjà associées à des résultats peu satisfaisants obtenus dans le cadre d'études d'un procédé MBBR nous poussent à étudier de plus près cette filière.

Ainsi, une étude cofinancée par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse (RMC) et l'Irstea de Lyon-Villeurbanne a été menée sur le procédé de flottation afin de mieux connaître ce système, ses créneaux d'application ainsi que ses performances.

Dans un premier temps, un état de l'art sur la flottation et le recensement des différents types de systèmes présents sur le marché français à été réalisé par une recherche bibliographique. Puis, des visites techniques de stations d'épuration équipées du procédé ont permis de comprendre au mieux le système et de mettre en évidence les différents paramètres de fonctionnement des flottateurs. Enfin, des suivis sur site réels de plusieurs jours nous ont permis de tester les performances des systèmes.

## II. Etat des connaissances sur la flottation

### 1. Principe

La flottation est un procédé de séparation solide-liquide basé sur les différences d'hydrophobicité de surfaces des particules à séparer (les particules solides doivent avoir une meilleure affinité pour l'air que pour l'eau). Par opposition à la décantation, la flottation s'applique d'office à des floccs dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient mais peut aussi s'adapter à des floccs dont la décantation peut s'avérer difficile. Ces floccs sont recueillis ensuite sous forme de boues flottées à la surface du flottateur (JARVIS *et al* 2009).

La flottation est dite naturelle si la différence de masse volumique entre les floccs et l'eau est naturellement suffisante pour une séparation. Elle est couramment employée dans tous les pré-déshuilages (secteur industriel).

La flottation assistée s'utilise pour des matériaux légèrement moins denses que le milieu liquide ou équivalent. Pour certaines particules, la flottation pourrait être naturelle mais la lenteur du processus, due à la faiblesse de la force d'Archimède, ne permet pas une séparation suffisante. La flottation assistée met donc en œuvre des moyens extérieurs (air, réactifs...) pour améliorer la séparation de particules naturellement flottables mais avec une vitesse de séparation insuffisante :

- La flottation assistée à l'air (bulles d'air moyennes de 2-4 mm ou fines bulles de 0,2 à 2 mm) sans réactifs : il s'agit d'une flottation naturelle favorisée par l'insufflation de bulles d'air au sein de la masse liquide. Ce procédé concerne en particulier la séparation de graisses dispersées (particules solides hydrophobes).
- La flottation assistée à l'air et par des réactifs (dite « flottation mécanique » ou « moussage ») : les réactifs sont principalement utilisés pour modifier les tensions de surface des particules. Ce procédé est utilisé pour séparer par exemple les différents minéraux constitutifs d'une roche, pour séparer des huiles en traitement d'eaux de gisement ou encore pour la séparation d'agents tensioactifs.

Enfin, la flottation est dite provoquée lorsque la masse volumique de la particule, à l'origine supérieure à celle du liquide, est artificiellement réduite pour provoquer sa flottation.

Dans ce dernier cas, l'injection de bulles de gaz (de l'air en général) va permettre l'association des particules solides avec celles-ci pour ainsi former des « attelages » particules-gaz moins denses que le liquide les contenant et engendrer la flottation du fait d'une vitesse ascensionnelle satisfaisante.

Dans le traitement des eaux résiduaires urbaines, lorsque la flottation est utilisée, il s'agit d'une flottation provoquée utilisant des microbulles (40 à 70  $\mu\text{m}$  de diamètre), plus couramment appelée Flottation à Air Dissous (FAD).

Notons que la flottation est généralement précédée d'une étape de coagulation (dans le cas où 'une déphosphatation est nécessaire) et de floculation (étape indispensable) dont l'objectif est d'éliminer les matières en suspension de façon plus efficace et d'atteindre un abattement de celles-ci de près de 95%. En effet, les microbulles étant 10 à 100 fois plus grosses que les particules colloïdales, l'accrochage de celles-ci est négligeable et leur coagulation-floculation au préalable est indispensable de manière à obtenir des matières solides de plus grande taille sur lesquelles un plus grand nombre de bulles peut se fixer (EDZWALD 2010).

De plus, la déstabilisation des charges répulsives et l'agglomération des particules en flocc volumineux permettent d'obtenir une certaine solidité des flocc pouvant alors résister plus facilement au débit d'eau entrant dans le flottateur (débit supérieur à celui d'un décanteur).

## **2. Les différents types de flottation provoquée en traitement des eaux usées.**

Une flottation provoquée efficace dépend principalement de deux paramètres : la formation de bulles d'air appropriées et la capacité d'attachement de ces bulles aux particules solides.

### **a. La génération des bulles d'air**

La génération des bulles d'air peut se faire de différentes manières (SIANGSANUN 2010, HUANG *et al* 2010).

- **La flottation à air dispersé (ou air induit : FAI)**: Pour ce procédé, des bulles d'air d'un diamètre de 0,2 à 2 mm sont produites par un agitateur mécanique à très grande vitesse. Ce procédé est utilisé en minéralurgie et peu courant dans le domaine du traitement des eaux, excepté dans le domaine pétrolier, dans les traitements primaires d'eaux résiduaires ou les traitements des fibres issues d'effluents papetiers.
- **La micro-flottation** : Ce procédé repose sur la production de fines bulles afin d'augmenter la concentration en bulles et de garder une faible vitesse ascensionnelle des bulles pour un rendement efficace grâce au temps de contact plus élevé entre les bulles et les particules.

Ces fines bulles peuvent être produites de différentes façons :

- **Flottation à air dissous** où l'air est dissous dans une eau pressurisée à une pression supérieure à la pression atmosphérique (4-6 bars). Par détente lors du retour à la pression atmosphérique, l'excès d'air est libéré sous forme de microbulles (diamètre compris entre 40 et 70  $\mu\text{m}$ ). Cette technique est appliquée dans le cas de notre étude, en traitement des eaux résiduaires urbaines.
- **Flottation par électrolyse** (ou électro-flottation) où un courant basse tension traverse deux électrodes insolubles immergées dans l'eau. Par dissociation électrolytique, des bulles d'hydrogène et d'oxygène sont produites (diamètre compris entre 10 et 40  $\mu\text{m}$ ).

### **b. L'attachement des bulles d'air aux particules solides**

Lorsque les bulles d'air formées sont libérées dans le flottateur, elles peuvent se fixer aux particules en suspension par plusieurs mécanismes (SIANGSANUN 2010):

- Le mécanisme d'adsorption : les bulles d'air viennent s'adsorber à la surface des particules en suspension. Ce mécanisme est favorisé pour une quantité d'air injectée suffisante et turbulente pour l'attachement des particules.
- Le mécanisme de piégeage : c'est le phénomène le plus fréquent. La liaison entre les bulles d'air et les particules solides se fait par collision pendant les mouvements aléatoires. La taille des bulles d'air et des particules doit être contrôlée de manière à assurer qu'il y ait un rayon suffisant d'attachement pour maintenir la liaison. En traitement des eaux résiduaires urbaines, il s'agit de ce mécanisme.
- Le mécanisme d'absorption : c'est un phénomène de liaisons bulles d'air / particules permanentes. Les bulles d'air sont noyées dans la masse du flocc.

### 3. La flottation à air dissous

La flottation par air dissous est une technique de séparation solide-liquide utilisée en traitement des eaux dans le but de séparer les floccs formés de l'eau traitée. Le principe repose sur l'injection de bulles d'air qui vont alors s'associer avec les floccs formés et par une différence de densité (association floccs-bulles d'air moins dense), ils vont être entraînés et flotter à la surface. L'eau clarifiée est rejetée au milieu naturel et une partie de celle-ci est réutilisée pour la production des microbulles. Les boues forment une couche en surface périodiquement enlevée par raclage. Une petite partie des boues peut décanter au fond du flottateur où un système de raclage ou de purge permet de les évacuer (JARVIS *et al* 2009).

La flottation à air dissous est bien adaptée au traitement de floccs souvent fragiles et de densité relativement faibles. Cette technique est principalement utilisée pour séparer les matières flocculées pour des eaux peu chargées en MES.

#### a. Le flottateur à air dissous (FAD)

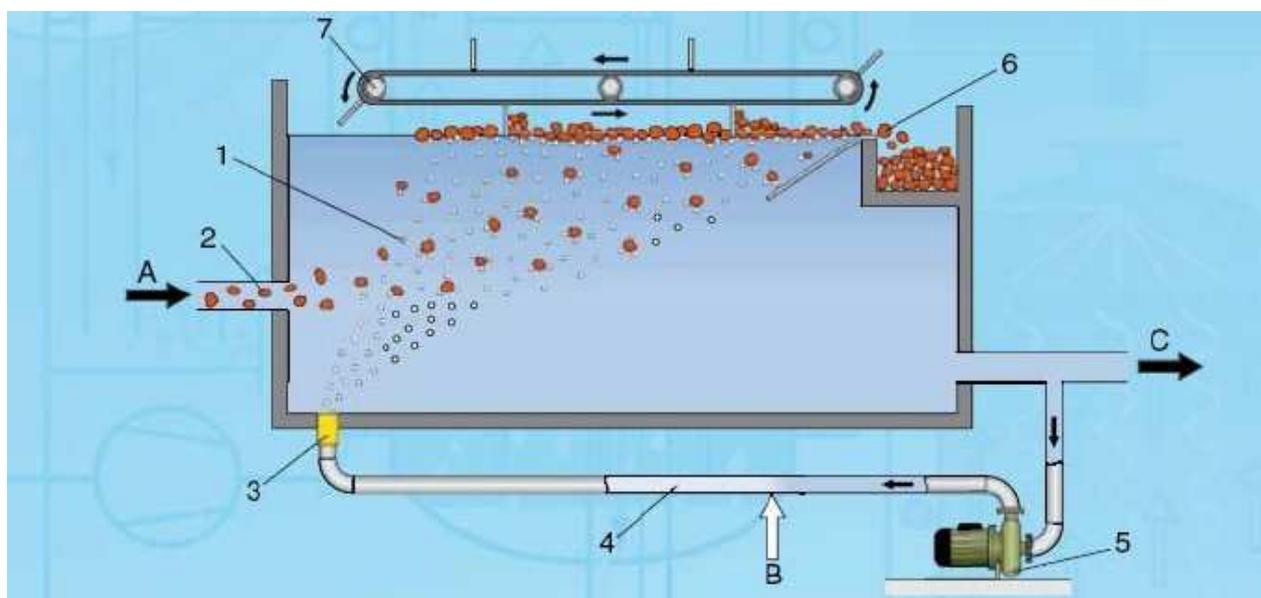


Figure 1 : Principe général de fonctionnement d'un flottateur à air dissous (ABABOU *et al*)

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1 : Micro-bulles d'air           | A : Eau brute (préalablement flocculée) |
| 2 : Particules solides           | B : Apport d'air comprimé               |
| 3 : Soupape (système de détente) | C : Eau clarifiée                       |
| 4 : Eau sous pression            |   |
| 5 : Unité de pressurisation      |   |
| 6 : Boues flottées               |   |
| 7 : Racleur                      |   |

#### b. La production des microbulles

Un élément clé de tout système de FAD est la génération des microbulles. La production des microbulles est principalement réalisée par pressurisation. Elle peut être produite de deux manières :

- Soit par une pompe haute pression qui reprend une partie du débit d'eau traitée à la sortie du flottateur (débit fixe ou variable) et la pressurise à une pression d'environ 4 à 6 bars dans une unité de pressurisation (pressurisation indirecte),

- Soit par la pressurisation de l'eau à traiter avec une recirculation totale ou partielle du débit de l'eau à traiter (pressurisation directe). La pressurisation indirecte est généralement utilisée notamment en traitement des eaux résiduaires urbaines.

De l'air comprimé est également apporté dans l'unité de pressurisation à une pression supérieure à celle présente dans celle-ci de façon à ce que l'air puisse y entrer. Puis, en se détendant à la pression atmosphérique, le mélange air/eau libère l'excès d'air sous forme de microbulles, l'eau est alors dite « blanche ». Cette dernière va être injectée dans le flottateur et mélangée à l'eau à traiter (AL-SHAMRANI *et al* 2001).

Le système de FAD maintient une taille de microbulles dans une gamme de 10 à 100  $\mu\text{m}$ , la taille moyenne la plus favorable approche les 40  $\mu\text{m}$  (SIANGSANUN 2010).

Les avantages de la production de bulles de très petite taille sont :

- Une bonne répartition des bulles pour un faible débit d'air permettant ainsi de limiter les turbulences qui risqueraient de casser les floccs,
- Une augmentation de la concentration des bulles qui favorise la probabilité de rencontre avec les particules solides,
- Une faible vitesse ascensionnelle des bulles par rapport à la masse fluide permettant une meilleure adhésion sur les floccs.

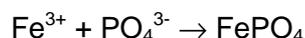
### c. Les réactifs utilisés

Comme nous avons pu le voir, la flottation est très fréquemment précédée d'une étape de floculation (et éventuellement d'une étape de coagulation pour la déphosphatation) dans le but de favoriser l'accrochage « bulles-particules », de solidifier les floccs et ainsi de séparer les boues de l'eau traitée de façon plus efficace.

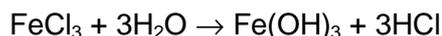
En théorie, la coagulation permet de neutraliser les charges présentes à la surface des particules colloïdales (charges négatives dans le cas d'eaux usées urbaines) et d'éviter ainsi toutes répulsions inter-colloïdales. Cette déstabilisation favorise ensuite leur agrégation. La floculation permet ensuite de les agglomérer en floccs volumineux par pontage.

Dans le cas de l'utilisation d'un coagulant en amont de la flottation, celui-ci est généralement appliqué pour l'élimination du phosphore mais il participe aussi à la déstabilisation des particules colloïdales. La coagulation peut être réalisée par l'ajout de sels trivalents, plus particulièrement des sels de fer (chlorure ferrique) ou d'aluminium (sulfate d'aluminium). Les sels de fer étant préférés pour des questions de coût. Cependant, le volume de boues produites serait plus élevé lorsque le coagulant utilisé est un sel de fer (EL-GOHARY *et al* 1980).

La déphosphatation consiste en la formation d'un précipité de phosphate de fer selon la réaction chimique suivante :



La coagulation est favorisée par un brassage rapide sur un temps court (environ 30 sec) dans le but d'éviter la formation d'hydroxydes de fer et de faciliter la mise en contact du coagulant avec le flocc :



En effet, ceux-ci nécessitent l'utilisation d'un excès de sel en raison de la compétition présente entre la réaction de précipitation des phosphates et celle des hydroxydes.

L'étape de floculation est réalisée à l'aide de polymères organiques de haut poids moléculaire de préférence afin d'obtenir des floccs volumineux. Les polymères peuvent être neutres ou chargés positivement (poly-électrolytes cationiques). Les poly-électrolytes cationiques sont les plus utilisés puisqu'ils réalisent à la fois la déstabilisation des particules colloïdales et l'agglomération en floccs volumineux.

La floculation est favorisée par un brassage à vitesse lente sur un temps long (5 à 15 min) afin de permettre la formation et l'agglomération de floccs volumineux et d'éviter de les casser (CROSSLET *et al* 2006).

La floculation avec une injection de polymère de l'ordre de 3 à 5 g/m<sup>3</sup> d'eau à traiter est en général indispensable pour une flottation efficace.

Les réactifs peuvent être injectés préalablement à la cellule de flottation de deux manières différentes :

- Soit dans des compartiments précédents le flottateur (cuve de coagulation et cuve de floculation).
- Soit à l'entrée directe du flottateur, « injection en ligne » au même niveau que l'injection de l'eau pressurisée.

#### 4. Fonctionnement du système

##### a. Paramètres essentiels au fonctionnement du système

- Quantité d'air solubilisé dans l'eau (débit d'air)

La solubilité de l'air dans l'eau est limitée par des volumes maximaux d'air exprimés en cm<sup>3</sup> mesurés dans des conditions normales de température et de pression (0°C et 1 bar) qui peuvent se dissoudre sous la pression de 1 bar dans 1 kg d'eau à différentes températures.

La saturation de l'air dans l'eau dépend principalement de la température. Plus la température de l'eau est élevée, moins l'air peut se dissoudre dans l'eau.

Température (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Volume maximal d'air dissous (cm <sup>3</sup> /kg)	28,8	25,5	22,7	20,5	18,7	17,3	16,1	15,1	14,3	13,7	13,2	12,3

Tableau 1. Table simplifiée de la saturation de l'air dans l'eau en fonction de la température

Pour obtenir les volumes maximaux d'air pouvant se dissoudre dans l'eau à des pressions autres que 1 bar, il suffit de multiplier les nombres ci-dessus par la pression exprimée en bar. On obtiendra alors une approximation suffisante à condition que la pression ne dépasse pas 40 bars. L'incertitude affectant les valeurs ainsi calculées s'accroît au fur et à mesure que la pression s'éloigne de 1 bar, pour atteindre 7% quand la pression s'élève à 40 bars (PONT-A-MOUSSON 1989).

- Concentration en solides de l'eau à traiter : rapport air/solide (A/S) définit comme le poids d'air (en kg) devant être libéré par kg de solides dans l'eau à traiter.

**A/S** = masse d'air libérée par dépressurisation / masse de solides dans l'effluent

Le rapport A/S peut être évalué par l'équation suivante (EL-GOHARY *et al* 1980) :

$$A/S = \frac{1,3 \times s_a \times R \times (P - 1)}{Q \times S_a}$$

Avec :

- s<sub>a</sub> : air injecté (cm<sup>3</sup>/L)
- P : pression appliquée (bar)
- R : volume d'eau pressurisée (L)
- Q : volume d'eau à traiter (L)
- S<sub>a</sub> : concentration en MES (mg/L)

Il a pu être montré que l'efficacité de la flottation est une fonction croissante du rapport A/S (GALLINARI *et al* 1996). Le ratio A/S dans le traitement des eaux usées doit être compris entre 0,01 et 0,06 (DUC 2009).

- Taux de recirculation de l'eau traitée pour la pressurisation

L'estimation du débit à recirculer peut être définie par la relation suivante (DUC 2009) :

$$R = \frac{(A/S) \times Q \times X_0}{1,2 \times Sa \times (fP - 1)}$$

Avec :

R : débit recirculé (m<sup>3</sup>/h)

A/S : rapport air/solide

Q : débit entrant dans le flottateur (m<sup>3</sup>/h)

X<sub>0</sub> : concentration en MES en entrée du flottateur (mg/L)

Sa : solubilité de l'air à la pression atmosphérique (ml/L)

f : 0,5

P : pression dans l'unité de pressurisation (bar)

- Temps de séjour de l'eau dans le flottateur

Il dépend du débit de recirculation d'eau traitée pour la pressurisation et doit être suffisant pour permettre le contact bulles-particules et la remontée de celles-ci.

- Vitesse ascensionnelle

Celle-ci doit être supérieure à la vitesse transversale (vitesse de passage de l'eau) pour permettre la remontée des attelages bulles-particules.

- Réactifs (nature et quantité)

Le dosage du coagulant dépend de la quantité de phosphore à traiter mais également du rendement désiré.

Le dosage du polymère doit être optimisé de manière à obtenir des floccs de taille optimale pour favoriser l'attachement bulles-particules et obtenir une clarification efficace.

- Point d'injection du polymère

Il est fonction de la technologie mise en place, spécifique à chaque constructeur de flottateurs.

→ Injection en ligne

→ Injection en amont dans une chambre de floculation

- Raclage et évacuation des boues

Ces équipements s'avèrent indispensables.

Le raclage en surface doit se faire régulièrement de manière à ne pas laisser une couche de boues trop importante s'accumuler tout en obtenant des boues suffisamment concentrées.

Le raclage de fond doit être optimisé de manière à ne pas remettre en suspension les boues décantées en fond d'ouvrage.

### *b. Dispositifs déterminants pour la performance d'un flottateur*

- La recirculation : Ce circuit annexe est alimenté à partir d'eau traitée recirculée par pompage (de l'ordre de 20%) et asservi ou non au débit d'eau entrant dans le flottateur.
- La pressurisation / détente : Ce dispositif permet la fabrication de micro-bulles adaptées à l'attachement bulles-particules et l'entraînement de celles-ci en surface.
- Le mélange entre floccs et eau détendue : Il influence l'efficacité de l'accrochage bulles-floc et par conséquent la qualité de la clarification.
- Le raclage : il doit être optimisé de façon à concentrer suffisamment les boues sans que celles-ci atteignent une hauteur trop importante pour laisser s'échapper des MES avec l'eau clarifiée.

## **5. Intérêts d'utiliser un système de flottation**

### *a. Avantages*

- Elimination plus rapide des particules légères dont la décantation est lente.
- Concentration des boues plus élevée que lors d'une clarification par décantation (3-6% de matière sèche).
- Compacité de l'installation (ODEGAARD 2001), possibilité de couvrir et de désodoriser les équipements.
- Adapté dans le cas de station d'épuration ne possédant pas de système de dénitrification ou possédant une dénitrification incomplète.

### *b. Inconvénients*

- La flottation s'applique seulement à des boues possédant des propriétés de décantation médiocres : floccs peu denses et concentrations en MES faibles (de l'ordre de 100 à 300 mg/L).
- Dépense énergétique supplémentaire due à l'apport d'air continu pour la fabrication de l'eau pressurisée.
- Coût d'investissement plus important qu'un décanteur.

## **6. Applications de la flottation**

Le procédé de flottation peut avoir différentes applications et être mis en place dans différents cas :

- En prétraitements dans le cas de l'élimination des graisses (produit hydrophobe, forte affinité sur les bulles de gaz).
- En traitement d'eau potable :
  - Séparation de matières flocculées en clarification d'eau de surface (peu concentrées en MES mais riches en matière organique (MO) ou contenant des algues planctoniques) (DEGREMONT-SUEZ 2005).
  - Elimination de la turbidité, des algues et notamment des organismes parasites tels que Giardia et Cryptosporidium (EDZWALD 2010).

- En traitement des boues :
  - Cas de la déphosphatation biologique afin d'éviter le relargage du phosphore sur accumulé par la biomasse lors des phases d'anaérobies.
  - Cas des eaux de lavage de biofiltres, en raison des concentrations faibles des eaux de lavages et pour les biofiltres nitrifiants riches en nitrates.
  
- En traitement d'eaux résiduaires industrielles : de nombreuses applications existent mais les plus courantes sont :
  - Séparation et récupération des fibres des eaux de papeterie (ZARKOVIC 2010).
  - Séparation d'hydroxydes métalliques (SUDILOVSKIY *et al* 2007).
  - Séparation d'huiles flocculées sur des eaux résiduaires de raffinerie, d'aéroport ou de métallurgie (SANTANDER *et al* 2010).
  - Traitement de lixiviats de décharge (PALANIANDY *et al* 2010).
  
- Et enfin, en traitement d'eaux résiduaires urbaines :
  - Traitement secondaire en sortie de réacteur biologique produisant des MES faiblement concentrées (ex : MBBR) et pour les installations où la dénitrification n'est pas demandée.
  - Traitement tertiaire en remplacement d'un clari-floculateur (déphosphatation biologique).
  - Traitement secondaire en sortie de bassin biologique à boues activées (pour le traitement de rejets liquides issus de l'oxydation par voie humide des boues (OVH)), avec actuellement deux sites en France.

On s'intéressera principalement au procédé de flottation utilisé sur « la file eau » pour le traitement d'eaux résiduaires urbaines. Dans ce cas, la flottation pourra être utilisée en sortie de réacteur biologique produisant des MES faiblement concentrées tel que le procédé MBBR ou en traitement tertiaire (en remplacement d'un clari-floculateur). Notons que dans ce dernier cas, la flottation n'est qu'en cours de projet et n'a pu encore faire ses preuves. Quant à la flottation utilisée après un bassin biologique à boues activées, elle ne concerne pour l'instant que le traitement de rejets liquides issus de l'OVH des boues.

Notre étude porte donc principalement sur le procédé de flottation installé en sortie de réacteur biologique MBBR.

## **7. Stations françaises équipées du procédé de flottation**

### ***a. Flottation utilisée en sortie de réacteur biologique MBBR***

En France, en 2013, dix stations d'épuration sont équipées d'un traitement biologique MBBR suivi d'un procédé de flottation à air dissous. Certaines fonctionnent depuis 2007 alors que d'autres sont encore en cours de mise en route.

Le tableau suivant recense ces stations et présente le type d'ouvrage ainsi que le constructeur des différents flottateurs installés.

STEP	Dpt	EH	Mise en eau	Constructeurs		Type de flottateur
				STEP	Flottateur	
Saint Jean d'Arves	73	17 000	Nov. 2007	VINCI	KWI (International)	Horizontal « Megacell H »
CC3F (68)	68	82 000	Oct. 2008	VINCI	PURAC (Suède)	DAF Classic
Molines en Queyras	05	6 000	Oct. 2008	VINCI	KWI	Horizontal « Megacell H »
Bellentre	73	28 000	Sep. 2010	VINCI	KWI	Horizontal « Megacell H »
Thourotte	60	12 500	Août 2010	VINCI	KWI	Horizontal « Megacell H »
Corbeil-Essonnes	91	75 000	Août 2010	VINCI	KWI	Vertical « Megacell V »
Villard de Lans	38	44 500	Nov. 2010	VINCI	KWI	Vertical « Megacell V »
Vallouise	05	15 000	Nov. 2010	OTV (Veolia eau)	IDRACOS (Italie)	Idraflot
Ajaccio	2A	65 000	Mars 2012	VINCI	NIJHUIS (Hollande)	
Agnières en Dévoluy	05	7 000	Avr. 2012	MSE (Veolia eau)	KWI	Horizontal « Megacell H »

Tableau 2. Stations d'épuration françaises équipées d'un système de flottation en traitement secondaire en 2013

Ce tableau met en évidence la variété des stations d'épuration équipées du procédé MBBR suivi d'une clarification par flottation. En effet, la capacité de traitement est assez différente allant de 6 000 EH pour la station de Molines en Queyras à 82 000 EH pour la station de la CC3F. Ce système n'est donc pas limité dans sa capacité de traitement. En effet, il faut savoir également que les stations peuvent être équipées de plusieurs flottateurs installés en parallèle (2 voire 3 flottateurs).

De plus, on observe que la majorité des stations se situe dans les bassins Rhône-Méditerranée et Corse (6 sur 10) et notamment sur des communes touristiques de montagne où seule la nitrification est demandée. Ces stations d'épuration possèdent des variations de charge importantes selon les saisons (coefficient de variation de charge entre la haute et la basse saison de l'ordre de 10), d'où l'installation du procédé MBBR en plusieurs files parallèles.

Enfin, VINCI est actuellement le constructeur principal avec l'installation de 8 stations d'épuration sur 10. Il a fait appel à trois sous-traitants différents pour la construction des flottateurs PURAC, KWI et NIJHUIS. Notons que le flottateur NIJHUIS est en cours de réception (Ajaccio), le PURAC n'est présent que sur un seul site (CC3F) et les flottateurs KWI sont donc les plus installés actuellement.

En remarque, le constructeur Degrémont ne figure pas dans cette liste de stations puisqu'il n'a pas encore de référence de procédé MBBR en France.

### b. Flottation utilisée en traitement tertiaire

Au jour d'aujourd'hui, une seule station d'épuration française est équipée un traitement tertiaire de type affinage (en particulier pour l'abattement du phosphore) par flottation. Celle-ci a été mise en eau fin 2011 par Degrémont.

STEP	EH	Mise en eau	Constructeur	Flottateur	Type
Evreux (27)	164 000	Septembre 2011	DEGREMONT	DEGREMONT	Greendaf TW

Tableau 3 : Station d'épuration française équipée d'un système de flottation en traitement tertiaire

## 8. Principales caractéristiques des technologies développées

### a. Flottateur PURAC

Le principe de fonctionnement du flottateur PURAC est schématisé ci-dessous.

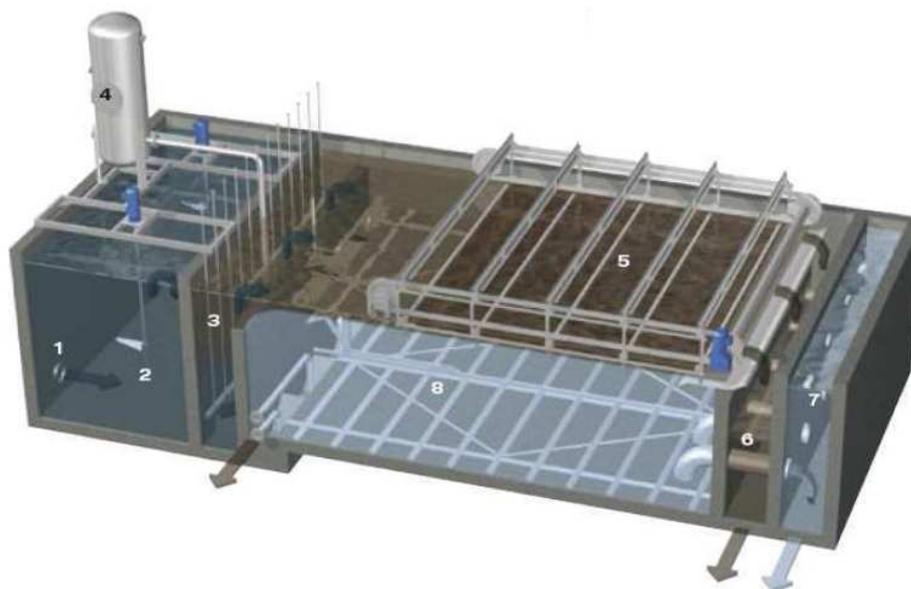


Figure 2 : Schéma du flottateur PURAC

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1 : Entrée de l'eau à traiter              | 5 : Couche de boues flottées      |
| 2 : Cuve de floculation                    | 6 : Evacuation des boues          |
| 3 : Mélange eau traitée et eau pressurisée | 7 : Récupération de l'eau traitée |
| 4 : Unité de pressurisation                | 8 : Boues de fond                 |

Selon le constructeur, les principaux avantages de ce flottateur sont les suivants (arguments commerciaux) :

- Elimination efficace des MES (> 95% de rendement).
- Compacité, avec une charge hydraulique de 15 m/h effective dans un espace limité.
- Robustesse, avec des variations de débit et de charge massique qui n'influencent pas l'efficacité du procédé.
- Les boues flottées sont composées de 3 à 6% en matière sèche (MS).

### *b. Flottateurs KWI*

KWI propose deux flottateurs adaptés au traitement des eaux résiduaires urbaines dans le cas d'une clarification de biomasse.

- Le Megacell H (Horizontal):

Son principe de fonctionnement est schématisé ci-dessous.

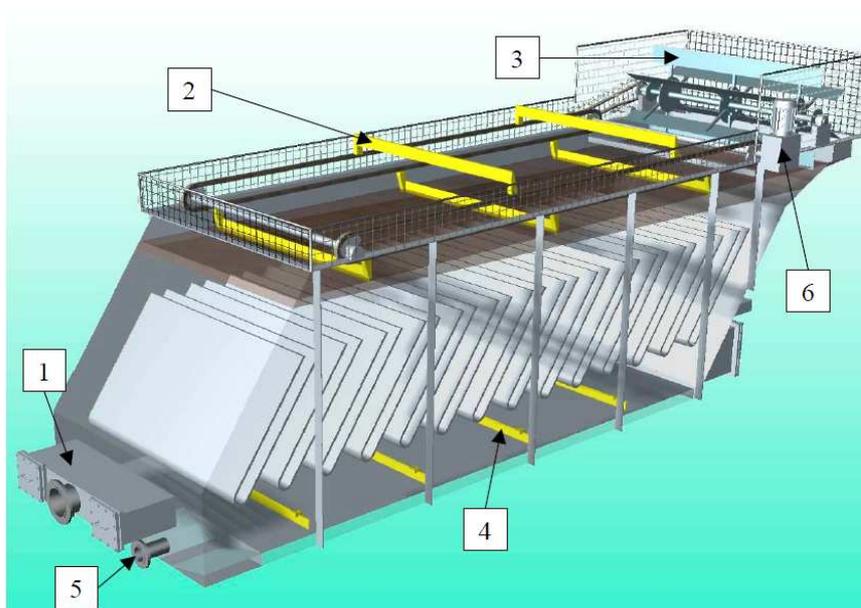


Figure 3 : Schéma du flottateur KWI Megacell H

1 : Boîte de répartition dans laquelle est introduite l'eau brute mélangée à l'eau pressurisée (plus flocculant dans le cas d'une injection en ligne). Cette boîte permet une répartition homogène sous la rangée d'éléments en U (deux conduites d'alimentation sur les ouvrages de 2 m de large).

2 : Racleur de surface qui pousse les boues flottées jusqu'à la roue d'extraction.

3 : Roue d'extraction des boues flottées. Elle permet une grande capacité d'extraction ainsi qu'une plus forte concentration des boues.

4 : Racle de fond qui permet de pousser les boues de fond vers les vannes de purge.

5 : Vanne. Les particules lourdes qui décantent au fond de la cuve sont purgées périodiquement par une ou deux vannes.

6 : Moteur permettant de faire fonctionner la racle de surface et la roue d'extraction.

- Le Megacell V (Vertical) :

Son principe de fonctionnement est schématisé ci-dessous.

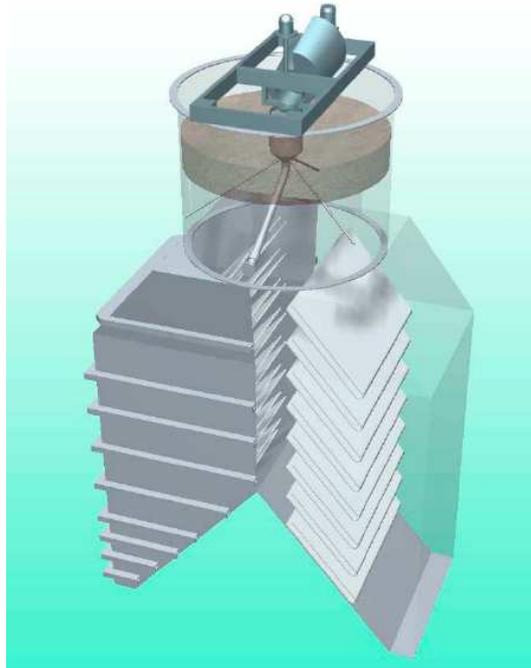


Figure 4 : Schéma du flottateur KWI Megacell V

Le Megacell V présente des corps rectangulaires (1,2 ou 4) contenant les éléments en U et une partie commune cylindrique en surface dans laquelle sont collectées les boues flottées.

Les boues montent vers la surface du côté ouvert des éléments et sont récupérées en surface par un racleur ou par une écope à spirale (dans le cas de flottateurs circulaires) pour être envoyées vers une fosse à boues. Il n'y a pas de racle de fond, les particules décantées sont purgées périodiquement par vannes.

Spécificité et principe de fonctionnement de ces deux appareils :

Le cœur du Megacell est une rangée d'éléments en forme de U disposés les uns à côté des autres à une certaine distance et inclinés à un certain angle. La partie ouverte de ces éléments en U se situe en haut. La disposition de ces éléments peut être côte à côte sur l'ouvrage horizontale (Megacell H) ou verticale avec superposition des éléments sur le second (Megacell V).

L'eau brute mélangée à l'eau pressurisée (plus coagulant éventuel si une déphosphatation est recherchée) et le floculant, obligatoire pour la flottation, est introduite de façon homogène dans une boîte de répartition sous les éléments en U et remonte vers la surface grâce à l'injection d'air de façon homogène sur toute la surface du flottateur. L'espace sous les éléments en U autorise un certain temps de séjour pour atténuer les turbulences et pour terminer la floculation. Dans cet espace, les particules lourdes décantent au fond de la cuve.

A cet endroit, une première séparation des MES est effectuée (clarification lamellaire à co-courant). Les MES séparées sont guidées par les plaques des éléments en U jusqu'à la surface de l'eau où elles forment une couche de boues flottées (90-95% des MES).

L'eau clarifiée redescend à l'intérieur de chaque élément en U où une seconde séparation des dernières particules de MES est effectuée selon la flottation lamellaire à contre-courant (celle-ci fonctionne bien car la charge massique est très faible).

L'eau clarifiée est récupérée au fond de chaque élément en U par un collecteur incorporé, ce qui permet une répartition hydraulique homogène.

Pour les petits appareils, le niveau de l'eau dans la cuve est contrôlé par un déversoir mécanique. Pour les gros appareils, le niveau de l'eau est contrôlé par un transmetteur de pression et une vanne de régulation automatique.

Les boues flottées sont raclées par un racleur de surface qui pousse la boue jusqu'à la roue d'extraction. Celle-ci permet un égouttage avant l'évacuation de la boue.

Les particules lourdes qui décantent au fond de la cuve sont purgées périodiquement par une vanne. Dans les petits Megacells, le fond de la cuve a une forme de pyramide inversée et l'extraction des boues de fond se fait depuis le point le plus bas.

Dans les gros appareils, les boues de fond sont poussées par une racle de fond afin de rejoindre les vannes de purge.

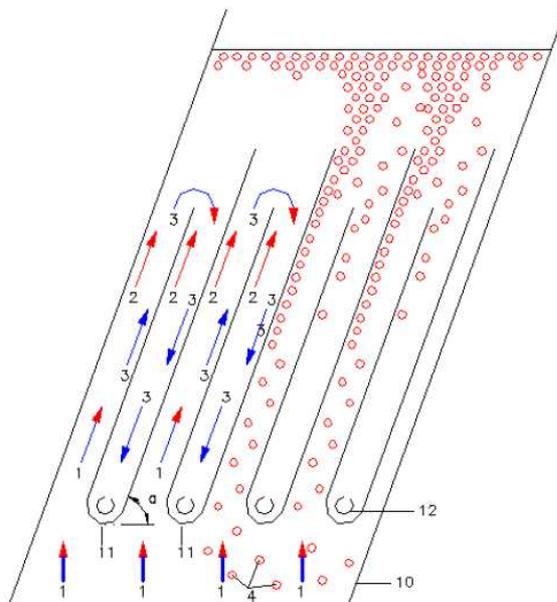


Figure 5 : Principe de fonctionnement des flottateurs KWI

- 1 : Mélange eau à traiter et eau pressurisée réparti sur toute la surface de l'ouvrage
- 2 : Particules flottantes
- 3 : Eau clarifiée
- 4 : Eau brute avec MES
- 10 : Cuve de l'appareil
- 11 : Élément en forme de U
- 12 : Récupération de l'eau clarifiée au fond de chaque tube en U

Les principaux points importants retenus pour les Megacells lors de nos discussions avec le constructeur sont les suivants :

- L'utilisation de la flottation comme technique de clarification de biomasse ne peut se réaliser que pour des concentrations en MES en sortie de traitement biologique inférieures à 1,5 g/L. En effet, le dimensionnement d'un flottateur se fait selon le débit ( $m^3/h$  par élément en U) pour des concentrations en MES en entrée inférieures à 1,5 g/L alors qu'il se fait selon la charge massique ( $kg\ MES/m^2$  de surface au miroir) pour des concentrations supérieures. Dans ce cas, la surface d'occupation au sol et les coûts en polymère et énergie de pressurisation seraient trop importants pour concurrencer les dispositifs de décantation classique (lamellaire). C'est pourquoi, les flottateurs ne sont pas installés en sortie d'un traitement biologique par boues activées.

- L'utilisation d'un polymère cationique est indispensable pour le procédé de flottation. Ce polymère doit être injecté de préférence en ligne (au même niveau que l'eau pressurisée) et de façon continue. En ce qui concerne les doses, KWI conseille une injection de polymère entre 3 et 5  $g/m^3$  d'eau à traiter.

Par contre, l'utilisation d'un coagulant n'est nécessaire que dans le cas d'une déphosphatation.

Il faut noter que les constructeurs ne conseillent pas de réactif. Les vendeurs de polymères se déplacent pour effectuer des essais sur site (par flotta-test) afin de trouver le polymère et son dosage idéal pour la flottation. Chaque réactif est donc normalement spécifique au site.

- La fréquence de raclage des boues flottées doit être optimisée de manière à concentrer suffisamment les boues (à environ 35 g/L) sans pour autant qu'une partie de celles-ci puisse s'échapper avec l'eau traitée. La fréquence de raclage peut être cadencée selon une certaine hauteur de boues. Les boues de fond doivent être purgées régulièrement mais peu fréquemment afin de ne pas les remettre en suspension.

- Le niveau de l'eau (et donc le niveau de la couche des boues flottées) dans l'appareil est réglé soit par un déversoir mécanique, soit par une vanne automatique contrôlée par un détecteur de pression.

- Le débit de recirculation de l'eau traitée est fixé à 20% du débit entrant maximal. Il ne peut être modulé par l'exploitant. Celui-ci doit toutefois vérifier régulièrement le  $\Delta P$  (différence de pression entre l'entrée et l'intérieur du tube de dissolution d'air (ADT)) qui doit être de 0,5.

- Le débit d'air injecté dans l'ADT est modulable. Il doit représenter environ 10% du débit de recirculation de l'eau traitée. Notons que ce débit d'air doit être injecté à une pression supérieure à la pression présente dans l'ADT de manière à ce qu'elle puisse y entrer.

### c. Flottateur IDRACOS

Le schéma du principe de fonctionnement du flottateur est décrit ci-dessous.

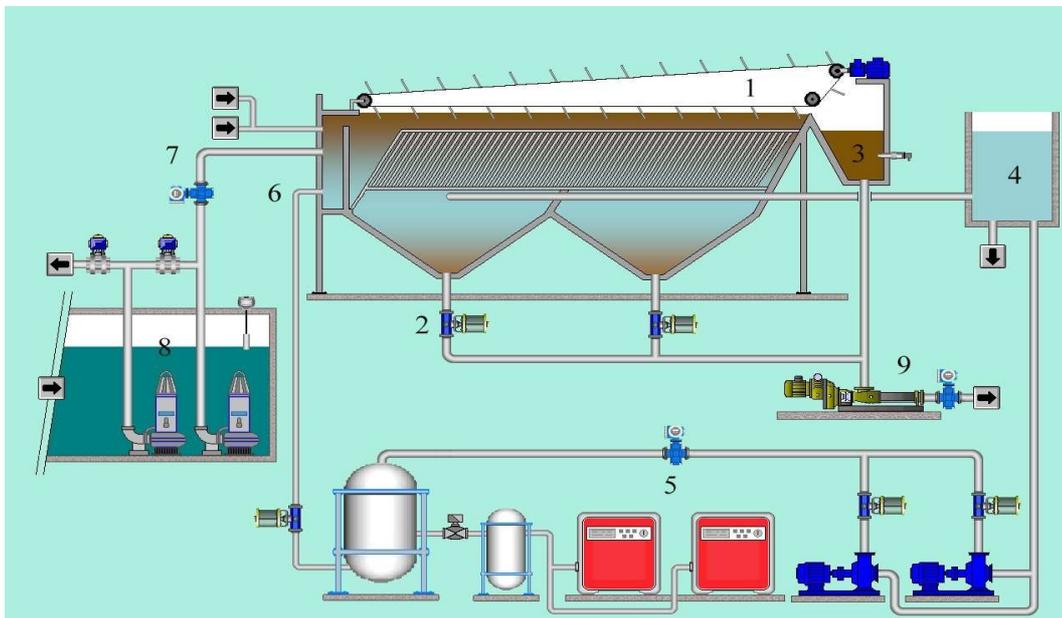


Figure 6 : Principe de fonctionnement du flottateur Idraflot de Idracos

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1 : Racleur                          | 6 : Arrivée eau blanche                          |
| 2 : Récupération des boues décantées | 7 : Arrivée eau brute                            |
| 3 : Récupération des boues flottées  | 8 : Pompes eau brute                             |
| 4 : Eau clarifiée                    | 9 : Evacuation des boues (flottées et décantées) |
| 5 : Système de pressurisation        |  |

Selon le constructeur, les principaux avantages de ce flottateur sont les suivants (arguments commerciaux) :

- Elimination efficace des MES et de la DCO.
- Compacité, avec une charge hydraulique de 20 m/h.
- Présence d'un bloc lamellaire permettant de guider les flux et d'obtenir une meilleure répartition de ceux-ci.
- Les boues flottées peuvent être extraites avec des matières sèche jusqu'à 8%.

d. Synthèse des principales différences entre les flottateurs

Flottateurs	PURAC	KWI H	KWI V	IDRACOS Idracflot
Conception	Non lamellaire	Profilés en U		Lamellaire
Critère de dimensionnement	Vitesse ascensionnelle	m <sup>3</sup> /h par élément en U		Charge massique au miroir
Vitesse ascensionnelle au miroir (m/h)	15	30	60	20
Unité de pressurisation	Ballon de pressurisation	Tube de dissolution d'air (ADT)		Ballon de pressurisation
Système de raclage de surface	Racleur à chaîne	Racleur à chaîne (+ roue d'extraction possible)		Racleur à chaîne
Système de raclage de fond	Racle à mouvement séquencé et aspiration par air-lift	Ecoulement gravitaire et purge par vannes		Ecoulement gravitaire et purge par vannes
Concentration des boues flottées (g/l)	35	35		25

Tableau 4 : Principales caractéristiques des flottateurs selon les constructeurs

On observe un dimensionnement différent des appareils en fonction de leur conception. En effet, les flottateurs KWI possèdent des profilés en U et sont dimensionnés selon le débit appliqué par élément en U. Le flottateur Purac, non lamellaire, est dimensionné selon la vitesse ascensionnelle. Enfin le flottateur Idracos est lamellaire et dimensionné selon la charge massique appliquée (kg MES/m<sup>2</sup> de surface au miroir).

Les flottateurs KWI, de par leur conception, présentent une vitesse ascensionnelle plus élevée que les deux autres (notamment le Megacell V) et donc une emprise au sol moindre. Ils possèdent un système de pressurisation (ADT) breveté et propre à leur société ainsi qu'un système de raclage en surface présentant parfois une roue d'extraction en plus du racleur à chaîne dans le but d'égoutter et d'extraire au maximum les boues flottées.

Concernant celles-ci, les constructeurs annoncent une concentration de l'ordre de 35 g/L mis à part Idracos.

Les boues de fond peuvent être récupérées de deux façons différentes, soit par écoulement gravitaire au sein de fosses à boues puis évacuation des boues décantées par purges pour la majorité des flottateurs (KWI et Idracos), soit par raclage puis aspiration par air-lift pour le flottateur Purac. Dans ce dernier cas, le flottateur possède un fond plat contrairement aux autres présentant un fond en forme de pyramide inversée.

### III. Les mesures sur site

Pour rappel, on dénombre à ce jour en France cinq types de flottateurs distincts en sortie de réacteur biologique MBBR, dont quatre systèmes aux technologies différentes. Le dernier système implanté sur le territoire national est le procédé commercialisé par NIJHUIS. Celui-ci n'a pas été retenu dans le cadre de cette étude car sa configuration est très proche de celle du flottateur IDRACOS (bloc type lamellaire).

Afin de pouvoir mener une étude globale sur le fonctionnement des différents flottateurs, nous nous sommes intéressés aux quatre flottateurs de technologie différente et en fonctionnement depuis plus d'un an en place en sortie de réacteur biologique MBBR, c'est-à-dire les technologies PURAC, KWI H, KWI V et IDRACOS.

Le Tableau 4 précédent rappelle les caractéristiques de chacune de ses technologies.

#### 1. Présentation des sites retenus

Parmi les sites d'étude choisis, trois stations d'épuration sur quatre sont des stations touristiques de montagne accueillant une population nettement supérieure lors des périodes de vacances scolaires hivernales.

Pour faire face aux variations importantes de charge selon les périodes touristiques et dans le but de répondre aux normes de rejet notamment par l'obligation d'un traitement biologique à la place d'un traitement physico-chimique, ces stations ont subi une reconstruction ou une modernisation complète de leurs équipements.

Flottateurs retenus	PURAC	KWI H	KWI V	IDRACOS
Sites	A	B	C	D
Taille	82 000 EH	28 000 EH	44 500 EH	15 000 EH
Réacteur MBBR	2 files (DN+C+N+DN)	2 files (C+C+N)	2 files (C+N)	2 files (C+C)
Nb. de flottateurs	3	1	2	2
Présence d'UV en tertiaire	non	oui	non (mais proposée en option)	oui

Tableau 5. Caractéristiques de dimensionnement des sites retenus

Les quatre sites d'étude sont des installations de taille largement différente avec une capacité nominale allant de 15 000 à 82 000 EH. Par contre, la taille nominale minimale observée par flottateur est de 7500 EH.

La filière de traitement des eaux est par contre identique sur l'ensemble des sites et se compose d'un relèvement des eaux usées, d'un étage de prétraitements, d'un traitement primaire de type physico-chimique (décantation lamellaire) et d'un traitement biologique de type MBBR suivi d'une étape de flottation.

La configuration de l'étage biologique diffère en fonction du traitement demandé : traitement du carbone (mais charge variable, d'où risques de nitrification à certaines périodes de l'année), de l'azote avec nitrification seule (d'où le choix du procédé flottation) ou couplée à une dénitrification. Ainsi, le nombre de réacteurs biologiques installés en série varie de 2 à 4 suivant le site. Les biomédias utilisés et leur taux de remplissage différent suivant le constructeur et le traitement recherché. Les supports utilisés sont le Biochips et/ou du K1 pour Vinci et le Horus pour OTV.

Tous les sites sont équipés de deux files de traitement biologiques en parallèle mais le nombre de flottateur installé est variable en fonction du taux de charge à traiter, avec les différents cas de figure suivant :

- un seul ouvrage pour le Megacell horizontal de KWI,
- deux ouvrages non connectables pour le Megacell Vertical de KWI (1 flottateur par file de MBBR),
- deux ouvrages pour l'Idraflot de IDRACOS alimentés à partir d'un unique poste de relèvement (2 MBBR / 1 poste de relevage / 2 flottateurs),
- et trois ouvrages pour le PURAC alimentés à partir d'une même goulotte de récupération en sortie MBBR (flottateurs interconnectables).

Un traitement tertiaire par UV est en place sur deux sites. Enfin, les autorisations de rejet en MES sont identiques (35 mg MES/l) à l'exception d'un site pour lequel une concentration de 30 mg MES/l est demandée. Au niveau du rejet en phosphore, une concentration de 2 mg/l de PT et/ou un rendement de 80% en moyen journalier sont demandés sur deux des sites (A et C).

## 2. Caractéristiques des flottateurs

### a. Principales caractéristiques de dimensionnement (données constructeurs)

Les caractéristiques hydrauliques principales de dimensionnement des flottateurs sont synthétisées dans le tableau 6. Ces valeurs « constructeur » sont données pour un ouvrage.

Sites Flottateurs	A PURAC	B KWI H	C KWI V	D IDRACOS
Charge hydraulique * (m/h) (avec recirculation)	15 (18)	21.9 (27,5)	33.3 (40)	19.5 (23.8)
Temps de séjour minimum (min.)	10	6,8	9	5
[MES] entrée flottateur (mg/L)	100-200	100-300	20-100	80-100
Charge massique calculée ** (kg MES/m <sup>2</sup> .h)	1.5 à 3	2.2 à 6.5	0.7 à 3.3	1.6 à 2

Tableau 6. Dimensionnement hydraulique des flottateurs étudiés

\* : Calcul ramené à la surface au miroir de l'ouvrage, sans les ouvrages annexes (goulotte, ...)

\*\* : Calcul réalisé en prenant en compte les concentrations en MES en entrée d'ouvrage annoncées par le constructeur (ligne précédente)

On observe de grandes différences au niveau du dimensionnement hydraulique qui se trouve ainsi du simple au double suivant la technologie du flottateur avec une charge hydraulique maximale (hors recirculation des eaux blanches) de 15 m/h pour le Purac et de 33 m/h pour le KWI V.

On retiendra une vitesse maximale (sans recirculation) de l'ordre de :

15 m/h pour les flottateurs sans lamelle

20 m/h pour les flottateurs équipés de lamelles ou d'éléments en U

30 m/h pour les flottateurs dits verticaux équipés d'éléments en U

Les temps de séjour de l'eau dans l'ouvrage en pointe hydraulique sont très courts et de l'ordre de 5 à 10mn.

Au niveau des charges massiques, on observe une grande variabilité des données qui vont de 1 à 6 kg MES/m<sup>2</sup>.h. Cette variation s'explique par la concentration en MES d'entrée prise en compte par les constructeurs qui est fonction du degré de dilution des eaux d'entrée et des performances du décanteur primaire.

Les concentrations en MES maximale annoncées en sortie MBBR sont classiques et s'étalent de 100 à 300 mg MES/l.

Il est à noter que l'alimentation des flottateurs par pompage sur un des sites permet une automatisation plus importante des ouvrages. En effet, l'asservissement d'un flottateur à débit fixe est en place, le surplus d'eau étant dirigé si nécessaire vers le second ouvrage. Dès que le volume d'eau en sortie MBBR est inférieur au débit fixé, un seul ouvrage est alimenté, le second étant mis à l'arrêt après une temporisation (arrêt de la recirculation des eaux blanches et du raclage). Ce fonctionnement bien paramétré doit permettre des réductions de consommation énergétique en basse saison et en période nocturne.

## Fabrication de l'Eau blanche

Le poste de production d'eau blanche est spécifique pour tous les systèmes de flottation à air dissous. Les principales caractéristiques rencontrées sur les sites sont les suivants :

- La pressurisation peut être réalisée par deux systèmes distincts : un ballon de pressurisation ou un tube de dissolution d'air (ADT).



*Tube de dissolution d'air*



*Ballon de pressurisation*

- La pression appliquée dans l'unité de pressurisation est comprise entre 6 et 7 bars.  
- Ce poste étant essentiel pour le process, les pompes de pressurisation et les compresseurs sont systématiquement équipés d'un secours.

- Le débit de recirculation de l'eau traitée pour la fabrication de l'eau blanche peut être fixe (à 20% du débit maxi de dimensionnement entrant dans le flottateur) ou asservi au débit entrant (Purac – à 15% du débit d'eau à traiter).

- Le débit d'air injecté est fixe et dimensionné sur 10% du débit de recirculation à l'exception du procédé Purac. Sur cette installation le débit d'air est dimensionné sur 25% du débit de recirculation qui est proportionnel au débit entrant.

La pression appliquée pour ces débits d'air est, par contre, toujours plus élevée à la pression appliquée dans l'unité de pressurisation pour permettre l'entrée d'air dans cette unité.

- L'injection de l'eau blanche est réalisée en fond du flottateur sur toute la largeur pour Purac ou sur toute la longueur pour KWI et Idracos.

## Réactifs utilisés

### Floculant

On peut rappeler que l'étape de floculation amont est obligatoire pour le bon fonctionnement du procédé flottation à air dissous.

Les quatre sites sont équipés de pompes doseuses asservies au débit ou sur table horaire. Le point d'injection du polymère peut être soit en ligne soit au niveau de la cuve de floculation en amont du flottateur.

Le taux de traitement annoncé au dimensionnement est faible pour les procédés Purac et KWI (0.5 à 1 g/m<sup>3</sup> d'eau traité) et nettement plus important pour le système Idracos avec un taux de 2 à 6 g/m<sup>3</sup> d'eau traitée.

### Coagulant

Les quatre sites apportent du FeCl<sub>3</sub> au niveau du traitement primaire physico-chimique de manière continue ou uniquement en haute saison touristique.

L'étape de coagulation est obligatoire pour le traitement du phosphore. Par contre, on observe une stratégie différente entre les constructeurs sur la nécessité ou non d'un apport de FeCl<sub>3</sub> pour la coagulation des floccs en sortie MBBR et le bon fonctionnement du procédé flottation à air dissous.

Pour les sites ayant une contrainte de rejet en phosphore, le coagulant peut être apporté uniquement en primaire (1 site) mais aussi en tête du flottateur (1 site avec un taux de traitement de dimensionnement de 25 g/m<sup>3</sup>).

Pour les sites n'ayant pas de contrainte de rejet en phosphore, le coagulant peut quand même être injecté en tête du flottateur (1 site avec un taux de traitement de dimensionnement de l'ordre 10 à 40 g/m<sup>3</sup>).

## Systèmes d'évacuation des boues

Deux types de boues sont évacués régulièrement du flottateur : les boues flottées en surface et les boues décantées en fond d'ouvrage.

Le raclage de surface est toujours réalisé par un système de racleur à chaîne qui pousse les boues flottées vers la goulotte d'évacuation. Celui-ci peut être complété pour KWI par une roue d'extraction des boues en fin d'ouvrage qui permet un égouttage de celles-ci avant leur évacuation.

L'extraction des boues décantées est réalisée après écoulement gravitaire des boues en fond de trémie par des vannes de purge sauf pour le flottateur Purac longitudinal et à fond plat pour lequel les boues sont raclées et évacuées par air-lift en fin d'ouvrage.

Ces différents systèmes d'évacuation des boues sont pilotés sur horloge ou asservis au débit traité.

### *b. Performances demandées*

Le niveau de rejet garanti au dimensionnement par les constructeurs des stations pour une concentration en MES en entrée flottateur de l'ordre de 80 à 300 mg/l, est un rejet inférieur à 20-35 mg MES/l suivant le site et le constructeur. Le seuil de rejet réglementaire étant une concentration en MES inférieure à 30-35 mg/l.

Parallèlement, les boues flottées évacuées en surface d'ouvrage vers la file de traitement des boues sont annoncées à des concentrations supérieures à 35 g MES/l à l'exception d'un site dont le dimensionnement est plus sécuritaire (>25 g MES/l).

### *c. Exploitation*

Globalement, les contraintes d'exploitation annoncées sur les flottateurs sont peu importantes avec essentiellement des vérifications régulières de la floculation (poste de préparation), de la fréquence de raclage des boues et des différentes pressions mesurées au niveau du système de pressurisation. L'assurance que les compresseurs fonctionnent correctement est également important afin d'apporter en continu de l'air pour la fabrication de l'eau blanche. Enfin, un entretien des équipements (purges, nettoyage des racles...) doit être réalisé régulièrement.



*Surfaces de flottateurs : Racle et Boues flottées*

### 3. Résultats des mesures

Plusieurs campagnes de mesures 24h ont été réalisées sur chacun des sites.

Les résultats obtenus sont rassemblés suivant trois types de flottateurs aux caractéristiques différentes :

- Type I : Flottateur site A caractérisé par un fond plat et l'absence de support à l'intérieur de l'ouvrage,
- Type II : flottateurs sites B et D aux caractéristiques similaires et pourvus de supports (plaques, nids d'abeille, éléments en U),
- Type III : flottateur site C équipé de support (éléments en U) mais dont l'ouvrage est profond et à circulation verticale.

#### a. Performances moyennes des flottateurs (bilan en 24h)

Afin de s'approcher des valeurs de dimensionnement et d'obtenir un taux de charge hydraulique maximal sur l'ouvrage de flottation, des modifications de l'alimentation hydraulique des sites ont été mises en place avec l'accord de l'exploitant, par arrêt de l'alimentation d'une file ou en stockant de l'eau en amont de l'ouvrage au niveau du bassin d'orage.

Les performances obtenues en moyen 24h sur les quatre sites durant nos mesures sont présentées dans le tableau 7 suivant.

Type de flottateurs	I	II		III
Sites Flottateurs	A PURAC	D IDRACOS	B KWI H	C KWI V
Charge hydraulique de dimensionnement (m/h)	15	19,5	21,9	33,3
Charge hydraulique moyenne (m/h)	7.5	10.3	9.2	10.2
Taux de charge hydraulique moyen (%)	50	53	42	30
Temps de séjour moyen (mn)	24	12	16	36
Charge massique de dimensionnement calculée (kg MES/m <sup>2</sup> .h)	1.5 à 3	1.6 à 2	2.2 à 6.5	0.7 à 3.3
Charge massique moyenne (kg MES/m <sup>2</sup> .h)	1.2	1.7	1.4	0.86
Taux de charge massique moyen (%)	40	85	20	26
[MES] entrée (mg/l)	156	163	152	84
[MES] sortie (mg/l)	15	28	27	18.5
Rendement moyen en MES (%)	90.5	82.1	82	78.5

Tableau 7. Performances moyennes des flottateurs étudiés

Malgré les modifications de réglage mises en place, les taux de charge hydraulique et massique mesurés sur les sites sont faibles à l'exception du site D dont l'alimentation par pompage est gérée de façon prioritaire sur un flottateur et pour lequel les concentrations en MES d'entrée annoncées au dimensionnement sont plutôt faibles.

On note des concentrations en sortie très différentes malgré de faibles charges hydrauliques. Pour deux installations, les valeurs obtenues au rejet sont importantes pour un taux de charge hydraulique de 40 à 50%. Les charges massiques n'expliquent pas ces valeurs élevées, ce qui révèle que d'autres facteurs (effluent, réactifs, conception) influencent les performances des ouvrages.

Les représentations graphiques de la concentration en MES de sortie en fonction du taux charge hydraulique et de la charge massique sont les suivantes :

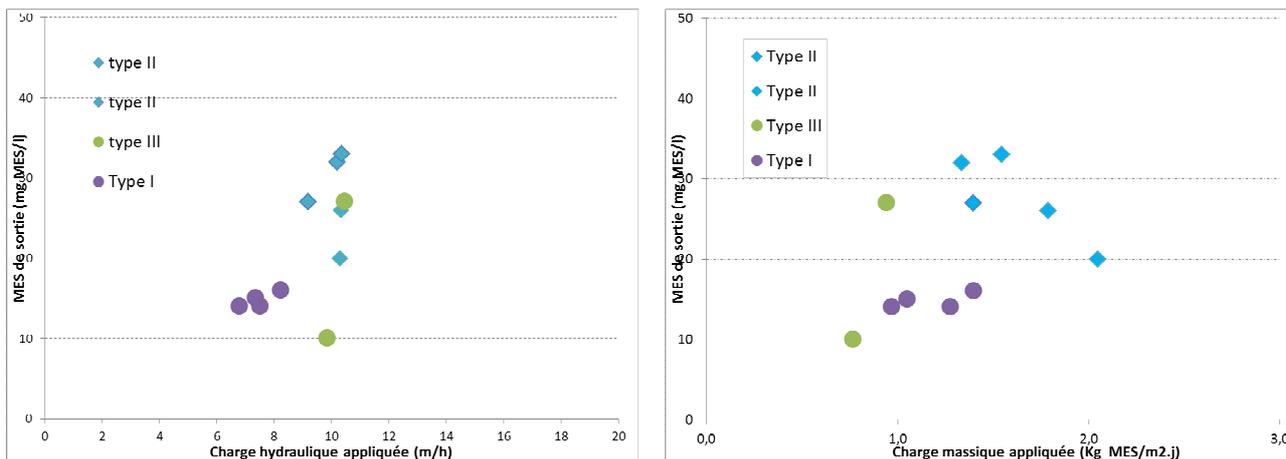


Figure 7 : Concentration moyenne en MES de sortie en fonction des charge hydraulique et massique appliquées (échantillon moyen 24h).

Aucune relation nette n'est observée entre la concentration en MES de sortie et la vitesse ou charge massique appliquée. Cependant, après suppression d'un point (type III), une tendance se dégage entre les MES de sortie et la charge hydraulique.

A l'exception du type I, les concentrations en MES de sortie s'approchent des 30 mg MES/l malgré le faible taux de charge hydraulique.

On retiendra donc une vitesse appliquée de l'ordre de 12 m/h pour respecter un niveau de rejet en moyen journalier de 35 mg de MES/l.

Par contre, il est difficile de noter une tendance pour la charge massique appliquée, ce qui confirme que ce paramètre n'est pas pris en compte par les constructeurs lors du dimensionnement.

Des prélèvements manuels réguliers des boues flottées extraites par raclage en surface de l'ouvrage sont réalisés durant les suivis. Les résultats analytiques sont présentés dans le tableau 8 ci-dessous.

Type de flottateurs	I	II		III
Sites Flottateurs	A PURAC	D IDRACOS	B KWI H	C KWI V
Siccité moyenne des boues flottées en % (% MVS)	/*	4 - 5.3 (80 à 82%)	5.3 - 6.2 (87 à 88%)	5.8 - 6.3 (78 à 83%)
Boues flottées équivalence en MES en g MES/l **	/	45.4	56.4	59.4
Fréquences de raclage	Asservi au débit 1 démarrage / 150 m <sup>3</sup> et 3 mn de marche	5 mn de marche / 1 mn d'arrêt	3 mn de marche / 2 h d'arrêt	9 mn de marche / 1h30 d'arrêt

Tableau 8. Synthèse des caractéristiques des boues

\* : Sur le site A, suite à des apports de limon vers le réseau d'assainissement lors d'épisodes pluvieux, la caractérisation des boues obtenue n'est pas représentative d'un fonctionnement classique.

\*\* : Des analyses de MS et MES réalisées en parallèle sur les mêmes échantillons montrent un delta positif de 1.1 g/l entre les deux analyses due aux sels dissous.

Les siccités moyennes des boues extraites en surface des flottateurs sont très importantes et bien supérieures aux données de dimensionnement exprimées en g MES/l (25 / 35 g MES/l). Ces concentrations élevées sont obtenues principalement en exploitation par le réglage des fréquences de raclage qui sont variables d'un site à l'autre.

On note une relation nette entre la siccité obtenues et la durée cumulée journalière du temps d'arrêt du raclage :

Temps d'arrêt cumulés par jour	Siccités obtenues
240 mn	4 - 5.3 %
1309 mn	5.8 - 6.3%
1404 mn	5.3 - 6.2%

Ce paramètre est important et il faudra rester vigilant en exploitation sur son réglage. En effet, le maintien d'une couche de boue importante en surface peut nuire à un moment donné à la qualité des eaux de sortie par une reprise de MES des boues flottées par la sous verse du flottateur.

Ainsi, comparé à un clarificateur, la filière flottation à air dissous peut s'abstenir d'un ouvrage d'épaississement.

Les boues extraites des flottateurs à l'aval du traitement biologique sont organiques avec un taux de MVS supérieur à 80% et caractéristiques des boues de MBBR.

Les boues décantées de fond d'ouvrage n'ont pas pu faire l'objet de prélèvements représentatifs.

Les boues extraites des flottateurs sont dirigées vers une bêche à boue pour être mélangées aux boues primaires avant déshydratation par centrifugation sur les quatre sites (mais après digestion pour le site A).

### b. Performances des flottateurs sur des pointes hydrauliques courtes

Les performances obtenues sur des pointes de courte durée (2 à 3 heures) durant nos mesures sont présentées dans le tableau 9.

Type de flottateurs	I	II		III
Sites Flottateurs	A PURAC	D IDRACOS	B KWI H	C KWI V
Charge hydraulique de dimensionnement (m/h)	15	19,5	21,9	33,3
charges hydrauliques en pointe (m/h)	9.1 - 9.8	11.9	10.4 à 15.2	13.1 – 13.2
Taux de charge hydraulique sur la pointe (%)	65	61	69	40
Coefficient de pointe	1.30	1.15	1.65	1.3
Charge massique de dimensionnement calculée (kg MES/m <sup>2</sup> .h)	1.5 à 3	1.6 à 2	2.2 à 6.5	0.7 à 3.3
charges massiques en pointe (kg MES/m <sup>2</sup> .h)	1.6 - 1.7	1.42 à 2.32	1.8 à 2.5	1.54 – 1.56
Taux de charge massique sur la pointe (%)	57	116	38	47
[MES] entrée / sortie (mg/l)	176 / 17 - 22	117 à 195 / 9 à 49	158 à 191 / 19 à 55	118 / 16 - 24
Rendement moyen (%)	89	84	81	83

Tableau 9. Moyenne des performances obtenue en pointe multi-horaires

On note de faibles coefficients de pointe pour trois flottateurs qui s'expliquent par de faibles variations hydrauliques en entrée station pour les deux sites de taille importante et par une alimentation à un débit fixé à 61 % du nominale pour le dernier site.

Pour l'installation de type II à coefficient de pointe élevé et taux de charge hydraulique de 69%, les valeurs obtenues en sortie sont ponctuellement élevées et supérieures à 35 mg MES/l. Celles-ci sont à rapprocher de problèmes d'apport en polymère lors des pointes hydrauliques (débit max de la pompe de dosage du polymère d'où un taux de traitement insuffisant) et du traitement biologique amont insuffisant lors des retours de centras de la filière boue.

La figure 8 illustre les concentrations en MES de sortie mesurées en fonction de la vitesse et de la charge appliquée sur l'ouvrage à partir des résultats obtenus sur des pointes multi-horaires.

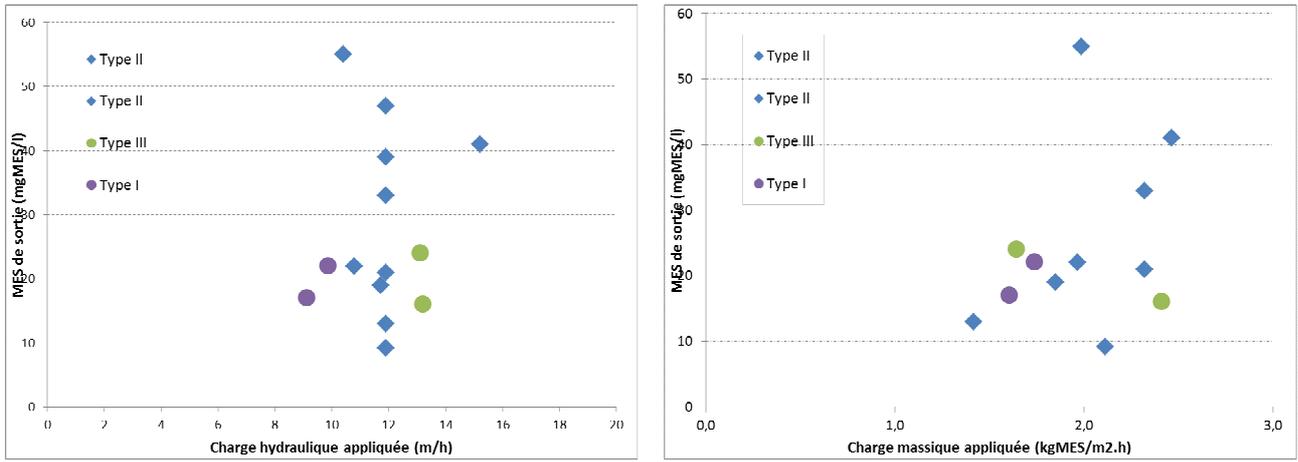


Figure 8 : Concentration en MES de sortie en fonction de la vitesse et de la charge appliquée sur l'ouvrage (pointes multi-horaires).

On observe pour un même type de procédé et à des charges hydrauliques identiques, des variations importantes en termes de qualité des eaux de sortie. Ce point confirme bien que le paramètre hydraulique n'est pas le seul paramètre à influencer les performances de la flottation.

### c. Impact des variations hydrauliques et flux associés

#### Variations horaires sur la journée

Lors des différents suivis et plus particulièrement sur les sites où une variation des débits à l'entrée du flottateur est observée, des analyses de MES sur des échantillons horaires en entrée et sortie d'ouvrage sont réalisées. Ces données permettent une approche plus fine du comportement des flottateurs face aux variations de charges hydraulique et particulaire.

Les figures ci-dessous illustrent les évolutions obtenues sur les deux sites équipés des flottateurs de type II.

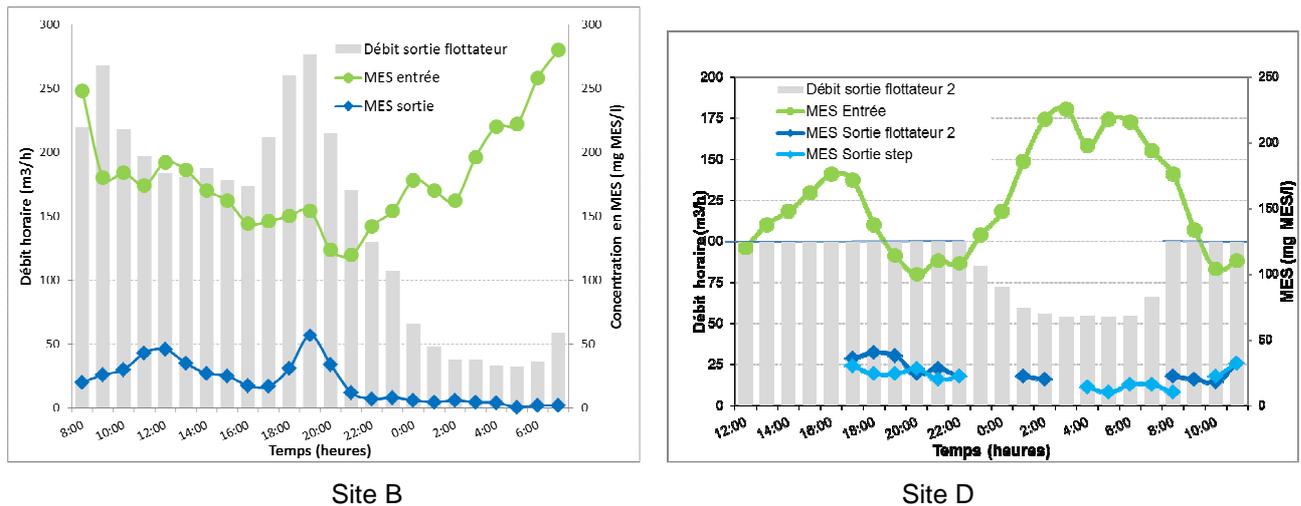


Figure 9 : Evolution horaire des débits et des concentrations en MES en entrée/sortie de deux flottateurs.

Ces deux représentations graphiques illustrent :

- Une relation inverse entre le débit d'alimentation des MBBR et la concentration des boues d'entrée flottateur. Celle-ci est à rapprocher des fortes variations hydrauliques rencontrées sur ces sites touristiques hivernaux et s'explique par l'effet de dilution des MES du réacteur biologique.

- Une relation nette entre les débits et les MES de sortie avec, pour le site B, des valeurs élevées en sortie accentuées par des problèmes d'apport de polymère lors des forts débits et pour le site D des valeurs plus stables compte tenu d'un flottateur alimenté à débit constant (100 m<sup>3</sup>/h) hors période nocturne.

La figure 10 ci-après présente l'ensemble des points horaires obtenus en sortie flottateur en fonction de la charge hydraulique appliquée.

L'ensemble des points retenus n'intègre pas les dysfonctionnements avérés comme les problèmes d'apport de polymère (apport plafonné lors des forts débits, taux de traitement involontairement trop faible) ou le traitement biologique amont insuffisant (asservissement en oxygène défaillant, retours de centras de la filière boue).

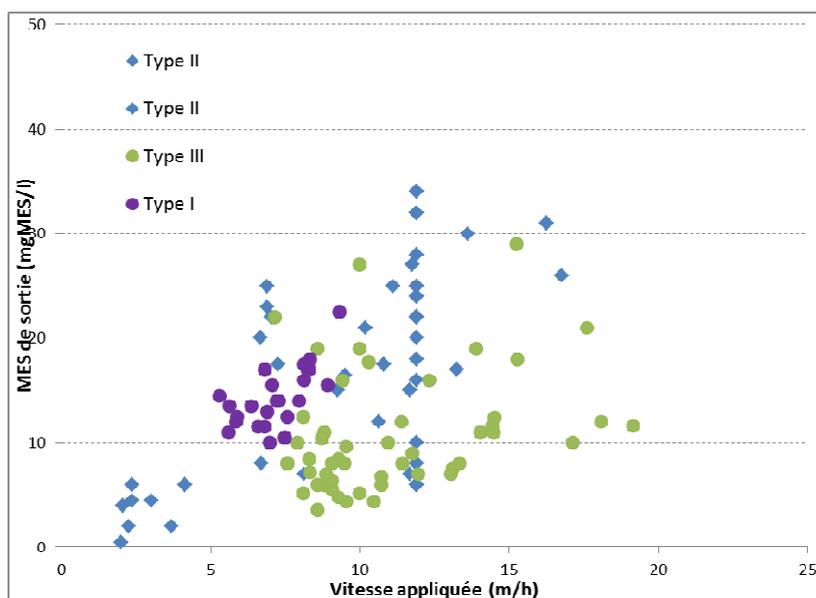


Figure 10 : Concentration en MES de sortie flottateur en fonction de la vitesse appliquée sur l'ouvrage (échantillons horaires)

A l'échelle de l'heure, pour une plage de vitesse appliquée très importante de 2 à 20 m/h, on obtient des concentrations de sortie inférieures à 30 - 35 mg MES/l.

Cette représentation graphique confirme que pour une technologie donnée, la concentration en MES de sortie n'est pas uniquement dépendante de la vitesse appliquée sur l'ouvrage.

On note également des différences par technologie avec un bon comportement pour les flottateurs de type III (concentration inférieure à 35 mg/l de MES pour des vitesses élevées) et de type II mais avec des charges hydrauliques de dimensionnement inférieures.

Il faut bien préciser que le rôle du flottateur est de retenir les floccs biologiques formés au niveau de l'étage de traitement amont. En aucun cas cet ouvrage ne permet de stopper la pollution soluble et colloïdale non traitée à l'amont.

Ainsi, lors de certaines pointes de charges organiques journalières, si le traitement biologique amont est dégradé suite à un manque d'oxygène dissous ou lors d'à-coups de charges dus aux retours des centras de la filière de traitement des boues, un rejet plus élevé en MES sera observé en sortie.

Certains pics horaires en MES mesurés en sortie sont dus à une forte proportion de colloïdes non traités dans le MBBR et non à un fonctionnement insuffisant du flottateur.

Pour les mêmes points, la relation entre la concentration en MES de sortie et la charge appliquée en MES est illustrée sur la figure 11 suivante.

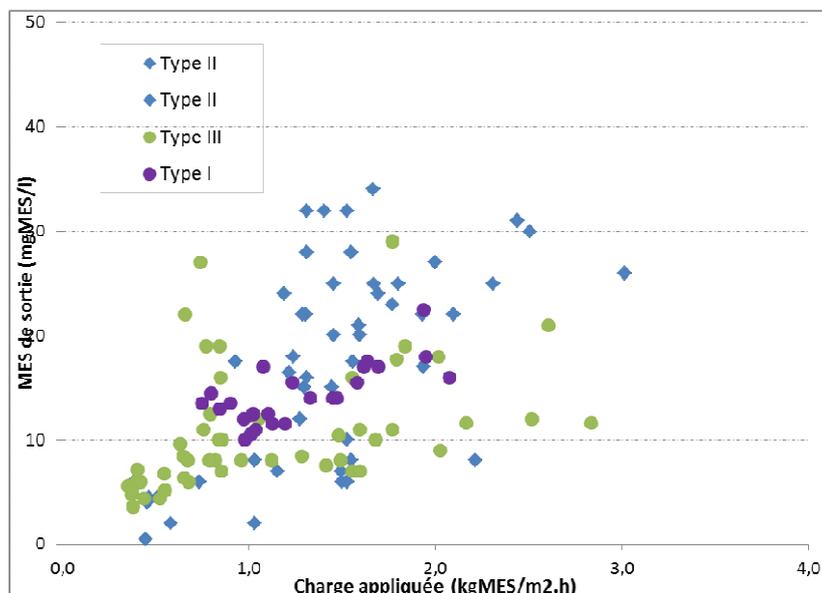


Figure 11 : Concentration en MES en sortie flottateur en fonction de la charge en MES appliquée sur l'ouvrage (échantillons horaires)

On observe un nuage de points plus étroit avec une fourchette de charges appliquées qui s'étend de 0.4 à 3.0 kg MES /m<sup>2</sup>.h pour les mêmes concentrations de sortie que précédemment. Ainsi, les flottateurs ont fonctionnés au niveau de l'heure sur la majorité de la gamme des charges massiques de dimensionnement (0.7 à 3.3 si l'on enlève la gamme du site B aberrante).

Une relation charge massique appliquée / concentration en MES en sortie d'ouvrage peut également être observée.

Ainsi, sans dysfonctionnement du process (traitement biologique du MBBR ou apport de polymère), les concentrations en MES de sortie sont inférieures au seuil de rejet autorisé de 35 mg MES/l lors de variations hydrauliques et massiques, pour des taux de charge hydraulique de l'ordre de 17 m/h et pour des charges massiques inférieures à 3 kg MES /m<sup>2</sup>.h.

### **A-coups hydrauliques sur des flottateurs en stand-by (sans alimentation et sans polymère)**

Sur les sites étudiés, un ouvrage en stand-by étant souvent observé, nous avons voulu appréhender l'impact de ce mode de fonctionnement sur la qualité du traitement. Sur le plan énergétique, le gain est minime puisque la production d'eau blanche est maintenue en fonctionnement, ce poste contribuant fortement à la consommation énergétique de l'ouvrage.

Différents à-coups hydrauliques par rapport aux débits des heures précédentes sont provoqués sans arrêter le flottateur. Pour cela, le relevage des eaux d'entrée de la station est arrêté pour remplir le bassin d'orage. Le redémarrage de l'alimentation permet ensuite d'apporter temporairement un débit d'eau plus important (somme des débits entrant et de vidange du bassin d'orage).

On observe ainsi sur la figure 12 suivante, deux pointes « artificielles » à 360 m<sup>3</sup>/h (soit une augmentation de 71 % du débit précédent) et 370 m<sup>3</sup>/h (soit une augmentation de 428 %).

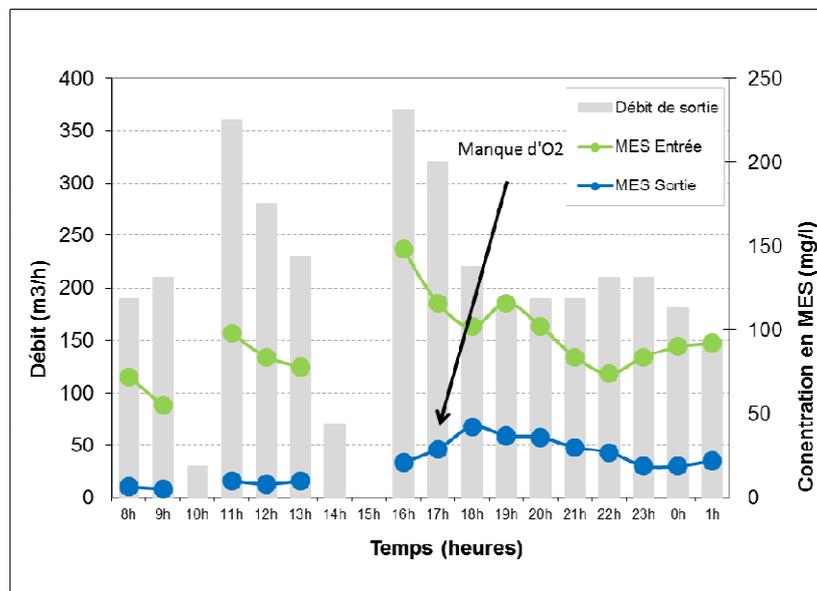


Figure 12 : Evolution des débits de sortie et des concentrations en MES en entrée/sortie d'ouvrage lors d'écoulements hydrauliques

Pour les deux simulations, on observe lors du re démarrage de l'alimentation un doublement de la concentration en MES de sortie avec un passage de 5,2 à 10 mg de MES/l en sortie pour le 1er essai pour un taux de charge hydraulique de 51% et de 10 à 21 mg de MES /l pour le second pour un taux de charge hydraulique de 53%. Cette augmentation de la concentration est de courte durée (quelques heures) et ne dépasse pas les valeurs demandées du rejet, la qualité des eaux traitées en moyen journalier restant ainsi sous le seuil autorisé.

Sur la seconde période, on observe une valeur importante de 42 mg/L entre 18 et 19h soit trois heures après le re démarrage. Cette valeur élevée s'explique par un déficit d'oxygène au niveau du système de traitement biologique (MBBR) amont qui a entraîné une forte teneur de matières colloïdales en entrée et sortie flottateur.

#### d. Impact des redémarrages (arrêt complet des flottateurs)

L'arrêt complet d'un flottateur permet un gain énergétique non négligeable pour l'installation. Le suivi de cet arrêt puis de sa mise en route automatisée permet de vérifier si le rejet est fortement affecté par rapport à la période de fonctionnement précédente.

Sur chaque site, à l'exception du site B équipé d'un unique flottateur, l'arrêt total d'un ouvrage (alimentation, apport en polymère, production et recirculation des eaux blanches, raclage) puis son redémarrage ont été effectués.

Les résultats obtenus sur un des sites sont illustrés par le graphe 13 ci-dessous.

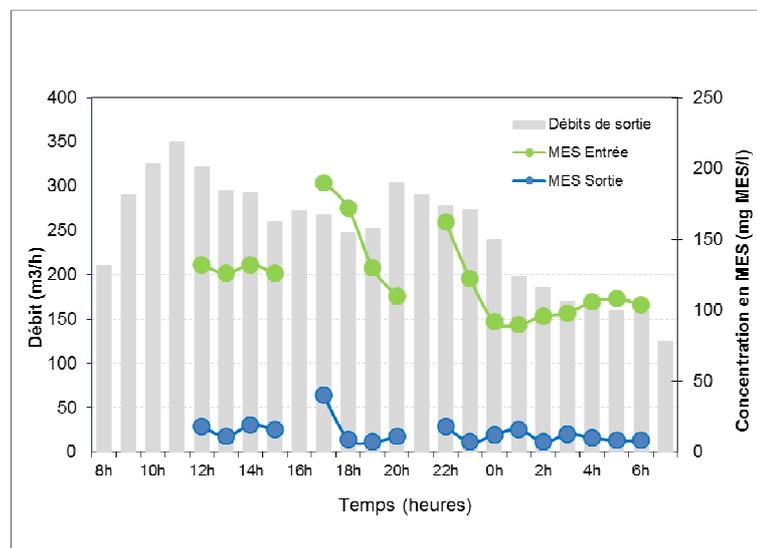


Figure 13 : Evolution des débits de sortie et des concentrations en MES en entrée/sortie d'ouvrage suite au redémarrage d'un flottateur

Le flottateur est totalement arrêté puis redémarré deux fois de suite à un intervalle de 4 heures. Les à-coups de charge hydraulique représentent sur cet ouvrage 40% du taux de charge de dimensionnement. On observe un pic de MES en sortie uniquement la première heure après chaque remise en route de l'ouvrage. Puis, le temps que le procédé se stabilise, une concentration classique en MES de sortie est retrouvée.

Le flottateur à air dissous récupère ainsi ses performances dans l'heure suivant son redémarrage complet.

Il faut noter que le système Purac n'est pas conçu pour effectuer des arrêts et redémarrages aisés. A l'inverse, le système Idracos est équipé d'un automatisme conçu pour ce type de fonctionnement syncopé continu.

#### e. Principales caractéristiques de fonctionnement

### Fabrication de l'eau blanche

Ce poste fonctionne évidemment en continu et est indispensable pour le process.

Lors de nos mesures, la recirculation des eaux blanches a fonctionné suivant les paramètres du tableau 12 suivant :

Type de flottateurs	I	II		III
Sites Flottateurs	A PURAC	D IDRACOS	B KWI H	C KWI V
Dimensionnement : Débit de recirculation de l'eau traitée	Asservi au débit 15% du débit entrant	Débit fixe De l'ordre de 20% du débit entrant max		
Fonctionnement : % recalculé / débit moyen traité	9.3 à 11.4 % Suivant la file	35%	61%	67%

Tableau 10. Fabrication de l'eau blanche

En fonctionnement moyen, le taux de recirculation se situe dans les fourchettes de 35 à 67%; sauf pour le site A pour lequel la recirculation des eaux blanches est inférieure car asservit au débit à traiter.

Ainsi, en faible charge hydraulique, la recirculation est nettement supérieure pour les flottateurs dont le taux de recirculation est fixe. Cette recirculation à débit fixe augmente de façon importante la vitesse de fonctionnement réelle moyenne et lors des faibles pointes hydrauliques.

Par exemple, pour les flottateurs de type II, la recirculation à débit fixe accroît la vitesse de fonctionnement en moyen 24h de 9.2 à 14.8 m/h (soit + 5.5 m/h).



*Pompes de recirculation*

## Réactifs utilisés

Les quatre sites de mesures se différencient par le poste de coagulation / floculation à l'amont du flottateur. Le tableau 11 ci-après présente les caractéristiques des réactifs utilisés.

Type de flottateurs	I	II		III
Sites Flottateurs	A PURAC	D IDRACOS	B KWI H	C KWI V
Coagulant FeCl <sub>3</sub> Taux de traitement	50 g/m <sup>3</sup> d'eau traitée	41 g/m <sup>3</sup> d'eau traitée	-	-
Floculant Taux de traitement	0.75 à 0.85 g/m <sup>3</sup>	3.47 g/m <sup>3</sup>	1.4 à 1.95 g/m <sup>3</sup>	1.5 à 3 g/m <sup>3</sup>
Point d'injection floculant	Cuve de floculation amont	En ligne		
[MES] moyenne sortie mg/l	15	28	27	61 à 18.5
Boues flottées en g MES/l	/	45.4	56.4	59.4

*Tableau 11. Réactifs utilisés*

- Coagulation

Le chlorure ferrique est injecté sur l'étage primaire des quatre sites, en continu pour le site A et suivant la saison pour les trois installations de sport d'hiver. L'objectif de cet apport est d'assurer un abattement de la pollution particulaire plus important sur cet étage de traitement mais également un abattement du phosphore pour deux d'entre d'eux (sites A et C).

Le coagulant est aussi apporté sur l'étage flottation sur 2 des sites.

- pour le site A, cet apport est réalisé pour une finition de la déphosphatation, au niveau du poste de coagulation en tête des flottateurs, avec un taux de traitement de 50 g/m<sup>3</sup> d'eau traitée (au lieu de 25 g/m<sup>3</sup> au dimensionnement).

- pour le site D, il est effectué pour un meilleur fonctionnement du flottateur, en ligne, avec un taux de traitement de 41 g/m<sup>3</sup> d'eau traitée (10 à 40 g/m<sup>3</sup> au dimensionnement).

### Rôle du FeCl<sub>3</sub> sur la flottation

Sur le site D, différents suivis horaires ont été réalisés avec et sans apport de coagulant. Les résultats sont résumés sur la figure 14.

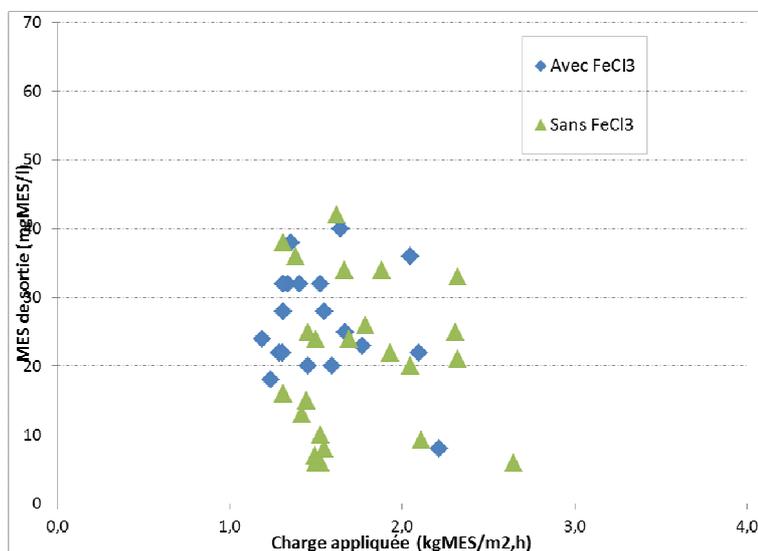


Figure 14 : Concentrations en MES de sortie flottateur en fonction de la charge en MES appliquée sur l'ouvrage avec et sans apport de FeCl<sub>3</sub>

Avec l'utilisation du polymère à un même taux de traitement (produit indispensable à la flottation), aucune différence de performance n'est observée entre les deux périodes avec ou sans apport de coagulant. L'injection de chlorure ferrique (à 41 g/m<sup>3</sup> d'eau traité) n'apporte pas d'amélioration à la flottation avec ce polymère.



Centrale de préparation du polymère

- Flocculation

Chaque installation utilise un polymère et un taux de traitement différent qui ont été choisis après essais sur site. Les quantités apportées dépendent des caractéristiques des boues, de leur concentration en entrée d'ouvrage et du point d'injection.

En flottation, divers polymères cationiques, plutôt polyvalents, sont utilisés sous forme d'émulsion ou de poudre. Le point d'injection retenu est un apport en ligne à l'amont des flottateurs pour trois sites ou au niveau de la cuve de flocculation pour le dernier.

L'impact du point d'apport du polymère, (poste de flocculation amont ou en ligne avant l'alimentation des ouvrages) n'a pas pu être étudié sur site mais des essais d'injection du polymère aux deux points ont été réalisés par l'exploitant d'un site sans observer de différence sur la qualité de traitement.

Les taux de traitement mesurés sont nettement supérieurs à ceux annoncés dans les cahiers techniques et justificatifs des installations, sauf pour le site A qui apporte conjointement de  $\text{FeCl}_3$  et qui a réduit ses apports en polymère suite à des essais sur site.

En absence de mesure comparative sur site, il n'est pas possible de se positionner sur l'impact de l'apport conjoint de coagulant sur le taux de traitement du flocculant en tête de flottateur. En théorie, un apport de  $\text{FeCl}_3$  permet de réduire le taux de traitement de flocculant pour les mêmes performances de traitement.

Il faut noter que les constructeurs de flottateurs annoncent de leur côté des taux de traitement de l'ordre de 3 à 5  $\text{g/m}^3$  pour un fonctionnement optimal de leur procédé et ne sont pas toujours en phase avec les constructeurs de stations d'épuration qui tentent eux de minimiser les futurs coûts de fonctionnement de leur installation.

Les pompes doseuses sont asservies au débit traité et en secours sur table horaire.

Pour le site de D, l'objectif d'un taux de traitement de 6  $\text{g/m}^3$  n'a pas pu être assuré suite à un problème de casse d'électrovannes de la préparation du polymère qui a entraîné une concentration de la préparation deux fois moins concentrée.

Des problèmes d'apport de polymère sont également rencontrés sur les sites de B et C avec des dysfonctionnements des pompes doseuses (débit obtenu < débit théorique suite au colmatage du système de pompage) et un choix des pompes et de leur asservissement non optimisé. Ainsi, sur ces sites, l'apport de polymère est stoppé ou limité à partir d'un certain débit nettement inférieur au débit maxi de dimensionnement. Lors des pointes de débit, l'apport de polymère est ainsi plafonné voire stoppé.

On peut noter que des centrales indépendantes de préparation du flocculant pour le traitement primaire, la flottation et le traitement des boues sont en place sur les sites sauf sur le B où la même centrale est utilisée pour la centrifugation des boues et l'étage de flottation. Afin de palier à cette anomalie, un nouveau poste de préparation était en cours de commande.

#### *f. Impact de la concentration en polymère*

Sur le site C, le fonctionnement du flottateur à différents taux de traitement en polymère a pu être suivi. La figure 14 illustre les résultats obtenus.

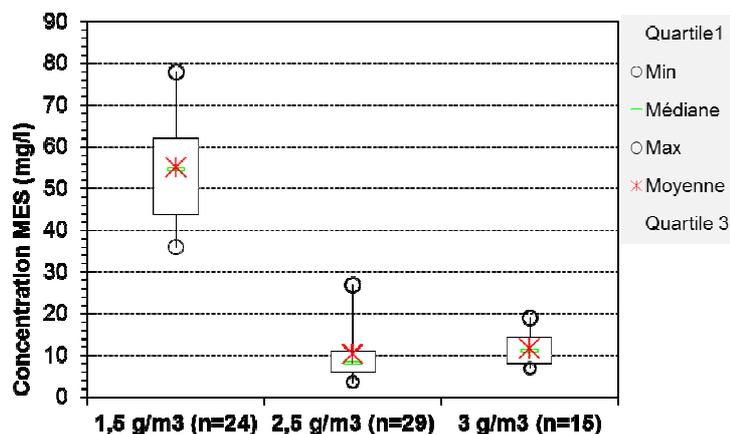


Figure 15 : Concentrations en MES mesurées en sortie flottateur en fonction de 3 taux de traitement

Les taux de charge hydrauliques moyen des jours de meures sont de l'ordre de 30 à 35%.

On remarque que pour des taux de traitement en polymère de 2,5 et 3 g/m<sup>3</sup> d'eau à traiter, la moyenne des MES de sortie est respectivement de 10,2 et 11,4 mg MES/l.

Par contre, pour une concentration en polymère de 1,5 g/m<sup>3</sup>, on observe un fonctionnement dégradé du flottateur entraînant alors des rejets non conformes sur les concentrations en MES de sortie (moyenne de 65 mg/L sur l'échantillon moyen 24h).

Ces résultats confirment les préconisations de taux de traitement élevés, de l'ordre de 3 à 5 g/m<sup>3</sup> d'eau à traiter, données par les constructeurs de flottateurs.

### g. Consommation énergétique

Une approche de la répartition des consommations énergétiques est réalisée à partir du relevé régulier des compteurs de la station et des enregistrements de la supervision sur deux sites.

Type de flottateurs	I	III
Sites Flottateurs	A PURAC	C KWI V
Taux de charge hydraulique moyen %	50	30
% utilisé par la flottation	10.04% / file eau 8.38% / station	1 file : 23.7% / file eau 10.8% / station
kW/kg MS évacués	0.25 à 0.30	/
kW/m <sup>3</sup> d'eau traitée	0.082	1 file : 0.103

Tableau 12. Synthèse des consommations énergétiques des flottateurs étudiés

Lors de nos mesures, le ratio de consommation utilisé en flottation est élevé (10 et 24% de la consommation de la file eau) le reste étant utilisé majoritairement par l'aération continue du MBBR. Cette variation est à rapprocher de l'effet taille des installations.

Ramenée au traitement nominal (100% d'hydraulique), la consommation énergétique de l'étape flottation s'élèverait à 35 - 40 W/m<sup>3</sup> d'eau traitée et serait légèrement supérieure à la gamme de consommation énergétique obtenue sur un clarificateur statique avec recirculation des boues par

Irstea [A.E. Stricker]. de 20 à 40 W/m<sup>3</sup> d'eau traité en fonction du taux d'équipement de l'ouvrage (raclé, sucé, pompe à vide...). En effet la consommation principale les deux procédés est à mettre sur le compte des pompes de recirculation fonctionnant en continu.

#### **4. *Recommandations et exploitation***

Les différentes visites techniques réalisées sur les sites équipés de flottateur ont permis de mettre en évidence les caractéristiques de fonctionnement mais également de connaître les conditions d'exploitation, les éventuels dysfonctionnements observés sur les flottateurs ou encore les modifications de réglage effectuées depuis leur mise en route.



*Flottateur*

##### **a. *Dysfonctionnements rencontrés***

En ce qui concerne les dysfonctionnements observés sur les flottateurs depuis leur mise en route, on remarque notamment des problèmes de conception (hauteur insuffisante du raclage de surface, vitesse du racleur de fond trop rapide, pompes d'injection du polymère non adaptées aux variations hydrauliques importantes, mauvais réglage de la vanne d'ouverture de l'eau blanche, nuisance sonore du système de pressurisation...) qui ont nécessité une optimisation pour atteindre un meilleur fonctionnement.

Le réglage de l'apport en polymère est également un souci récurrent sur plusieurs stations. En effet, sa nature, le taux de traitement ou encore son point d'injection sont des paramètres déterminants pour une flottation efficace. Ces critères sont donc à optimiser rapidement lors de la mise en route des ouvrages.

Ces différents dysfonctionnements apparaissent plus ou moins selon les stations et sont à l'origine des rejets parfois non conformes en MES observés en début de mise en route des installations.

## *b. Recommandations*

Différentes recommandations peuvent être proposées sur la mise en place du procédé flottation à air dissous.

### Coagulation / floculation :

- L'apport de  $\text{FeCl}_3$  n'est pas nécessaire pour le bon fonctionnement du procédé. Il peut par contre être utilisé sur les sites où une déphosphatation est demandée.

- La mise en place de postes de préparation du polymère indépendants pour le traitement primaire, la flottation et le traitement des boues est préconisée. Cela permet une plus grande souplesse d'exploitation et un choix de produit, après essais sur site, le mieux adapté à chaque type de traitement.

- Une attention particulière doit être apportée au choix de la gamme de débits des pompes d'injection de floculant. En effet, un compromis est toujours fait entre le taux de traitement à débit moyen et un faible, voire une absence, d'apport lors des pointes de débit pour des économies d'exploitation.

### Eau blanche :

- Les pompes de recirculation fonctionnent en continu et peuvent être une source de nuisances sonores importantes sur les grosses installations.

- Il est primordial de bien vérifier que tous les organes nécessaires à la production des eaux blanches soient reliés à l'automate pour un redémarrage automatique ou à distance. En effet, sur un site, les surpresseurs pour la fabrication des eaux blanches n'avaient pas été connectés correctement à l'automate. Ainsi, lors de coupures électriques nocturnes et autres dysfonctionnements, la flottation redémarrait automatiquement avec la filière eau mais sans apport d'air.

### Flottateur :

- Pour les ouvrages installés en intérieur de bâtiment, le capotage supplémentaire des flottateurs n'est pas nécessaire : l'ouvrage est constamment aéré et les boues flottées sont extraites régulièrement. Par contre, ce capotage crée des contraintes continues et importantes en exploitation : mauvaise vision de la surface, donc de la qualité des eaux blanches, du raclage et des boues flottées, contrainte du lavage régulier des vitres.

- Les sites étudiés se différencient par leur souplesse de démarrage. Pour PURAC, aucun automatisme n'est prévu et chaque moteur doit être démarré manuellement, des batardeaux devant être déplacés en sortie R3F. A l'apposé, le fonctionnement des flottateurs d'IDRAFLOT est géré entièrement par automate avec alimentation prioritaire d'un unique ouvrage et le fonctionnement en marche /arrêt du second suivant le débit à traiter. Cette optimisation de fonctionnement par l'automatisme doit permettre de réaliser des économies d'énergies, indispensables sur les sites équipés de traitement biologique MBBR déjà reconnus comme étant énergivores.

### *c. Exploitation*

Comparé aux clarificateurs statiques, le bon fonctionnement des flottateurs est davantage lié aux équipements: surpresseurs, pompes de recirculation des eaux blanches, racle, poste de préparation des coagulants, pompes à polymère.

Outre la maintenance traditionnelle des organes, une surveillance accrue du procédé est donc indispensable, et plus particulièrement les postes floculation (concentration de la solution mère, état et débit d'injection des pompes, suivi du stock de polymère ...) et production des eaux blanches (vérification du débit d'air et des pressions). Un suivi régulier de la concentration des boues extraites en fond d'ouvrage, souvent difficile car non prévu, permet d'évaluer si des dépôts se forment avec le temps.

Certains paramètres de réglages de fonctionnement des flottateurs ne sont pas fixes, mais doivent être modifiés en fonction de la saison et de la charge à traiter, comme par exemple les temps d'extraction des boues décantées et la fréquence de raclage des boues flottées. Ces modifications demandent de l'expérience et se font « à l'œil » suivant la hauteur de boues flottées lors des pointes de charges journalières.

## 5. Avantages / inconvénients du procédé

### a. Avantages

- Le temps de séjour hydraulique sur l'étage est court avec des boues constamment aérées. La mise en place de flottateur à l'aval de procédés de traitements biologiques type MBBR assurant une nitrification sans dénitrification complète correspond bien à son créneau d'application.
- Le procédé est réellement compact. Il est donc intéressant pour les sites confrontés à des contraintes foncières importantes. Sa faible emprise au sol donne la possibilité de les intégrer dans un bâtiment. Leur mise en place est donc bien en cohérence avec le choix du procédé MBBR.
- Les boues secondaires obtenues par flottation sont concentrées et permettent de se passer d'un épaisseur sur la file de traitement des boues.
- Si besoin, il est possible de parfaire une déphosphatation sur l'ouvrage par un apport amont de coagulant.

### b. Inconvénients

- Afin de garder ses avantages, le créneau d'application de la FAD est le traitement de boues faiblement concentrées avec des MES inférieures à 1,5 g MES/l.
- Le procédé est plutôt fragile puisque son bon fonctionnement est étroitement lié à du matériel et à de l'automatisme : Compresseurs, préparation et pompes à polymère, racle de surface, vidanges de fond.
- L'apport d'un polymère est obligatoire, avec un taux de traitement à fixer pour chaque installation mais qui s'inscrit dans la fourchette de 2.5 à 6 mg/ m<sup>3</sup> d'eau traité sans apport de FeCl<sub>3</sub>.
- Des pertes de MES en sortie du flottateur sont observées lors de dysfonctionnements du MBBR amont (apport de colloïdes), suite à de faibles taux de traitement en polymère, une fréquence de racle inadaptée et évidemment des coupures d'électricité.

## IV. Conclusion

Les cinq technologies différentes de flottateurs rencontrées en France se répartissent en trois grands types suivant leurs caractéristiques :

- Ouvrage caractérisé par un fond plat et l'absence de support à l'intérieur de l'ouvrage, dimensionné à 15 m/h.
- Flottateur équipé de supports (plaques, éléments en U), dimensionné à 20 m/h.
- Ouvrage profond également équipé de support mais à circulation verticale, dimensionné à 30m/h.

Le dimensionnement du procédé flottation à air dissous est ainsi basé sur le paramètre charge hydraulique appliquée et non pas sur celui de la charge massique.

Lors de nos suivis, une relation nette entre la vitesse appliquée et la concentration en MES de sortie est observée. Par contre, ce paramètre charge hydraulique n'est pas le seul à influencer les performances de la flottation.

Des niveaux de rejet de l'ordre de 30 - 35 mg MES/l en moyen journalier sont respectés mais des dépassements sont observés au niveau des pointes horaires. Ceux-ci sont à rapprocher de dysfonctionnements observés lorsque le traitement biologique amont n'est pas optimisé (manque d'Oxygène dissous, à-coups de charge des retours en tête du traitement des boues) ou lorsque des problèmes d'apport de polymère sont rencontrés.

Il faut bien préciser que le rôle du flottateur est de retenir les floccs biologiques formés au niveau de l'étage de traitement amont. En aucun cas cet ouvrage ne permet de stopper la pollution soluble et colloïdale non traitée à l'amont.

Ainsi, sans dysfonctionnement du process (traitement biologique du MBBR ou apport de polymère), les concentrations en MES de sortie sont inférieures au seuil de rejet autorisé de 35 mg MES/l lors de variations hydrauliques et massiques, pour des taux de charge hydraulique de l'ordre de 17 m/h et des charges massiques inférieures à 3 kg MES /m<sup>2</sup>.h.

Les concentrations moyennes des boues flottées extraites en surface des flottateurs sont élevées et bien supérieures aux données de dimensionnement (25/35 g MES/l). Ces concentrations importantes sont obtenues principalement par le réglage des fréquences de raclage et permettent de s'affranchir d'un épaisseur sur la file de traitement des boues.

On observe une bonne réponse du procédé face aux redémarrages des ouvrages en stand-by ou en arrêt complet avec une récupération du niveau de traitement dès les premières heures.

Pour l'obtention de ces performances, l'apport continu de polymère cationique à l'amont du flottateur est indispensable avec un taux de traitement de l'ordre de 2.5 mg/m<sup>3</sup> d'eau traité, sans coagulant. Un apport de FeCl<sub>3</sub> n'est pas nécessaire pour son bon fonctionnement mais possible pour assurer une déphosphatation finale.

Le procédé Flottation à air dissous (FAD) s'avère donc être une technologie intéressante pour son créneau d'application : traitement compact, il est en adéquation avec un traitement MBBR assurant une nitrification sans dénitrification, qui permet une alimentation en boue à de faibles concentrations de MES (< 1.5 mg MES/l).

Le bon fonctionnement des flottateurs est étroitement lié aux équipements : compresseurs, pompes de recirculation, racle, poste de préparation des coagulants, pompe à polymère. Outre la maintenance traditionnelle des organes, une surveillance régulière du procédé est donc indispensable, et plus particulièrement les postes floculation (concentration de la solution mère, débit d'injection de la pompe, suivi du stock de polymère ...) et production des eaux blanches (vérification du débit d'air et des pressions).

Le point délicat en exploitation est l'optimisation de l'apport de polymère qui demande un suivi régulier de la préparation, de l'état et du bon fonctionnement des pompes d'injection, du taux de traitement.

Certains réglages de fonctionnement des flottateurs ne sont pas figés, mais doivent être modifiés en fonction de la saison et de la charge à traiter comme par exemple les temps d'extraction des boues décantées, la fréquence de raclage des boues flottées voir le taux de traitement.

Les coûts énergétiques de fonctionnement sont proches mais légèrement supérieurs à ceux d'une clarification. En effet la consommation principale les deux procédés est à mettre sur le compte des pompes de recirculation fonctionnant en continu.

## Bibliographiques

AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE, 2009. *Guide pour la mise en œuvre de l'auto-surveillance des stations d'épuration des collectivités.*

AL-SHAMRANI A.A., JAMES A., XIAO H., 2001. Separation of oil from water by dissolved air flotation, *Colloids and Surfaces, A : Physicochemical and Engineering Aspects* 209, pp. 15-26.

CANLER J.P., PERRET J.M. (Irstea). Les Procédés MBBR pour le traitement des eaux usées. Cas du procédé R3F, Document technique FNDAE n°38.

CROSSLET I.A., VALADE M.T. , 2006. A review of the technological developments of dissolved air flotation, *Journal of water supply : Research and Technology – AQUA* 55.7-8, pp. 479-491.

DEGREMONT-SUEZ, 2005. *Mémento technique de l'eau*, dixième édition, 1718 p.

DUC C., 2009. Suivi et optimisation de la station de traitement des eaux usées de la Communauté de Communes des Trois Frontières, *Mémoire de fin d'étude, Master Eau potable et Assainissement*, 83 p.

EDZWALD J.K. , 2010. Dissolved air flotation and me , *Water Research* 44, pp. 2077-2106.

EL-GOHARY F.A., ABO EL-ELA S.E. , 1980. The Optimization of Wastewater Treatment via Combined Techniques, Part II : Combined Biological-Dissolved Air Flotation, *Environment International*, vol 3, pp. 219-223.

GALLINARI F., ELMALEH S., BEN AIM R., 1996. Influence de la dissipation énergétique sur l'efficacité de la flottation à air dissous : analogie avec la floculation, *Revue des Sciences de l'Eau* 4, pp. 485-498.

HAMI M.L., AL-HASHIMI M.A., AL-DOORI M.M., 2007. Effect of activated carbon on BOD and COD removal in a dissolved air flotation unit treating refinery wastewater, *Desalination* 216, pp. 116-122.

HUANG Z., LEGENDRE D., GUIRAUD P., 2010. A new experimental method for determining particle capture efficiency in flotation, *Chemical Engineering Science* 66, pp. 982-997.

JARVIS P., BUCKINGHAM P., HOLDEN B., JEFFERSON B., 2009. Low energy ballasted flotation, *Water Research* 43, pp. 3427-3434.

JONES P.A., SCHULER A.J., 2010. Seasonal variability of biomass density and activated sludge settleability in full-scale wastewater treatment systems, *Chemical Engineering Journal* 164, pp. 16-22.

ODEGAARD H., 2001. The use of dissolved air flotation in municipal wastewater treatment, *Water Science and Technology*, vol 43, n°8, pp. 75-81.

PALANIANDY P., ADLAN M.N., ABDUL AZIZ H., MURSHED M-F., 2010. Application of dissolved air flotation (DAF) in semiaerobic leachate treatment, *Chemical Engineering Journal* 157, pp. 316-322.

SANTANDER M., RODRIGUES R.T., RUBIO J., 2010. Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations, *Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects* 375, pp. 237-244.

SARROT V., 2006. Capture de fines particules par des inclusions fluides, *Thèse, Doctorat Transferts, Dynamique des fluides, Énergétique et Procédés*, 292 p.

SIANGSANUN V., 2010. New Hybrid Process : Hydrocyclone, Coagulation, Flocculation and Flotation for water treatment process, *Thèse, Université de Toulouse*, 207 p.

SUDILOVSKIY P.S., KAGRAMANOV G.G., TRUSHIN A.M., KOLESNIKOV V.A., 2007. Use of membranes for heavy metal cationic wastewater treatment : flotation and membrane filtration, *Clean Techn. Environ. Policy* 9, pp. 189-198.

ZARKOVIC D.B., TODOROVIC Z.N., RAJAKOVIC L.V., 2010. Simple and cost-effective measures for the improvement of paper mill effluent treatment - A case study, *Journal of Cleaner Production* 19, pp. 764-774.