

Influence de la dissipation énergétique sur l'efficacité de la flottation à air dissous : analogie avec la floculation

Influence of Energy Dissipation on the Efficiency of Air Flotation: Analogy with Flocculation

F. Gallinari, S. Elmaleh and R. Ben Aïm

Volume 9, Number 4, 1996

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705263ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705263ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Gallinari, F., Elmaleh, S. & Ben Aïm, 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 / Journal of Water Science*, 9(4), 485–498. <https://doi.org/10.7202/705263ar>

Article abstract

Dissolved air flotation units are generally designed on the basis of two parameters: the mA/mS ratio of the air mass to the solid mass in reaction, and the contact time between the gas phase and the solid phase. The insufficiency of this approach, which neglects energy dissipation, is demonstrated.

Five units, the efficiencies of which were quantified by turbidimetry, were operated with a bentonite suspension previously flocculated with WAC or ferric chloride. Batch flotator 1 was a commercial unit designed to evaluate flotation feasibility (Fig.1). Flotators 2 and 3 were used to establish flotation efficiency as a function of the mA/mS ratio in continuous operation (Figs. 2 and 3). The influence of contact time was determined with batch flotator 4 (Fig. 4). Continuous flotators 3 and 5 were identical rectangular reactors but the latter was designed to allow the injection of pressurized water through five different points (Fig. 3).

Turbidity abatement increases as a function of mA/mS, reaching a plateau, the curve having a classical sigmoidal shape in batch or in continuous operation (Fig. 5). However the important air requirement ($\text{mA/mS}=1$) to attain 70% abatement would hamper industrial applications. The contact time is the residence time of the gas phase through a batch cell or the residence time of the solid phase through a continuous flotator. Its influence is displayed in Fig. 6 where a sigmoidal curve shows that a 100 second contact time is required to reach a significant abatement even with a low mA/mS of 0.1. However, flotator 3 operated with a 108 second contact time and 0.1 mA/mS ratio afforded only 40% abatement (Fig. 7). Efficiency is not therefore determined by the two classical parameters only but also by energy dissipation. The energetic conditions can be quantified by velocity gradient measurements, of classical use in flocculation; this parameter is 3100 s^{-1} in flotator 3 and between 590 and 1670 s^{-1} in flotator 4.

Flotation kinetics are classically considered first-order with respect to the particle concentration (Eqn. 3). In fact there is an analogy between flotation and flocculation which allows one to extend the well-known flocculation kinetics (Eqn. 4) to the flotation process (Eqn. 5). The steadiness of the bubble concentration permits the derivation of Eqn. 6, which enables one to calculate the efficiency of a batch or a plug-flow reactor as a function of the Camp number Gt (Eqn. 9). In fact there is an optimum range of velocity gradients between 3000 and 4000 s^{-1} and an optimum range of Camp number between 105 and 106 (Fig. 9). The difference with the range currently observed in flocculation could be explained by the contact efficiencies in each process and by the probable existence of two ranges of optimal conditions. The model accuracy can be verified and the rate constant calculated (Figs. 8 and 10). This approach should be extended by testing particles exhibiting different degrees of hydrophobicity.

Influence de la dissipation énergétique sur l'efficacité de la flottation à air dissous : analogie avec la floculation

Influence of energy dissipation on the efficiency of air flotation : analogy with flocculation

F. GALLINARI^{1*}, S. ELMALEH¹ et R. BEN AÏM²

Reçu le 12 mars 1996, accepté le 20 juillet 1996*.

SUMMARY

Dissolved air flotation units are generally designed on the basis of two parameters : the m_A/m_S ratio of the air mass to the solid mass in reaction and the contact time between the gas phase and the solid phase. The insufficiency of this approach which neglects the energy dissipation will be demonstrated.

Five units, whose efficiencies were quantified by turbidimetry, were operated with a bentonite suspension previously flocculated with WAC or ferric chloride. Batch flotator 1 was a commercial unit designed to evaluate the flotation feasibility (Fig. 1). Flotator 2 and 3 were aimed to establish the efficiency against m_A/m_S in continuous operation (Fig. 2 and 3). The contact time influence was obtained with batch flotator 4 (Fig. 4). Continuous flotators 3 and 5 were identical rectangular reactors but the latter allowed to inject pressurized water through five different points (Fig. 3).

The turbidity abatement is a growing function of m_A/m_S that reaches a plateau, the curve having a classical sigmoid shape in batch or in continuous operation (Fig. 5). However the important air requirement ($m_A/m_S = 1$) to reach a 70% abatement can hamper the industrial development. The contact time is the space time of the gas phase through a batch cell or the space time of the solid phase through a continuous flotator. Its influence is displayed Figure 6 where a sigmoid curve shows that a 100 seconds contact time is required to reach a significant abatement even with a low m_A/m_S of 0.1. However, flotator 3 operated with a 108 seconds contact time and 0.1 m_A/m_S ratio allows to reach 40% abatement only (Fig. 7). The efficiency is not therefore determined by the two classical parameters only but also by the energy dissipation. If the energetic conditions are quantified by velocity gradient of classical use in flocculation, this parameter is 3100 s^{-1} in flotator 3 and between 590 and 1670 s^{-1} in flotator 4.

1. Génie des Procédés-Traitement des Eaux, Université Montpellier II, CC 24, 34095 Montpellier Cedex 5.

2. Département de Génie Chimique, Université Technologique de Compiègne.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 29 août 1997.

The flotation kinetics is classically considered first-order with respect to the particles (Eqn. 3). In fact there is an analogy between flotation and flocculation which allows to extend the well known flocculation kinetics (Eqn. 4) to the flotation process (Eqn. 5). The steadiness of the bubble concentration allows to derive Eqn. 6 which allows to calculate the efficiency of a batch or a plug flow reactor as a function of the Camp number Gt (Eqn. 9). In fact there is an optimum range of velocity gradient between 3000 and 4000 s^{-1} and an optimum range of Camp number between 10^5 and 10^6 (Fig. 9). The difference with the range currently observed in flocculation could be explained by the contact efficiency in each process and by the probable existence of two ranges of optimal conditions. The model accuracy can be verified and the rate constant calculated (Fig. 8 and 10). This approach should be extended by operating particles of high difference in hydrophobicity.

Key-words : *flotation, flocculation, energy dissipation, kinetics.*

RÉSUMÉ

Les flottateurs à air dissous sont classiquement dimensionnés à partir de deux paramètres : le rapport m_A/m_S des masses d'air et de solides en présence et le temps de contact entre phases. Une série d'essais effectués sur cinq différentes unités continues ou discontinues montre que ces seules variables opératoires ne suffisent pas à déterminer l'efficacité. De plus, l'extrapolation des données obtenues sur un flocculateur discontinu conduirait à des besoins en air dissous considérables pouvant limiter le développement industriel. La dissipation d'énergie, habituellement négligée, peut être quantifiée par le gradient de vitesse tel qu'il a été introduit en théorie de la flocculation. De plus, une analogie entre la capture bulles-particules et le processus de flocculation des particules primaires sur les flocs déjà formés permet d'étendre les équations de vitesse de la flocculation et d'obtenir un modèle cinétique où interviennent seulement le gradient de vitesse et la concentration de particules ; ce modèle remplace avantageusement l'approche classique qui considère la flottation comme un processus du premier ordre par rapport aux particules. L'efficacité d'une cellule continue ou d'un flocculateur piston est alors fonction du seul nombre de Camp. Les résultats montrent l'existence d'un intervalle optimal pour le gradient de vitesse, 3 000 à 4 000 s^{-1} , et pour le nombre de Camp 10^5 à 10^6 . Le modèle devra être amélioré par introduction de la tension critique de mouillage des particules.

Mots clés : *flottation, flocculation, dissipation d'énergie, cinétique.*

NOTATIONS

E	efficacité de clarification	
G	gradient de vitesse	T^{-1}
k	constante de vitesse	
K	constante de vitesse	
K'	constante de vitesse	L^3
K''	constante de vitesse	T^{-1}
N_b	concentration de bulles	L^{-3}
N_p	concentration de particules	L^{-3}
N_{po}	concentration initiale de particules	L^{-3}

p	pression relative	$M L^{-1} T^{-2}$
P	puissance dissipée	$M L^2 T^{-3}$
Q_i	débit d'eau pressurisée	$L^3 T^{-1}$
r	vitesse de flottation	$L^{-3} T^{-1}$
r_p	vitesse de floculation	$L^{-3} T^{-1}$
t	temps chronologique ou de passage	T
v_i	volume injecté	L^3
V	volume	L^3

Lettres grecques

μ	viscosité dynamique	$M L^{-1} T^{-1}$
Φ	fraction de volume occupé par le solide	
τ_i	durée de l'injection	T

INTRODUCTION

La flottation induite par insufflation de fines bulles gazeuses ou détente de liquide préalablement saturé sous pression est une technique de séparation liquide-solide qui n'a pas connu jusqu'ici le même développement que la décantation (BAL et KHIRSAGAR, 1985). Il est vrai que la flottation implique l'utilisation d'air sous pression ce qui induit un coût supplémentaire qu'il convient de minimiser pour rentabiliser le procédé. Or, le dimensionnement des cellules de flottation par détente de liquide saturé sous pression repose classiquement sur deux paramètres, la masse d'air injecté par unité de masse de solide en suspension et le temps de contact entre les particules solide et gazeuse, le choix des conditions énergétiques restant empirique (MHATRE et BHOLE, 1987). Le but de la présente étude est, tout d'abord, de montrer l'insuffisance de l'approche classique puis de développer un modèle cinétique reposant sur l'analogie entre la capture des particules par les bulles et le phénomène de floculation qui tient compte des conditions hydrodynamiques dans la zone de contact.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cinq cellules distinctes ont été utilisées pour mettre en évidence l'influence des différents paramètres.

— La faisabilité de l'opération est d'abord vérifiée dans la cellule 1 dite Flotta-test. Il s'agit d'une unité compacte fonctionnant en discontinu de manière analogue au jar-test utilisé en floculation. Elle comprend trois récipients cylindro-coniques gradués dans lesquels la suspension est introduite (*fig. 1*). La partie inférieure de ces récipients est reliée à une bouteille d'eau saturée d'air sous une pression contrôlée. L'ouverture des électrovannes permet l'introduction d'un

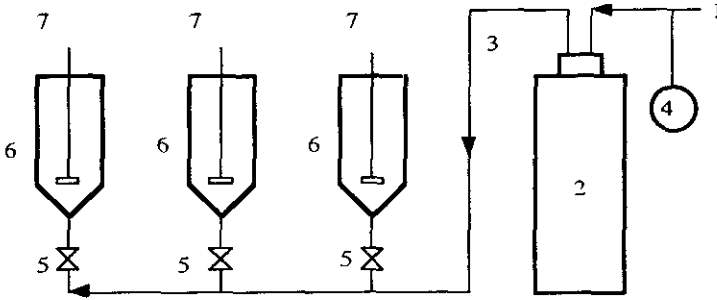


Figure 1

Unité discontinue 1.

1 : air comprimé. 2 : réservoir d'eau pressurisée. 3 : alimentation en eau pressurisée. 4 : manomètre. 5 : électrovannes. 6 : flottateurs. 7 : agitateurs.

Batch unit 1.

1 : compressed air. 2 : pressurized water tank. 3 : pressurized water inlet. 4 : manometer. 5 : electrovalves. 6 : stirrers.

volume d'eau saturé en air qui se détend sous forme de micro-bulles. Le nuage de micro-bulles traverse la suspension provoquant l'apparition en surface d'une couche constituée d'agrégats bulles-particules. Lorsque la totalité des agrégats susceptibles de flotter a atteint cette couche, on échantillonne le liquide clarifié par le bas des récipients. Le temps de contact bulles-particules varie entre 36 et 60 secondes selon le volume de suspension testé.

– *L'influence de la masse d'air injecté par unité de masse de solide en suspension (rapport m_A/m_S) sur l'efficacité de la flottation est étudiée en continu sur les cellules 2 et 3. La cellule 2 est rectangulaire, de même hauteur (0,2 m) que le Flotta-test, et fonctionne avec un temps de contact de 40 secondes. Elle est alimentée par des suspensions floculées dans un floculateur hélicoïdal (ELMALEH et JABBOURI, 1991) (fig. 2). La cellule 3 est analogue à la précédente avec une hauteur de 0,5 m (fig. 3). Le mélange bulles-particules réalisé dans la zone du point d'injection part directement vers la surface du liquide où se constitue une couche de boue qui doit être périodiquement éliminée.*

– *Le temps de contact « bulles-particules » peut être varié avec la cellule 4, cylindro-conique, et qui fonctionne en discontinu selon un mode opératoire identique à celui du Flotta-test. Sa hauteur totale est de 1 mètre, la hauteur variable de la lame d'eau permettant d'ajuster le temps de contact (fig. 3).*

– *Les conditions énergétiques de la mise en contact des phases solide et gazeuse sont étudiées avec la cellule 5. Celle-ci est identique à la cellule 3 à l'exception de l'injection d'eau pressurisée qui peut être effectuée à différents niveaux dans le canal vertical d'entrée, la variation du volume de la zone de mélange bulles-particules modifiant les conditions énergétiques de la mise en contact (fig. 4).*

Les différents essais sont effectués sur une suspension à $0,2 \text{ kg/m}^3$ de bentonite préalablement floculée à l'aide de WAC à raison de $0,2 \text{ kg/kg}$ de bentonite (essais sur cellules 1 à 4) ou de chlorure ferrique à la dose de $0,4 \text{ kg/kg}$ (essais sur cellule 5). Les tailles de floc sont comparables pour les deux réactifs avec une moyenne à $500 \mu\text{m}$ obtenue par analyse d'images (GALLINARI, 1992).

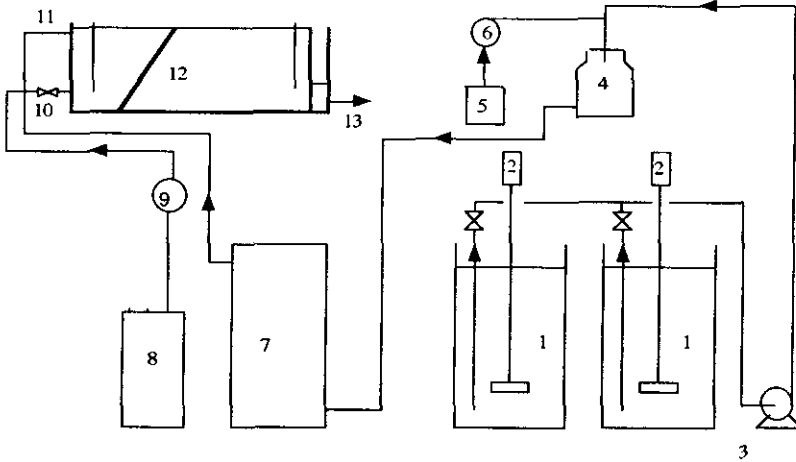


Figure 2

Unité continue 2

1 : suspension de bentonite. 2 : agitateurs. 3 : pompe d'alimentation. 4 : mélange. 5 : floculant. 6 : micropompe. 7 : flocculateur hélicoïdal. 8 : eau pressurisée. 9 : débitmètre. 10 : entrée d'eau pressurisée. 11 : entrée de suspension floculée. 12 : flottateur. 13 : sortie d'eau clarifiée.

Continuous unit 2

1 : bentonite suspension tank. 2 : stirrers. 3 : feed pump. 4 : mixing tank. 5 : flocculant tank. 6 : micropump. 7 : coiled flocculator. 8 : pressurized water saturator. 9 : flowmeter. 10 : pressurized water inlet. 11 : flocculated suspension inlet. 12 : flotator. 13 : clarified water outlet.

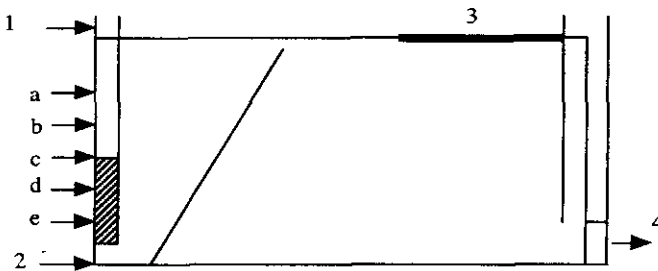


Figure 3

Cellules continues 3 et 5.

1 : entrée de la suspension. 2 : entrée de l'eau pressurisée. 3 : boues flottées. 4 : eau clarifiée. a, b, c, d et e : points d'injection d'eau pressurisée (cellule 5).

Continuous flotators 3 and 5.

1 : suspension inlet. 2 : pressurized water. 3 : floated sludge. 4 : clarified water. a, b, c, d and e : pressurized water injection (flotator 5).

La concentration en solides dans la suspension initiale puis dans la suspension obtenue dans la partie basse des unités est bien corrélée avec la turbidité mesurée avec un appareil HACH. L'efficacité de la flottation est alors définie par $E = 1 - N_p/N_{p0}$ où N_{p0} et N_p sont respectivement les nombres de particules contenues par unité de volume dans la suspension initiale et dans l'eau traitée ; le rapport N_p/N_{p0} est égal au rapport des turbidités correspondantes.

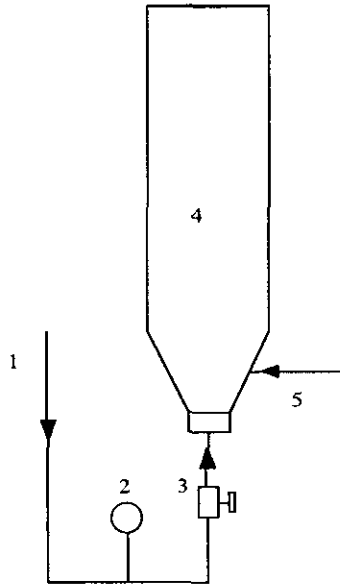


Figure 4 Cellule de flottation discontinue 4.
1 : eau pressurisée. 3 : vanne de détente. 4 : flottateur. 5 : entrée de la suspension floculée.

Batch flotator 4.

1 : pressurized water. 3 : discharge valve. 4 : flotator. 5 : flocculated suspension inlet.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'efficacité de flottation est une fonction croissante du rapport m_A/m_S aussi bien pour les données obtenues sur le Flotta-test que sur la cellule continue 2 (fig. 5). Ce résultat est classique et la forme sigmoïde de la courbe a déjà été observée par plusieurs auteurs (JAMESON *et al.*, 1977 ; MHATRE et Bhole, 1987). Il faut, cependant, remarquer que la séparation est relativement faible en regard de la quantité d'air injecté : pour 1 kg d'air/kg de solide, l'efficacité du Flotta-test atteint à peine 70 %. Cet appareil étant proposé pour établir les bases du dimensionnement d'une unité industrielle, on pourrait dès lors craindre un coût de fonctionnement excessif.

Le second paramètre habituellement utilisé en dimensionnement est le temps de contact moyen bulles-particules (JAMESON *et al.*, 1977). En fait, il s'agit du temps de séjour moyen des bulles dans un flottateur discontinu ou du temps de séjour moyen des particules dans une cellule continue. En discontinu, le nuage de bulles subit un écoulement piston et son temps de passage se confond avec le temps de contact ; dans une cellule continue rectangulaire, la phase solide est en ségrégation totale et le temps de contact est égal au temps de passage des particules. En faisant varier la hauteur de la lame liquide, la cellule 4 permet de faire varier ce paramètre en maintenant constant le rapport m_A/m_S . La courbe d'effica-

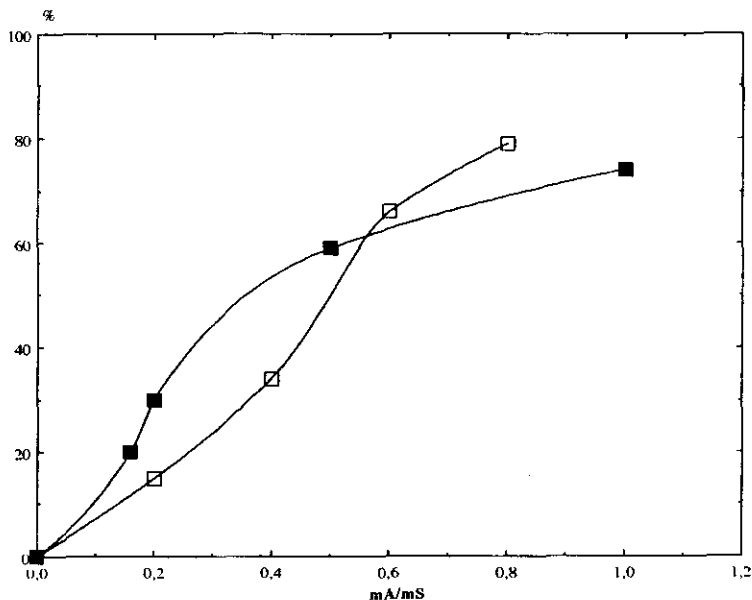


Figure 5 Efficacité de la flottation en fonction de mA/mS.
 ■ Flottateur discontinu 1 □ Flottateur continu 2
Flotation efficiency against mA/mS ratio.
 ■ Batch flotator 1 □ Continuous flotator 2

cité présente encore une allure sigmoïde (fig. 6) ; elle montre que pour un temps de contact inférieur à 40 secondes, l'efficacité de séparation est très faible et croît peu avec le temps de contact. Cette observation est sans doute liée à la possibilité des bulles de s'accrocher autour d'une particule. Un nombre critique minimal de bulles accrochées est nécessaire pour assurer la flottation d'une particule. Ce nombre minimal de bulles varie ici entre 10 et 20 (KITCHENER et GOCHIN, 1981 ; GALLINARI, 1992). Par contre, l'efficacité augmente rapidement lorsque le temps de contact est compris entre 40 et 90 secondes, passant de 5 à 80 %. Au delà, l'efficacité se stabilise. Ces essais montrent qu'une efficacité importante peut être obtenue avec une valeur du rapport $m_A/m_S = 0,1$ plus compatible avec un fonctionnement industriel que les données extrapolées du Flotta-test.

Avec une hauteur de 0,5 m, la cellule 3 maintient un temps de contact de 108 secondes, valeur qui permet d'obtenir une efficacité de l'ordre de 80 % sur la cellule 4 pour un rapport m_A/m_S de 0,1. Or la courbe d'efficacité obtenue sur la cellule 3 montre que pour cette même valeur de m_A/m_S , la séparation est à peine de l'ordre de 40 % (fig. 7). Le seul choix de valeurs convenables du rapport m_A/m_S et du temps de contact ne suffisent donc pas pour obtenir une flottation satisfaisante ni, *a fortiori*, pour déterminer l'efficacité. Or, les cellules 3 et 4 diffèrent par les conditions énergétiques mises en œuvre, conditions qui vont maintenant être quantifiées.

Le processus d'agglomération bulles-particules est analogue au processus de floculation qui implique l'agglomération de particules primaires sur des floccs en formation. En flottation, les bulles jouent le même rôle que les particules primai-

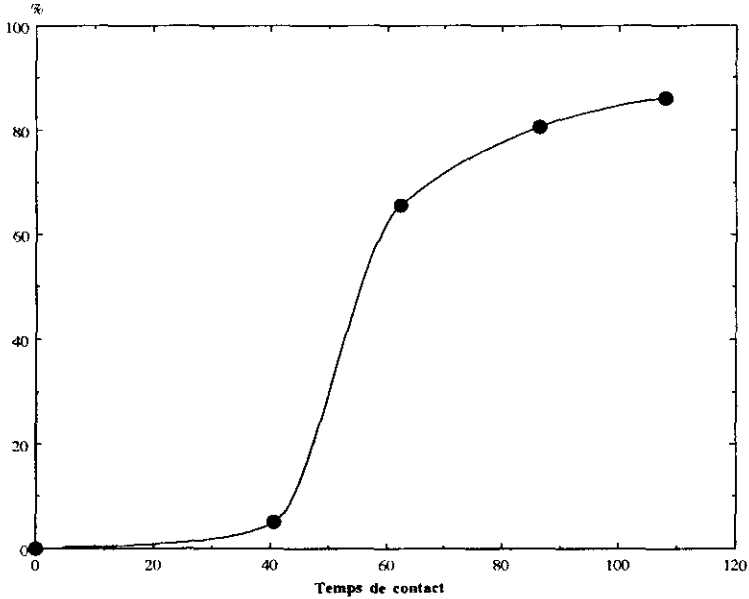


Figure 6 Efficacité de la flottation en fonction du temps de contact bulles-particules (cellule A, $m_A/m_S = 0,1$).

Flotation efficiency against bubble-particle contact time (flotator 4, $m_A/m_S = 0,1$).

res en floculation alors que les particules à flotter se comportent comme des floes en grossissement. En floculation, la dissipation d'énergie est classiquement quantifiée à l'aide du gradient de vitesse G tel qu'il a été introduit par généralisation de la relation donnant la densité de puissance dégradée entre deux feuilles en écoulement laminaire (CAMP et STEIN, 1943) :

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

où P est la puissance dissipée, V le volume dans lequel se produit la dissipation et μ la viscosité dynamique de la phase liquide.

A travers une unité de floculation, par exemple, une cuve agitée, la puissance dissipée localement varie considérablement d'un point à un autre ce qui rend incorrects l'utilisation de l'équation (1) et, en toute rigueur, le terme même de gradient de vitesse, cependant consacré par la littérature. CLEASBY (1984) a montré que la grandeur G ainsi introduite est toutefois utilisable pour la floculation de particules de taille inférieure à la microéchelle de turbulence de Kolmogoroff. Or, la taille moyenne des bulles étant de $50 \mu\text{m}$, soit l'ordre de grandeur de particules primaires à floculer, l'utilisation du gradient de vitesse en flottation à air dissous serait aussi justifiée. La puissance dissipée est alors calculée, en cellule discontinue, par :

$$P = \frac{\rho v_i}{\tau_i}$$

ou, en cellule continue par :

$$P = \rho Q_i \tag{2}$$

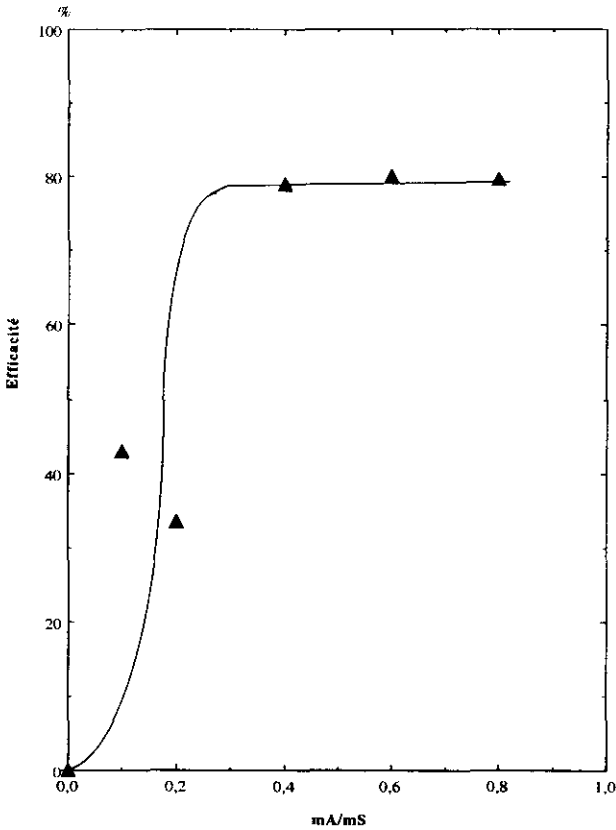


Figure 7 Efficacité de la flottation en fonction du rapport m_A/m_S (cellule 3).
Flotation efficiency against m_A/m_S ratio through flotator 3.

où v_i est le volume injecté, p la pression relative de l'eau pressurisée, τ_i la durée de l'injection et Q_i le débit d'eau pressurisée.

Il est maintenant possible de comparer les conditions énergétiques des cellules 3 et 4. Au cours des différents essais, le gradient de vitesse dans la cellule 4 est maintenu à $3\,100\text{ s}^{-1}$ alors que dans la cellule 3, il varie entre 590 et $1\,670\text{ s}^{-1}$, ce qui représente une différence significative. Or, jusqu'à présent, l'influence des conditions énergétiques n'a jamais été explicitement intégrée au dimensionnement des flottateurs.

En effet, la cinétique de flottation est généralement considérée comme résultant d'un processus du premier ordre par rapport aux particules (SUTHERLAND, 1948) :

$$r = -K'' N_p \quad (3)$$

où r est la vitesse volumique de séparation des particules, c'est-à-dire le nombre de particules éliminées par unité de volume et par unité de temps, et K'' une constante de vitesse.

Cette équation ne tient pas explicitement compte des conditions de dissipation d'énergie. En outre, la vitesse de floculation orthocinétique est souvent quantifiée par l'équation de CAMP (1955) :

$$r_p = -k G \Phi N_p \quad (4)$$

où r_p est la vitesse de disparition des particules primaires, Φ la fraction de volume occupé par la phase solide et k une constante de vitesse.

La cinétique de flottation pourra donc mieux s'exprimer par analogie avec l'équation (4) :

$$r = -K' G N_b N_p \quad (5)$$

où N_b est le nombre de bulles par unité de volume et K' une constante de vitesse.

En première approximation, la concentration des bulles peut être considérée comme constante. En effet, la production de bulles par détente d'eau saturée permet d'atteindre une taille de bulle stable qui dépend de la pression de saturation (GALLINARI, 1992) et, dans la plupart des conditions opératoires, la concentration des bulles est 100 à 1 000 fois plus grande que celle des particules alors que l'efficacité du contact bulles-particules est faible, les particules étant généralement hydrophiles (KITCHENER et GOCHIN, 1981). La vitesse ascensionnelle des agrégats montre que le nombre de bulles fixées sur une particule isolée n'excède pas 20 (KITCHENER et GOCHIN, 1981). La vitesse de flottation peut finalement s'exprimer plus simplement par :

$$r = -K G N_p \quad (6)$$

avec :

$$K = K' N_b \quad (7)$$

Dans les conditions hydrodynamiques représentatives des essais en cellule discontinue ou en cellule continue rectangulaire où l'écoulement de la phase solide est de type piston, la relation (6) permet de calculer :

$$\frac{N_p}{N_{p0}} = \exp(-KGt) \quad (8)$$

où N_{p0} est le nombre initial de particules par unité de volume et t , le temps de passage à travers le flottateur piston ou le temps chronologique en cellule discontinue.

Le nombre adimensionnel Gt qui, en floculation, porte le nom de critère de CAMP, apparaît ici explicitement. Si le gradient de vitesse est lié à la puissance dissipée, le nombre Gt résulte de l'énergie mise en jeu. L'efficacité de clarification est alors donnée par :

$$E = 1 - \exp(-KGt) \quad (9)$$

Cette dernière relation permet de prévoir une variation linéaire entre $\ln(1 - E)$ et Gt :

$$\ln(1 - E) = -KGt \quad (10)$$

Dans la cellule 4, le gradient de vitesse est maintenu à $3\,100\text{ s}^{-1}$ alors que le temps de contact est variable. Les données expérimentales alignées sur le plan ($t, \ln(1 - E)$) confirment la validité du modèle proposé malgré le faible nombre de points (fig. 8) ; il est, en effet, difficile de faire varier le temps de contact sur un plus large intervalle. Cependant, cette conclusion est validée sur un grand nom-

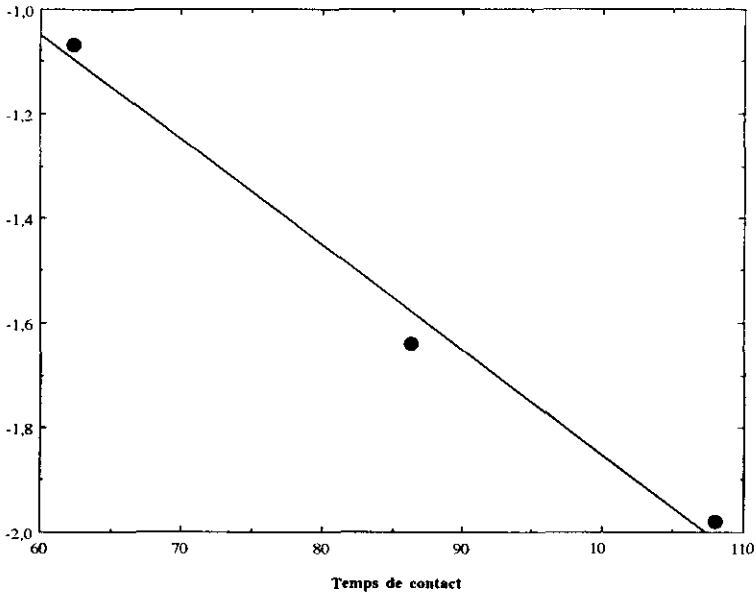


Figure 8 Vérification du modèle à temps de contact variable et G constant (cellule 4).
Model validity with variable contact time and constant G (flotator 4).

bre d'essais reproductibles (GALLINARI, 1992). Par ailleurs, la cellule 5 permet de mesurer des efficacités à temps de contact constant 360 secondes et une valeur de 0,1 pour le rapport m_A/m_S alors que le gradient de vitesse est variable ; le nombre de points expérimentaux est encore relativement faible par suite de la difficulté à faire varier le gradient de vitesse par la simple position du point d'injection ; cependant, ces données ont été reproduites à plusieurs reprises et comparées à des observations sur unité industrielle (GALLINARI, 1992). L'efficacité est maximale et vaut 86 % pour un gradient de vitesse de l'ordre de $3\,500\text{ s}^{-1}$, soit une valeur 100 fois plus grande que la valeur optimale en floculation généralement comprise entre 30 et 50 s^{-1} (ELMALEH et JABBOURI, 1991) (fig. 9). Cet écart pourrait s'expliquer par deux facteurs. En premier lieu, la différence de densité entre les bulles d'air et les particules affecte probablement la qualité des contacts dans les deux processus. De plus, les gradients de vitesse engendrés par détente d'air sont nécessairement élevés ; il n'est pas impossible qu'il existe un autre optimum à plus faible valeur du gradient mais techniquement irréalisable en flottation à air dissous. Une étude analogue sur l'influence de la dissipation d'énergie mécanique en électroflottation fait apparaître deux valeurs optimales, l'une à énergie mécanique transférée nulle, l'autre à une valeur voisine de celle observée ici (JOMNI, 1996).

La diminution de l'efficacité au-delà de $4\,000\text{ s}^{-1}$ illustre les limites de l'équation (9) : en flottation comme en floculation, l'efficacité n'est pas une fonction monotone croissante du gradient de vitesse ni du nombre Gt ; il existe simplement un intervalle de valeurs optimales. Tous les essais effectués avec un gradient de vitesse excédant $4\,000\text{ s}^{-1}$ montrent une décroissance de l'efficacité (GALLINARI, 1992). Pour étendre le modèle aux fortes valeurs du gradient de

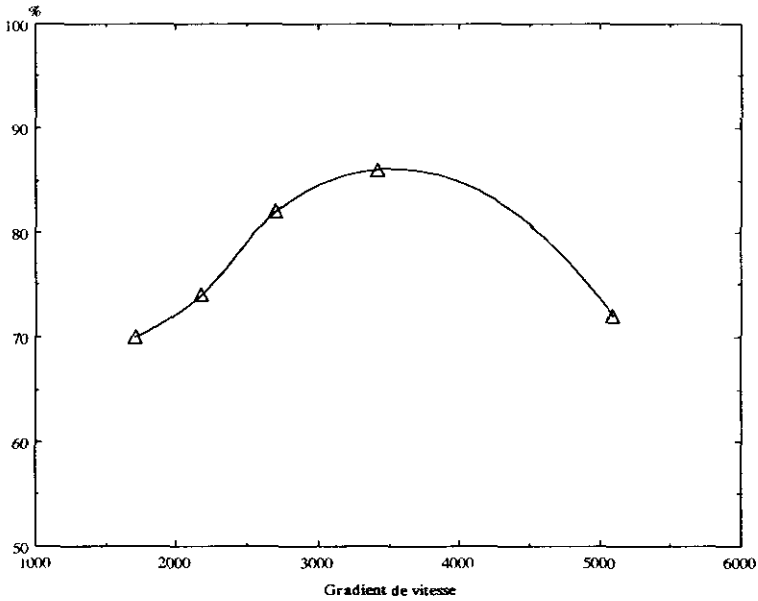


Figure 9 Efficacité en fonction du gradient de vitesse (cellule 5).
Efficiency against velocity gradient (flotator 5).

vitesse, il faudrait, comme en floculation, introduire une cinétique de destruction de l'agrégat bulles-particules.

Si le traitement se limite à la partie croissante de la courbe d'efficacité en fonction de G , les variations de $\ln(1 - E)$ en fonction de G sont encore linéaires confirmant la validité du modèle cinétique dans l'intervalle retenu (fig. 10). Les deux courbes $\ln(1 - E)$ en fonction du temps puis de G permettent de calculer la constante K . Les deux séries d'essais n'ont pas été effectuées avec le même flocculant ; néanmoins, l'ordre de grandeur des deux valeurs est le même : $6,5 \cdot 10^{-6}$ en cellule 4 et $1,3 \cdot 10^{-6}$ en cellule 5. Les faibles valeurs de K résultent de la faible efficacité du contact bulle-particule due à l'hydrophilie des particules. La constante de vitesse doit dépendre de la tension critique de mouillage ; cependant, l'utilisation d'un flocculant permet de diminuer l'hydrophilie par rapport à l'aérophilie ce qui explique l'ordre de grandeur comparable obtenu pour les deux réactifs.

L'équation (9) permet de déterminer l'intervalle de valeurs optimales du nombre Gt qui s'étend de 10^5 à 10^6 , soit des valeurs 10 fois plus grandes que pour la floculation, ce qui signifie, en tenant compte des valeurs optimales du gradient de vitesse dans chacun des cas, que le temps de contact nécessaire en flottation est 10 fois plus petit qu'en floculation. Les différences dans les conditions énergétiques à assurer s'expliquent encore par les qualités des contacts et, peut-être, par l'existence d'un double optimum (JOMNI, 1996).

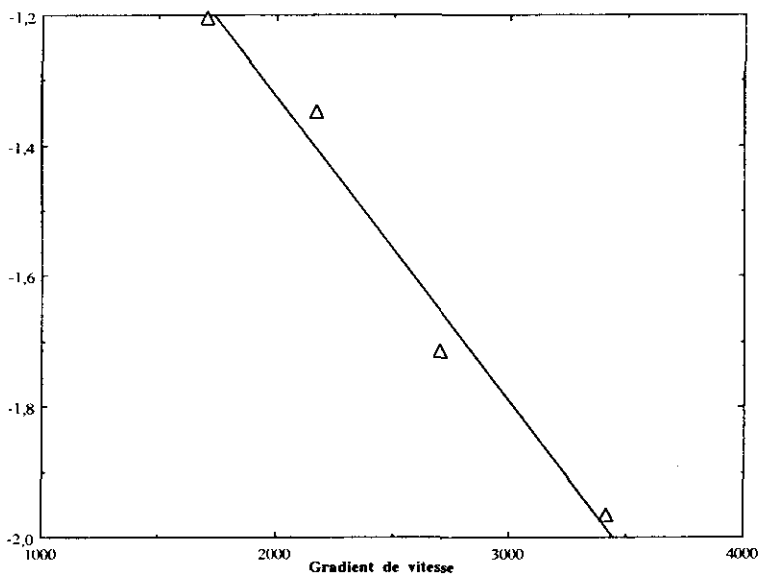


Figure 10 Vérification du modèle à gradient de vitesse variable et temps de contact constant (cellule 5).

Model accuracy with variable velocity gradient and steady contact time (flotator 5).

CONCLUSIONS

L'efficacité de la floculation ne dépend pas seulement du rapport m_A/m_S et du temps de contact bulles-particules mais aussi des conditions de dissipation d'énergie. L'énergie dégradée peut être quantifiée par le gradient de vitesse tel qu'il a été introduit dans la théorie de la floculation. En poursuivant l'analogie, on propose une cinétique de flottation du premier ordre par rapport aux particules faisant apparaître explicitement le gradient de vitesse ; cette équation de vitesse permet de calculer l'efficacité dans une cellule fermée ou continue en fonction exponentielle du nombre de Camp.

Les conditions optimales de flottation à l'air dissous correspondent à un gradient de vitesse compris entre 3 000 et 4 000 s^{-1} et un nombre de Camp entre 10^5 et 10^6 . Ces valeurs sont sensiblement différentes des valeurs optimales en floculation ; l'écart s'explique par une différence dans la qualité des contacts et, peut-être, par l'existence de deux valeurs optimales du gradient de vitesse, la plus faible ne pouvant être obtenue par détente d'eau saturée sous pression.

Ce travail devra se poursuivre en utilisant des particules à caractère hydrophile ou hydrophobe très différents afin d'introduire explicitement la tension critique de mouillage.

REMERCIEMENTS

Les unités expérimentales ont été réalisées par H. Barral envers qui les auteurs sont très reconnaissants.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAL A.S., KHIRSAGAR, 1985. Dissolved air flotation technique for water and waste treatment. *Chem. Age India*, 36, 219-225.
- MHATRE S.M., BHOLE A.G., 1987. Clarification of water by dissolved air flotation and direct air flotation. *Indian J. Env. Hlth.*, 29, 185-194.
- ELMALEH S., JABBOURI A., 1991. Flocculation energy requirement. *Wat. Res.*, 25, 939-943.
- JAMESON G.J., NAM S., YOUNG M.M. 1977. Physical factors affecting recovery rates in flotation. *Miner. Sci. Eng.*, 3, 103-114.
- JOMNI S., 1996. Influence de la dissipation d'énergie mécanique sur le processus de capture bulles-particule en électroflotation. Rapport de Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Montpellier II.
- KITCHENER J.A., GOCHIN R.I., 1981. The mechanism of dissolved air flotation for potable water : basic analysis and a proposal. *Wat. Res.*, 15, 585-593.
- GALLINARI F.P., 1992. Etude Comparative de la Décantation et de la Flottation à l'Air dissous : Application au Traitement des Eaux. Thèse de Docteur d'Etat, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumedienne, Alger.
- CAMP T.R., STEIN P.C., 1943. Velocity gradient and internal work in fluid motion. *J. Boston Soc. Civ. Eng.*, 219, 526-540.
- CLEASBY J.L., 1984. Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter? *J. Environ. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 110, 875-884.
- SUTHERLAND K.L., 1948. Physical chemistry of flotation ; kinetics of the flotation process. *J. Phys. Chem.*, 52, 394-422.
- CAMP T.R., 1955. Flocculation and flocculation basins. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 110, 875-884.