

Sommaire

L'Oloïde, outil de brassage et d'aération – Préambule	Page 3
Première Partie : L'Oloïde : Présentation	
<i>I] La forme oloïde</i>	
I.1 Historique	Page 4
I.2 L'Oloïde, une sculpture mathématique	Page 4
I.2.1 Les propriétés mathématiques de l'Oloïde	Page 4
I.2.2 Modélisation de la forme Oloïde par informatique	Page 5
<i>II] Les applications de la forme oloïde</i>	
II.1 Historique	Page 5
II.2 Le mouvement de l'Oloïde	Page 6
II.3 Les différentes utilisations de l'Oloïde	Page 6
II.4 Les différentes applications de l'Oloïde	Page 6
II.4.1 Les traitements des eaux d'infiltration d'installations de compostage et de décharges	Page 7
II.4.2 L'assainissement de lacs ou d'étangs	Page 7
II.4.3 Technologie Oloïde et lagunage	Page 8
II.4.4 Technologie et aquaristique	Page 8
II.4.5 Traitement du lisier	Page 9
II.4.6 Utilisation de la technologie Oloïde dans le milieu industriel	Page 9
II.4.7 Développements futurs	Page 9
Seconde Partie : Optimisation d'un système d'aération par fines bulles grâce à la technologie Oloïde	
<i>I] Introduction – Problématique</i>	
	Page 10
<i>II] Modèle théorique</i>	
II.1 Cadre de l'étude et hypothèses	Page 10
II.1.1 Cadre de l'étude	Page 10
II.1.2 Hypothèses	Page 10
II.1.3 Forces s'exerçant sur la bulle	Page 11
II.1.4 Modification de la trajectoire	Page 11
II.2 Premier Cas	
II.2.1 Application du Principe Fondamental de la Dynamique	Page 12
II.2.2 Durée de vie de la bulle	Page 13
II.3 Deuxième Cas	
II.3.1 Application du Principe Fondamental de la Dynamique	Page 13
II.3.2 Durée de vie de la bulle	Page 13
II.4 Conclusions sur le modèle théorique	Page 14
<i>III] Confrontation du modèle théorique à l'expérimentation</i>	
III.1 Cadre de l'expérience	Page 14
III.1.1 Matériel utilisé	Page 14
III.1.2 Valeurs des différentes constantes	Page 14
III.1.3 Premières remarques qualitatives	Page 15
III.2 Mesure de l'angle θ	Page 15
III.2.1 Mesure de l'angle θ	Page 15
III.2.2 Remarques	Page 16
III.3 Mesure du rayon r	Page 16
III.4 Mesure de la durée de vie des bulles	Page 17
III.4.1 Méthode de mesure	Page 17
III.4.2 Mesure de la durée de vie des bulles en l'absence de l'Oloïde	Page 18
III.4.3 Mesure de la durée de vie des bulles lorsque l'Oloïde est en marche	Page 18
III.5 Validation des mesures à l'aide d'une sonde de vitesse	Page 18
III.6 Conclusions	Page 19

III.6.1 Conclusions quant au modèle à choisir	Page 19
III.6.2 Conclusions quant à l'hypothèse de l'établissement immédiat du régime permanent	Page 19
III.6.3 Conclusions quant aux autres hypothèses	Page 19
III.6.4 Conclusions quant à l'action de l'Oloïde	Page 20
Troisième Partie : Conclusions	Page 21
Annexes	Pages 23 à 36
Divers	Pages 37 et 38

L'Oloïde

Outil de brassage et d'aération

Préambule

L'eau est un bien précieux. Si les dernières décennies ont été marquées par des conflits visant des intérêts énergétiques (pétrole, en particulier), nombreux sont les économistes qui prévoient pour l'avenir des conflits ayant pour but le contrôle de l'eau. La gestion de l'eau est devenue, au cours des dix dernières années un réel enjeu : l'eau devient de plus en plus rare et dans le même temps est de plus en plus polluée.

Cette tendance s'applique également aux plans d'eau (naturels ou non) qui sont de plus en plus nombreux à être eutrophiés. L'envasement du marais poitevin menace aujourd'hui, non seulement une faune et une flore exceptionnelles mais également toute l'industrie touristique d'une région. Les solutions généralement proposées pour résoudre ces problèmes d'eutrophie consistent en des installations distribuant de l'oxygène par l'intermédiaire de conduites forcées ou de turbines. Mais ces systèmes sont de gros consommateurs d'énergie, demandent une maintenance régulière et sont souvent bruyants, ce qui ne facilite pas leur installation dans un milieu sauvage.

Depuis quelques années, un appareil remplissant les fonctions de brassage et d'aération a été mis au point par une société suisse : l'Oloïde. Sa simplicité de fonctionnement, sa fiabilité, sa faible consommation énergétique en font un outil hors du commun. Nous verrons ici comment la technologie Oloïde peut être combinée à des systèmes d'aération classiques (comme un aérateur à fines bulles) et les avantages que l'on peut tirer de cette association. Nous nous attacherons tout d'abord à présenter l'Oloïde et ses différentes applications, puis nous proposerons un protocole expérimental permettant de souligner les avantages de l'utilisation combinée d'un Oloïde et d'un aérateur à fines bulles.

Première Partie

L'Oloïde : présentation

I] La forme oloïde :

I.1 Historique :



Paul Schatz

L'oloïde est une invention du mathématicien et artiste suisse Paul SCHATZ (1898 -1979) datant de 1933. Cette découverte s'inscrit dans le cadre des recherches menées par ce mathématicien sur la cinématique d'inversion au cours des années 1930. L'oloïde n'est pas la seule découverte que l'on doive à Paul SCHATZ ; celui-ci a en effet travaillé sur d'autres sujets et a mis au point d'autres machines (on peut en particulier citer les mélangeurs INVERSINA (voir DOCUMENT 01), très utilisés dans le domaine médical et vendus à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires dans le monde).

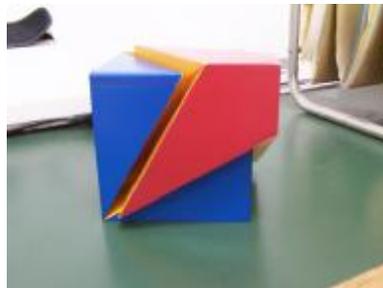


Document 01 : Mélangeur de type Inversina

I.2 L'oloïde, une sculpture mathématique :

I.2.1 Les propriétés mathématiques de l'Oloïde :

La forme oloïde a été élaborée par Paul Schatz à partir de ses recherches sur le cube inversible : il s'agit d'un cube auquel on «enlève» une partie (DOCUMENT 02). On peut, à partir de ce cube inversible, décrire une "section" d'Oloïde (voir la série de photos de l'annexe 01).



Document 01 : Le cube inversible (voir également l'annexe 01)

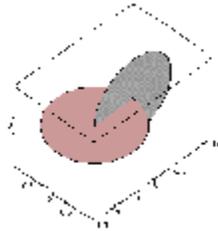
L'oloïde possède de nombreuses propriétés mathématiques (en particulier plusieurs axes de symétrie et une structure pouvant être construite à partir de rotations successives) ; mais la propriété la plus singulière est vraisemblablement celle-ci : l'Oloïde est l'une des rares constructions géométriques qui, lorsqu'elles "roulent" sur un plan, puisse avoir la totalité de sa surface en contact avec ce plan (voir la série de photos

de l'annexe 02). Cette propriété garantit à l'Oloïde une grande efficacité dans le domaine du brassage : il offre, à volume égal, une plus grande surface assurant le brassage.

I.2.2 Modélisation de la forme oloïde par informatique :

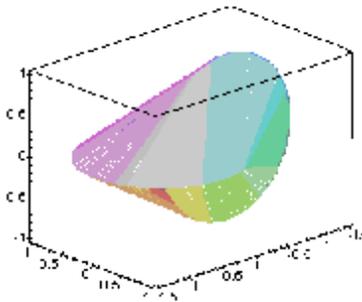
Il est possible de «construire» l'oloïde, pas à pas, de façon mathématique. Je propose ici une modélisation de la forme Oloïde par le programme de calcul formel Maple. La modélisation réalisée a été largement inspirée d'un article intitulé «The Development of the Oloïde», dont Hans Dirnbock et Hellmuth Stachel, professeurs de mathématiques autrichiens sont les auteurs. Cet article a été publié en 1999 dans la revue « Journal for Geometry and Graphics ».

Prenons au départ deux cercles de rayon unité dans deux plans perpendiculaires de façon à ce que chaque cercle contienne le centre de l'autre cercle. On obtient ainsi la «charpente» de l'oloïde (*DOCUMENT 03*).



Document 03

A partir de ces deux cercles, nous allons construire le reste de l'Oloïde : le but est de joindre par une infinité de segments les bords de ces deux cercles. Pour cela, on crée une fonction correspondant à l'un de ces segments puis une liste de segments correspondant aux segments couvrant le quart de la surface de l'Oloïde. On obtient finalement la forme oloïde en effectuant trois rotations de cette liste de segments (*DOCUMENT 04*). Bien entendu, plus le nombre de segments est élevé dans la liste, mieux l'objet final est modélisé.



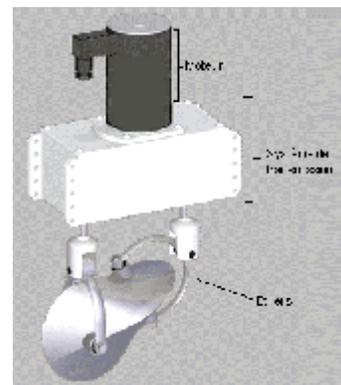
Document 04

L'ensemble de cette modélisation est retranscrite (en langage Maple) en annexe 03.

II] Les applications de la forme oloïde :

II.1 Historique :

C'est en 1974 que Paul SCHATZ fonde la société OLOID AG. Au départ, son idée était d'utiliser l'Oloïde comme une hélice pour les bateaux, mais il est très vite apparu que l'Oloïde était plus adapté au brassage, à l'agitation et à l'aération de divers fluides. OLOID AG a donc développé, dans ce but un système mécanique permettant de mettre en mouvement l'Oloïde. A un moteur électrique est relié un système de transmission permettant de transformer la rotation uniforme de l'axe du moteur en une rotation non uniforme (ponctuée d'accélération et de décélérations) au niveau de deux axes à la sortie



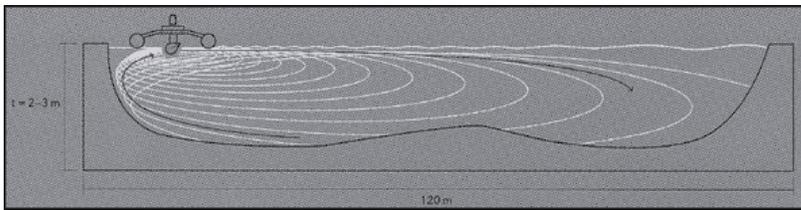
du mécanisme. A ces axes sont fixés des étriers auxquels l'Oloïde est lui-même fixé. Depuis les débuts d'OLOID AG, treize systèmes différents de transmission ont été testés (par chaînes, courroies, engrenages ...). Le système Oloïde a depuis fait ses preuves dans le domaine du brassage et de l'aération : il est utilisé dans de nombreux domaines d'application.

L'Oloïde se décline à présent en plusieurs versions : un Oloïde Type 200 (pour 200mm), un Oloïde Type 400 (pour 400mm), un Oloïde Type 600 (pour 600mm) de surface et un Oloïde Type 600 agitateur de fonds.

II.2 Le mouvement de l'Oloïde :

Le système présenté ci-dessus permet à l'Oloïde de décrire une trajectoire tout à fait singulière : le mouvement est une suite d'accélération et de décélérations, permettant à la forme oloïde de transmettre des "impulsions" au fluide brassé. (L'annexe 04 est une suite de photographies présentant ce mouvement). Lors de ce mouvement, la forme oloïde se comporte, à chacune de ses extrémités, comme une pagaie : le mouvement est accéléré à chaque fois que l'une de ses extrémités se trouve placée perpendiculairement à la surface du fluide brassé (c'est le cas des photographies 2,3 et 4 de l'annexe 04). Cette extrémité subit ensuite une décélération tandis que l'extrémité opposée, se trouvant placée perpendiculairement à la surface, subit une accélération et ainsi de suite.

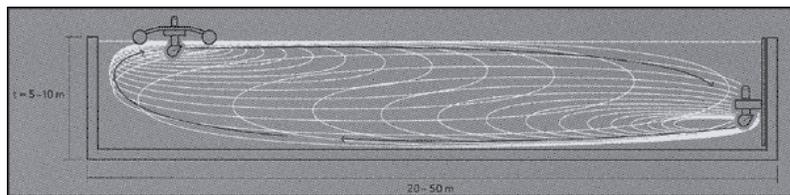
II.3 Les différentes utilisations de l'Oloïde :



Suivant l'usage que souhaite en faire l'utilisateur, l'Oloïde peut se régler de deux manières différentes : la première consiste à n'immerger qu'un tiers à une moitié du corps de l'Oloïde. Dans ce cas, le mouvement de

l'Oloïde est imprimé à la surface du fluide brassé et crée des ondulations qui augmentent la surface de contact avec l'air, augmentant du même coup le transfert d'oxygène. Dans le même temps, les impulsions de l'Oloïde remontent en douceur les couches profondes du fluide vers la surface. Cette technique permet donc d'empêcher le dépôt des matières les plus lourdes dans les couches profondes du fluide.

La seconde technique consiste à immerger totalement le corps de l'Oloïde. Cette technique permet de créer des courants qui se déplacent à travers tout le volume du liquide. Ceci permet en particulier d'homogénéiser la



totalité du volume brassé. Les impulsions évitent, là aussi, le dépôt de matières solides en suspension

A noter qu'il existe une troisième manière d'utiliser l'Oloïde. Celle-ci consiste à immerger complètement l'Oloïde (moteur compris) dans le fluide (on parle alors d'agitateur de fond). Combiné à un système d'aération par fines bulles, cette technique permet d'allonger la durée de séjour des bulles dans le fluide et permet ainsi d'optimiser une installation déjà existante tout en diminuant les coûts d'exploitation (un système d'aération à fines bulles est un gros consommateur d'énergie).

II.4 Les différentes applications de l'Oloïde :

Comme on peut l'imaginer, les applications de l'Oloïde sont multiples et touchent de nombreux domaines d'activité.

II.4.1 Le traitement des eaux d'infiltration d'installations de compostage et de décharges :

Les installations de compostage et les décharges présentent la particularité suivante : leurs eaux d'infiltration ou de ruissellement ne peuvent directement retourner dans la nappe phréatique en raison de leur charge élevée en DBO (Demande Biologique en Oxygène), DCO (Demande Chimique en Oxygène) et de la présence de métaux lourds. Ces eaux d'infiltration sont en général recueillies dans des bassins, des citernes ou des étangs. Cependant leur utilisation reste très limitée : elles ne peuvent en général que servir à l'arrosage des meules de compost. De plus, ces eaux dégagent généralement de mauvaises odeurs et leur évacuation vers une station d'épuration est très souvent accompagnée de surtaxes en raison de leur pollution. Pour remédier à ces problèmes, les installations de compostage ou les décharges ont en général recours à des aérateurs immergés (système d'aération par fines bulles, pales tournantes, etc...) qui sont de gros consommateurs d'énergie.



Document 05 : Oloïde en place sur une installation de compostage – Klasmann Deilmann GmbH (Allemagne)

L'Oloïde permet d'aérer et d'agiter ces eaux, ce qui, d'une part, facilite la disparition des mauvaises odeurs et, d'autre part, réduit de manière conséquente la charge en DBO et DCO (puisque le transfert d'oxygène devient plus important). Considérant le fait qu'un Oloïde Type 400 consomme en moyenne dix fois moins d'énergie qu'un système d'aération traditionnel, l'installation devient très vite rentable. Les eaux ainsi traitées pourront être soit réutilisées pour l'arrosage des meules de compost soit être évacuées vers une station d'épuration avec une réduction des taxes.

II.4.2 L'assainissement de lacs et d'étangs :

Le système Oloïde peut intervenir dans deux cas en ce qui concerne l'assainissement de plans d'eau : il peut lutter contre le phénomène d'eutrophisation mais peut également être une réponse efficace à une pollution d'origine humaine.

L'eutrophisation est une pollution nutritionnelle caractéristique d'eaux trop chargées en nutriments (azote, phosphore, oligo-éléments). Une température élevée, un fort éclaircissement, un courant faible favorisent de plus l'eutrophisation. Concrètement, ce phénomène se traduit par une prolifération de plantes aquatiques (phytoplanctons, algues) qui vont progressivement asphyxier le plan d'eau. En outre, lorsque elles meurent, ces plantes se putréfient, ce qui entraîne une pollution organique. Ce type de plan d'eau est en général caractérisé par une forte valeur de DBO (Demande Biologique en Oxygène). L'Oloïde permet, d'une part, de brasser la vase accumulée qui va petit à petit remonter à la surface et y être dégradée au contact de l'air et, d'autre part, d'augmenter le transfert d'oxygène (les ondulations créées par l'Oloïde augmentent en effet la surface globale du lac) : La technologie permet donc non seulement de prévenir l'eutrophisation mais aussi de la combattre.



Document 06 : Utilisation d'un Oloïde de type 400 sur le site de « Petite Camargue » (Saint Louis –France) pour lutter contre l'eutrophisation d'un étang

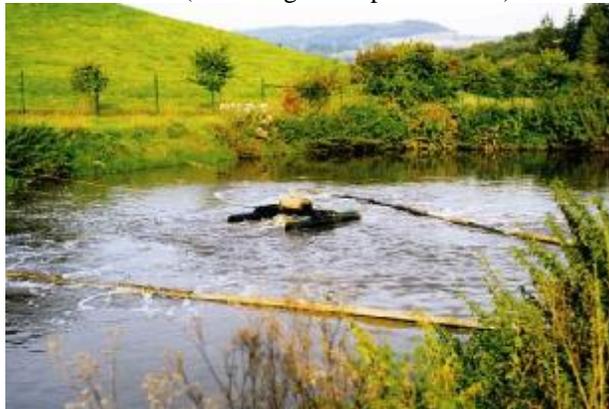
La pollution d'origine humaine revêt différentes formes : il peut s'agir, par exemple, de la pollution d'un lac ou d'un étang par des métaux lourds ou d'une pollution relative à l'exploitation d'un système d'épuration des eaux. La technologie Oloïde peut être mise en œuvre dans les cas où il suffit de faire remonter le polluant vers la surface pour qu'il y soit oxydé au contact de l'air. Dans ce cas, les courants créés par l'Oloïde permettent cette remontée vers la surface.



Document 07 : Utilisation de l'Oloïde sur un étang d'oxydation à Muenchen (Allemagne)

II.4.3 Technologie Oloïde et lagunage :

Le lagunage est une technique particulière d'assainissement des eaux couramment utilisée en Suisse et en Allemagne, mais également de plus en plus présente en France. Le principe est relativement simple : on aménage un ou plusieurs bassins destinés à recevoir l'ensemble des eaux usées d'une ou plusieurs habitations préalablement traitées par une fosse septique. L'épuration est réalisée, d'une part par des bactéries utilisant la matière organique pour leur croissance et, d'autre part, par des végétaux aquatiques qui assimilent les nitrates et les phosphates rejetés par les bactéries. Cette technique, peu coûteuse dans sa mise en œuvre, nécessite cependant un suivi régulier. L'Oloïde peut être utilisé dans les installations de lagunage comme aérateur permettant une action plus rapide des bactéries : le temps passé par les eaux à traiter dans chaque bassin est donc réduit (d'où un gain de productivité).



Document 08 : Oloïde utilisé sur le site de lagunage de Kallental (Diemelstadt - Allemagne)

II.4.4 Technologie Oloïde et aquaristique :



Document 09 : 4 Oloïdes de type 400 sont utilisés dans le bassin à requins du zoo de Bochum (Allemagne)

Les aquariums aussi bien que les fermes piscicoles ont besoin d'outils performants d'aération afin d'assurer la sauvegarde des occupants des bassins. Si l'Oloïde n'est pas en mesure d'introduire dans le milieu aquatique une grande quantité de dioxygène comme pourrait le faire un système d'aération par fines bulles, il peut cependant s'avérer être un outil efficace pour homogénéiser l'oxygénation et créer des courants proches de ceux du milieu naturel. L'expérience a déjà été menée sur un aquarium océanique en Allemagne où les requins ont semblé apprécier les courants créés.

II.4.5 Traitement du lisier

Le principal problème rencontré lors du stockage du lisier tient au fait que celui-ci se sépare généralement en deux phases : à la surface, une phase essentiellement liquide et en-dessous, une phase de densité plus importante. L'utilisation de la technologie Oloïde permet, moyennant une utilisation de une à cinq heures par jour (suivant le volume à traiter), d'une part d'homogénéiser la répartition des substances nutritives dans le lisier et d'autre part de contribuer à réduire les odeurs désagréables, ce qui constitue un confort certain lors de l'épandage.



Document 10 : Utilisation de l'Oloïde dans un élevage porcin (Hellbuehl – Suisse)

II.4.6 Utilisation de la technologie Oloïde dans le milieu industriel :

L'utilisation de la technologie Oloïde ne se résume pas au traitement des eaux d'infiltration ou aux sites de lagunage : plusieurs expériences ont été menées en Suisse et en Allemagne sur l'utilisation d'Oloïdes 400 ou 600 complètement immergés dans des bassins de dénitrification de stations d'épuration où ils permettent de maintenir en suspension la biomasse et ceci, sans apport supplémentaire d'oxygène (la dénitrification se fait en effet en conditions anoxiques). Cette même technique est également utilisée dans les bassins d'élimination biologique du phosphore (conditions anaérobies, sans oxygène ni nitrates).

II.4.7 Développements futurs

De nombreux développements futurs peuvent être envisagés, y compris en dehors du domaine du traitement des eaux. L'utilisation de la technologie Oloïde pourrait par exemple faire l'objet de développements dans la chimie (on peut en particulier imaginer des débouchés dans le domaine de la chimie industrielle ou de la pétrochimie).

Seconde Partie

Optimisation d'un système d'aération par fines bulles grâce à la technologie Oloïde

I] Introduction :

La technologie Oloïde, bien que pouvant dans certains cas s'avérer plus efficace, plus économique et plus adaptée au milieu à traiter que d'autres technologies de brassage ou d'aération, a encore du mal à convaincre les industriels. La société OLOID AG a donc depuis quelques années mis en place une véritable politique de recherche-développement en multipliant les contacts avec les universités et les laboratoires de recherche. Dans le cadre de cette politique, j'ai mené un protocole expérimental visant à mettre en évidence l'allongement de la «durée de vie» des bulles émises par un aérateur à fines bulles lors de l'utilisation de l'Oloïde.

Problématique : Les aérateurs à fines bulles (qui sont en général constitués d'une pompe et d'un distributeur qui émet les bulles) sont des systèmes très efficaces pour assurer l'oxygénation d'un milieu. Ils sont par exemple utilisés couramment dans les stations d'épuration. Cependant, ces systèmes sont de gros consommateurs d'énergie et sont donc en général peu rentables énergétiquement (et par conséquent économiquement) parlant. Pour l'industriel, il importe donc de «rentabiliser» leur utilisation. L'optimisation de ces aérateurs peut passer par l'installation d'un ou de plusieurs Oloïdes, qui permettront de prolonger la « durée de vie » des bulles dans le fluide brassé : l'Oloïde en mouvement va en effet générer des courants qui allongent la trajectoire des bulles.

Le but de cette étude est de proposer tout d'abord un modèle théorique de ce phénomène, puis de confronter ce modèle à la pratique.

II] Modèle théorique :

II.1 Cadre de l'étude et hypothèses :

II.1.1 Cadre de l'étude :

L'étude est réalisée dans un bassin circulaire de hauteur h , de rayon R . Ce bassin est rempli d'eau, de masse volumique ρ_e , de viscosité dynamique μ . On nomme g l'accélération de la pesanteur.

On considère une bulle en mouvement dans ce bassin, de masse volumique ρ_a , de rayon r et de volume V .

II.1.2 Hypothèses :

Pour ce modèle, nous ferons les hypothèses suivantes :

- On suppose que le régime permanent est immédiatement atteint (pas de régime transitoire). La vitesse de la bulle est alors constante, de norme v .
- On suppose que la bulle étudiée est assimilable à une sphère de rayon r . On supposera cette sphère indéformable.
- On ne modélisera pas ici le contact bord du bassin – bulle.
- On suppose que le seul effet produit par l'Oloïde est la transformation de la trajectoire rectiligne verticale de la bulle en trajectoire hélicoïdale (que l'on précisera plus bas).

II.1.3 Forces s'exerçant sur la bulle :

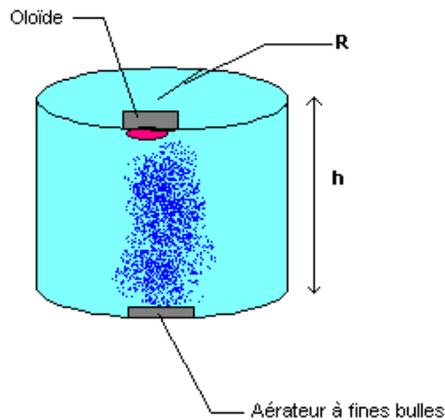
L'équation d'Euler est difficilement résoluble dans les conditions que nous avons décrites plus haut (le champ des vitesses aurait été, en particulier, difficile à modéliser). Ainsi, je propose en première approximation un modèle très simple : la trajectoire des bulles (hélicoïdale) est supposée connue et la résultante des forces s'appliquant sur la bulle est la somme de trois forces : le poids, la poussée d'Archimède (bien que cette force ne soit en général applicable qu'à des fluides en équilibre) et une force de frottements fluides.

- Le poids, noté \vec{P} est tel que $\vec{P} = V\rho_a\vec{g} = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_a\vec{g}$
- La poussée d'Archimède, notée \vec{P}_a , telle que $\vec{P}_a = -V\rho_e\vec{g} = -\frac{4}{3}\pi r^3\rho_e\vec{g}$
- La force de frottements (ou traînée), notée \vec{F}_r Cette force est généralement complexe à décrire. Elle dépend généralement de la vitesse de la bulle par rapport à l'eau, de ses dimensions et de sa forme. On étudiera deux cas distincts : une dépendance de \vec{F}_r en \vec{v} et une dépendance de \vec{F}_r en \vec{v}^2 .

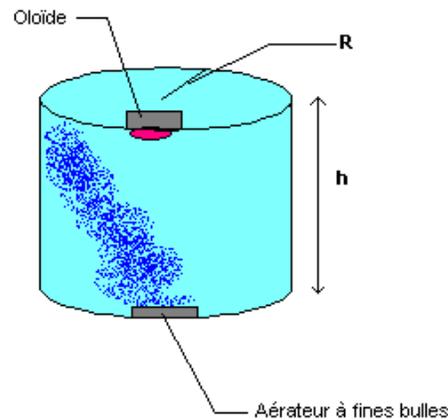
En réalité, cette dépendance est fonction du nombre de Reynolds, mais ne sachant pas à quelle plage de vitesses m'attendre, j'ai fait une modélisation pour les deux cas.

II.1.4 Modification de la trajectoire :

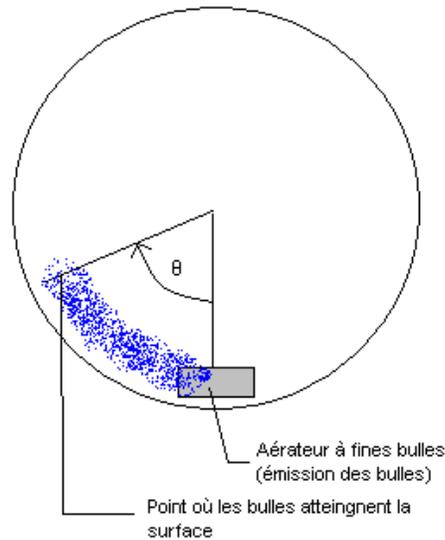
On suppose que la trajectoire des bulles sans action de l'Oloïde est verticale. D'autre part, on suppose que le seul résultat du fonctionnement de l'Oloïde est la transformation de cette trajectoire en trajectoire hélicoïdale de rayon R (voir DOCUMENTS 11 ET 12).



Document 11 : Bassin – Oloïde à l'arrêt



Document 12 : Bassin – Oloïde en marche

Document 13 : Bassin – Vue de dessus et paramétrage de l'angle θ

Soit L la distance entre le lieu d'émission de la bulle (aérateur à fines bulles) et le lieu où cette bulle atteint la surface. On note θ l'angle entre ces deux points (voir DOCUMENT 13) On calcule L grâce au théorème de Pythagore :

$$L = \sqrt{h^2 + R^2\theta^2}$$

II.2 Premier Cas : on suppose que la dépendance de \vec{F}_r est en \vec{v} :

Remarque sur \vec{F}_r : on considère ici que la bulle est un objet en mouvement dans un fluide visqueux, et est soumise à une force de frottement, dans la direction de la vitesse et de sens opposé. Cette traînée dépend de la viscosité du fluide, de la vitesse et de la forme de l'objet. Pour des objets de forme simple comme c'est le cas ici, à surface non rugueuse et lorsqu'il n'y a pas de turbulence, on peut calculer cette force de traînée. La traînée est également appelée force de Stokes.

On a alors \vec{F}_r de la forme : $\vec{F}_r = -6\pi\mu \vec{v}$

II.2.1 Application du Principe Fondamental de la Dynamique :

Le PFD s'écrit $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_a \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_r + \vec{P}_a + \vec{P}$

Ceci devient en régime permanent : $\vec{F}_r + \vec{P}_a + \vec{P} = \vec{0}$

ie $-6\pi\mu \vec{v} - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_e \vec{g} + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_a \vec{g} = \vec{0}$

ie $\frac{4}{3}\pi r^3 \vec{g} (\rho_e - \rho_a) = -6\pi\mu \vec{v}$

ie $\vec{v} = -\frac{4(\rho_e - \rho_a)r^2}{18\mu} \vec{g}$

ie $\vec{v} = \frac{2(\rho_e - \rho_a)gr^2}{9\mu}$

II.2.2 Durée de vie de la bulle :

De la vitesse (supposée constante puisque l'on travaille uniquement en régime stationnaire), on tire le temps nécessaire à la bulle pour parvenir à la surface :

On note t'_1 le temps nécessaire à la bulle pour remonter à la surface sans l'Oloïde et t'_2 avec l'Oloïde.

$$t'_1 = \frac{9h\mu}{2(\rho_e - \rho_a)r^2g} \quad \text{et} \quad t'_2 = \frac{9\mu\sqrt{h^2 + R^2\theta^2}}{2g(\rho_e - \rho_a)r^2}$$

II.3 Deuxième Cas : on suppose que la dépendance de \vec{Fr} est en v^2 :

On a alors \vec{Fr} de la forme : $\vec{Fr} = -\frac{1}{2}\rho_e S v^2 \vec{Cx}$

avec : S la section que présente la bulle à l'écoulement de l'eau
 Cx , appelé coefficient de traînée

Remarque sur le coefficient de traînée Cx :

le coefficient Cx peut être calculé grâce à la formule suivante : $Cx = \frac{b}{(Re)^n}$

avec Re le nombre de Reynolds
 b et n en fonction du régime d'écoulement

Si $Re < 2$, $n=1$ et $b=24$ (écoulement laminaire)

Si $2 < Re < 500$, $n=0.6$ et $b=18.5$ (écoulement de transition)

Si $Re > 500$, $n=0$ et $b=0.4$ (écoulement turbulent)

Pour la sphère étudiée, on retiendra $Cx = 0.51$ SI (premier régime). Cette valeur a été calculée par B.Grandjean (Université de Ulaval [Canada]).

II.3.1 Application du Principe Fondamental de la Dynamique :

Le PFD s'écrit $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_a \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{Fr} + \vec{Pa} + \vec{P}$

Ceci devient en régime permanent : $\vec{Fr} + \vec{Pa} + \vec{P} = \vec{0}$

ie $-\frac{1}{2}\rho_e S v^2 \vec{Cx} - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_e \vec{g} + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_a \vec{g} = \vec{0}$

ie $\frac{4}{3}\pi r^3 \vec{g} (\rho_e - \rho_a) = -\frac{1}{2}\rho_e S v^2 \vec{Cx}$

ie $\vec{v}^2 = -\frac{8\pi r^3 (\rho_e - \rho_a)}{3\rho_e S Cx} \vec{g}$

$$\text{ie } v = \sqrt{\frac{8gr(\rho_e - \rho_a)}{3\rho_e Cx}}$$

II.3.2 Durée de vie de la bulle :

De la vitesse (supposée constante puisque l'on travaille uniquement en régime stationnaire), on tire le temps nécessaire à la bulle pour parvenir à la surface :

On note t''_1 le temps nécessaire à la bulle pour remonter à la surface sans l'Oloïde et t''_2 avec l'Oloïde.

$$t''_1 = h \sqrt{\frac{3\rho_e Cx}{8gr(\rho_e - \rho_a)}} \quad \text{et} \quad t''_2 = \sqrt{\frac{(h^2 + R^2\theta^2)(3\rho_e Cx)}{8gr(\rho_e - \rho_a)}}$$

II.4 Conclusions sur le modèle théorique :

Le modèle théorique que nous avons élaboré nous conduit donc (en utilisant les valeurs des constantes numériques μ , ρ_e , ρ_a , g , R et h données ci-dessous) aux résultats suivants (pour $\theta=0$) :

	r = 0,5 mm	r = 1 mm	r = 1,5 mm	r = 2 mm	r = 2,5 mm
vitesse cas 1	0,41 m/s	1,66 m/s	3,74 m/s	6,66 m/s	10,41 m/s
t'1	1,17 s	0,29 s	0,13 s	0,07 s	0,04 s
vitesse cas 2	0,16 m/s	0,22 m/s	0,27 m/s	0,32 m/s	0,35 m/s
t''1	3,06 s	2,16 s	1,77 s	1,53 s	1,37 s

En considérant que le rayon de la bulle est probablement plus proche de 0,5 mm que de 2,5, ce modèle nous permet de conclure sur l'ordre de grandeur du temps recherché : de l'ordre de la seconde.

III] Confrontation du modèle théorique à l'expérimentation :

III.1 Cadre de l'expérimentation :

L'expérience a eu lieu entre les 25 et 26 février 2003 à Bâle (Suisse), dans les locaux de la société OLOID AG

III.1.1 Matériel utilisé : (voir également annexe 05)

J'ai, au cours de cette expérience, utilisé :

- Un bassin transparent circulaire et rempli d'eau propre (température approximative : 283 K)
Les dimensions mesurées de ce bassin sont :
Diamètre : 1,06 mètre \pm 0,01 mètre
Rayon : R = 0,53 mètre \pm 0,01 mètre
Hauteur d'eau : 0,59 mètre \pm 0,005 mètre
Hauteur d'eau depuis le lieu d'émission des bulles : h = 0,49 mètre \pm 0,005 mètre
- Un Oloïde Type 200 (voir caractéristiques techniques annexe 06) muni d'un moteur de marque Neckar Motoren (230V / 50 Hz / 605 mA) (numéro de série : 620141) d'une puissance de 80 W. Le dispositif était muni d'un variateur électronique Hitachi L100 permettant de régler la vitesse de rotation de l'Oloïde.
- Un aérateur à fines bulles de marque Yasunga, modèle 4P-40A (numéro de série 99040021). Ce modèle a un débit d'air de 43 litres d'air à la minute (voir annexe 07).
- Une sonde de vitesse à hélice de marque Schilknecht, modèle MiniAir 20 (numéro de série 49509)

III.1.2 Valeurs des différentes constantes :

Les différentes constantes que nous avons utilisées dans notre modèle théorique sont ρ_e , ρ_a , g et μ . Ces différentes constantes peuvent être trouvées dans la littérature; nous donnons ici les valeurs numériques que nous avons retenues :

$$\rho_e = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\rho_a = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

$\mu = 1307 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
(d'après CRC handbook of chemistry & physics)

III.1.3 Premières remarques qualitatives :

- L'approximation selon laquelle le panache de bulles a une trajectoire hélicoïdale semble être vérifiée : la trajectoire est bien incurvée lors de la mise en marche de l'Oloïde (voir DOCUMENT 14). D'autre part, pour peu que l'on place l'aérateur à fines bulles suffisamment près de la paroi du bassin (comme ce sera le cas dans toute la suite de l'expérience), on peut considérer que cette trajectoire hélicoïdale a bien un rayon R (autrement dit, le flot de bulles est proche de la paroi du bassin).
- Le temps de montée des bulles semble être de l'ordre de la seconde, ce qui correspond à la valeur théorique.
- A partir d'une certaine vitesse de rotation, le panache de bulles est suffisamment dévié pour que l'on puisse faire des mesures.

Les mesures semblent donc pouvoir être effectuées.



Document 14 : trajectoire hélicoïdale des bulles
lors de l'utilisation de l'Oloïde

III.2 Mesure de l'angle θ :

III.2.1 Mesure de θ

Nous avons, dans l'introduction, défini θ comme l'angle entre le lieu d'émission des bulles et le lieu où elles atteignent la surface.

J'ai débuté le protocole expérimental en effectuant une mesure de θ en fonction de la fréquence de rotation de l'Oloïde. Cela nous donne le tableau suivant :

Fréquence de rotation (Hz)	Têta (rad)	Tolerance (rad)
5	non mesurable	non mesurable
10	non mesurable	non mesurable
15	0,27	0,06
20	0,42	0,06
25	0,79	0,06
30	0,98	0,06
35	1,28	0,06

Le problème de la mesure de θ réside dans le fait que l'aérateur à fines bulles délivre un flot continu de bulles (comment alors espérer mesurer la distance précise entre deux points alors que le panache de bulles a une largeur d'une dizaine de centimètres ?).

Dans un premier temps, j'ai fait des mesures en estimant la position du "centre" du panache de bulles. Mais, cette mesure donne lieu à des incertitudes trop importantes qui ne pourraient permettre de valider le modèle théorique.

Pour remédier à ce problème, j'ai décidé de réduire la pression de sortie de l'aérateur à fines bulles afin de n'avoir plus que trois ou quatre fines colonnes de bulles (voir DOCUMENT 15). Cette technique m'a permis de ramener les incertitudes sur θ à des valeurs plus acceptables (celles du tableau ci-dessus)



Document 15 : aérateur à fines bulles fonctionnant avec une faible pression de sortie

III.2.2 Remarques :

- En déplaçant l'aérateur à fines bulles dans le bassin (tout en le laissant contre la paroi du bassin), j'ai constaté qu'à fréquence de rotation constante, l'angle θ ne varie pas. Les mesures peuvent donc être menées quelle que soit la position de l'aérateur à fines bulles (à condition tout de même que ce dernier soit contre la paroi du bassin).
- Pour toute la suite du protocole, j'ai choisi de régler la fréquence de rotation de l'Oloïde sur 30Hz, qui se trouve être d'une part la fréquence couramment utilisée et qui d'autre part permet de bien visualiser la modification de la trajectoire des bulles lorsque l'Oloïde fonctionne.

III.3 Mesure du rayon r :

C'est probablement la mesure qui m'a posé le plus de difficultés : la mesure du rayon d'une bulle faisant partie d'un flot continu de bulles en mouvement n'est en effet pas aisée.

Ma méthode a consisté à utiliser une plaque munie d'une règlette. Avec cette plaque, on isole quelques bulles du panache et on mesure leur diamètre (voir DOCUMENT 16).

Au cours de cette expérience, j'ai mesuré un rayon moyen : $r = 0,5 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$.

NB : Cette mesure est en accord avec la valeur donnée par le constructeur de l'aérateur à fines bulles qui annonce un rayon r de 0,5 mm.

NB : Cette méthode semble quelque peu "chaotique", mais la mesure faite étant en accord avec la valeur du constructeur, j'ai considéré que la méthode était valable.



Document 16 : Plaque utilisée pour mesurer r

III.4 Mesure de la durée de vie des bulles :

III.4.1 Méthode de mesure :

Là aussi, se pose un problème : comment mesurer le temps mis par une bulle pour remonter à la surface alors que l'aérateur émet un flot continu de bulles. Dans un premier temps, j'ai pensé filmer la scène avec une caméra numérique puis, à partir d'un logiciel, analyser le film image par image et en déduire le temps (et même la vitesse) recherchés. Cependant, je n'ai pas pu disposer des moyens techniques nécessaires. J'ai finalement effectué cette mesure à l'aide d'un chronomètre de précision. Mon idée initiale était de déclencher le chronomètre à l'instant où l'aérateur à fines bulles est mis en marche puis de stopper le chronomètre lorsque le début du panache arrive à la surface. Un problème est apparu lors de la phase d'expérimentations : il s'avère qu'un temps de l'ordre du dixième de seconde s'écoule entre le moment où l'aérateur à fines bulles est mis en marche et le moment où il commence à émettre les premières bulles. Ce temps correspond à un 'gonflage' nécessaire de l'aérateur (voir DOCUMENTS 17 ET 18).



Document 17: Distributeur non «gonflé»



Document 18 : Distributeur «gonflé»

La mesure de la durée de vie des bulles a donc été effectuée lors de la phase d'extinction de l'aérateur : on déclenche le chronomètre lorsque l'on arrête l'aérateur à fines bulles puis on stoppe le chronomètre lorsque la 'fin' du panache de bulles atteint la surface (voir DOCUMENT 19).



Document 19 : Arrêt de l'aérateur à fines bulles

NB : La mesure de la durée de vie des bulles a été réalisée de la même façon, que l'Oloïde soit en action ou non.

III.4.2 Mesure de la durée de vie des bulles en l'absence de l'Oloïde :

Les mesures effectuées sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temps mesure (s)	1'17	1'14	1'10	1'00	1'14	1'01	0'98	1'15	1'07	1'19

Mesure	11	12	13	14	15
Temps mesure (s)	1'19	1'06	1'09	1'03	1'13

Moyenne : 1,10 seconde

Soit une vitesse moyenne v telle que $v = \frac{0,49}{1,10} = 0,44 \text{ m.s}^{-1}$

III.4.3 Mesure de la durée de vie des bulles lorsque l'Oloïde est en marche :

J'ai effectué la mesure en tenant compte du fait qu'il fallait un certain temps pour que les courants induits par l'Oloïde se mettent en place. Par conséquent, l'Oloïde a été mis en marche et la première mesure n'a été effectuée que cinq minutes plus tard. L'Oloïde n'a plus ensuite été éteint.

Les mesures effectuées sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temps mesure (s)	1'48	1'74	1'58	1'77	1'57	1'78	1'63	1'71	1'56	1'60

Mesure	11	12	13	14	15
Temps mesure (s)	1'58	1'75	1'49	1'55	1'57

Moyenne : 1 seconde et 62 centièmes

III.5 Validation des mesures à l'aide d'une sonde de vitesse :

OLOID AG a eu la gentillesse de mettre à ma disposition une sonde de vitesse à hélice pour vérifier mes résultats (voir DOCUMENT 20).

J'ai donc mesuré la vitesse induite par le panache de bulles lorsque l'Oloïde est à l'arrêt (voir remarque suivante).

Avec le mode 'moyenne' de l'appareil, j'ai trouvé une vitesse moyenne v' sur trente secondes telle que

$$v' = 0,46 \text{ m.s}^{-1}$$

Notons par ailleurs V_{max} la vitesse maximale trouvée par la sonde et V_{min} la vitesse minimale. On lit sur la sonde :

$$V'_{\text{max}} = 0,61 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V'_{\text{min}} = 0,33 \text{ m.s}^{-1}$$



Document 20 : Sonde de vitesse à hélice

NB : Ces valeurs sont en accord avec ce que nous avons trouvé en III.4.2. Les mesures à l'aide du chronomètre semblent donc être correctes.

NB : J'ai également essayé de mesurer la vitesse des courants induits par le mouvement de l'Oloïde (l'aérateur étant alors éteint). Les valeurs renvoyées par la sonde étaient comprises dans une fourchette allant de -6 m.s^{-1} à 6 m.s^{-1} avec des valeurs changeant sans arrêt. L'espace confiné (le bassin n'est pas vaste) semble donc interdire toute mesure de vitesse lorsque l'Oloïde est en marche.

NB : J'ai enfin essayé de mettre en cause l'hypothèse selon laquelle la vitesse des bulles est constante en mesurant la vitesse induite par le panache de bulles à différentes profondeurs : on trouve sensiblement les mêmes valeurs. De cela, on peut tirer deux hypothèses : soit la sonde n'est pas assez précise pour mesurer une variation de vitesse lorsque la profondeur varie peu (50 centimètres au maximum), soit mon modèle théorique est validé.

III.6 Conclusions :

III.6.1 Conclusions quant au modèle à choisir :

Il semble relativement clair que le modèle à retenir est celui de la force de Stokes : d'une part, la valeur que nous avons trouvée pour le rayon r est relativement faible : entre 0,25mm et 0,75mm et d'autre part, les valeurs trouvées en III.4.2 semblent être en accord avec les valeurs théoriques du cas 1 du II.4.

Nous retiendrons donc le modèle de la force de Stokes comme force de frottements (nous sommes d'ailleurs confortés dans ce choix par le document émanant du Groupe d'Experts pour les Programmes Scolaires en annexe 08).

D'autre part, le modèle consistant à supposer que la résultante des forces est la somme du poids, de la poussée d'Archimède et d'une force de frottements fluides et que la trajectoire est hélicoïdale ne semble pas devoir être remis en cause, les résultats obtenus étant tout à fait en accord avec les valeurs théoriques.

III.6.2 Conclusions quant à l'hypothèse de l'établissement immédiat du régime permanent :

permanent :

Nous avons postulé que le régime permanent était immédiatement établi. Les valeurs trouvées en III.4.2, proches des valeurs théoriques du II.4 semblent confirmer cette hypothèse.

Afin de valider complètement cette hypothèse nous pouvons refaire le calcul en supposant cette fois que le régime permanent n'est pas immédiatement atteint :

$$\text{Le PFD s'écrit } \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_r + \vec{P}_a + \vec{P}$$

$$\text{ie } -6\pi r \mu \vec{v} - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e \vec{g} + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a \vec{g} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\text{ie } \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{-9\mu}{2r^2\rho_a} \vec{v} + \vec{g} \left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_a}\right)$$

on reconnaît ici une équation différentielle vectorielle dont la solution est (en postulant que lorsqu'elles sont émises, les bulles ont une vitesse nulle) :

$$\vec{v}(t) = \vec{g} \frac{(\rho_e - \rho_a) 2r^2}{9\mu} \left(\exp\left(\frac{-9\mu t}{2r^2\rho_a}\right) - 1 \right)$$

Or si l'on considère les valeurs de μ , r , ρ_a et ρ_e , on obtient les valeurs numériques suivantes :

$$\frac{-9\mu}{2r^2\rho_a} = -19605 \text{ s}^{-1}.$$

Si l'on nomme τ le temps caractéristique du système : $\tau = \frac{1}{19605} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ s} \ll 1 \text{ s}$.

Notre hypothèse était donc bien justifiée.

III.6.3 Conclusions quant aux autres hypothèses :

En ce qui concerne la trajectoire hélicoïdale des bulles : l'hypothèse semble vérifiée. En effet, lorsque l'Oloïde est en marche, le panache de bulles est relativement proche du bord : à plus ou moins cinq centimètres près, on peut considérer que la trajectoire hélicoïdale des bulles a pour rayon R .

En ce qui concerne le fait d'assimiler la bulle à une sphère de rayon r , je suis dans l'incapacité de conclure : d'une part, il semble peu probable que chaque bulle soit une sphère et d'autre part, si elle est assimilable à une sphère, cette dernière n'est certainement pas indéformable. Qualitativement, en effet, pour un nombre n de mols d'air contenues dans la bulle, plus la pression extérieure est élevée, plus le volume de la bulle sera faible (donc son rayon sera également plus faible). Par conséquent, le rayon r varie en fonction de la profondeur à laquelle se trouve la bulle. Cependant, nous avons ici travaillé sur de faibles profondeurs (moins d'un mètre), on peut donc considérer le rayon r comme une constante. D'autre part, une étude de la forme d'une bulle pouvant être à elle seule un sujet de TIPE, je considère que cette hypothèse est, dans une certaine mesure, valable (d'autant plus que je n'obtiens pas de résultats incohérents).

III.6.4 Conclusions quant à l'action de l'Oloïde :

Comparons les temps trouvés en III.4.2 et III.4.3 à l'aide du chronomètre :

$$\frac{1,10}{1,62} = 0,67 \text{ ou } 100 \frac{1,62 - 1,10}{1,10} = 47,2 \%$$

Comparons à présent h et L (pour une fréquence de rotation de 30 Hz) :

$$\frac{0,49}{0,71} = 0,69 \text{ ou } 100 \frac{0,71 - 0,49}{0,49} = 45 \%$$

D'une part, ces deux résultats sont concordants (ce qui renforce notre hypothèse sur la trajectoire hélicoïdale des bulles) et d'autre part, ces résultats mettent en évidence l'efficacité d'un système d'aération par fines bulles combiné à un Oloïde : les bulles passent une fois et demi plus de temps dans le fluide lorsque l'Oloïde est en marche. Rapporté à la faible consommation énergétique de la technologie Oloïde (80 W au maximum dans le cas de l'Oloïde Type 200), cette combinaison semble particulièrement intéressante.

Troisième Partie

Conclusions

I] L'Oloïde, un outil efficace :

Nous avons vu, dans la première partie que la technologie Oloïde pouvait être un outil très efficace dans divers domaines : renaturation de plans d'eau, traitement des eaux, aquaculture, traitement du lisier, aération des eaux d'infiltration... La seconde partie nous a également permis de mettre en évidence que l'Oloïde peut également être utilisé en même temps qu'un système d'aération classique en permettant d'augmenter l'efficacité de ce dernier.

Si, à première vue, l'Oloïde semble être un outil original (nombreux sont les industriels qui sont sceptiques concernant l'efficacité de la technologie Oloïde) relevant plus de l'extravagance que du véritable outil de brassage ou d'aération, il a cependant prouvé à de nombreuses reprises (en particulier en Suisse et en Allemagne) qu'il pouvait être efficace voire même remplacer les systèmes classiques.

II] Les limites de la technologie Oloïde :

Cependant, il serait utopique de penser que la technologie Oloïde est la solution à tous les problèmes. S'il peut être un complément efficace à un système d'aération par fines bulles, il ne pourrait vraisemblablement pas le remplacer : contrairement au système à fines bulles, l'Oloïde ne peut pas introduire directement l'oxygène dans le milieu et ne peut qu'augmenter la surface fluide-air permettant un meilleur transfert d'oxygène. Les performances de l'Oloïde comme outil d'aération sont donc limitées. De même, ses performances comme outil de brassage sont également «limitées» : l'Oloïde ne peut pas être utilisé comme un mixeur. Sur de grands volumes, il agit sur la durée en utilisant l'inertie du milieu : l'Oloïde ne peut pas être utilisé, comme pourrait l'être un système de brassage à pâles comme un mélangeur permettant en un court laps de temps d'homogénéiser un fluide. Par contre, la technologie Oloïde permet, à moindre coût (mais sur une période de temps plus grande pouvant même aller jusqu'à plusieurs années), de réaliser cette homogénéisation sur de grands volumes (lacs par exemple).

III] Portée de cette étude :

L'étude que nous avons développée tout au long de la seconde partie met en évidence une action bénéfique de la technologie Oloïde sur la rentabilité d'un aérateur à fines bulles. Les chiffres obtenus doivent cependant être relativisés.

D'une part, toute l'étude a en effet été menée en milieu «confiné» : le bassin dans lequel a eu lieu l'expérimentation présente de faibles dimensions devant les volumes habituellement traités par un Oloïde Type 200 : on peut supposer que les résultats ne seraient certainement pas les mêmes si le bassin en question avait eu un volume de quelques dizaines de mètres cubes.

D'autre part, cette étude a été menée avec un bassin circulaire. Or, tous les bassins, étangs, lacs ou réservoirs traités ne sont pas tous circulaires et une extrapolation des résultats obtenus semble difficile sur des bassins rectangulaires, par exemple. Les courants créés par l'Oloïde peuvent en effet alors être tout à fait différents (une étude est d'ailleurs menée à ce sujet par le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels de Grenoble).

Enfin, si les bulles passent près de 50% de temps en plus dans le bassin, l'efficacité globale du système n'est pas pour autant accrue de 50% : il faut prendre en compte la surconsommation énergétique induite par le fonctionnement de l'Oloïde (même si cette dernière est faible).

Dans le même temps, on peut supposer qu'un Oloïde de Type 600 agitateur de fond placé dans un bassin d'une station d'épuration (dont les dimensions sont souvent limitées) aboutirait à des résultats proches de ceux que nous avons obtenus dans la seconde partie. C'est ce qu'ont pu observer les ingénieurs à Lehre (Allemagne), Hinterzarten (Allemagne) ou Kmehlen (Allemagne) où la technologie Oloïde s'est avérée être un complément efficace des systèmes d'aération et d'agitation classiques et a permis de réaliser de substantielles économies.

Annexes

Le Cube Inversible et la forme Oloïde

Nous allons voir ici comment Paul Schatz, à partir du cube inversible a pu obtenir une “coupe” de l'Oloïde.

1.Le cube inversible :

Commençons par considérer un cube auquel on va prélever une partie (en rouge sur la photo 2).

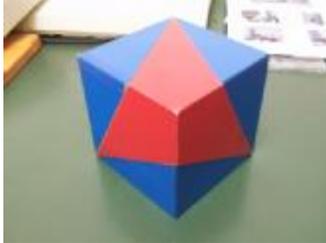


Photo 1

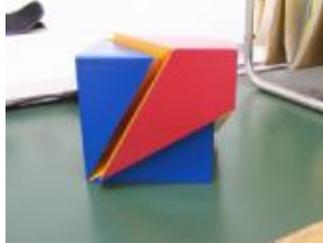


Photo 2

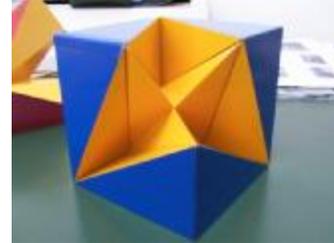


Photo 3

De la même manière, on va également enlever à ce qui reste du cube le symétrique de la partie déjà prélevée (photo 4). Si l'on pose “à plat” ce qui reste du cube, on obtient le volume de la photo 5.



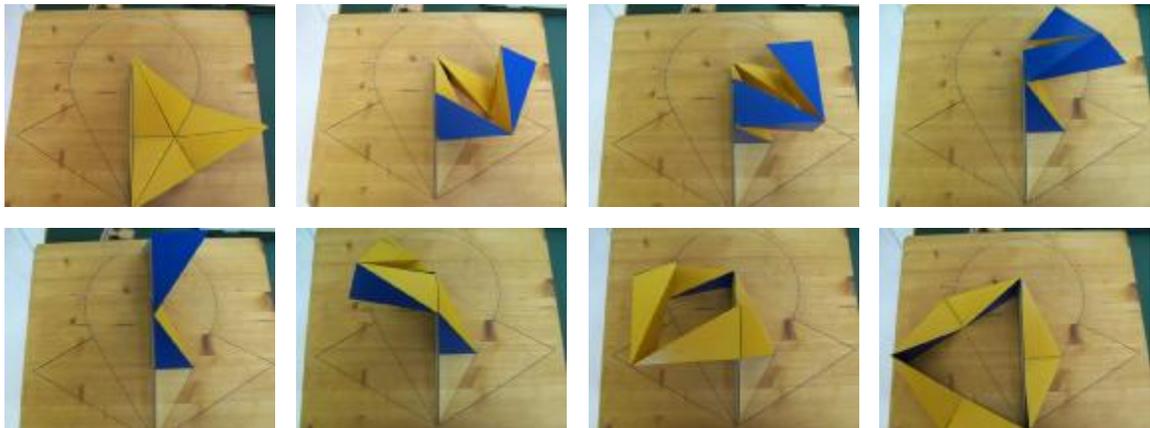
Photo 4



Photo5

2.La forme oloïde :

Nous allons voir ici, comment à partir de ce que nous avons obtenu précédemment (photo 5), nous pouvons obtenir une “coupe” de la forme oloïde. En reprenant la forme précédente et en la faisant tourner autour d'un axe, on obtient “une coupe” (un cercle se terminant en pointe) de la forme oloïde.



Le mouvement sur un plan de l'oloïde

Dans la série de photos suivante, on observe le fait que l'intégralité de la surface de la forme oloïde entre en contact avec un plan sur lequel il "roule".



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4

Modélisation de la forme oloïde grâce au programme de calcul formel Maple

Le but de ce travail est d'arriver à modéliser la forme oloïde grâce au programme Maple. Cette modélisation a été basée sur l'article intitulé "The Development of the Oloid", paru en 1999 dans la revue "Journal for Geometry and Graphics". Mrs Hans Dirnbock et Hellmuth Stachel, professeurs de mathématiques autrichiens sont à l'origine de cette étude. Les passages en rouge gras correspondent aux commandes utilisées avec Maple.

1. Création de la structure de base :

Commençons par activer les commandes plots et plottools de Maple (pour les représentations des formes géométriques).

Ø restart:with(plots):with(plottools):

On crée ensuite deux listes de points (deux séquences de $n=100$ points placées entre crochets). Ces listes, en utilisant la commande `polyonplot3d`, constituent deux cercles de rayon unité placés sur deux plans perpendiculaires, chacun passant par le centre de l'autre. Ces cercles Ka et Kb ont pour équation :

$$Ka: x^2 + (y + \frac{1}{2})^2 = 1$$

$$Kb: z^2 + (y - \frac{1}{2})^2 = 1$$

Ø n:=100:

a:=seq([1/2+cos(2*i*Pi/n),sin(2*i*Pi/n),0],i=1..n):

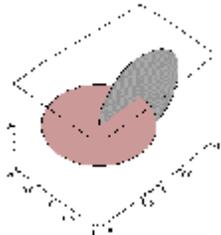
b:=seq([-1/2+cos(2*i*Pi/n),0,sin(2*i*Pi/n)],i=1..n):

Ka:=polyonplot3d(a):

Kb:=polyonplot3d(b):

Ens:=polyonplot3d([a,b]):

Ø display3d(Ka,Kb,Ens,scaling=constrained):



2. Création de la forme oloïde :

Maintenant que nous avons obtenu la "structure de base" de l'oloïde, il ne reste qu'à relier les extrémités de ces deux cercles par une infinité de segments. Utilisons pour cela le schéma mis au point par Mrs Dirnbock et Stachel. Paramétrons Ψ grâce à la longueur d'arc t avec, pour point de départ $t=0$ à U (le U situé du côté négatif de l'axe y). On obtient ainsi les coordonnées de A :

$$A = (\sin t, -\frac{1}{2} - \cos t, 0)$$

Trouvons à présent les coordonnées de B . Pour cela, on commence par exprimer les coordonnées de T , intersection de l'axe des y et de la tangente à Ka passant par A . On a :

$$T = \left(0, -\frac{2 + \cos t}{2 \cos t}, 0\right)$$

On en tire alors les coordonnées de B :

$$B = \left(0, \frac{1}{2} - \frac{\cos t}{1 + \cos t}, \pm \frac{\sqrt{1 + 2 \cos t}}{1 + \cos t}\right)$$

Définissons, à partir de ce que nous avons vu une fonction ax représentative des coordonnées de A sur l'axe des x en fonction de t et une fonction ay représentative des coordonnées de A sur l'axe des y. De même, on définit bx et bz.

```

Ø ax:=t->1/2+cos(t):
  ay:=sin:
  bx:=t->(1/2)*(cos(t)-1)/(cos(t)+1):
  bz:=t->sqrt((2*cos(t)+1))/(cos(t)+1):

```

Nous venons de créer les fonctions qui vont nous permettre d'obtenir les segments joignant les cercles Ka et Kb.

Choisissons à présent un nombre fini n qui déterminera le nombre de segments utilisés pour joindre les circonférences de ces deux cercles. On va créer une liste L[i] représentant ces segments.

```

Ø n:=300:
  for i from 0 to n
  do t:=i*Pi/n-Pi/2:
  A[i]:=[ax(t),ay(t),0]:
  B[i]:=[bx(t),0,bz(t)]:
  L[i]:=line(A[i],B[i]):
  od:

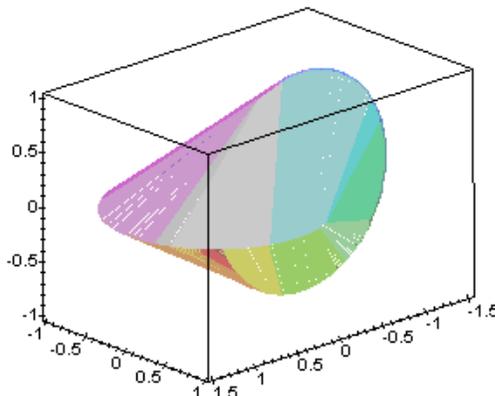
```

Cette liste créée représente le quart de la surface de la forme oloïde. On va donc obtenir les trois autres quarts de la surface de la forme oloïde par rotation.

```

Ø Gr1:=display3d(seq(L[i],i=0..n)):
  Gr2:=rotate(Gr1,Pi,0,0):
  Gr3:=rotate(Gr1,Pi/2,0,Pi):
  Gr4:=rotate(Gr2,Pi/2,0,Pi):
  display3d(Ka,Kb,Ens,Gr1,Gr2,Gr3,Gr4,scaling=constrained);

```



Le Mouvement de l'Oloïde

Les photographies suivantes présentent le mouvement d'un Oloïde (l'Oloïde photographié est un Oloïde de type 600).



Photo 1



Photo 2



Photo 3



Photo 4



Photo 5

Matériel utilisé lors du protocole expérimental mené le 26 février 2003

1. Le bassin circulaire :

J'ai utilisé un bassin transparent circulaire (voir photos 1 et 2), équipé d'un Oloïde type 200 (voir photo 3) et d'un aérateur à fines bulles (voir photos 4 et 5).



Photo 1 : Bassin circulaire



Photo 2 : Bassin circulaire (vue du haut)

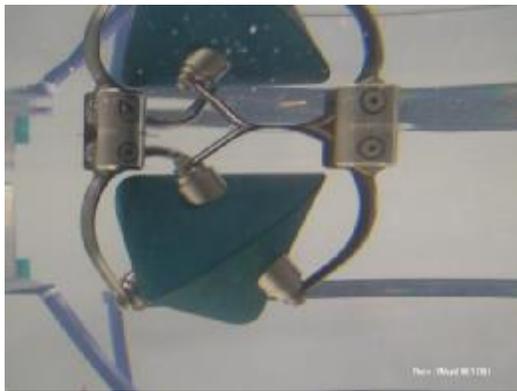


Photo 3 : Oloïde type 200



Photo 4 : Pompe de l'aérateur à fines bulles



Photo 5 : Distributeur de l'aérateur à fines bulles

2. Le variateur électronique

L'Oloïde était équipé d'un variateur électronique Hitachi L100 (voir photos 6 et 7).



Photo 6 : Variateurs Hitachi L 100



Photo 7 : variateur utilisé

3. Sonde de vitesse :

La sonde de vitesse utilisée était une sonde à hélice (voir photos 8 et 9).



Photo 8 : Sonde de vitesse



Photo 9 : Sonde de vitesse



OLOÏDE type 200 Données techniques

	OLOÏDE type 200 A (C. alternatif)	OLOÏDE type 200 B (C. continu)
Moteur	Moteur monophasé à condensateur (IP)	Moteur à courant continu
Type	230 V	15 V
Tension	50 Hz	-
Fréquence	80 W	80 W
Puissance nom.	< 60 W	< 60 W
Puissance absorbée		
Matériau	Mat. synthétique (PU); Longueur: 195 mm	Mat. synthétique (PU); Longueur:
Corps de l'OLOÏDE	Aluminium anodisé (ou inox)	Aluminium anodisé (ou inox)
Boîtier	Inox	Inox
Transmission	Mat. synthétique (PE)	Mat. synthétique (PE)
Flotteurs (2 pièces)	Mat. synthétique (PE)	Mat. synthétique (PE)
Chevalet	Mat. synthétique (PE)	Mat. synthétique (PE)
Rendement	max. 125 l/m	max. 125 l/m
Vitesse de rotation	max. 70 gO ₂ /h	max. 70 gO ₂ /h
Transfert O ₂	max. 1,1 kgO ₂ /kWh	max. 1,1 kgO ₂ /kWh
Rendement O ₂	30 m	30 m
Courant horizontal	3 m	3 m
Courant vertical	300 m ³ /h	300 m ³ /h
Écoulement		
Dimensions		
Agitateur	11 kg (boîtier alu)	11 kg (boîtier alu)
Poids	250 x 110 x 420 mm	ca. 250 x 110 x 420 mm
Dimensions		
Flotteurs	7 kg (Flotteurs et chevalet en PE)	7 kg (Flotteurs et chevalet en PE)
Poids	env. 880 x 670 mm	env. 880 x 670 mm
Dimensions		
Installation complète		
Poids	18 kg	18 kg
Dimensions	env. 880 x 670 x 420 mm	Env. 880 x 670 x 420 mm
Fonction	Corps mi-immersé	Corps mi-immersé
Aérateur de surface	Corps immergé entièrement	Corps immergé entièrement
Agitateur de surface		

OLOÏD AG

Jurastrasse 50, CH - 4053 Bâle
 Tel. +41 61 366 90 30, Fax +41 65 365 90 39
 E-Mail: info@oloid.ch Site: www.oloid.ch



Fonctionnement de l'aérateur à fines bulles

1.L'aérateur à fines bulles :

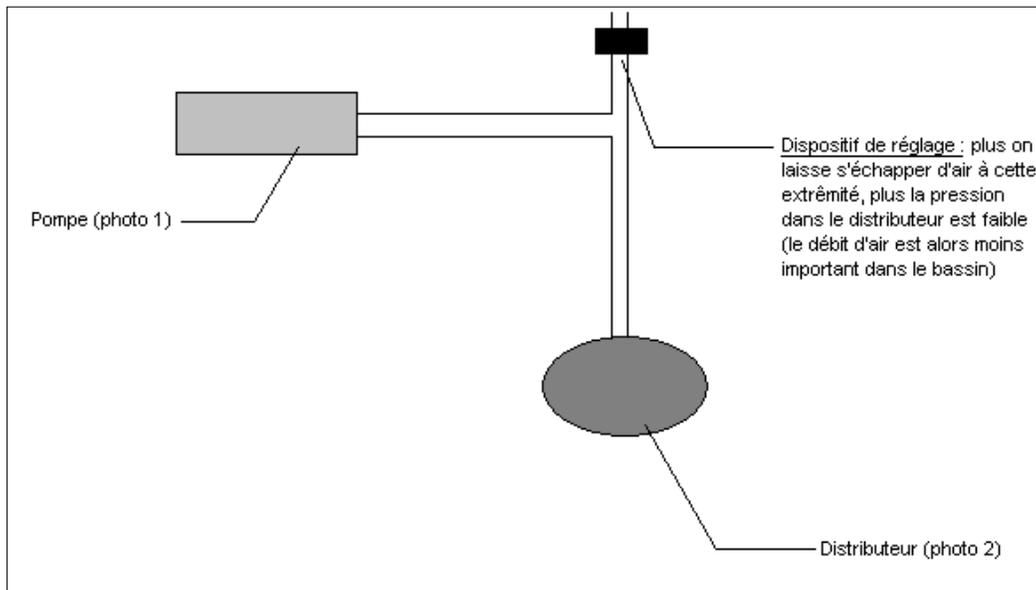


Schéma de principe

2.La pompe :

La pompe utilisée avait un débit d'air de 43 litres par minute :



Photo 1 : Pompe de l'aérateur à fines bulles

3.Le distributeur :



Photo 2 : Distributeur de l'aérateur à fines bulles

Coefficient de traînée C_x d'une sphère

D'après le site Internet du Groupe d'Experts pour les Programmes Scolaires

1. Forces exercées par un fluide sur un corps en mouvement.

Un corps solide, en mouvement de translation dans un fluide, est soumis à des forces, réparties en surface, dont les valeurs et distributions dépendent du fluide, de son état physique, de la vitesse relative, et bien sûr de la forme du corps et de la rugosité de sa surface.

La somme de ces forces peut être décomposée en une composante dirigée en sens inverse de la vitesse, appelée *résistance* ou *traînée*, et une composante perpendiculaire appelée *portance* en aérodynamique.

Pour effectuer l'étude expérimentale des forces aérodynamiques, le corps est placé dans la "veine" d'une soufflerie où il est maintenu par des systèmes qui permettent de mesurer la traînée et la portance en fonction de la vitesse de l'air pour une orientation choisie du corps. Dans le cas des forces hydrodynamiques, on utilise de préférence le déplacement du corps dans un bassin de grande longueur en le suspendant à une potence mobile. Dans les deux cas, c'est la vitesse relative du corps par rapport au fluide qui est le paramètre important. Dans ce qui suit, nous nous limiterons à l'étude de la traînée.

Expérimentalement, on constate l'existence de deux régimes particuliers :

1) Aux faibles vitesses, l'écoulement du fluide autour du corps est laminaire, c'est-à-dire sans turbulences. Le fluide possède une vitesse locale, égale à celle du corps à la surface de celui-ci, et décroissant régulièrement en fonction de son éloignement du corps. Les "couches" de fluide glissent les unes sur les autres, avec frottement interne ; c'est le phénomène de viscosité; l'effet résultant sur le corps de ces forces de frottement internes le freine et donne la traînée. Pour caractériser cette propriété du fluide, on définit un *coefficient de viscosité*, coefficient qui dépend de façon notable de la température (voir plus bas). Dans ces situations, on peut admettre que la traînée, dirigée en sens inverse de la vitesse, lui est *proportionnelle*.

2) Un autre régime se rencontre pour des vitesses relatives nettement plus élevées ; le corps "pousse" violemment le fluide devant lui et il se forme à l'arrière un sillage avec turbulences où le fluide est partiellement entraîné avec le corps solide. Expérimentalement, on constate qu'il existe toute une plage de vitesse pour laquelle la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Dans ce régime, c'est la mise en mouvement du fluide par le corps, donc son inertie, qui prédomine dans l'effet de traînée.

Entre ces deux régimes, il existe toute une gamme de vitesses intermédiaires pour lesquelles les deux propriétés, viscosité et inertie du fluide, jouent un rôle, et la relation traînée-vitesse n'y possède pas d'expression simple.

2. Coefficient de traînée en régime laminaire

Rappelons la définition du coefficient de viscosité h d'un fluide. Lorsque deux couches de fluide voisines, glissant l'une sur l'autre suivant l'axe x , sont animées de vitesses différentes, la force de frottement, en module, peut dans de nombreux cas être modélisée par l'expression suivante :

$$F = hS \left| \frac{\partial V_x}{\partial z} \right|$$

où S représente la surface de contact des couches, $\frac{\partial V_x}{\partial z}$ le gradient de vitesse perpendiculaire à la direction locale de l'écoulement. Cette expression peut être considérée comme une définition du coefficient de viscosité. La pertinence de la modélisation résulte, comme toujours, d'une comparaison avec l'expérience.

Dans le cas d'une sphère de rayon r se déplaçant à faible vitesse V dans un fluide, on peut démontrer, à partir des équations de l'hydrodynamique, que la traînée est donné par une formule due à Stokes :

$$T = 6\pi r h V \quad (1)$$

Le facteur 6π est propre à la sphère, mais la structure du terme est générale : dans la mesure où la traînée, qui est une force, est proportionnelle à la vitesse et à la viscosité (dont la dimension est celle d'une pression multipliée par un temps), elle doit être également proportionnelle à une longueur (caractéristique de l'objet).

La viscosité d'un fluide dépend de sa température (cf. tableau 1 et 2). Mais alors que la viscosité d'un liquide, en général, diminue lorsque la température augmente (penser à de l'huile dans une poêle que l'on chauffe), celle d'un gaz croît avec la température. Cette différence de comportement tient au rôle des interactions. Dans le cas d'un liquide, les molécules sont liées les unes aux autres, et la force qu'une couche de fluide exerce sur sa voisine sera d'autant plus faible que les molécules peuvent bouger facilement : ce mouvement est facilité lorsque la température augmente, d'où diminution de la viscosité. Dans un gaz, les interactions sont souvent négligeables et l'action d'une couche de gaz sur une voisine est directement reliée à la vitesse moyenne des molécules ; une théorie simple conduit à une viscosité proportionnelle à la racine carrée de la température absolue ; l'expérience donne une variation plus importante, en T^α avec α de l'ordre de 0,8 pour l'air.

En ce qui concerne les effets de la pression, là aussi gaz et liquides ont des comportements différents : une augmentation de pression a tendance à empêcher le mouvement des molécules d'un liquide, donc à augmenter sa viscosité. En revanche la viscosité d'un gaz dépend très peu de la pression.

3. Coefficient de traînée à grande vitesse

Lorsqu'un objet se déplace à grande vitesse dans un fluide de masse volumique r , il met le fluide en mouvement dans son sillage. L'énergie ainsi communiquée, égale à $1/2 r V^2$ par unité de volume, a pour effet de ralentir le mobile et doit donc intervenir dans l'expression de la force de frottement. La dimension latérale du sillage étant de l'ordre de grandeur de la surface apparente S présentée par le corps perpendiculairement à la vitesse (surface appelée « maître-couple »), on est amené à écrire pour la traînée une expression de la forme :

$$T = C_x \frac{1}{2} r V^2 S \quad (2)$$

L'intérêt de cette définition est que le coefficient C_x est un nombre sans dimension. Il dépend de la forme du corps et de son orientation par rapport à la direction de la vitesse, et il est mesuré en soufflerie. Les constructeurs automobiles cherchent évidemment à réduire la valeur de C_x , car en réduisant la traînée, on réduit la consommation du véhicule.

4. Quelques évaluations numériques

Pour une chute dans du glycérol pur à 25°C, la formule de Stokes est valable pour des billes (du verre au plomb) de rayon inférieur à 2 mm environ.

Pour une chute dans de l'eau pure, on obtient une traînée en v^2 pour un rayon de bille supérieur à 1 mm environ.

Choisir des billes de 2 à 4 mm de diamètre doit permettre de mettre en évidence les deux régimes

5. Références

- R.Comelet, Mécanique expérimentale des fluides, tome II, Masson (1963).
- J.P. Faroux, J. Renault. Mécanique des fluides et ondes mécaniques, Dunod (1999).

Divers

Bibliographie

Voici la liste des ouvrages ou publications utilisés lors de mes recherches au cours de ce TIPE

- [1] H.DIRNBOCK (Université de Klagenfurt) & H.STACHEL (Université Technologique de Vienne) : *The Development of the Oloid – Journal for Geometry and Graphics – Volume 1, n°2, 105-118 – Juillet 1997*
- [2] P.SCHATZ : *Rhythmusforschung und Technik – Verlag Freies Geistesleben – Stuttgart – 1975*
- [3] P.SCHATZ : *Deutsches Reichspatent Nr 589 452 in der allgemeinen Getriebeklasse (Brevet International) – 1933*
- [4] B.BUSER, M.HONEGGER & E.PROTZEN : *Vorschläge zur weiteren Erforschung der Oloid-Technik – Basel – Novembre 1999*
- [5] T.WARKEN & E.SCHOMER : *Rolling Rigid Objects – Max Planck Institut für Informatik*
- [6] S.RAVIER & M.RIGAUT : *Mécanique des fluides – Ecole Normale Supérieure de Lyon (Sciences de la matière) – Janvier 2000*
- [7] W.D MACMILLAN : *Dynamics of Rigid Bodies – chapitre VIII, pages 257 à 287 – Dover Publication, New York – 1960*
- [8] *Sculptures réelles et virtuelles – Pour la science – Numéro 269*
- [9] *Les stations d'épuration Oloïde – OLOID AG – 2000*
- [10] *L'Oloïde – OLOID AG – 2000*

Crédits

DOCUMENT 1 : Mélangeur de type Inversina	Mikaël FREYCHET – Bâle – Août 2002
DOCUMENT 2 : Le cube inversible	Mikaël FREYCHET – Bâle – Août 2002
DOCUMENT 3 : Modélisation de l'Oloïde	Mikaël FREYCHET – Août 2002
DOCUMENT 4 : Modélisation de l'Oloïde	Mikaël FREYCHET – Août 2002
DOCUMENT 5 : Installation de compostage	OLOID AG
DOCUMENT 6 : Site de «Petite Camargue»	OLOID AG
DOCUMENT 7 : Etang d'oxydation à Muenchen	OLOID AG
DOCUMENT 8 : Site de lagunage de Kallental	OLOID AG
DOCUMENT 9 : Zoo de Bochum	OLOID AG
DOCUMENT 10 : Elevage porcin de Hellbuehl	OLOID AG
DOCUMENT 11 : Bassin – Oloïde à l'arrêt	Mikaël FREYCHET – Février 2003
DOCUMENT 12 : Bassin – Oloïde en marche	Mikaël FREYCHET – Février 2003
DOCUMENT 13 : Bassin – Vue de haut	Mikaël FREYCHET – Février 2003
DOCUMENT 14 : Trajectoire hélicoïdale	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
DOCUMENT 15 : Aérateur à fines bulles	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
DOCUMENT 16 : Plaque utilisée pour mesurer r	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
DOCUMENT 17 : Distributeur non gonflé	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003

DOCUMENT 18 : Distributeur gonflé	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
DOCUMENT 19 : Arrêt de l'aérateur à fines bulles	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
DOCUMENT 20 : Sonde de vitesse à hélice	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
Annexe 01 : Le Cube Inversible	Mikaël FREYCHET – Bâle – Août 2002
Annexe 02 : Le mouvement sur un plan de l'Oloïde	Mikaël FREYCHET – Bâle – Août 2002
Annexe 03 : Modélisation de l'Oloïde par Maple	Mikaël FREYCHET – Juillet 2002
Annexe 04 : Le mouvement de l'Oloïde	Mikaël FREYCHET – Bâle – Août 2002
Annexe 05 : Matériel utilisé lors de la réalisation du protocole expérimental	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
Annexe 06 : Caractéristiques de l'Oloïde 200A	OLOID AG
Annexe 07 : Fonctionnement de l'aérateur	Mikaël FREYCHET – Bâle – Février 2003
Annexe 08 : Coefficient de traînée d'une sphère	Groupe d'Experts pour les Programmes Scolaires

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier :

- Joël HONEGGER, pour m'avoir fait découvrir l'Oloïde
- Max HONEGGER, pour son accueil à Bâle
- La société OLOID AG de m'avoir accueilli en août 2002 puis en février 2003
- Philippe SECHET (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels – ENS Hydraulique et Mécanique de Grenoble) pour ses conseils
- Paul SCHATZ pour son invention

