



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti

Tesi di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA MECCANICA ENERGIA E
AERONAUTICA

**STUDY OF DRAG REDUCTION USING
SUPERHYDROPHOBIC SURFACES**

Relatore : Prof. Alessandro Bottaro

Correlatore : Prof. Nicolas Mazellier

Tesi di Laurea di :
Adelphe Yousseu

Anno Accademico 2014-2015

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à un environnement scientifique et humain particulièrement agréable. Aussi, il me semble naturel d'associer à ce travail les différents protagonistes, collaborateurs et proches, grâce à qui j'ai passé un peu plus de neuf mois formidables.

Je tiens à remercier en premier lieu les professeurs Nicolas Mazellier et Alessandro Bottaro, qui ont encadré mon travail depuis mon arrivée comme stagiaire au laboratoire et jusqu'à la fin de ma thèse, me permettant de le mener à bien. Je leur dois énormément sur le plan scientifique, et j'ai vraiment apprécié le suivi assidu et particulièrement humain qu'ils ont assuré à mon travail, tout en me confiant au quotidien la liberté nécessaire à tout bon travail de recherche ! Je leur suis extrêmement reconnaissant de m'avoir exprimé tout au long de la thèse leur grand enthousiasme, même lorsque les expériences ne donnaient rien, me permettant ainsi de rebondir sur ces échecs passagers. Je les remercie également pour les bonnes relations que nous avons entretenues pendant ces 9 mois avec le prof Nicolas et depuis plus de deux ans avec le prof Alessandro.

Qui dit thèse expérimentale dit dispositifs expérimentaux... Je remercie Stéphane Loyer, sans qui ce travail n'aurait pas été possible, et qui m'a permis de jouer avec des dispositifs de qualité. Merci aussi pour votre disponibilité infinie.

Un grand merci à mon camarade de classe Alessandro Bacigalupo avec qui j'ai passé des journées de buching mémorable (examen d'aérodynamique et turbulence), mais aussi pauses-café, goûters, et grandes discussions de fin de journée au cours desquelles le monde se refait...

Je remercie vivement mes proches, famille et amis, qui m'ont toujours soutenu au cours de la thèse, bien que se demandant parfois si c'était bien vrai que je passais mes journées à jeter des cailloux dans l'eau...

Mon dernier remerciement, et non le moindre, s'adresse à Lucrece Vitale, dont la confiance et le soutien quotidien (bien que tu en avais besoin plus que moi) m'ont encore plus que tout le reste permis de garder ma motivation à chaque instant... Un grand MERCI à toi femme exceptionnelle !

Enfin ce dédie ce travail à mon fils, mon petit bout d'homme Noah Anael en qui j'ai trouvé la force pendant ces les moments difficiles et vers qui je me retourne toujours quand le découragement veut avoir raison de moi et quand j'ai besoin d'énergie pour persévérer.

" Là ou s'abbat le découragement s'élève la victoire du persévérant "

Table des matières

1	Introduction aux surfaces super-hydrophobes	13
2	Mouillage et dynamique des liquides aux interfaces	17
2.1	Mouillage statique sur une surface lisse et homogène	17
2.1.1	superficie de séparation	17
2.1.2	Tension superficielle	18
2.1.3	Angle de contact statique	20
2.2	Mouillage sur une surface rugueuse	22
2.2.1	Le modèle de Wenzel	23
2.2.2	Le modèle de Cassie-Baxter (Etat Fakir)	24
2.3	Hystéresis de l'angle de contact	28
2.4	Angle d'inclinaison (Roll of angle ou Tilt angle)	30
2.5	Dynamique des liquides aux interfaces	30
3	Force de Trainée sur une sphère	35
3.1	Rappel : Coefficient de traînée d'une sphère solide	35
3.2	Décomposition de la traînée totale	40
3.3	Trainée de frottement sur une sphère.	41
4	Dispositif expérimental et opérations préliminaires	47
4.1	Dispositif expérimental	47
4.1.1	Test et réglages	48
4.2	Opérations préliminaires	50
4.2.1	Caractérisation des sphères	50
4.2.2	Caractérisation des fluides	54
4.3	Revêtement des sphères	56
4.3.1	Ultra Ever Dry " toujours sec"	56
4.3.2	Méthodes et protocoles de revêtement	58

5	Mesures, Post-traitement des données recueillies dans l'eau	61
5.1	Etalonnage de l'eau	61
5.2	Traitement des données des sphères non revêtues	63
5.2.1	Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre non revêtues dans l'eau	63
5.2.2	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 10mm dans l'eau	69
5.2.3	Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans l'eau	72
5.2.4	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 8mm dans l'eau	77
5.2.5	Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre non revêtues dans l'eau	81
5.2.6	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 5mm dans l'eau	86
5.3	Traitement des données des sphères revêtues dans l'eau	89
5.3.1	Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre revêtues dans l'eau	89
5.3.2	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère revêtue de 10mm dans l'eau	95
5.3.3	Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans l'eau	98
5.3.4	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère de 8mm revêtue dans l'eau	103
5.3.5	Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre revêtues dans l'eau	106
5.3.6	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère revêtue de 5mm dans l'eau	110
6	Mesures, Post-traitement des données recueillies dans la glycérine	115
6.1	Etalonnage de la glycérine	115
6.2	Traitement des données des sphères non revêtues	117
6.2.1	Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre non revêtues dans la glycérine	117
6.2.2	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 10mm dans la glycérine	123

6.2.3	Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans la glycérine	126
6.2.4	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 8mm dans l'eau	131
6.2.5	Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre non revêtues dans la glycérine	135
6.2.6	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 5mm dans la glycérine	140
6.3	Traitement des données des sphères revêtues dans la glycérine	143
6.3.1	Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre revêtues dans la glycérine	143
6.3.2	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère revêtue de 10mm dans la glycérine	149
6.3.3	Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans la glycérine	152
6.3.4	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère de 8mm revêtue dans la glycérine	157
6.3.5	Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre revêtues dans la glycérine	160
6.3.6	Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère revêtue de 5mm dans la glycérine	164
7	Analyse des résultats et discussion	169
7.1	Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans l'eau. . .	169
7.1.1	Résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans l'eau.	169
7.1.2	Analyse des résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans l'eau.	179
7.2	Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans la glycérine.	185
7.3	Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans la glycérine.	185
7.3.1	Résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans la glycérine.	185
7.3.2	Analyse des résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans la glycérine.	194
8	Conclusion et perspectives	201

Résumé

Riassunto

In un materiale, le proprietà di superficie sono strettamente legate sia alla chimica che alla topografia alla micro e nano scala. Mentre per le superficie prodotte con metodi convenzionali presentano una scabrosità distribuita in modo casuale, che rende difficile ridurre l'attrito e l'usura, si è scoperto recentemente che molte superfici biologiche di tipo biologiche di tipo funzionale hanno una rugosità strutturata in gerarchie complesse, che ne determina le proprietà. Ad esempio le foglie di alcune piante, prima fra tutte quelle del loto, grazie ad una struttura siffatta risultano dotate di eccezionali proprietà superidrofobiche. Prendendo ispirazione dalla natura, la creazione di asperità micro-e-nano-metriche sulle superfici viene sempre più spesso consapevolmente utilizzata per modificare in modo controllato le caratteristiche delle superficie stesse.

Lo scopo di questa tesi è di vedere l'effetto di un rivestimento superidrofobico sulla resistenza idrodinamica, in pratica si tratta di una misura indiretta della resistenza, quello che si andrà effettivamente a valutare è la velocità terminale delle sfere in caduta libera. Nella fase terminale, l'oggetto è sottoposto alle sole forze di gravità, galleggiabilità e appunto resistenza.

Il rivestimento che è stato utilizzato si chiama "Ultra Ever Dry". L'applicazione del rivestimento sulle sfere fa sì che divengono superidrofobiche ricoprendosi di una sottile strato d'aria, è proprio lo strato d'aria che impedisce alle gocce di liquido nel nostro caso acqua e glicerolo di attaccarsi al supporto, questo è possibile aumentando l'angolo di contatto statico. In effetti è il valore dell'angolo di contatto statico il parametro principale che ci permette di classificare le superficie in base alla loro natura (idrofilicità e idrofobicità). Mentre l'angolo di contatto fornisce un'informazione sull'equilibrio statico delle superficie, in molti casi di interesse, è importante che il liquido riesca a scorrere via velocemente. E' quindi utile considerare un ulteriore fattore quando si tratta di superidrofobicità : l'angolo di rotolamento che può essere definito come l'angolo minimo di cui la superficie deve essere inclinata perché la goccia sia in grado di mettersi in moto. Quest'angolo di rotolamento è legato alla cosiddetta isteresi dell'angolo di

contatto a sua volta definita come la differenza fra l'angolo di contatto sul retro e quello nella posizione frontale su una superficie inclinata.

$$\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$$

Per avere quindi la massima mobilità, bisogna contemporaneamente massimizzare l'angolo di contatto e minimizzare la sua isteresi. Dal punto di vista pratico si può progressivamente ridurre la superficie intervallandola con fessure vuote di dimensioni micrometriche. In questo modo la linea di contatto tocca le superficie solo sulle punte delle colonne solide. Esiste tuttavia un limite fisico, dal momento che esiste una pressione statica massima che può essere sostenuta dai pilastri d'aria oltre laquale l'aria penetra all'interno delle cavità aderendo così intimamente alle asperità della superficie solida impedendo la mobilità.

Analizziamo ora il caso maggiormente realistico di una goccia depositata su superficie orizzontale piana e ruvida. In questo caso sulla superficie, che continueremo a supporre piana in senso macroscopico, possono essere presenti difformità e difetti di vario tipo, chimici o fisici, sia prodotti artificialmente al fine di modificarne la bagnabilità (e quindi dotati di una certa regolarità), sia casuali o intrinseci alla struttura microscopica del materiale usato. In un primo momento manteniamo l'ipotesi di superficie composta da un unico materiale. Occorre in questo caso introdurre una distinzione nel concetto di area superficiale. Si definisce area superficiale proiettata (o apparente, o geometrica) la proiezione della goccia sul piano geometrico della superficie, ovvero l'area che macroscopicamente appare essere l'area bagnata dalla goccia. Si definisce area superficiale vera l'area della superficie concreta realmente bagnata dalla goccia, tenendo conto delle sue sue rugosità. Il parametro che descrive il sistema è il rapporto tra l'area superficiale vera e quella proiettata, indicato con r .

Nel modello di Wenzel la goccia di liquido è in contatto con tutti i punti della superficie sottostante, ovvero l'area superficiale vera è maggiore di quella apparente, ovvero $r > 1$. In questo caso l'angolo di contatto statico è dato dalla legge di Wenzel

$$\cos \theta_w = r \cdot \cos \theta$$

dove θ è l'angolo di Young e θ_r è l'angolo di Wenzel (o angolo apparente). Nel modello di Cassie-Baxter, invece, la goccia di liquido non bagna tutta la superficie sottostante, ma si adagia solo sui picchi delle rugosità

superficiali, lasciando intrappolata dell'aria tra di essi. Di fatto, la superficie si comporta come una superficie eterogenea composta dal suo materiale e da aria.

Il modello di Cassie Baxter vale infatti anche per superfici eterogenee composte da più materiali e prive di rugosità. Nel caso di più componenti, l'angolo di contatto statico è dato dalla equazione di Cassie :

$$\cos \theta_c = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2$$

dove θ_c è l'angolo di contatto statico del liquido sulla superficie eterogenea composta dalla frazione f_1 di un gruppo chimico e f_2 dell'altro $f_1 + f_2 = 1$.

una volta studiato il moto di un liquido su una superficie superidrofobica, ci si può giustamente chiedere cosa avviene se invece un solido con superficie superidrofobica si trova in movimento in un liquido. Non si tratta naturalmente di una pura curiosità scientifica : dispositivi di questo tipo potrebbero portare ad un enorme risparmio energetico anche se in questo caso l'attrito risultasse ridotto. Questa ipotesi non trova però conferme sperimentale come nei nostri esperimenti.

infatti abbiamo utilizzati le sfere di 10mm, 8mm, e 5mm di diametro e 2 fluidi(acqua e glicerolo) avendo così la possibilità di lavorare con diversi numeri di Reynolds (0.3192 - 15000).

Nell'acqua, pur non essendo in regime turbolento non si è verificato l'effetto desiderato, il rivestimento riduce la velocità terminale e quindi aumenta l'attrito.

Nel glicerolo invece, si è osservato un aumento della velocità terminale di circa 10%

gli attuali coating superidrofobici sembrano aumentare piuttosto che ridurre l'attrito dell'oggetto nel liquido. Risultano maggiormente efficaci rivestimenti semplicemente idrofobici, ad ulteriore riprova che la chiave del problema risiede nello strato d'aria che si forma nelle due interfacce solido-liquido in condizioni di superidrofobicità.

Inanzi tutto va considerato che nel caso di oggetto in moto in un liquido, l'attrito è fondamentale fra i vari strati liquido-liquido che scivolano l'uno sull'altro più che tra solido-liquido (in regime laminare, il primo strato di liquido aderisce infatti alla superficie solida e si muove in modo solidale con esso).

In secondo luogo va analizzato attentamente il ruolo dello strato d'aria

di cui sopra. Considerando che la viscosità dell'aria è minore di quella dell'acqua, si potrebbe ritenere infatti che lo strato di piccole bolle d'aria possa giocare un ruolo fondamentale nella riduzione dell'attrito tra liquido e superficie superidrofobiche. Questo è vero nel caso di moto laminare (dove lo sottile strato d'aria funziona come lubrificante), ma non nel moto turbolento, dove, paradossalmente la superidrofobicità sembra essere controproducente. La resistenza delle bolle d'aria è infatti dovuta a due componenti, l'attrito e la pressione. Il fatto che la viscosità dell'aria sia minore di quella dell'acqua può diminuire la prima componente, ma rischia di aumentare la seconda fino al punto che nei moti di tipo turbolento la presenza di uno strato di bolle d'aria legato allo stato di superidrofobicità può risultare addirittura di impedimento al moto. D'altra parte, la relazione di Laplace relativa alla variazione della pressione all'interfaccia dovuta alla curvatura della superficie prova che quanto più è piccolo il raggio di curvatura delle bolle e tanto maggiore sarà la differenza di pressione sulle 2 facce della superficie di separazione tra i due fluidi (aria/acqua). Tanto per dare un'idea, si è calcolato che il raggio 0,10mm di una bollicina di spumante implica una differenza di pressione di 1,5 KPa sufficiente a sostenere una colonna d'acqua di 15cm.

Non è quindi del tutto peregrina l'ipotesi che l'aria funzioni non più da lubrificante ma da sostegno e conseguente smorzatore del moto nel fluido.

Chapitre 1

Introduction aux surfaces super-hydrophobes

Qu'il s'agisse de limiter la buée, le givre ou le dépôt de salissures, nombreuses sont les situations pratiques où l'on cherche à empêcher les gouttes d'adhérer à leur support. La seule nature chimique des surfaces est impuissante, en effet, les propriétés d'une superficie sont liées à la chimie et à la topographie à la micro et nano-échelle.

Tandis que les surfaces produites par des procédés classiques ont une rugosité distribuée de façon aléatoire, qui rend difficile réduire le frottement et l'usure, de nombreuses surfaces biologiques présentent une rugosité structurée et complexe qui détermine leurs propriétés. Par exemple, les feuilles de certaines plantes, notamment celle du lotus, grâce à une telle structure sont équipés d'exceptionnelles propriétés super-hydrophobes. Tirant son inspiration de la nature, la création de micro et nano-rugosité sur les surfaces est de plus en plus souvent utilisées pour modifier de façon contrôlée les caractéristiques de ces surfaces. Cette technique peut rendre les systèmes tribologiques (science du frottement, de la lubrification et de l'usure) plus efficaces et respectueux de l'environnement. Il suffit de penser, par exemple, comme l'accumulation de micro-organismes, plantes, etc, sur la coque des navires, crée une augmentation de 40% de la consommation de carburant, ou encore l'accumulation des micro organismes dans les conduits et tubes des équipements industriels crée une baisse considérable de l'efficacité. Très souvent, on applique des produits chimiques dont l'action peut être d'une efficacité limitée et nocive pour l'environnement. Un raisonnement similaire s'applique pour les méthodes de protection contre le gel des pales d'éoliennes, des ailes aérodynamiques et câbles électriques. Tout ceci peut être dorénavant efficacement remplacé par des

surfaces micro-structurées qui empêcheront simplement à la la glace et aux micro organismes de s'y attacher grâce à une couche d'air qui se forme à l'interface.

Cette thèse s'intéresse à l'influence potentielle des effets de surface sur les écoulements hydrodynamiques. Derrière cette affirmation sibylline se cache en réalité un véritable pari, voir un déficit. En effet une analyse dimensionnelle des contributions qui interviennent dans un écoulement laisse peu d'espoir à la pertinence de tels effets car les contraintes inertielles au sein d'un écoulement sont bien supérieures aux contraintes prenant leur origines aux surfaces ainsi qu'aux contraintes visqueuses, il suffit de remarquer que le nombre de Reynolds (Re) et le nombre de Weber (We) sont très supérieur à l'unité dans les écoulements macroscopiques.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\gamma}$$

où

$\nu = \mu/\rho$ est la viscosité cinématique en $[m^2/s]$

μ ou η est la viscosité dynamique en $[Kg/(m \cdot s)]$

ρ est la densité encore appelé masse volumique en $[Kg/m^3]$

γ est la tension de surface du liquide en $[N/m]$

U est la vitesse de l'écoulement en $[m/s]$

L est la taille de l'écoulement en $[m]$

Comment et pourquoi alors, peut-on espérer mettre en évidence des effets de surface dans les écoulements ? Une partie de la réponse réside dans le développement récent des surfaces aux qualités exceptionnelles dite super-hydrophobe qui pourrait permettre d'explorer les phénomènes de couplage

entre hydrodynamique et capillarité. Un second élément de réponse est que les géométries d'écoulement faisant intervenir des lignes de contact triples Liquide-Solide-Gas peuvent aider à coupler les effets de surface et les écoulements

Dans cette thèse, nous avons exploré différents phénomènes mettant en évidence de tels couplage. En particulier, l'impact des sphères solides dans deux liquides (Eau et glycérine) pouvant balayer une large gamme de nombre de Reynolds a été étudié, en faisant intervenir les sphères de différents diamètres et différentes mouillabilités obtenues à travers un revêtement super-hydrophobe (Ultra Ever Dry). Nous nous sommes intéressé plus précisément à la vitesse terminale pour chaque diamètre et type de superficie, pouvant ainsi apprécier la réduction ou l'augmentation de la trainée.

Si les chutes dans l'eau n'ont pas permis d'avoir les effets recherchés (Réduction de la trainée), nous verrons que les effets spectaculaires des propriétés de mouillage des surfaces ont été mis en évidence dans la glycérine. Nous montrons ainsi que contrairement à ce que prédit l'analyse prématurée des nombres de Reynolds et de Weber, les propriétés de surface peuvent avoir une influence majeure sur l'hydrodynamique. Avant d'exposer les études réalisées, nous rappellerons dans un premier temps quelques notions de base concernant le phénomène de mouillage dans ses aspects statiques et dynamiques (tension de surface, angle de contact, hysteresis d'angle de contact,...), ensuite nous allons décrire brièvement le dispositif expérimental, puis nous allons caractériser nos sphères, nos fluides, présenter le revêtement utilisé et décrire notre protocole de revêtement, enfin nous présenterons les résultats obtenus après post-traitement à travers le programme Matlab. Après nous terminerons notre manuscrit avec la rubrique Conclusion et perspectives.

Chapitre 2

Mouillage et dynamique des liquides aux interfaces

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques notions élémentaires du mouillage dans ses aspects statique et dynamiques et feront quelques considérations sur la dynamique des liquides aux interfaces.

2.1 Mouillage statique sur une surface lisse et homogène

2.1.1 superficie de séparation

Introduisons pour commencer le concept de superficie (ou interface) de séparation, très utile chaque fois qu'il ya séparation nette entre deux diverses phases (solide-liquide, solide-gaz ou liquide-gaz). D'après la théorie moléculaire, nous savons que chaque molécule de liquide ou de gaz est attirée par les molécules voisines par des interactions moléculaires décrites par un potentiel type Lenard-Jones. Les molécules éloignées de la superficie sont attirées dans toutes les directions par les molécules voisines et possèdent une certaine énergie de liaison ; les molécules proches de la superficie ressentent seulement de l'attraction vers l'intérieur du liquide et ont par conséquent une énergie de liaison plus grande.

La superficie de séparation est donc la zone frontalière où se vérifie une telle asymétrie. Il s'agit ici d'une superficie dans le sens physique et non géométrique, puisqu'il s'agit d'un volume extrêmement petit ayant pour épaisseur quelques Angstrom et d'aire égale à celle du liquide ou du gaz.

Pour réduire donc sa propre énergie, le système (liquide et surface) à

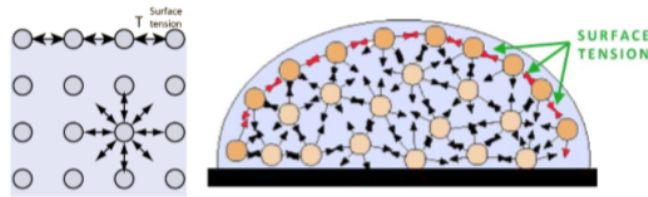


FIGURE 2.1 – (Gauche) : interaction moléculaire dans un liquide et sur la surface, (Droite) : représentation des interactions dans une goutte, en rouge celle qui crée la tension de surface

tendance à minimiser la superficie de séparation entre ses phases et face à des petites contraintes, il rentre à la position d'équilibre.

2.1.2 Tension superficielle

Nous pouvons à présent introduire le concept de tension de surface. En particulier, il est possible de donner trois différentes définitions : mécanique, fluide-dynamique, thermodynamique.

mécanique : la tension de surface γ est l'énergie nécessaire pour augmenter la superficie de séparation d'une unité :

$$\gamma = \frac{dW}{dA} \quad (2.1)$$

thermodynamique : la tension de surface est la fonction définie comme la dérivée partiel de l'énergie interne par rapport à la surface :

$$\gamma = \left. \frac{\partial U}{\partial A} \right|_{T,n} \quad (2.2)$$

fluidodynamique : on appelle tension de surface γ la "force spécifique linéaire qui maintient uni les bord d'une éventuelle coupe pratiquée sur le fluide" :

$$\gamma = \frac{dF_{\perp}}{dl} \quad (2.3)$$

Cette dernière définition est celle qui met le mieux en évidence la signification physique de tension superficielle : c'est l'agent physique qui maintient tendu la surface et lui donne des propriétés élastiques.

D'après les deux premières définitions, on note comme les forces capillaires sont proportionnelles à l'aire et sont comparables aux forces d'inerties

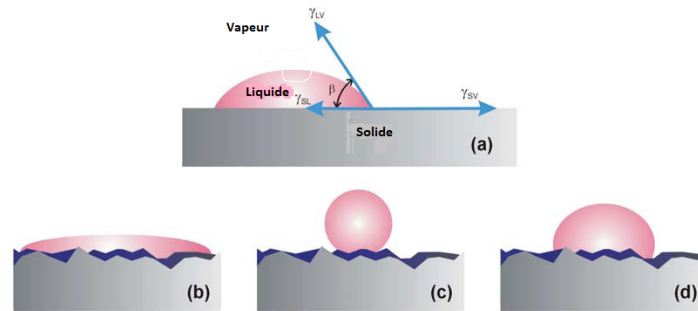


FIGURE 2.2 – tension de surface

et de volume quand le rapport superficie/volume assume des valeurs élevées, comme dans le cas d'une goutte de quelques millimètres de diamètre. La micro-fluidique étudie les fluides dans la zone où les forces capillaires ont une importance prédominante. Dans le cas de la gravité, le paramètre qui quantifie ce changement de régime est la longueur capillaire K^{-1} défini à partir de la pression hydrostatique et de la loi de Laplace.

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

$$p_L = \frac{\gamma}{h} \quad (2.5)$$

$$k^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot g}} \quad (2.6)$$

avec :

h : hauteur

γ : tension superficielle

g : accélération gravitationnelle

ρ : masse volumique

Lorsque les dimensions caractéristiques du système (comme le diamètre de la goutte) sont plus petites que la longueur capillaire, les forces capillaires prédominent et les forces gravitationnelles peuvent être négligées (la pesanteur est négligée).

Comme on peut l'observer dans la nature, comme le montre de nombreuses études, la forme d'une goutte, l'aire de la surface mouillée et l'angle de contact dépendent du type et du volume du liquide, des caractéristiques de la vapeur qui entoure la goutte et la superficie, du matériel (ou des matériels) qui constitue la superficie, et de la morphologie microscopique de la superficie (rugosité, impureté, présence et alignement des fibres, etc.). Dans

ce paragraphe, nous analyserons les forces qui agissent sur une goutte avec comme hypothèse idéale une surface plane, horizontale, parfaitement lisse et homogène. Notre système est composé de trois phases : liquide (la goutte), solide (la surface plane sur la quelle repose la goutte), vapeur (l'air); et d'autant de superficie de séparation : liquide-solide, solide-vapeur, liquide-vapeur. Sur chaque superficie de séparation agissent les relatives tensions de surface à savoir :

- γ_{sv} qui est la tension superficielle associée à l'interface solide-vapeur.
- γ_{sl} qui est la tension superficielle associé à l'interface solide-liquide.
- γ_{lv} qui est la tension superficielle associé à l'interface liquide-vapeur.

La γ_{sv} a tendance à étendre la goutte de liquide sur la surface du solide ; la γ_{sl} et la γ_{lv} , plus précisément leur résultante à un effet contraire à celui de γ_{sv} .

L'équation bilan des tensions de surface nous donne :

$$\gamma_{sv} - \gamma_{lv} = \gamma_{sl} \quad (2.7)$$

Nous pouvons avoir deux situations possibles :

- la tension superficielle du liquide est inférieur à la tension superficielle du support. Le liquide a une tendance naturelle à s'étendre sur le support Fig. 2.2b
- la tension superficielle du liquide est supérieur à la tension superficielle du support. Le liquide n'aura aucune tendance à mouiller le support et la zone de contact entre le liquide et le support sera très petit. Fig. 2.2c

2.1.3 Angle de contact statique

Considérant les hypothèse faites plus haut, lorsqu'une goutte est déposé sur un substrat solide idéalement lisse et homogène, deux situations peuvent se produire :

- ✓ le liquide s'étale complètement sur la surface solide et forme une couche qui sépare les phases solide-liquide ; on parle dans ce cas de mouillage total ;
- ✓ la goutte ne s'étale pas et forme à l'équilibre une calotte sphérique, laquelle se raccorde au substrat avec un angle θ_0 Formule appelé angle de contact statique ; cette situation est appelée mouillage partiel.

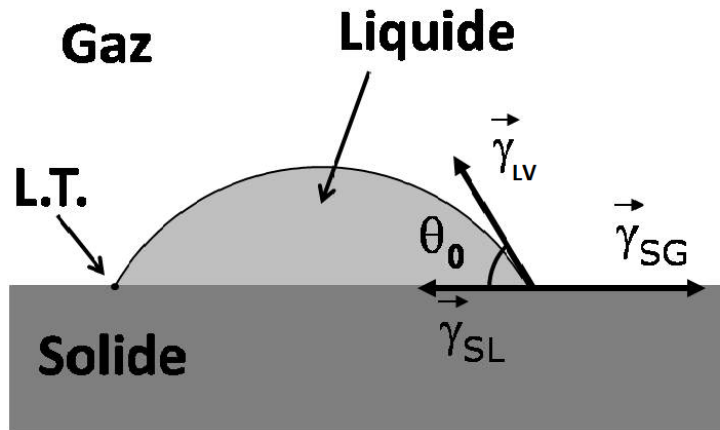


FIGURE 2.3 – goutte liquide posée sur un substrat liquide en mouillage partiel : la valeur de l'angle de contact statique θ_0 est imposée par l'équilibre des forces capillaires linéiques qui s'appliquent sur la ligne de contact triple (L.T)

Lors du mouillage partiel, on appelle ligne triple l'intersection des interfaces solide-liquide, liquide-gaz et solide-gaz sur laquelle agissent en même temps la tension superficielle solide-liquide, dirigée vers l'intérieur de la goutte ; la tension superficielle solide-gaz, dirigée vers l'extérieur de la goutte ; la tension superficielle liquide-air γ_{lv} , dirigée comme la tangente à la goutte au point de contact.

En introduisant les tensions superficielles, γ_{sl} , γ_{sv} , γ_{lv} , associées à leur respectives interfaces, homogènes à une énergie par unité d'aire, ou encore une force par unité de longueur, on peut définir le paramètre d'étalement S :

$$S = \gamma_{sv} - (\gamma_{sl} + \gamma_{lv}) \quad (2.8)$$

Lorsque S est positif, il est énergétiquement plus favorable pour un système de créer deux interfaces, solide-liquide et liquide-gaz, et éviter ainsi la formation d'une interface solide-gaz. Dans le cas contraire, la minimisation de l'énergie de surface entraîne l'étalement partiel du liquide et impose la valeur de l'angle de contact statique.

Cette situation de mouillage partiel nous permet de relier l'angle de contact statique avec les tensions superficielles qui est selon la loi de Young :

$$\cos(\theta_0) = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2.9)$$

En combinant les équations les deux équations ci-dessus, on obtient la relation entre le paramètre d'étalement et l'angle de contact statique

$$S = \gamma_{lv}(\cos\theta_0 - 1) \quad (2.10)$$

L'angle de contact lui-même est une quantité souvent mal définie : pour un système donnée, on observe en général toute une plage d'angles possibles. Cet effet appelé hystérésis de l'angle de contact, est responsable de l'accrochage des gouttes sur les vitres ou les pare-brises ; si sa cause est connue (il est lié à la présence de défauts physiques ou chimiques à la surface du solide), on ne sait pas en général prédire quantitativement sa valeur, pour une surface d'une défektivité donnée. Or dans bien des applications pratiques on cherchera à réaliser des matériaux non-adhésifs pour l'eau. On peut y parvenir par deux moyens différents : soit en supprimant l'hystérésis, soit en réduisant le contact solide/liquide, c'est à dire en augmentant l'angle de contact. La première solution est en général inapplicable car elle requiert la réalisation de substrats presque parfaits, qui au-delà des difficultés à les élaborer ne conservent que peu de temps leur perfection. Et il se trouve (comme l'a montré Zisman dans les années 60) que la chimie seule ne permet pas de réaliser la seconde : on ne connaît pas de matériau pour lequel l'angle de contact de l'eau dépasse 125° . De ce point de vue, on comprend l'importance des observations anciennes de Wenzel et Cassie, qui ont les premiers suggéré qu'un matériau hydrophobe voit cette hydrophobie renforcée par la présence d'une micro-texture. Cet effet est très remarquable, en effet d'un angle d'environ 120° quand le matériau est plan, on passe à un angle pouvant dépasser 170° quand il est rugueux et une goutte, dès lors, n'adhère pratiquement plus à son support.

2.2 Mouillage sur une surface rugueuse

Analysons maintenant le cas (plus réel) d'une goutte déposé sur une surface horizontale, plane et rugueuse. Dans un premier moment, maintenons encore l'hypothèse de superficie composée d'un unique matériel. On appelle surface apparente la projection de la goutte sur le plan géométrique de la superficie, c'est à dire la portion qui semble être mouillée par la goutte, de même, on appelle surface vraie la superficie réelle concrètement mouillée par la goutte en tenant compte des rugosités. Le paramètre qui décrit le système est le rapport entre la surface vraie et la surface apparente. Ce paramètre est indiqué par r .

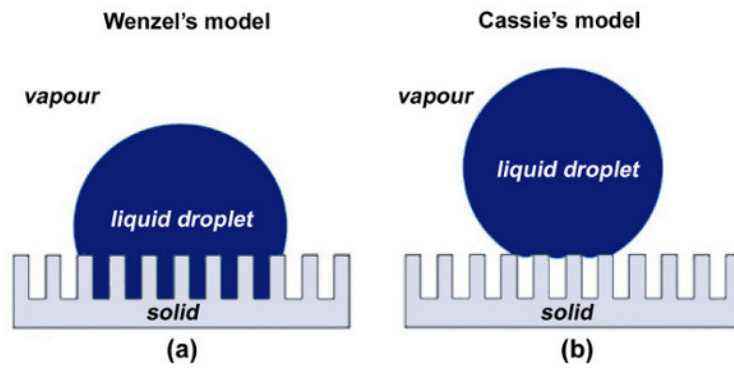


FIGURE 2.4 – (a) : modèle de Wenzel, la goutte envahit complètement les anfractuosités, (b) : modèle de Cassie-Baxter, la goutte touche seulement les extrémités de la superficie

Deux modèles permettent d'évaluer l'angle de contact statique que l'on peut observer sur une surface rugueuse : le modèle de Wenzel (Fig2.4a) qui considère une surface rugueuse imprégnée par le liquide, et le modèle de Cassie-Baxter (Fig2.4b), qui modélise un substrat rugueux lorsque le fluide n'envahit pas la rugosité et repose sur une surface composite gaz-solide.

2.2.1 Le modèle de Wenzel

Dans le modèle de Wenzel, la goutte de liquide est en contact avec tous les points de la superficie sur laquelle elle repose, donc la goutte envahit complètement les anfractuosités de la surface. Pour une telle surface, le rapport r décrit plus haut sera supérieur à l'unité ($r > 1$). En supposant que la goutte est très grande par rapport à l'échelle de la rugosité, et qu'elle se raccorde localement au solide avec un angle de contact statique θ_0 donné par la relation de Young, on peut évaluer l'angle de contact apparent θ_0^* bilan d'énergies de surface.

Considérons pour cela un petit déplacement dx de la ligne de contact parallèlement à la surface solide (Fig2.5) ; celui-ci est associé à une variation à une variation d'énergie du système dE , qui s'exprime comme

$$dE_{wenzel} = [\gamma_{lv} \cos \theta_0^* + r(\gamma_{sl} - \gamma_{sg})]Ldx \quad (2.11)$$

où L est la longueur totale de la triple ligne. La condition d'équilibre impose la minimisation de l'énergie E (soit $dE = 0$), ce qui conduit à l'expression

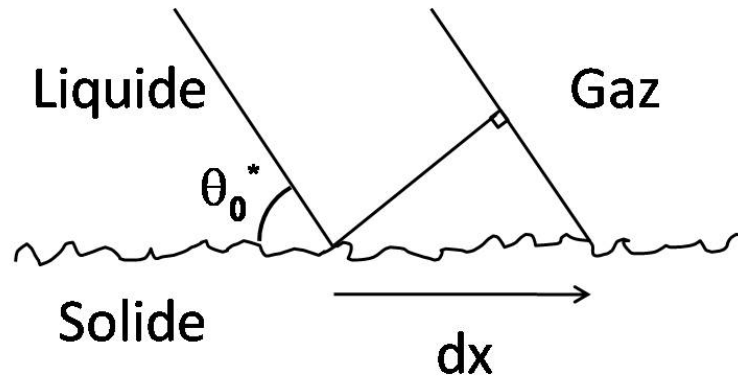


FIGURE 2.5 – modèle de Wenzel : angle de contact apparent θ_0^* sur une surface solide rugueuse.

$$\cos\theta_0^* = r\cos\theta_0 \quad (2.12)$$

Cette relation rend bien compte de l'amplification, par la rugosité, du comportement substrat vis à vis du liquide : si le substrat est chimiquement mouillant ($\theta_0 < 90^\circ$), alors $\theta_0^* < \theta_0$; au contraire, pour une surface chimiquement hydrophobe, l'angle de contact apparent est augmenté par la présence de la rugosité car $\theta_0^* > \theta_0$. En revanche, on remarque que le modèle de Wenzel autorise la transition vers la mouillabilité nulle $\theta_0^* = 180^\circ$ lorsque r est suffisamment élevé.

En pratique, cette transition n'a jamais pu être observée : au-delà, d'une certaine valeur de r^* , des poches de gaz sont piégées dans les rugosités de la surface et le liquide n'épouse plus les contours de la rugosité. Par conséquent, le modèle de Wenzel ne peut plus s'appliquer, et l'on doit plutôt considérer la situation où le liquide repose sur une surface composite solide-gaz.

2.2.2 Le modèle de Cassie-Baxter (Etat Fakir)

Dans le modèle de Cassie-Baxter, la goutte de liquide ne mouille pas tout le support, elle repose seulement sur les sommets des rugosités laissant ainsi une couche d'air piégée entre le support et la goutte. De ce fait, la surface se comporte comme une surface hétérogène composée du matériau et d'air.

Le modèle de Cassie-Baxter dans sa forme originale, considère le mouillage statique d'une goutte liquide qui repose sur une surface lisse hétérogène, formée de deux types de substrats, caractérisés par les angles de contact

statiques θ_1 et θ_2 , et qui occupent des fractions de surface ϕ_1 et ϕ_2 .

Nous pouvons à nouveau évaluer la variation de l'énergie de surface associée à un petit déplacement dx de la ligne triple sur le substrat (Fig2.6), où cette fois la goutte est considérée comme très grande devant la taille des domaines de type 1 ou 2.

$$dE = [\gamma_{lv} \cos^* \theta_0 + \phi_1(\gamma_{sl} - \gamma_{sv})_1 + \phi_2(\gamma_{sl} - \gamma_{sv})_2] L dx \quad (2.13)$$

La minimisation de l'énergie de surface à l'équilibre, associé aux équilibres de la loi de Young sur les deux types de substrats, permet de connaître la valeur de l'angle de contact apparent θ_0^* :

$$\cos \theta_0^* = \phi_1 \cos \theta_1 + \phi_2 \cos \theta_2 \quad (2.14)$$

Cette approche du mouillage peut être appliquée aux surfaces rugueuses hydrophobes non intrudées par le liquides. Dans cet état appelé état « Fakir », le liquide repose sur un substrat composite formé par les sommets de la rugosité et les poches de gaz piégées. En choisissant le solide comme substrat 1 et le gaz (air) comme substrat 2, nous avons $\theta_1 = \theta_0$ et $\theta_2 = 180^\circ$. Pour la situation modèle, caractérisée par la planéité des sommets des aspérités solides et des interfaces liquide-gaz, on peut ré-écrire les équations 1.12 et 1.13 en introduisant la fraction solide ϕ_s , définie comme la fraction de la surface totale de l'interface posée sur le solide ($\phi_s = \phi_1 = 1 - \phi_2 < 1$) :

$$dE_{fakir} = [\gamma \cos \theta_0^* + \phi_s(\gamma_{sl} - \gamma_{sv}) + (1 - \phi_s)\gamma_{lv}] L dx \quad (2.15)$$

$$\cos \theta_0^* = \phi_s(\cos \theta_0 + 1) - 1 \quad (2.16)$$

L'expression 1.15 indique que la présence de gaz piégé permet à l'angle de contact apparent de se rapprocher de la valeur limite 180° seulement si θ_0 s'approche de 180° , ce qui n'est pas réalisable en pratique, ou si la fraction du solide en contact ϕ_s tend vers 0. En outre, ce modèle indique que la limite du mouillage nul ($\theta_0 = 180^\circ$) ne peut être atteinte, puisqu'il faudrait pour cela que le liquide repose sur une fraction solide nulle.

Jusqu'à présent, nous nous sommes placés dans l'hypothèse de planéité de l'interface liquide-gaz sous-tendue par les sommets de la rugosité. En réalité, la courbure des ménisques dépend de la différence de pression $\Delta P = P_l - P_v$ qui règne entre le liquide et le gaz, de part et d'autre de l'interface liquide-gaz (figure2.7). En effet, le rayon de courbure moyen R_m du

ménisque, donné par l'équation de Laplace, est inversement proportionnel à cette différence de pression :

$$\Delta P = P_l - P_v \approx \frac{\gamma}{R_m} \quad (2.17)$$

On voit d'après cette équation qu'une augmentation de la pression dans le liquide conduit à une diminution du rayon de courbure du ménisque. Si R_m devient de l'ordre de l'écartement $\Lambda - \lambda$ entre les sommets de la rugosité, alors il devient possible pour l'interface liquide d'avancer dans les creux de la surface, et de mouiller complètement celle-ci. En tenant compte de la condition de raccordement de l'interface sur les parois solides, on obtient pour la pression d'intrusion

$$\Delta P_{intrusion} \approx -\frac{2\gamma \cos \theta_0}{\Lambda - \lambda} \quad (2.18)$$

où $\theta_0 > 90^\circ$, ce qui correspond bien à $\Delta P_{intrusion} > 0$.

Pour une valeur de $\Lambda - \lambda = 1\mu m$, avec $\gamma_{eau} \approx 70mN/m$ et $\theta_0 \approx 120^\circ$, la pression d'intrusion est de l'ordre de 10^5 Pascals, ce qui correspond à la pression hydrostatique qui règne dans l'eau à une profondeur H d'une dizaine de mètres ou à une pression hydrodynamique exercée par un écoulement d'eau de vitesse $U \approx 10m/s$.

En pratique, lors de l'utilisation de surfaces superhydrophobes, on peut déterminer si les rugosités sont ou non intrudées par le liquide par une simple observation de la surface. En effet, dans l'état fakir (état de Cassie), le liquide repose en partie sur une interface liquide-gaz qui réfléchit les rayons lumineux, ce qui permet d'observer un effet miroir sur la surface (figure 1.5), contrairement au cas où le liquide envahit complètement les anfractuosités de la surface (état de Wenzel).

Des deux interprétations (Wenzel et Cassie-Baxter), quelle est la bonne ? Sur une surface peu rugueuse et modérément hydrophobe, l'énergie associée à l'interface solide-liquide (Fig2.4a) n'est pas trop élevée, alors que la création de poches d'air sous la goutte (Fig2.4b) le serait plus : on attend alors un comportement de Wenzel. Au contraire, pour un solide très rugueux, il devient énergétiquement plus favorable de créer des poches d'air et l'état « fakir » est privilégié. Ce cas correspond à la plupart des matériaux naturels super-hydrophobes, qui sont décorés de plusieurs structures emboîtées qui leur confèrent une grande rugosité. En revanche, les

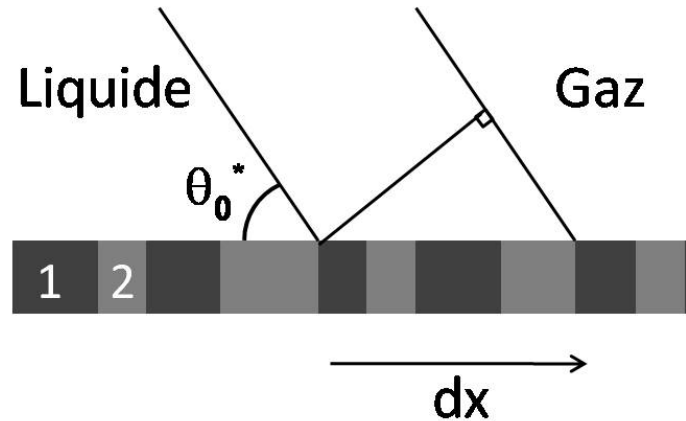


FIGURE 2.6 – modèle de Cassie-Baxter : angle de contact apparent θ_0^* sur une surface lisse composite.

techniques de microfabrication issues de la microélectronique engendrent le plus souvent des textures simples qui seront souvent peu rugueuses, et donc susceptibles de favoriser plutôt l'état de Wenzel.

Quelle importance, se dira-t-on, puisque ces deux états réalisent des angles de contact élevés ? Certes, mais ils s'opposent sur un point crucial en pratique : leur hystérésis est extrêmement différente. On peut prouver cela en préparant une goutte d'eau de deux manières. D'après une expérience trouve dans la littérature, en déposant la goutte sur un support, on observe un angle de 160° et une hystérésis de l'ordre de 5° , particulièrement faible donc. Ceci est à première vue paradoxal : l'hystérésis est associée à la présence de défauts, et ces surfaces en sont constellées. Mais une faible hystérésis se comprend bien dans l'état « fakir » : la goutte repose principalement sur de l'air, qui « gomme » les défauts de la surface solide. D'un point de vue pratique, et dans la perspective d'un faible accrochage, on voit donc que l'état fakir permet de gagner sur les deux tableaux : non seulement l'angle de contact est élevé, mais l'hystérésis responsable de l'accrochage est fortement réduite, inférieure même à celle mesurée sur les solides plans les plus idéaux.

Condensons à présent sur le même support une vapeur sursaturée, jusqu'à obtenir une goutte d'eau macroscopique. Quoique le système soit le même, on observe un angle de contact un peu plus faible. Mais surtout, l'hystérésis associée à cet état est amplifiée de façon spectaculaire : au lieu de 5° , on trouve alors typiquement 100° ! On peut interpréter cette expérience en supposant que d'avoir infusé les molécules a permis le remplissage des microtextures : c'est un état de Wenzel que l'on a ainsi construit. S'il

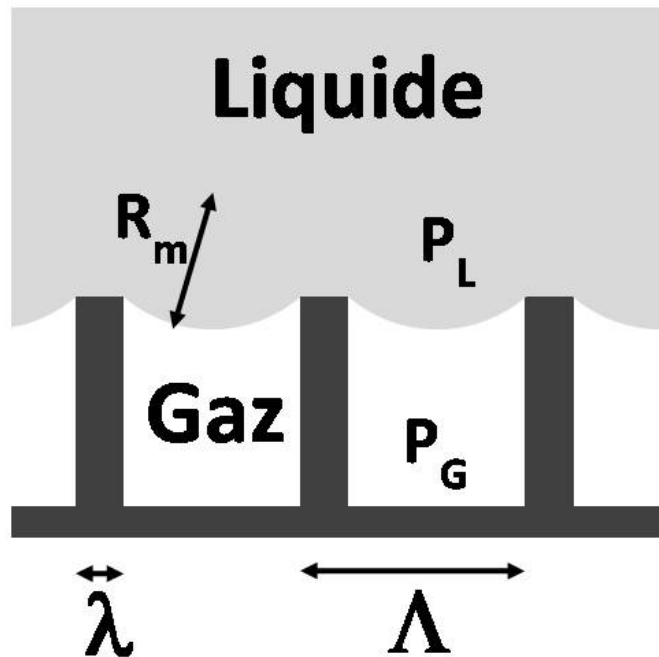


FIGURE 2.7 – Courbure de l’interface liquide-gaz sur une surface fakir

reste bien super-hydrophobe (comme l’atteste la valeur élevée de l’angle d’avancée), il est aussi « collant » : en se résorbant, une goutte laisse les microtextures pleines d’eau ; la ligne va s’accrocher sur ces « défauts » mouillants, ce qui engendre un angle de reculée très faible. On voit ainsi que les deux états super-hydrophobes se distinguent très nettement l’un de l’autre : si l’état fakir a bien la propriété de très faible adhésion attendue, il n’en est pas de même pour l’état de Wenzel, qui favorise l’accrochage des gouttes. On voit donc que pour le praticien, il ne s’agit pas seulement de microtexturer une surface hydrophobe ; il faut aussi que son design favorise un état fakir « robuste », peu susceptible de transiter vers un état de Wenzel. L’idée principale est d’amplifier la rugosité : alors, l’état de Wenzel devient thermodynamiquement très défavorable – et la plupart des substrats naturels super-hydrophobes (feuilles de tulipe, de ginkgo biloba, de drosera ou de lotus ; pattes d’araignées d’eau ou plumes de canard) ont bien une rugosité très élevée.

2.3 Hystéresis de l’angle de contact

La dynamique de la goutte sur une surface lisse peut être observée de deux manières : la première consiste à l’inclinaison de la surface ; la

deuxième consiste à pomper le liquide dans la goutte ou aspirer le liquide de la goutte en gardant la surface horizontal. Si la surface était parfaitement lisse et homogène comme dans le cas idéal, la goutte glisserait comme un corps rigide en absence de force de frottement le long du plan incliné ; ou augmenterait ou réduirait son volume suite au pompage ou à l'aspiration (du liquide) sur le plan horizontale sans changer l'angle de contact. Tout ça évidemment en restant dans le même régime capillaire. Dans le cas de plan horizontale, même en changeant de régime capillaire, l'angle de contact resterait inchangé, bien que la forme de la goutte ait changé sous la force de gravité. Nous pouvons donc dire que pour les surfaces idéales et pour des gouttes très petites, l'angle de contact est toujours l'angle de contact statique défini par Young (1.9)

Dans la réalité, les défauts physiques ou chimiques de la surface impliquent l'existence d'une gamme d'angles de contact statiques « autorisés » autour de la valeur θ_0 comme conséquence de l'existence de plusieurs états d'équilibre qui vont d'un minimum θ_r à un maximum de θ_a . On dit que l'angle de contact dépend de la préparation de la surface. Par exemple, si l'on gonfle une goutte sur un substrat non idéal, l'angle de contact va augmenter jusqu'à atteindre la valeur maximale θ_a appelé angle d'avancée, sans que la ligne de contact triple ne se déplace. De la même manière, si l'on aspire le liquide présent dans la goutte, l'angle de contact va diminuer jusqu'à l'angle de recul θ_r avant que la ligne de contact ne se recule. Ce phénomène appelé hystérésis d'angle de contact peut être quantifié par la différence :

$$\Delta\theta = \theta_a - \theta_r \quad (2.19)$$

Pour les surfaces idéales, $\Delta\theta = 0$, pour les surfaces réelles, $\Delta\theta > 0$, car par définition $\theta_a > \theta_r$. Si $\Delta\theta$ assume de très grandes valeurs ($\theta_a \gg \theta_r$ et $\Delta\theta \approx \theta_a$), la goutte reste facilement accrochée à la surface : ce phénomène est appelé effet pétale de rose. Si $\Delta\theta$ assume de très basses valeurs ($\theta_a \approx \theta_r$ et $\Delta\theta \approx 0$) donc la goutte glisse facilement le long de la surface : ce phénomène est appelé effet lotus. Très souvent l'effet pétale de rose est associé au modèle de Wenzel et l'effet lotus est associé au modèle de Cassie-Baxter. En effet dans le cas de extreme de Cassie-Baxter, la goutte se comporte comme une sphère sur surface dure.

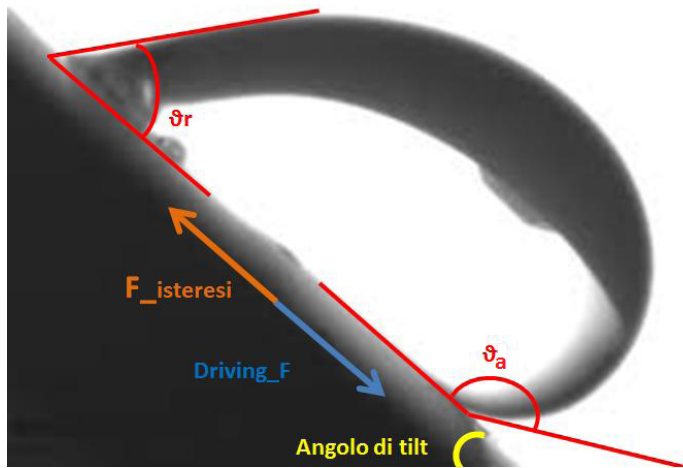


FIGURE 2.8 – l’hysteresis de l’angle de contact est un paramètre de type dynamique : il donne des informations sur la mobilité de la goutte sur une surface .

2.4 Angle d’inclinaison (Roll of angle ou Tilt angle)

Tandis que l’angle de contact donne des informations sur l’équilibre statique de la surface, dans plusieurs situations d’intérêt pratique, il serait important que le liquide puisse couler rapidement. Il est alors important de considérer un autre facteur quand il s’agit de la superhydrophobicité : l’angle de tilt (ou roll of angle), c’est à dire l’angle minimale dont doit être incliné la surface afin que le liquide se mette à rouler tout seul. Cette mesure peut aussi être utilisée pour la classification des surfaces, mais le résultat ne coïncide pas nécessairement avec celui obtenu en mesurant seulement l’angle de contact. Actuellement on parle de surface superhydrophobe quand l’angle de contact statique est autour de 150° et l’angle de tilt $< 10^\circ$. L’angle de tilt est lié à l’hystérésis de l’angle de contact défini plus haut. $\Delta\theta$ est causé par la non homogénéité du substrat qui tend à bloquer la partie antérieure de la goutte créant ainsi un gradient de courbure qui lui aussi conduit à un gradient de pression à l’interface. Pour avoir donc une facile mobilité, il faudrait en même temps maximiser l’angle de contact et minimiser son hystérésis.

2.5 Dynamique des liquides aux interfaces

Ces dernières années, cette problématique du lien entre les propriétés de surface et l’hydrodynamique a de fait connu un essor important. Dans

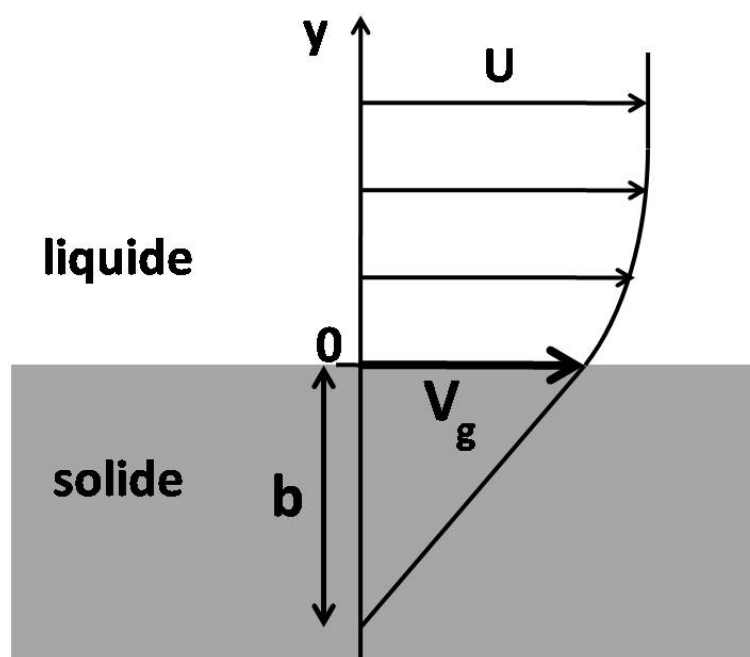


FIGURE 2.9 – Vitesse de glissement V_g et longueur de glissement b , lors de l'écoulement d'un liquide sur un solide.

ce contexte, de nombreuses études, tant expérimentales que théoriques ou numériques, se sont intéressées à la dynamique d'un liquide au voisinage d'une surface solide, et plus particulièrement à la friction du liquide sur la paroi. Pour quantifier ce phénomène, il est possible d'introduire une condition limite généralisée sous la forme d'un équilibre des contraintes tangentielles à la paroi : la somme de la force de frottement visqueux qu'applique le liquide sur le solide et de la force de friction appliquée par le solide sur le liquide est nulle, soit

$$\eta_l \cdot \frac{\partial \vec{V}_t}{\partial y} = \lambda_f \vec{V}_t(y=0) = \lambda_f \vec{V}_g \quad (2.20)$$

où λ_f est le coefficient de friction, avec V_t la vitesse tangentielle du fluide et y la direction perpendiculaire à la paroi. La vitesse tangentielle du liquide en $y = 0$ apparaît alors comme la vitesse de glissement du liquide à la paroi, notée V_g (Fig2.9). De manière équivalente, on peut également introduire la longueur de glissement b , définie comme la longueur de pénétration du profil de vitesse à l'intérieur de la paroi solide, ou encore la distance entre la paroi et le lieu où l'extrapolation linéaire du profil de vitesse s'annule (Fig2.9). Ceci revient alors à exprimer la condition limite sous la forme

$$\vec{V}_g = b \left(\frac{\partial \vec{V}_t}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2.21)$$

où l'on voit en combinant les équations 1.18 et 1.19 que la longueur b est liée au coefficient de friction λ_f par la relation

$$b = \frac{\eta_l}{\lambda_f} \quad (2.22)$$

L'hypothèse de non-glissement, dans laquelle on se place habituellement pour exprimer la condition limite à la paroi pour les écoulements macroscopiques de liquides visqueux, correspond à $V_g = 0$, soit une friction infinie ($\lambda_f \rightarrow \infty$) et une longueur de glissement nulle. Cette hypothèse, qui ne repose sur aucun fondement théorique, est bien vérifiée expérimentalement à l'échelle macroscopique. En revanche, aux échelles élémentaires, caractéristiques de la taille des molécules et des interactions entre le liquide et le solide, on peut s'attendre au glissement partiel du liquide sur la paroi, associé à une vitesse de glissement non nulle et un coefficient de friction fini. Ainsi, de nombreuses études de la condition limite à la paroi à l'échelle microscopique ont permis de montrer numériquement, mais aussi expérimentalement grâce à des dispositifs adaptés aux petites échelles, que l'hypothèse de non glissement peut être mise en défaut : alors que la longueur de glissement est nulle, ou du moins inférieure à quelques nanomètres, sur des substrats lisses hydrophiles des longueurs de glissement de quelques dizaines de nanomètres ont été mesurées sur des parois solides hydrophobes. Ces résultats indiquent donc qu'une modification de l'affinité du solide pour le liquide affecte la longueur de glissement à l'échelle nanométrique, ce qui est cohérent avec les échelles typiques mises en jeu.

Des mesures du glissement ont également été réalisées sur des surfaces superhydrophobes dans l'état fakir, comme les tapis de nanotubes fonctionnalisés de Joseph et Al, ou les surfaces lithographiées de Choi et Al. Dans ce cas, les mesures ont montré que l'effet d'une modification à l'échelle micrométrique de la structure de la surface se manifeste à la même échelle, et des longueurs de glissement de quelques dizaines de micromètres ont été rapportées. Ces observations ont pu être rationalisées en considérant que le glissement observé est un glissement « effectif » du liquide sur le solide [43–45] : alors que le glissement est très limité (b nanométrique) sur les sommets de la rugosité, les patches gazeux sur lesquels le liquide repose en

partie correspondent à des zones caractérisées par une friction quasi-nulle ($b \rightarrow \infty$). Ainsi, on peut considérer une paroi superhydrophobe comme intermédiaire, en termes de friction, entre une paroi solide et une interface liquide-gaz.

Pour une bulle de gaz de diamètre L dans un écoulement laminaire, l'équilibre des contraintes tangentielles à la paroi de la bulle s'exprime comme

$$\eta_l \left(\frac{\partial \vec{V}_t}{\partial y} \right)_{liq} = \eta_g \left(\frac{\partial \vec{V}_t}{\partial y} \right)_{gaz} \quad (2.23)$$

y étant toujours la direction perpendiculaire à l'interface liquide-gaz, et η_g la viscosité du gaz. Le membre de droite de l'équation 1.21 ci-dessus représente la contrainte visqueuse sur la paroi, associée au gradient de vitesse tangentielle dans le gaz, et évolue typiquement comme $\eta_g \cdot V_g/L$. De ce fait, l'équilibre des contraintes implique

$$\eta_l \left(\frac{\partial \vec{V}_t}{\partial y} \right)_{liq} \approx \eta_g \left(\frac{\vec{V}_g}{L} \right)_{gaz} \quad (2.24)$$

En utilisant la relation 1.19, l'équation ci-dessus donne

$$b \approx L \frac{\eta_l}{\eta_g} \quad (2.25)$$

Ainsi, la longueur de glissement que l'on peut associer au frottement d'un liquide sur une bulle est de l'ordre de grandeur de la taille de la bulle, ce qui suggère un effet d'ordre un sur la force de traînée lorsqu'on compare une bulle et une sphère solide. Cette estimation grossière concernant la réduction de traînée attendue est tout à fait cohérente avec les mesures de traînées sur des bulles, qui montrent que la force qui s'applique sur une bulle dans un écoulement est réduite de plusieurs dizaines de pourcents par rapport à une sphère solide de même taille. En lien plus direct avec l'idée d'une « bulle indéformable », on peut citer les travaux de Fukuda et Al, Sanders et Al. Ceux-ci ont tiré profit de la faible friction du liquide sur l'interface liquide-gaz pour réduire la force de traînée qui s'applique sur des objets solides immergés (modèles de coques de bateaux, plaques) : en injectant continuellement de l'air au voisinage des surfaces placées dans l'écoulement, ils ont pu produire le long des parois solides un film gazeux

d'épaisseur millimétrique et ainsi diminuer considérablement la friction du liquide sur l'objet immergé.

On peut comparer maintenant les échelles typiques mises en jeu dans l'écoulement aux longueurs de glissement que l'on peut attendre sur une paroi solide lisse (au maximum quelques dizaines de nanomètres) ou sur une paroi superhydrophobe (quelques dizaines de microns).

Dans un écoulement macroscopique, la taille typique sur laquelle la friction intervient est donnée par l'épaisseur δ de la couche limite qui se développe le long des parois solides. Cette épaisseur varie typiquement avec la vitesse U et la taille typique L de l'écoulement comme

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\eta \cdot L}{\rho \cdot U}} \quad (2.26)$$

Ainsi, pour une vitesse d'écoulement de quelques mètres par seconde et un objet de taille centimétrique, la comparaison de b et $\delta \approx 100 \mu m$ montre que dans le cas d'une surface superhydrophobe, la longueur de glissement n'est plus complètement négligeable devant la taille de la couche limite. Ceci permet donc d'espérer une réduction sensible de la friction du liquide sur les parois solides d'un objet superhydrophobe. Le raisonnement qui vient d'être conduit considère des écoulements laminaires au voisinage de la paroi solide. On peut également se demander si la transition vers le régime turbulent, qui se produit au-delà d'un nombre de Reynolds critique, est affectée par la présence de gaz lorsque la paroi solide est partiellement couverte de gaz.

Aussi, nous allons dans notre travail, essayer de mettre en évidence l'effet de la couche de gaz qui entoure un objet superhydrophobe à l'immersion, sur la force de traînée.

Chapitre 3

Force de Trainée sur une sphère

Afin de quantifier l'effet éventuel sur le coefficient de traînée de la présence d'une couche de gaz autour des surfaces superhydrophobes, nous nous sommes intéressés à un objet de géométrie modèle : la sphère.

On cherchera donc à mettre en évidence un effet superhydrophobe sur la traînée hydrodynamique. L'expérience proposée est une mesure indirecte de la traînée induite par un objet de forme sphérique en chute libre. Dans la phase terminale, l'objet est soumis aux seules forces de gravité, de flottabilité et de traînée.

3.1 Rappel : Coefficient de traînée d'une sphère solide

Lorsqu'un objet solide est placé dans un écoulement laminaire, de vitesse uniforme U loin en amont de l'objet, le fluide exerce sur cet objet une force F dans la direction de l'écoulement, appelée force de traînée. Le coefficient de traînée C_d de l'objet est un nombre sans dimension défini comme

$$C_d = \frac{2D}{\rho S_{\perp} U^2} \quad (3.1)$$

où ρ est la masse volumique du liquide et S_{\perp} l'aire de la section transverse de l'objet dans l'écoulement. Pour une sphère de rayon a , $S_{\perp} = \pi a^2$. Ce coefficient dépend fortement de la géométrie de l'objet et du nombre de Reynolds associé à l'écoulement autour de l'objet de dimension typique L ($L = 2a$ pour la sphère)

$$Re = \frac{\rho U L}{\eta_L} = \frac{U L}{\nu} \quad (3.2)$$

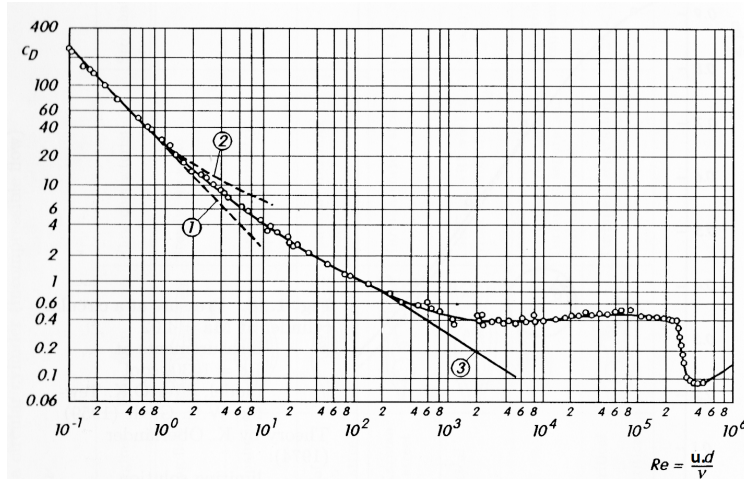


FIGURE 3.1 – Evolution du coefficient de traînée d’une sphère avec le nombre de Reynolds

L’évolution du coefficient de traînée d’une sphère en fonction du nombre de Reynolds est présentée sur la figure 3.1 où on y distingue plusieurs domaines.

En régime visqueux ($Re < 1$), la force de traînée qui s’applique sur une sphère est donnée par la loi de Stokes :

$$C_d = \frac{24}{Re}$$

$$C_d = \frac{2D}{\rho S_{\perp} U^2} = \frac{24}{Re}$$

$$\frac{24\eta_L}{\rho U 2a} = \frac{2D}{\rho U^2 \pi a^2}$$

$$D = \frac{24\eta_L U^2 \rho \pi a^2}{4\rho U a}$$

$$D = 6\pi\eta_L U a_{eff} \quad (3.3)$$

ce qui implique pour C_d une décroissance en $1/Re$.

lorsque Re augmente, cette décroissance ralentit et C_d atteint la valeur d’environ 0,4 pour $Re \approx 1000$. Dans la gamme $Re = 10^3 - 2 \cdot 10^5$, C_d reste approximativement constant, jusqu’à ce que survienne la « crise de traînée » qui se traduit par une chute brutale du coefficient de traînée associée au recollement de la couche limite autour de la sphère pour $Re \approx 2 - 3 \cdot 10^5$.

Calcul théorique de l'influence de la couche d'air sur la traînée

Considérons le mouvement d'une sphère revêtue dans la phase terminale, donc il n'existe pas une accélération et l'objet est soumis aux seules forces de gravité, de flottabilité et de traînée (fig3.2).

l'équation du mouvement de la sphère est

$$\vec{D} + \vec{F}_b - \vec{P} = \vec{0}$$

considérons (comme en réalité) l'épaisseur de la couche d'air ($h \ll a$) très petite devant le rayon. La force due à l'action de la gravité est :

$$P = \rho_s v_s g + \rho_a v_a g$$

avec ρ_s = densité de la bille

$$v_s = \frac{4\pi a^3}{3} = \text{volume de la bille}$$

ρ_a = densité de la couche d'air qui entoure la bille

$$v_a = 4\pi a^2 \cdot h = \text{volume de la couche d'air}$$

on obtient

$$P = \frac{4\rho_s a^3 \pi g}{3} + 4\rho_a \pi a^2 h g$$

$$P = 4\pi a^2 g \left[\rho_s \frac{a}{3} + \rho_a h \right] \quad (3.4)$$

La force de flottabilité peut s'écrire comme

$$F_b = \rho v_p g + \rho v_a g$$

En remplaçant v_p et v_a par leurs expressions on trouve la force de flottabilité

$$F_b = 4\pi a^2 \rho g \left[\frac{a}{3} + h \right] \quad (3.5)$$

Reprenons notre équation du mouvement et remplaçons les forces présentes par leurs expressions, en supposant d'être en régime de Stokes (pour la traînée)

$$D + F_b - P = 0 \implies D + F_b = P$$

$$6\pi\eta_L U a_{eff} + 4\pi a^2 \rho g \left[\frac{a}{3} + h \right] = 4\pi a^2 g \left[\rho_s \frac{a}{3} + \rho_a h \right]$$

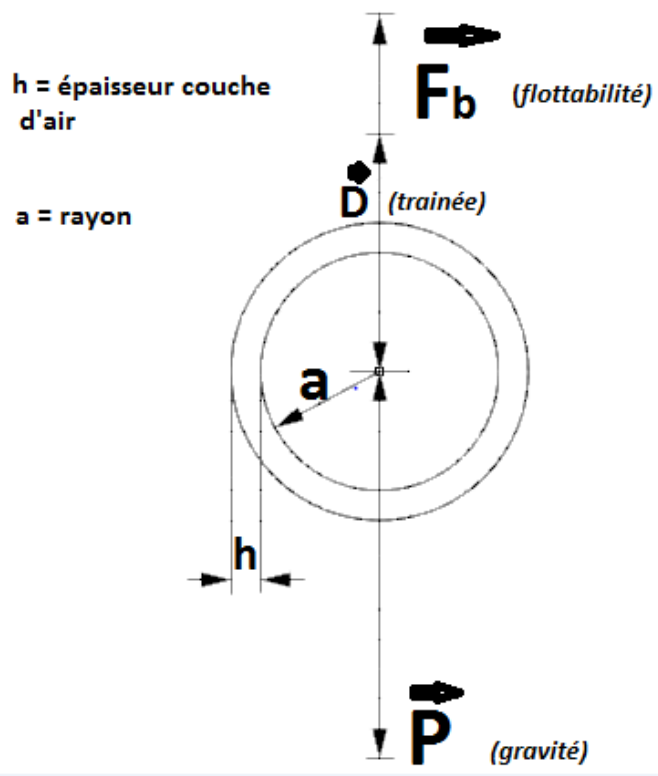


FIGURE 3.2 – forces présentes lors du mouvement de la bille dans la phase terminale

$$6\pi\eta_L U a_{eff} = 4\pi a^2 g \left[\frac{a}{3}(\rho_s - \rho) + h(\rho_a - \rho) \right]$$

$$6\pi\eta_L U a_{eff} = 4\pi a^2 g \left[\frac{a}{3}(\rho_s - \rho) - h\rho \right]$$

$$a_{eff} = \frac{4\pi a^2 g \left[\frac{a}{3}(\rho_s - \rho) - h\rho \right]}{6\pi\eta_L U}$$

$$a_{eff} = \frac{2a^2 g}{3\eta_L U} \left[\frac{a}{3}(\rho_s - \rho) - h\rho \right] \quad (3.6)$$

donc nous avons $a_{eff} = f(U, h, \rho_s)$, regardons comment il varie en fonction de ces paramètres.

$$da_{eff} = \frac{\partial a_{eff}}{\partial U} dU + \frac{\partial a_{eff}}{\partial \rho_s} d\rho_s + \frac{\partial a_{eff}}{\partial h} dh \quad (3.7)$$

La dérivé partiel de a_{eff} par rapport à U donne

$$\frac{\partial a_{eff}}{\partial U} = \frac{-3\eta_L 2a^2 g}{(3\eta_L U)^2} \left[(\rho_s - \rho) \frac{a}{3} - \rho h \right]$$

$$= \frac{-1}{U} \cdot \frac{2a^2 g}{3\eta_L U} \left[(\rho_s - \rho) \frac{a}{3} - \rho h \right]$$

$$\frac{\partial a_{eff}}{\partial U} = \frac{-a_{eff}}{U}$$

La dérivé partiel de a_{eff} par rapport à h donne

$$\frac{\partial a_{eff}}{\partial h} = \frac{-2\rho a^2 g}{3\eta_L U}$$

et celle de a_{eff} par rapport à ρ_s est

$$\frac{\partial a_{eff}}{\partial \rho_s} = \frac{2a^3 g}{9\eta_L U}$$

en remplaçant chaque terme par l'expression de la dérivé, nous obtenons

$$da_{eff} = \frac{-a_{eff}}{U} dU + \frac{2a^3 g}{9\eta_L U} d\rho_s + \frac{-2\rho a^2 g}{3\eta_L U} dh$$

à la fin nous obtenons

$$\frac{da_{eff}}{a_{eff}} = \frac{-dU}{U} + \frac{d\rho_s}{\rho_s - \rho(1 + \frac{3h}{a})} - \frac{dh}{(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)\frac{a}{3} - h} \quad (3.8)$$

3.2 Décomposition de la traînée totale

La force de traînée appliquée par un écoulement sur un objet immergé peut en réalité être décomposée en deux contributions principales, d'origines différentes : la traînée de forme D_{fo} et la traînée de frottement D_{fr} . La traînée de forme trouve son origine dans l'existence de contraintes normales de pression hydrodynamique qui s'appliquent sur la surface de l'objet, du fait de la condition de vitesse normale du fluide nulle sur la paroi solide ; on peut également voir comme origine de cette force la nécessité, pour les lignes de courant, de contourner l'objet qui constitue un obstacle au mouvement du fluide. Cette contribution est d'autant plus grande que la section transverse S_{\perp} de l'objet est importante, et peut s'écrire

$$D_{fo} = \frac{1}{2}\rho S_{\perp} \times C_{d,fo}(U) \times U^2 \quad (3.9)$$

où $C_{d,fo}(U)$ est de l'ordre de l'unité et dépend de la géométrie de l'objet immergé ; on reconnaît dans l'équation ci-dessus une pression hydrodynamique ρU^2 .

La traînée de frottement, quant à elle, est associée à la dissipation visqueuse qui se produit dans l'écoulement au voisinage du solide, elle-même liée aux gradients de vitesse perpendiculaires à la paroi ; en effet, à la condition de vitesse normale nulle sur les parois solides pour le fluide parfait s'ajoute la condition de vitesse tangentielle nulle lorsque le fluide est réel. Cette seconde condition impose l'existence d'une zone de transition, la couche limite, située entre l'objet (vitesse nulle à la paroi) et le lieu où, assez loin de part et d'autre de l'objet, on retrouve l'écoulement qui serait obtenu avec un fluide parfait. La couche limite est ainsi définie comme le lieu où intervient la dissipation visqueuse dans l'écoulement. La traînée de frottement est donc associée au transfert de quantité de mouvement entre les parois de l'objet et le fluide, et est d'autant plus importante que la surface latérale S_{\parallel} de l'objet est grande.

On peut raisonnablement penser que la traînée de forme n'est pas affectée par un revêtement superhydrophobe appliqué sur l'objet, puisque la modification de la section transverse associée à la présence du revêtement

est négligeable. En revanche, l'existence d'un film gazeux entre la paroi solide et le liquide environnant laisse espérer une modification de la condition limite de vitesse tangentielle sur le solide, d'où une éventuelle réduction de la traînée de frottement lorsqu'un tel traitement est appliqué.

Revenons sur les mesures de forces de traînées totales sur une sphère hydrophile et une sphère superhydrophobe entourée d'air, qui ont montré que la présence du gaz autour de la sphère ne modifie pas le coefficient de traînée de plus de 5/100 pour les nombre de Reynolds assez élevé ($Re \geq 10^4$). Ces résultats ne permettent pas de conclure quant à l'importance d'un effet du traitement superhydrophobe sur la seule traînée de frottement, puisqu'on ne connaît pas la part que celle-ci représente dans la force totale subie par la sphère : en effet, si la traînée de frottement ne représente par exemple que quelques pourcents de la traînée totale, alors une modification, même importante, de cette contribution peut n'engendrer qu'une variation de moins de 5/100 de la traînée totale, et ainsi passer inaperçue dans la mesure du coefficient de traînée. Par conséquent, il peut être intéressant d'évaluer la part représentée par la traînée de frottement dans la force de traînée totale subie par la sphère. Dans ce but, calculons l'expression de cette force de frottement.

3.3 Trainée de frottement sur une sphère.

On cherche ici à évaluer la traînée de frottement D_{fr} subie par une sphère de rayon a , lorsque celle-ci est immergée dans un écoulement de vitesse U , et dans le cas où la couche limite qui se développe le long de la paroi solide est laminaire. On définit ici l'abscisse curviligne $s(\phi, \psi)$ mesurée le long de la sphère, à une longitude ψ mesurée depuis le méridien amont de la sphère et à une latitude ϕ (voir schéma de la figure 3.3), soit :

$$s(\phi, \psi) = \psi a \cos \phi \quad (3.10)$$

On considère en premier lieu la composante selon l'axe x de la force de frottement visqueux subie par une « tranche » horizontale comprise entre les latitudes ϕ et $\phi + d\phi$. Compte-tenu des notations de la figure 3.3, celle-ci s'écrit

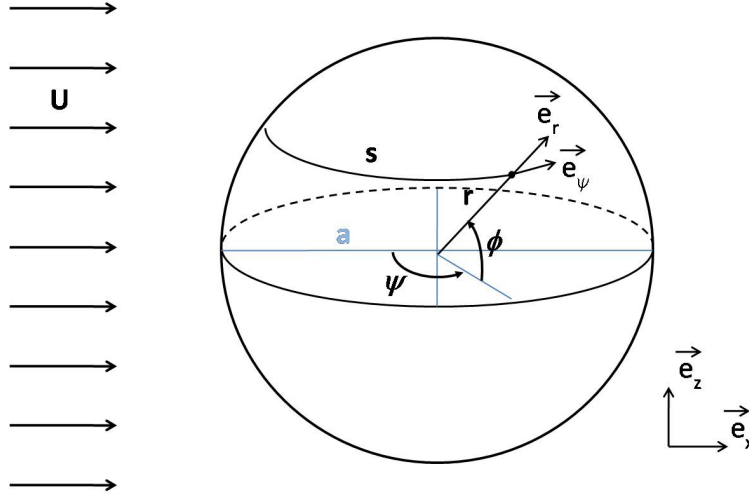


FIGURE 3.3 – Introduction des notations utilisées pour le calcul de la force de frottement visqueux qui s'exerce sur une sphère de rayon a , placée dans un écoulement de vitesse U .

$$dD_{fr} = a \cdot d\phi \int_{s=0}^{\pi a \cos \phi} \eta_L \frac{\partial U}{\partial r} \vec{e}_\psi \cdot \vec{e}_x ds \quad (3.11)$$

soit, après un changement de variable ($s \rightarrow \psi$)

$$dD_{fr} = a \cdot d\phi \int_{\psi=0}^{\pi} \eta_L \frac{\partial U}{\partial r} \vec{e}_\psi \cdot \vec{e}_x a \cos \phi d\psi. \quad (3.12)$$

On sait de plus que la couche limite est la zone d'épaisseur $\delta(\phi, \psi)$ qui connecte la paroi solide, où la vitesse du fluide est nulle, et l'écoulement de vitesse U ; le gradient de vitesse dans la couche limite peut donc être approximé par

$$\frac{\partial U}{\partial r} \approx \frac{U}{\delta} \quad (3.13)$$

D'autre part, lorsque l'écoulement dans la couche limite est laminaire, le transfert de quantité de mouvement entre la paroi et l'écoulement est diffusif, d'où l'expression de δ :

$$\delta(s, \phi) \approx \sqrt{\frac{\eta_L s}{\rho U}} = \sqrt{\frac{\eta_L \psi a \cos \phi}{\rho U}}. \quad (3.14)$$

En combinant les équations trois dernières équations ci-dessus, et en remarquant que $\vec{e}_\psi \cdot \vec{e}_x = \sin \psi$, on obtient pour dD_{fr}

$$dD_{fr} = \sqrt{\rho\eta_L a^3 U^3} \sqrt{\cos \phi} d\phi \times I_1 \quad (3.15)$$

où I_1 est l'intégrale définie par

$$I_1 = \int_{\psi=0}^{\pi} \frac{\sin \psi}{\sqrt{\psi}} d\psi \approx 1,79. \quad (3.16)$$

La force de frottement totale qui s'applique sur la sphère peut être évaluée en sommant dD_{fr} sur toutes les latitudes $\phi \in [-\pi/2; \pi/2]$:

$$D_{fr}(a, U) = 2 \int_{\phi=-\pi/2}^{\pi/2} dD_{fr} = 2I_1 I_2 \sqrt{\rho\eta_L a^3 U^3} \quad (3.17)$$

avec

$$I_2 = \int_{\phi=-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{\cos \phi} d\phi \approx 2,39 \quad (3.18)$$

On peut également exprimer $D_{fr}(a, U)$ de manière à faire apparaître la surface latérale de la sphère $S_{||} = 4\pi a^2$ et un coefficient de traînée $C_{d,fr}$:

$$D_{fr}(a, U) = \frac{1}{2} \rho S_{||} \times C_{d,fr}(a, U) \times U^2, \quad (3.19)$$

avec

$$C_{d,fr}(a, U) = \frac{I_1 I_2}{\pi} \sqrt{\frac{2\eta_L}{2a\rho U}}. \quad (3.20)$$

On déduit alors de la dernière équation que le coefficient de traînée de frottement d'une sphère de rayon a , évolue comme l'inverse de la racine du nombre de Reynolds de l'écoulement, construit sur le diamètre $2a$ de la sphère :

$$C_{d,fr}(a, U) \approx \frac{1,9}{\sqrt{Re_{2a}}} \quad (3.21)$$

Il faut noter toutefois que cette évaluation de D_{fr} donne la borne supérieure de la traînée de frottement à laquelle on peut s'attendre lorsque la couche limite est laminaire. En effet, dans un écoulement réel, lorsque le nombre de Reynolds augmente, la couche limite ne contourne plus complètement la sphère et se détache de la paroi solide en une position donnée, phénomène appelé « décollement de couche limite ». Une nouvelle contribution à la force de traînée totale apparaît : la traînée induite ou traînée de sillage, associée à la création de vorticités dans le sillage de l'objet qui de ce

fait fournit de l'énergie cinétique supplémentaire au fluide . Dans ce cas de décollement de la couche limite, la contribution de la friction sur les parois est plus faible que celle évaluée ci-dessus pour deux raisons : la première est la réduction de la surface solide autour de laquelle existe la couche limite visqueuse, la seconde est l'apparition d'une nouvelle contribution dans la traînée totale.

Néanmoins, l'équation précédente permet de quantifier la part maximale représentée par la traînée de frottement D_{fr} dans la force de traînée totale D qui s'applique sur une sphère en régime laminaire. On se limite ici à la gamme de nombre de Reynolds ($Re > 10^4$) qui est typiquement la gamme dans laquelle le dispositif expérimental a pu donner des mesures valides. Dans ce domaine de Re , le coefficient de traînée d'une sphère vaut approximativement 0,4 (figure 3.1), et on obtient l'expression :

$$D_{tot} \approx \frac{0,4}{2} \rho \pi a^2 U^2. \quad (3.22)$$

En divisant l'équation 1.19 par l'équation 1.22, on obtient le rapport de la traînée de frottement par la traînée totale :

$$\frac{D_{fr}}{D_{tot}} \approx 10C_{d,fr} \approx 19Re_{2a}^{-1/2} \quad (3.23)$$

Le tracé de $\frac{D_{fr}}{D_{tot}}$, soit la part représentée par la traînée de frottement dans la traînée totale subie par une sphère, en fonction du nombre de Reynolds (figure 3.4) indique que la traînée de frottement représente au plus entre 6 et 19 pourcents de la traînée totale subie par la sphère, dans le domaine de nombre de Reynolds qui nous intéresse. En conséquence, si l'on fait l'hypothèse que la traînée de forme n'est pas affectée par le revêtement superhydrophobe, alors l'incertitude de 5% sur la détermination de la traînée totale correspond à une incertitude de 25 à 83% sur la seule traînée de frottement.

Par ce calcul, on retrouve donc le fait que la traînée de frottement ne contribue que faiblement à la résistance d'une sphère dans un écoulement inertiel. Par conséquent, les mesures de forces de traînée sur les deux types de sphères (avec ou sans revêtement d'air) ne permettent pas de conclure quant à l'effet du traitement superhydrophobe sur la seule traînée de frottement.

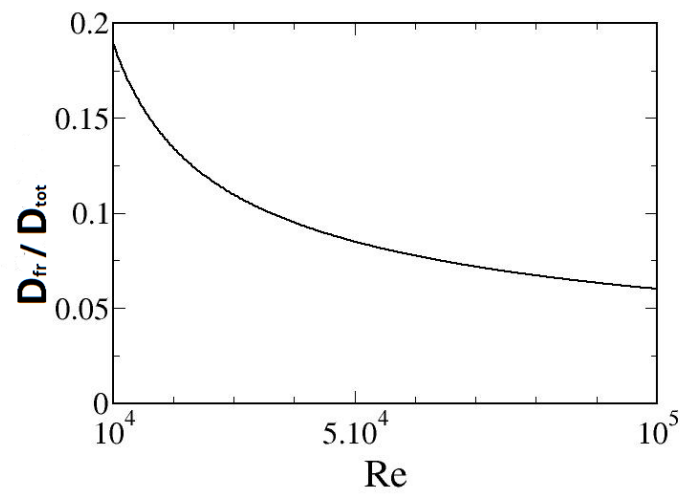


FIGURE 3.4 – Évaluation de la part représentée par la traînée de frottement dans la traînée totale qui s'applique sur une sphère immergée dans un écoulement caractérisé par un nombre de Reynolds $> 10^4$

Chapitre 4

Dispositif expérimental et opérations préliminaires

Après avoir vu quelques notions de base du mouillage, dans ce chapitre nous allons décrire le dispositif expérimental qui a été utilisé pour mesurer les vitesses et présenter les opérations faites avant effectuer nos chutes de sphère. Toutes les mesures ont été effectuées au Laboratoire "PRISME" Pluridisciplinaire de Recherche Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique de l'université d'Orléans.

4.1 Dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées au moyen du dispositif représenté plus bas (fig 4.1) : celui-ci consiste en une cuve parallélépipédique. contenant la phase liquide, au-dessus de laquelle la sphère solide étudiée est lâchée et on enregistre les mouvements de la sphère au moyen d'une caméra rapide pouvant prendre jusqu'à 800 images par seconde en incidence verticale et un dispositif d'éclairage à l'arrière.

Dans nos expériences, nous avons utilisé une colonne d'eau, puis de glycérol dans une cuve à base carré de dimension 0,60 m de hauteur et 0,1 m de coté faisant un volume total de 6 litres. Une caméra numérique rapide de marque Phantom, modèle V341 ayant comme résolution du capteur 2560 x 1600, 8 GB de mémoire Ram et pouvant prendre jusqu'à 800 images par seconde est utilisée pour filmer la chute des sphères dans la cuve remplie de liquide. la caméra est situé à 1,40 m du sol et à 1,30 m en face de la cuve contenant le liquide, la cuve elle même étant situé à 1,08 m du sol.

Grâce au matériel déjà présent dans le laboratoire, nous avons construit un système permettant de relâcher les sphères dans la cuve en créant un

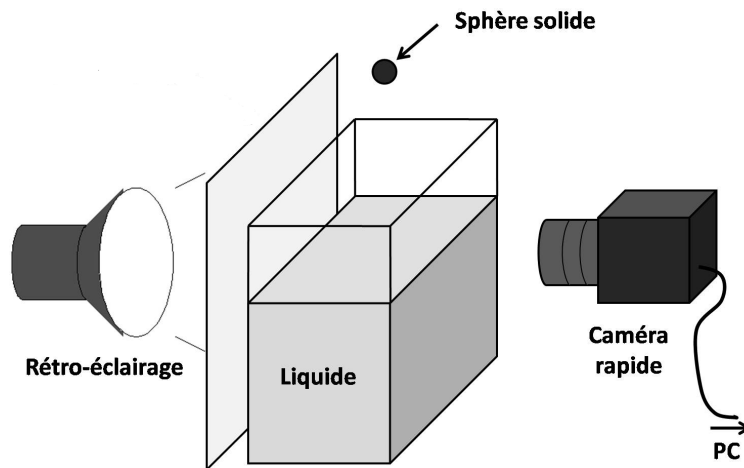


FIGURE 4.1 – Schéma du dispositif expérimental

champ magnétique à l'aide d'un générateur de tension de marque Agilent, modèle U8001A, la présence d'un champ magnétique suffisant permet à la bille de rester accrochée à une pointe métallique située au-dessus de la surface libre du liquide, une fois le générateur de tension arrêté, le champ magnétique coupé, la bille tombe seulement sous l'effet de son poids, la valeur de la tension affichée par le générateur dépend du diamètre et par conséquent du poids de la bille, c'est-à-dire, plus la sphère est grosse, plus la tension nécessaire pour la tenir accrochée à la pointe est importante.

Dans le but de créer une source lumineuse importante, permettant ainsi à la caméra de filmer seulement uniquement et entièrement la cuve car c'est le lieu qui nous intéresse et où a lieu le mouvement des sphères, un dispositif d'éclairage a été mis derrière le cylindre. Enfin nous disposons d'un ordinateur (avec unité centrale relié à la caméra) de bureau neuf de marque DELL PRECISION (TOWER 5810) avec comme système opératif Windows7, 64 bits sur lequel a été installé le logiciel permettant le réglage de la caméra, et tous les tests fonctionnels ont été faits pour vérifier la compatibilité entre ordinateur et caméra et donc une parfaite fonctionnalité de l'ensemble, de plus sur le même ordinateur a été installé Matlab R2012a pour le post traitement des données.

4.1.1 Test et réglages

Des essais préliminaires nous ont permis de pouvoir mettre en place les réglages nécessaires afin d'avoir une meilleure évaluation de nos tests car ayant des sphères de diamètre différent, nous avons aussi des vitesses

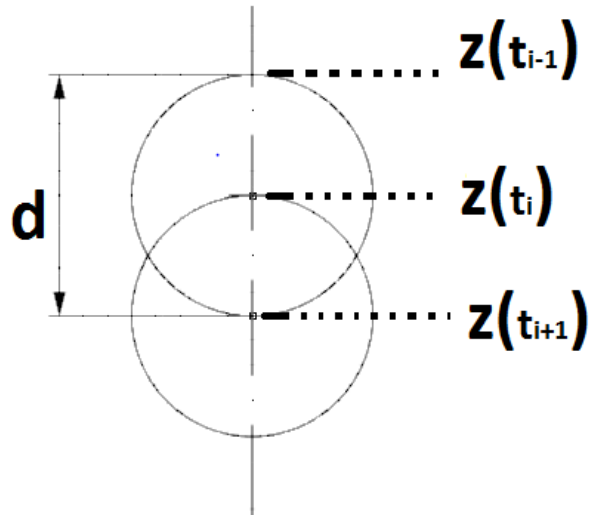


FIGURE 4.2 – Position du centre de la sphère entre images successives

différentes, ce qui entraîne évidemment une vidéo plus ou moins longue et le nombre d'image en dépend.

Par exemple pour régler le Sample Rate (fréquence d'acquisition) , considérons la bille de 10 mm de diamètre relâché dans du glycérol, les premiers essais et aussi d'après ce que nous avons trouvé dans la bibliographie, la vitesse maximale serait environ $0,25m/s$. Supposons à présent de vouloir régler la caméra de telle manière qu'entre 2 images successives, la bille se soit déplacé d'un rayon(fig4.2), pour cela le calcul suivant nous permet d'avoir la valeur de la fréquence d'acquisition.

$$U = \frac{\Delta z}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta z}{U} \quad (4.1)$$

$$\Delta z = \frac{D}{2} = 5 \cdot 10^{-3}m$$

$$U = 0,25m/S$$

$$\Delta t = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,25} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-2}}$$

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{25 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 50 \quad (4.2)$$

nous avons ainsi trouvé la valeur de la fréquence d'acquisition.

4.2 Opérations préliminaires

Avant de passer à l'acquisition de nos mesures, des opérations préliminaires ont été faites, nous pouvons citer parmi lesquelles :

- Caractérisation des sphères
- Caractérisation des fluides
- Etalonnage des fluides

4.2.1 Caractérisation des sphères

La mesure de la vitesse terminale a été réalisée pour des billes de précision en acier, géométriquement identiques, et dont seule la nature de la surface différait. Le choix du diamètre de ces objets est issu d'un compromis : d'un côté, des sphères de grande taille permettent de mesurer des vitesses terminales importantes, impliquant alors une meilleure précision relative sur les mesures ; d'un autre côté, cette considération est limitée par la nécessité de s'affranchir de l'influence des parois de la cuve autour des sphères, condition vérifiée lorsque la largeur typique des objets étudiés est petite devant les dimensions transverses de la cuve. Des billes de rayon $a = 10mm, 8mm, 5mm$ ont donc été choisies.

Comme dans tout travail expérimental, nous avons pesé nos sphères (billes), ce travail a été fait avec une balance METTLER TOLEDO-AB104-S qui a elle aussi été étalonné au préalable.

Etalonnage balance METTLER TOLEDO - AB104 - S

Masse effective : M(g)	Masse mesuré : M(g)	incertitude $\Delta M(g)$
2	1,9992	0,0001
2	1,9965	0,0001
4(2+2)	3,9959	0,0001
5	4,9901	0,0001
7(5+2)	6,9867	0,0001
9(5+2+2)	8,9858	0,0001
10	9,9973	0,0001
20	19,9566	0,0001
30(10+20)	29,9536	0,0001
50	50,0037	0,0001
100	99,9397	0,0001

incertitude de la balance : $\pm 1mg$

Pesée des billes de 10mm de diamètre

Numéro de la Bille	Masse en grammes : M(g)	incertitude : $\Delta M(g)$
Bille 1	4,0414	0,0001
Bille 2	4,0412	0,0001
Bille 3	4,0389	0,0001
Bille 4	4,0421	0,0001
Bille 5	4,0383	0,0001
Bille 6	4,0405	0,0001
Bille 7	4,0374	0,0001
Bille 8	4,0424	0,0001
Bille 9	4,0423	0,0001
Bille 10	4,0397	0,0001

Masse moyenne des billes de 10 mm de diamètre : 4,040grammes

Pesée des billes de 8mm de diamètre

Numéro de la Bille	Masse en grammes : M(g)	incertitude $\Delta M(g)$
Bille 1	2,0725	0,0001
Bille 2	2,0681	0,0001
Bille 3	2,0698	0,0001
Bille 4	2,0709	0,0001
Bille 5	2,0723	0,0001
Bille 6	2,0735	0,0001
Bille 7	2,0728	0,0001
Bille 8	2,0737	0,0001
Bille 9	2,0715	0,0001
Bille 10	2,0742	0,0001
Bille 11	2,0711	0,0001
Bille 12	2,0728	0,0001
Bille 13	2,0708	0,0001
Bille 14	2,0734	0,0001

Pesée des plusieurs billes de 8mm de diamètre ensemble

Nombre de Bille	Masse en grammes : M(g)	incertitude : $\Delta M(g)$
5 billes	10,3603	0,0001
10 billes	20,7228	0,0001
15 billes	31,0838	0,0001
20 billes	41,4447	0,0001
25 billes	51,8107	0,0001
30 billes	62,1694	0,0001

Masse moyenne des billes de 8mm de diamètre : 2,072grammes

Pesée des billes de 5mm de diamètre

Numéro de la Bille	Masse en grammes : M(g)	incertitude : $\Delta M(g)$
Bille 1	0,5060	0,0001
Bille 2	0,5060	0,0001
Bille 3	0,5062	0,0001
Bille 4	0,5056	0,0001
Bille 5	0,0557	0,0001
Bille 6	0,5057	0,0001
Bille 7	0,5062	0,0001
Bille 8	0,5061	0,0001
Bille 9	0,5059	0,0001
Bille 10	0,5056	0,0001
Bille 11	0,5062	0,0001
Bille 12	0,5060	0,0001
Bille 13	0,5058	0,0001
Bille 14	0,5062	0,0001
Bille 15	0,5061	0,0001

Pesée des plusieurs billes de 5mm de diamètre ensemble

Nombre de Bille	Masse en grammes : M(g)	incertitude : $\Delta M(g)$
10 billes	5,0596	0,0001
20 billes	10,1214	0,0001
30 billes	15,1813	0,0001
40 billes	20,2420	0,0002
50 billes	25,3025	0,0002

Masse moyenne des billes de 5mm de diamètre : 0,506*gramme*

Calcul de la masse volumique des sphères

Une fois obtenue les masses de nos différentes sphères, nous pouvons calculer leur masse volumique encore appelé densité. Nous savons que :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4.3)$$

M est la masse de la bille.

V est le volume de la bille.

Nous savons que le volume d'une sphère est donné par la relation :

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (4.4)$$

en remplaçant la 4.4 dans la 4.3 on obtient :

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi r^3}{3}} = \frac{3M}{4\pi r^3} \quad (4.5)$$

r est le rayon de la sphère.

En prenant comme masse la masse moyenne des billes, nous pouvons calculer la densité de la sphère pour chaque diamètre. On obtient donc :

- $\rho_1 = 7719,745 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les sphères de 10mm de diamètre
- $\rho_2 = 7732,882 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les sphères de 8mm de diamètre
- $\rho_3 = 7735,031 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les sphères de 5mm de diamètre

Pour les calculs théoriques, nous avons utilisé la valeur moyenne de la densité issue des calculs précédents et nous obtenons :

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho_i}{3} = \frac{7719,745 + 7732,882 + 7735,031}{3} = 7729,219 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.6)$$

ce qui est tout à fait normal car la densité de l'acier est comprise entre 7500 et 8000 $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

4.2.2 Caractérisation des fluides

Nous avons caractériser nos fluides pour les calculs théoriques, plus précisément la densité et les différentes viscosités en fonction de la température surtout en ce qui concerne le glycérol. Malgré le fait nous n'avons pas pu faire des chutes dans des fluides mixte (eau + glycerol) comme

initialement prévu, dans les tableaux qui suivent y figurent tout de même les caractéristiques des différents mélanges eau-glycérol.

En prenant comme température 22°C et pression atmosphérique 101325Pa nous avons un fluide dont les caractéristiques sont résumé dans le tableau ci-dessous.

V_{h_2O}	V_{gly}	Densité	Vis.dynamique	Vis.cinématique	Cmg	Cmv
6	0	997,58	$9,5743 \cdot 10^{-4}$	$9,5976 \cdot 10^{-7}$	0	0
5	1	1051,1	$16,597 \cdot 10^{-4}$	$15,790 \cdot 10^{-7}$	0,2020	0,1667
4,5	1,5	1061,3	$18,788 \cdot 10^{-4}$	$17,703 \cdot 10^{-7}$	0,2404	0,2000
4	2	1100,3	$18,788 \cdot 10^{-4}$	$29,723 \cdot 10^{-7}$	0,3876	0,3333
3,5	2,5	1118,9	$44,973 \cdot 10^{-4}$	$40,195 \cdot 10^{-7}$	0,4576	0,4000
3	3	1145,6	$77,392 \cdot 10^{-4}$	$67,557 \cdot 10^{-7}$	0,5586	0,5000
2,5	3,5	1171,2	$77,392 \cdot 10^{-4}$	$125,33 \cdot 10^{-7}$	0,6550	0,6000
2	4	1187,6	$240,78 \cdot 10^{-4}$	$202,75 \cdot 10^{-7}$	0,7168	0,6667
1,5	4,5	1218,9	$806,79 \cdot 10^{-4}$	$661,70 \cdot 10^{-7}$	0,8351	0,8000
1	5	1226,6	$1157,0 \cdot 10^{-4}$	$943,35 \cdot 10^{-7}$	0,8635	0,8333
0	6	1262,6	$11786,0 \cdot 10^{-4}$	$9334,9 \cdot 10^{-7}$	1	1

En considérant à présent comme température 25°C et pression atmosphérique 101325Pa nous avons un fluide dont les caractéristiques sont résumé dans le tableau cet autre tableau.

V_{h_2O}	V_{gly}	Densité	Vis.dynamique	Vis.cinématique	Cmg	Cmv
6	0	996,85	$8,9274 \cdot 10^{-4}$	$8,9556 \cdot 10^{-7}$	0	0
5	1	1050,1	$15,333 \cdot 10^{-4}$	$14,601 \cdot 10^{-7}$	0,2019	0,1667
4,5	1,5	1060,2	$17,313 \cdot 10^{-4}$	$16,330 \cdot 10^{-7}$	0,2402	0,2000
4	2	1099,3	$29,751 \cdot 10^{-4}$	$27,070 \cdot 10^{-7}$	0,3874	0,3333
3,5	2,5	1117,5	$40,577 \cdot 10^{-4}$	$36,310 \cdot 10^{-7}$	0,4574	0,4000
3	3	1144,2	$68,792 \cdot 10^{-4}$	$60,124 \cdot 10^{-7}$	0,5584	0,5000
2,5	3,5	1169,6	$128,08 \cdot 10^{-4}$	$109,50 \cdot 10^{-7}$	0,6548	0,6000
2	4	1185,9	$207,03 \cdot 10^{-4}$	$174,57 \cdot 10^{-7}$	0,7167	0,6667
1,5	4,5	1217,1	$669,03 \cdot 10^{-4}$	$549,69 \cdot 10^{-7}$	0,8349	0,8000
1	5	1224,6	$949,21 \cdot 10^{-4}$	$775,10,35 \cdot 10^{-7}$	0,8634	0,8333
0	6	1260,7	$9056,8 \cdot 10^{-4}$	$7184,2 \cdot 10^{-7}$	1	1

4.3 Revêtement des sphères

Ce qui semblait être la chose plus simple s'est avéré être l'une des opérations les plus difficiles et qui nécessite une très grande habileté car le revêtement doit être le plus possible uniforme et doit concerner toute la superficie de la sphère. Ne disposant d'aucun manuel théorique parlant des techniques de revêtement surtout en ce qui concerne les objets sphériques et n'étant pas présent dans la littérature des informations susceptibles de nous les principes fondamentaux pour revêtir une sphère, nous avons fait appel à notre imagination, à notre bon sens et en fonction du matériel à notre disposition, nous avons fait le revêtement en utilisant deux techniques diverses à savoir :

- ✓ Revêtement par immersion
- ✓ Revêtement par pulvérisation encore appelé Spray

nous présenterons dans les paragraphes qui suivent le revêtement super hydrophobe utilisé et puis nous parlerons du protocole du revêtement de nos deux techniques utilisées.

4.3.1 Ultra Ever Dry " toujours sec"

Ultra-Ever Dry est un revêtement super hydrophobe et oléophobe qui repousse la majorité des liquides. Ultra-Ever Dry utilise un processus pour créer un revêtement et une barrière d'air sur la surface d'un objet. Cette barrière repousse l'eau, l'huile, le béton humide et autres liquides comme aucun autre produit auparavant. Ultra-Ever Dry apporte une adhérence et une capacité de résistance à l'abrasion supérieure aux technologies précédentes, lui assurant une longévité dans ses différentes utilisations. Ultra Ever Dry est un produit qui utilise la technique de la nanotechnologie.

La nanoscience et la nanotechnologie sont l'étude, l'application et la manipulation de la matière au niveau moléculaire et peuvent être utilisées dans tous les autres domaines des sciences, comme la chimie, la biologie, la physique, la science des matériaux et l'ingénierie. La nanotechnologie n'est pas seulement un nouveau domaine de la science et de l'ingénierie, mais une nouvelle façon de regarder, d'étudier et créer des produits utiles. La nanoscience et la nanotechnologie impliquent la possibilité de voir et de contrôler les atomes et les molécules. Il est difficile d'imaginer l'ampleur de la nanotechnologie. Un nanomètre est un milliardième de mètre. Voici

quelques exemples illustratifs : Il y a 25,4 millions nanomètres dans un pouce, une feuille de papier journal a une épaisseur d'environ 100 000 nanomètres, un cheveu humain est d'environ 80.000 à 100.000 nanomètres de large. Ultra-Ever Dry est basé sur la nanotechnologie et c'est ce qui lui permet d'atteindre ses caractéristiques et avantages uniques.

La longévité de la formule en usage est sensible aux conditions environnementales (UV / abrasion). Ce revêtement durera généralement 2 à 8 mois à la lumière directe du soleil et aux conditions extérieures avant que le produit nécessite d'être recouvert d'une deuxième couche. Lorsqu'ils sont utilisés dans des applications intérieures ou recouverts à l'extérieur, le revêtement peut durer un an ou plus. La température de travail se situe entre -30 et 149°C , une fois qu'il a été appliqué. Il est efficace jusqu'à des températures de 260°C . Presque tous les matériaux peuvent recevoir une application : acier, aluminium, plastic, cuir, bois, béton, ciment....

L'un des points forts d'Ever Dry par rapport aux produits existants est sa résistance à l'abrasion. Sa résistance est supérieure aux autres produits super hydrophobes, et détient une note de 110 dans le test d'abrasion méthode Tabor (ASTM D4060-10) et assure une résistance à la corrosion 5 à 8 fois supérieure à la normale.

Ultra-Ever Dry est pulvérisé soit par pistolet à air comprimé, ou simplement par spray et son application se fait en deux temps (2 couches). Le temps de séchage est généralement 45 minutes pour la première couche, et de 5 à 10 minutes pour la seconde. Ceci peut être réduit par l'application de chaleur à l'aide d'un four, d'un pistolet à air chaud ou un séchoir industriel. Comme tout autre revêtement, Certains solvants, des alcools et des savons ou détergents peuvent provoquer sur la surface du revêtement de l'humidité. Une fois que les produits chimiques sont retirés, la super hydrophobicité sera généralement revenue. Mais, plus généralement, il résiste à un large éventail de produits comprenant les acides et bases. Après application il confère à la surface un angle de contact compris entre 165° et 175° . La durée de vie du produit est d'un an lorsqu'il est stocké entre 5°C et 27°C et ce dernier est affecté par les UV qui peuvent réduire son efficacité. La couleur standard est translucide à l'aspect laiteux. Il n'existe pas de formulation transparente à ce jour.

4.3.2 Méthodes et protocoles de revêtement

Nous présentons ici les méthodes individuées pour les revêtements de nos sphères. Cependant, bien que les expériences ont été faites avec des sphères, nous présenterons le protocole de revêtement pour les différentes méthodes. Ce protocole est aussi été appliqué pour revêtir les plaques, le choix des plaques est dû exclusivement au fait qu'il est plus facile de mesurer les différents angles de contact statiques, dynamiques et hystérésis d'angles de contact sur des plaques que sur des sphères.

Revêtement par immersion

Le revêtement par immersion consiste à plonger l'objet à revêtir dans le liquide de revêtement, sortir l'objet et le laisser sécher. Aussi simple soit-il, faut avant tout respecter certaines recommandations fondamentales avant de plonger l'objet dans le revêtement :

- a) Préparation de la surface à revêtir : il s'agit ici de s'assurer que la surface à revêtir soit très propre et privé de toute saletés, graisses, huiles pouvant ainsi modifier, réduire ou annuler l'effet ou les effets du revêtement en empêchant son adhérence, pour cela nos plaques et nos sphères seront lavées, dégraissées, essuyer et laisser sécher , si besoin, poncer la surface. Cette opération pourra se répéter jusqu'à obtenir une surface propre et prête à être revêtir.
- b) Immersion de nos plaques et sphères dans le revêtement de base appelé Bottom Coast, les plaques et les sphères sont laissées le revêtement de base pour une durée d'environ 10 secondes
- c) Une fois sortie du revêtement base, les plaques et les sphères seront placées en position verticale et laissées pour environ 1 heure le temps nécessaire pour le séchage totale et complet du Bottom Coast.
- d) Après s'être assuré que le revêtement de base soit bien sec, les objets seront à nouveau immergés dans le revêtement super hydrophobe appelé Top Coast toujours pour environ 10 secondes et seront laissées pour environ 30 minutes.

Nos objets pourront maintenant avoir des propriétés super hydrophobes et seront prêts pour les mesures de nos divers angles de contact et les chutes.

Revêtement par Spray

Plus complexe à réaliser que le précédent car nécessitant une plus grande habilité manuelle, le revêtement par Spray consiste à pulvériser le revêtement sur l'objet à revêtir nécessitant par conséquent certains outils ou matériel de travail en plus tel que les lunettes de protections, les masques de protection, gants de protection...et consiste à :

- a) Préparation de la surface à revêtir : identique à celle décrite plus haut
- b) Réglage du spray, à l'air libre afin de connaître la pression à exercer, car un surdosage augmente le temps de séchage et l'effet laiteux sur les plaques.
- c) Application de la première couche Bottom Coast : appliquer de façon uniforme et garder le spray à bonne distance afin d'éviter les surépaisseurs : Après séchage (1h), l'épaisseur théorique de la première couche est de l'ordre de quelques microns.
- d) Application de la deuxième couche : l'application se fait de la même manière que la première couche, c'est cette dernière couche qui donnera une apparence laiteuse à nos plaques et sphères.

Les propriétés Super hydrophobes s'obtiennent 30 minutes après l'application de la deuxième couche. Cependant c'est après 2 heures que nous avons un résultat optimal.

Chapitre 5

Mesures, Post-traitement des données recueillies dans l'eau

Dans cette partie, nous présentons les résultats de nos expériences, ces résultats sont obtenues à travers un post traitement de données, pour réaliser les expériences, nous avons utilisé les sphères de 10 mm, 8 mm et 5mm de diamètre en chute libre dans deux liquides : la glycérine et l'eau. Nous présentons ici toute la méthode à travers laquelle nous avons pu avoir les vitesses terminales des sphères dans chaque fluide. Il est convient de préciser qu'à la fin la vitesse moyenne sera le résultat de 10 chutes de chaque diamètre, dans chaque liquide et pour les deux surfaces (revêtues et non revêtues).

Chaque liquide ayant son indice de réfraction, il a été nécessaire de faire au préalable un étalonnage de chaque liquide.

5.1 Etalonnage de l'eau

Cette opération est faite dans le but de pouvoir convertir les pixels en mètres, en effet, nous voulons savoir la valeur en millimètre d'un pixel du point de vue de la caméra et ce le long de notre cuve où aura lieu nos chutes. Le principe est le suivant, il consiste de plonger un objet de dimension connue (dans notre cas nous avons plongé un papier a carreaux), l'objet est plongé dans la cuve remplie d'eau, puis des photos sont prises à différente hauteur (depuis le haut jusqu'au fond de la cuve). Une fois les photos enregistrées, sur chacune d'elle, à travers un script matlab on trouve la relation entre pixel et millimètre. Nous obtenons ainsi un lien entre pixel et millimètre le long de notre cuve. La valeur finale est obtenue en faisant la moyenne obtenue à travers chaque image. La figure 5.1 montre trois

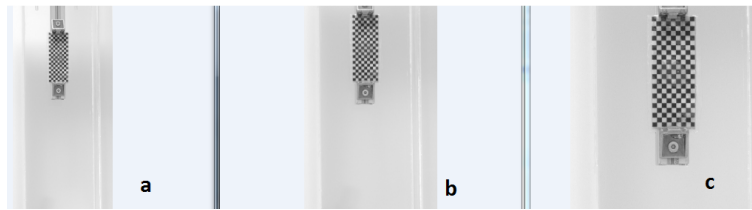


FIGURE 5.1 – Photo du papier à carreaux durant l'étalonnage à différentes hauteurs : a) 0,12m ; b) 0,18m ; c) 0,24m.

photos successives prises lors de l'étalonnage dans l'eau. Entre 2 images successives, la hauteur est de 0,06m, nous avons pris un total de 13 photos, le reste des photos seront présentées à la fin du rapport dans l'annexe. Nous présentons ci-dessous le tableau récapitulatif de l'étalonnage.

Image	Nombres de pixels	Longueur en mètre	Pix2m = longueur/nombres de pixels
Image 1	210	0,06	$2,85714 \cdot 10^{-4}$
Image 2	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$
Image 3	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$
Image 4	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 5	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 6	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 7	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$
Image 8	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 9	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 10	214	0,06	$2,80373 \cdot 10^{-4}$
Image 11	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$
Image 12	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$
Image 13	213	0,06	$2,81690 \cdot 10^{-4}$

Valeur moyenne Pix2m = $2,813921 \cdot 10^{-4}$



FIGURE 5.2 – images obtenue après conversion de la vidéo

5.2 Traitement des données des sphères non revêtues

5.2.1 Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre non revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous convertissons la vidéo en images, le nombre d' image dépend de la durée de la vidéo, plus le diamètre de la sphère est grand, plus la vidéo est courte. Les images sont ainsi sauvées avec un fichier type TIFF (.tif) lisible par Matlab. C'est à ce niveau que débute effectivement les opérations de post traitement avec le langage de programmation Matlab. Les scripts écrits pour les différentes étapes du post traitement avec Matlab seront mis à la fin de notre rapport. Nous montrons ci-dessous pour une seule expérience les différentes figures obtenues lors de notre post-traitement. Les résultats des autres expériences seront quant à eux mis dans l'annexe à la fin de notre rapport, mais le procédé de travail de post traitement est le même pour toutes les expériences.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

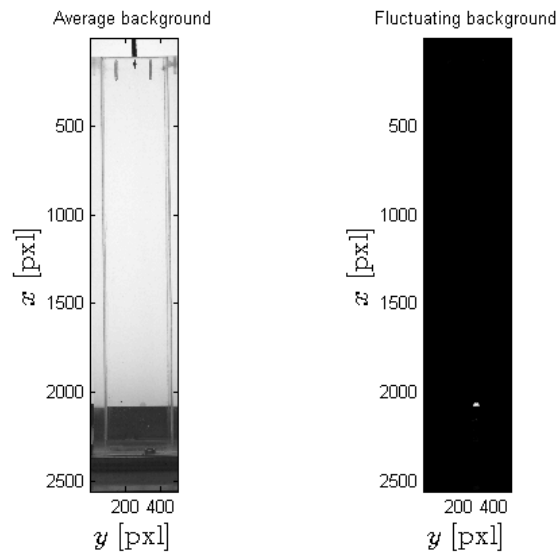


FIGURE 5.3 – Changement de couleur de l'arrière-plan

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting &
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVa

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

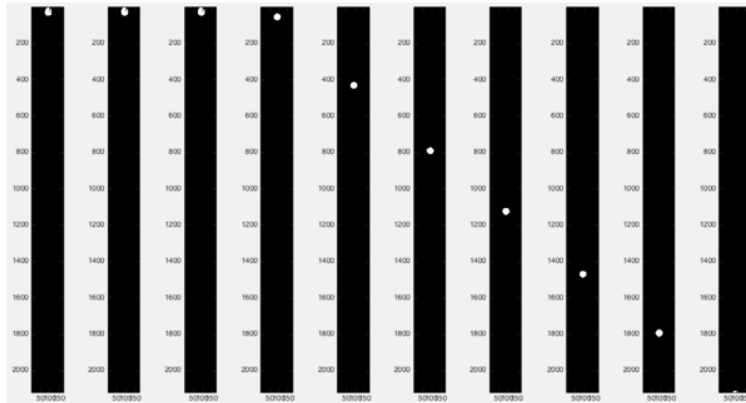


FIGURE 5.4 – Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');
    
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtract
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp>=Treshold);
BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Save
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end

```

```
clear all;
```



```

h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save, 'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape

```

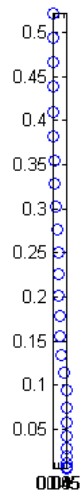


FIGURE 5.6 – Trajectoire de la sphère de 10mm non revêtue dans l'eau

```

axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toutes les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faite en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Le travail fait ci-dessus a été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous ferons seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

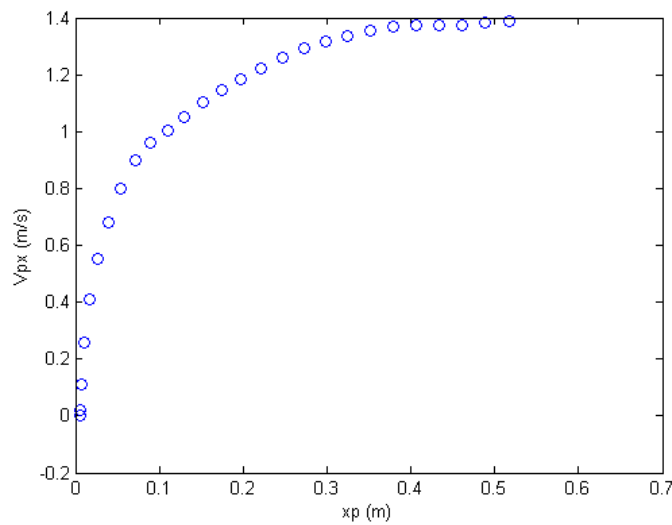


FIGURE 5.7 – Courbe de la vitesse sphère de la 10mm dans l'eau obtenu après post-traitement



FIGURE 5.8 – images obtenue après conversion de la vidéo

5.2.3 Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 10mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur,

en effet l'arrière plan qui devrait apparaître gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fal
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0,'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
```

```

end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelph Clepin, Nicolas Mazzelie)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameters
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp >= Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

5.2.4 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 8mm dans l'eau

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig5.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(5.24), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background substract
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

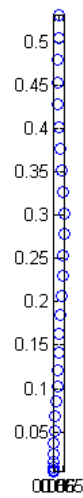


FIGURE 5.9 – Trajectoire de la sphère de 8mm non revêtue dans l'eau

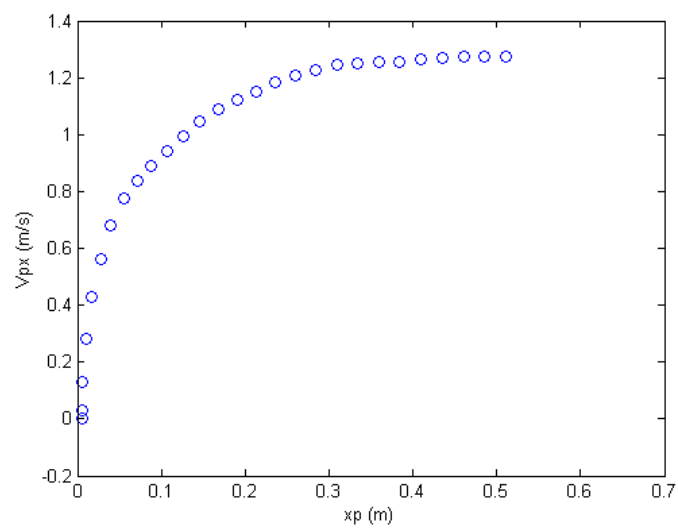


FIGURE 5.10 – Courbe de la vitesse sphère de la 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.



FIGURE 5.11 – images obtenue après conversion de la vidéo

5.2.5 Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre non revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 8mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fall
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelpe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0, 'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance init

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage).^2)/N
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

```

```
subplot(122);  
imagesc(BackgroundVariance)  
title('Fluctuating background');  
colormap(gray) % To change the colours and the landscape  
axis image  
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)  
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)  
  
clear all;
```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutting
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp >= Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
    BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sav
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
    subplot(1, 11, n)
    file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
    load(file2read);
    imagesc(BWImage);
    colormap(gray) % To change the colours and the landscape
    axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

5.2.6 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 5mm dans l'eau

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig5.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(5.24), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration of
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat',indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

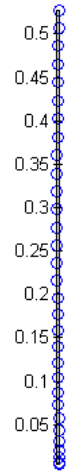


FIGURE 5.12 – Trajectoire de la sphère de 5mm non revêtue dans l'eau

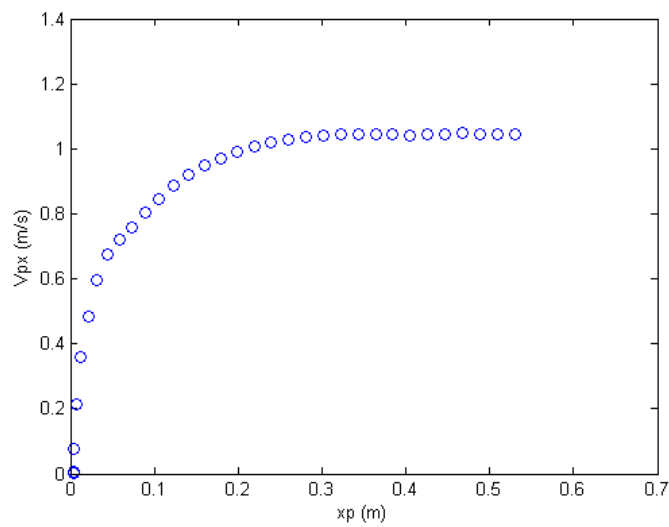


FIGURE 5.13 – Courbe de la vitesse sphère de la 5mm dans l'eau obtenu après post-traitement



FIGURE 5.14 – images obtenue après conversion de la vidéo

5.3 Traitement des données des sphères revêtues dans l'eau

5.3.1 Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous convertissons la vidéo en images, le nombre d'image dépend de la durée de la vidéo, plus le diamètre de la sphère est grand, plus la vidéo est courte. Les images sont ainsi sauvées avec un fichier type TIFF (.tif) lisible par Matlab. C'est à ce niveau que débute effectivement les opérations de post traitement avec le langage de programmation Matlab. Les scripts écrits pour les différentes étapes du post traitement avec Matlab seront mis à la fin de notre rapport. Nous montrons ci-dessous pour une seule expérience les différentes figures obtenues lors de notre post-traitement. Les résultats des autres expériences seront quant à eux mis dans l'annexe à la fin de notre rapport, mais le procédé de travail de post traitement est le même pour toutes les expériences.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

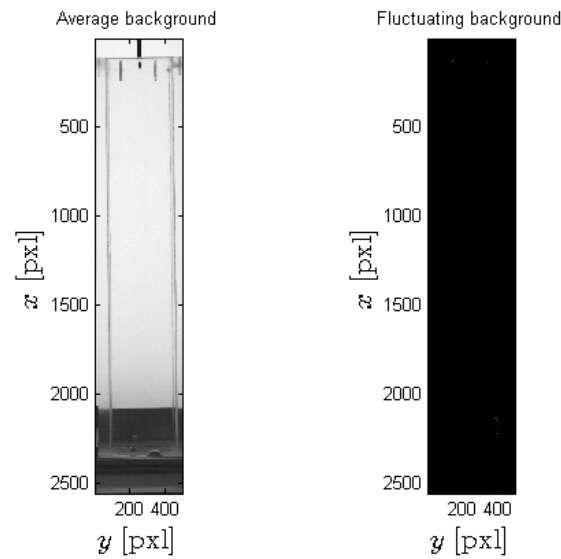


FIGURE 5.15 – Changement de couleur de l'arrière-plan

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.15)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);
```

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU91

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)^2);
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;
```

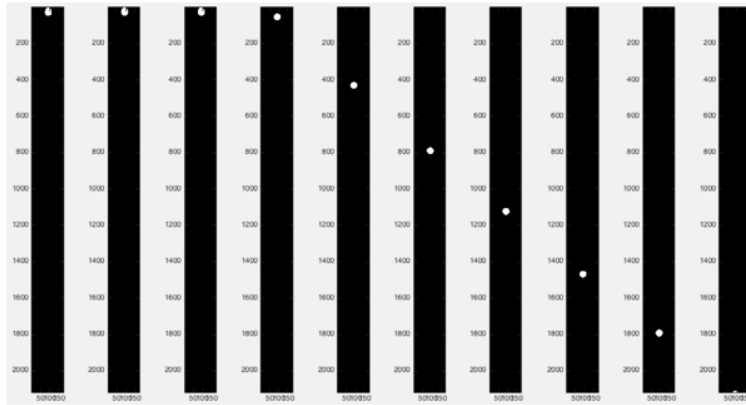


FIGURE 5.16 – Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');
    
```

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU93

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtract
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and wh
[I, J] = find(tmp>=Treshold);
BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Save
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end
```

```
clear all;
```



```

h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save, 'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape

```

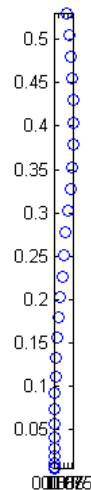



FIGURE 5.18 – Trajectoire de la sphère de 10mm revêtue dans l'eau

```
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;
```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

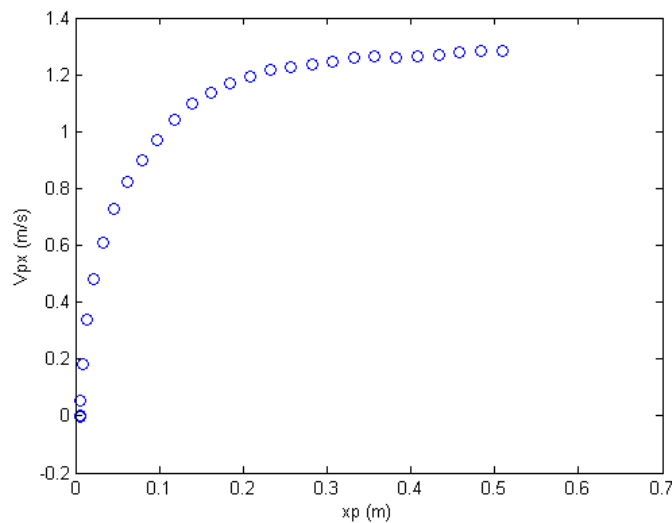


FIGURE 5.19 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de la 10mm dans l'eau obtenu après post-traitement

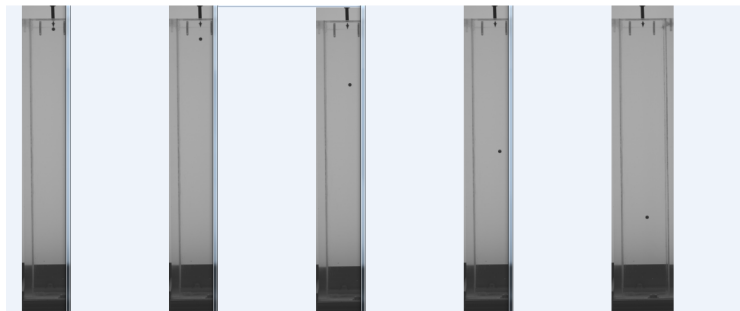


FIGURE 5.20 – images obtenue après conversion de la vidéo

5.3.3 Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 10mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur,

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU99

en effet l'arrière plan qui devrait apparaître gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fall
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0,'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
```

```

end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelph Clepin, Nicolas Mazzelie)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameters
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp >= Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

5.3.4 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère de 8mm revêtue dans l'eau

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig5.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(5.24), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background substract
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU105

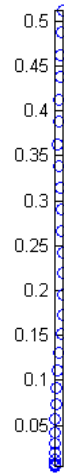


FIGURE 5.21 – Trajectoire de la sphère de 8mm revêtue dans l'eau

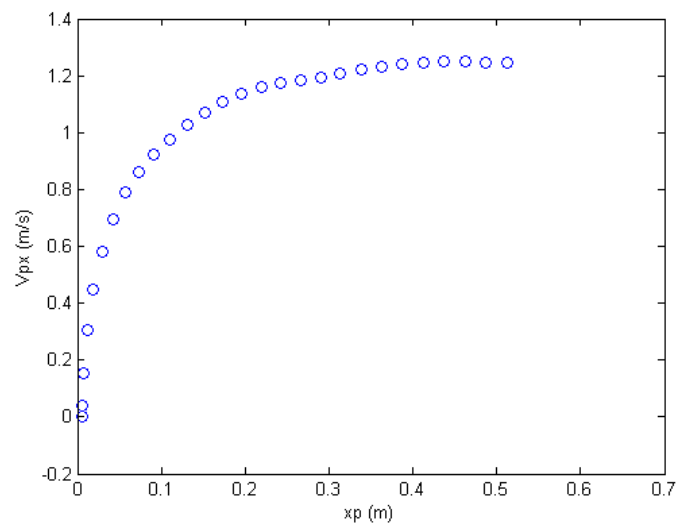


FIGURE 5.22 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement



FIGURE 5.23 – images obtenue après conversion de la vidéo

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

5.3.5 Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre revêtues dans l'eau

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 8mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
```

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU107

```
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0, 'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting &
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVa

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
```

```

title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 5.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

```

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU109

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
    file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
    tmp = double(imread(file2read));
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
    tmp = -tmp + BackgroundAverage;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
    tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
    tmp = mat2gray(tmp);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
    [I, J] = find(tmp>=Treshold);
    BWImage = zeros(size(tmp));
    for n = 1 : length(I)
        BWImage(I(n), J(n)) = 1;
    end
    BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
    file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
    save(file2save, 'BWImage');
    waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
    subplot(1, 11, n)
    file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
    load(file2read);
    imagesc(BWImage);
```



```

dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure

```

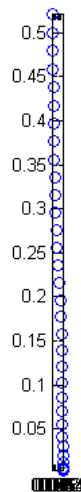


FIGURE 5.24 – Trajectoire de la sphère de 5mm revêtue dans l'eau

```
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;
```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toutes les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faite en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Une fois terminé le post-traitement des données recueillies lors des chutes des différents types de sphères et de divers diamètres dans l'eau, nous pouvons passer maintenant au post-traitement des données recueillies lors des chutes dans la glycérine. Il est convenable de rappeler que l'analyse et la conclusion ne se fera qu'à partir des valeurs moyennes de la vitesse terminale, car toutes les expériences ont été faites en utilisant des sphères différentes : pour les expériences avec les sphères 10mm nous avons utilisé 3 sphères, pour celles de 8mm, 3 sphères ont aussi été utilisées et pour celles de 5mm, 4 sphères ont été utilisées et lors de la caractérisation de nos sphères, nous avons vu que les sphères bien qu'ayant le même diamètre, ont des masses différentes, bien que l'écart entre les masses soit de l'ordre d'un centième voire un millième. En plus ayant utilisé la masse moyenne des sphères lors du calcul de la densité qui nous sera utile pour les calculs théoriques, il nous paraît logique d'utiliser aussi la valeur de la vitesse

5.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS L'EAU113

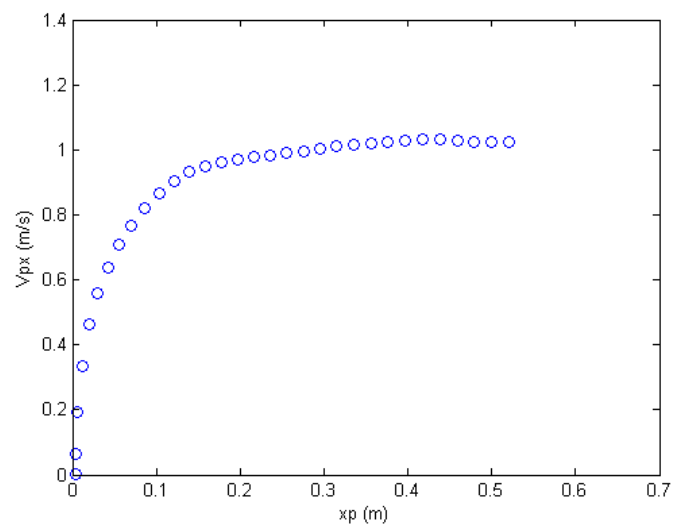


FIGURE 5.25 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de 5mm dans l'eau obtenu après post-traitement

moyenne que nous obtiendrons pour les des 10 chutes.

Chapitre 6

Mesures, Post-traitement des données recueillies dans la glycérine

Dans cette partie, nous présentons les résultats de nos expériences, ces résultats sont obtenues à travers un post traitement de données, pour réaliser les expériences, nous avons utilisé les sphères de 10 mm, 8 mm et 5mm de diamètre en chute libre dans deux liquides : la glycérine et l'eau. Nous présentons ici toute la méthode à travers laquelle nous avons pu avoir les vitesses terminales des sphères dans chaque fluide. Il est convient de préciser qu'à la fin la vitesse moyenne sera le résultat de 10 chutes de chaque diamètre, dans chaque liquide et pour les deux surfaces (revêtues et non revêtues).

Chaque liquide ayant son indice de réfraction, il a été nécessaire de faire au préalable un étalonnage de chaque liquide.

6.1 Etalonnage de la glycérine

Cette opération est faite dans le but de pouvoir convertir les pixels en mètres, en effet, nous voulons savoir la valeur en millimètre d'un pixel du point de vue de la caméra et ce le long de notre cuve où aura lieu nos chutes. Le principe est le suivant, il consiste de plonger un objet de dimension connue (dans notre cas nous avons plongé un papier a carreaux), l'objet est plongé dans la cuve remplie d'eau, puis des photos sont prises à différente hauteur (depuis le haut jusqu'au fond de la cuve). Une fois les photos enregistrées, sur chacune d'elle, à travers un script matlab on trouve la relation entre pixel et millimètre. Nous obtenons ainsi un lien entre pixel et millimètre le long de notre cuve. La valeur finale est obtenue en faisant la moyenne obtenue à travers chaque image. La figure 6.1 montre trois photos

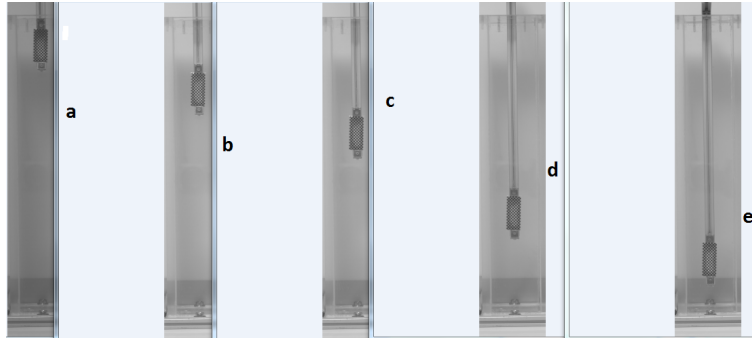


FIGURE 6.1 – Photo du papier à carreaux durant l'étalonnage à différentes hauteurs : a) 0,048m ; b) 0,072m ; c) 0,144m ; d) 0,168 ; e) 0,192

successives prises lors de l'étalonnage dans la glycérine. Entre 2 images successives, la hauteur est de 0,024m, nous avons pris un total de 11 photos, le reste des photos seront présentées à la fin du rapport dans l'annexe. Nous présentons ci-dessous le tableau récapitulatif de l'étalonnage.

Image	Nombres de pixels	Longueur en mètre	Pix2m = longueur/nombres de pixels
Image 1	85	0,024	$2,82352 \cdot 10^{-4}$
Image 2	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 3	85	0,024	$2,82352 \cdot 10^{-4}$
Image 4	85	0,024	$2,82352 \cdot 10^{-4}$
Image 5	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 6	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 7	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 8	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 9	86	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$
Image 10	87	0,024	$2,75862 \cdot 10^{-4}$
Image 11	213	0,024	$2,79069 \cdot 10^{-4}$

Valeur moyenne Pix2m = $2,79673 \cdot 10^{-4}$



FIGURE 6.2 – images obtenue après conversion de la vidéo

6.2 Traitement des données des sphères non revêtues

6.2.1 Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre non revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous convertissons la vidéo en images, le nombre d' image dépend de la durée de la vidéo, plus le diamètre de la sphère est grand, plus la vidéo est courte. Les images sont ainsi sauvées avec un fichier type TIFF (.tif) lisible par Matlab. C'est à ce niveau que débute effectivement les opérations de post traitement avec le langage de programmation Matlab. Les scripts écrits pour les différentes étapes du post traitement avec Matlab seront mis à la fin de notre rapport. Nous montrons ci-dessous pour une seule expérience les différentes figures obtenues lors de notre post-traitement. Les résultats des autres expériences seront quant à eux mis dans l'annexe à la fin de notre rapport, mais le procédé de travail de post traitement est le même pour toutes les expériences.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

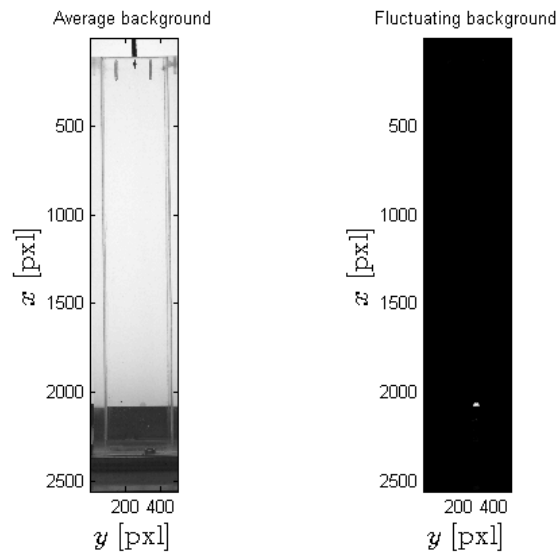


FIGURE 6.3 – Changement de couleur de l’arrière-plan

Voici le script Matlab nous permettant de changer l’arrière plan (fig5.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting &
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVa

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

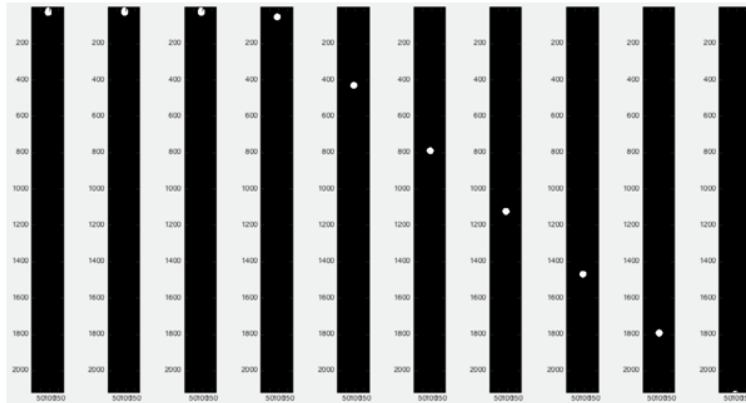


FIGURE 6.4 – Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 6.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');
    
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp>=Treshold);
BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end

```

```
clear all;
```

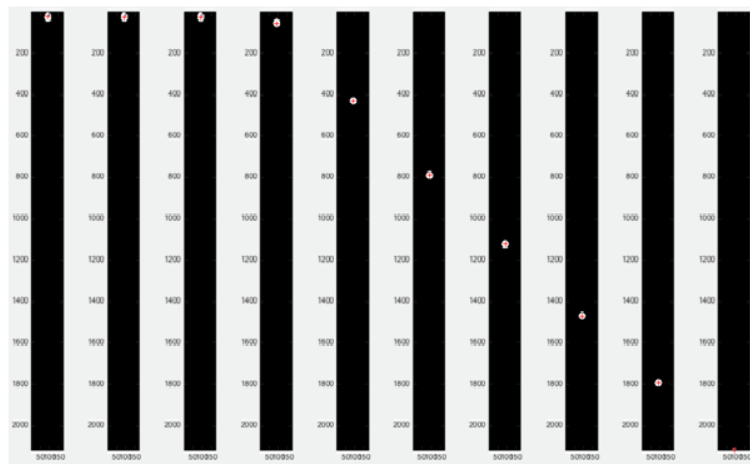


FIGURE 6.5 – centre de masse de la sphère pendant sa chute

6.2.2 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 10mm dans la glycérine

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig6.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(6.6), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelpe Clepin, Nicolas Mazzelie)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);

```

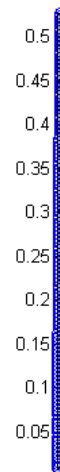


FIGURE 6.6 – Trajectoire de la sphère de 10mm non revêtue dans la glycérine

```

colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toutes les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faite en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Le travail fait ci-dessus a été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous ferons seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

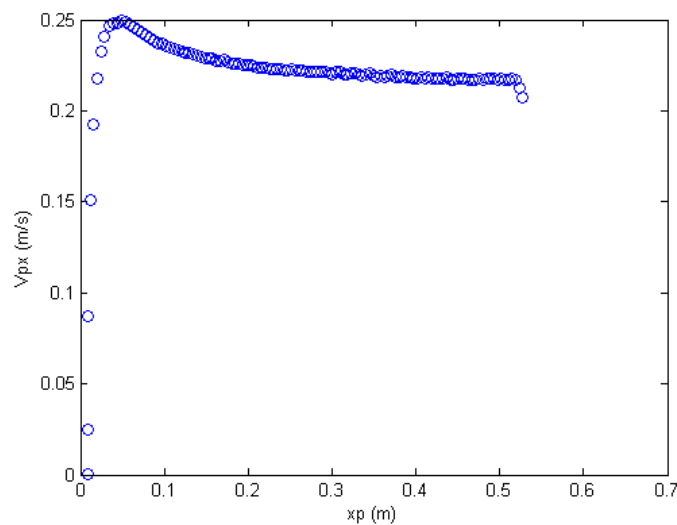


FIGURE 6.7 – Courbe de la vitesse sphère de la 10mm dans la glycérine obtenu après post-traitement

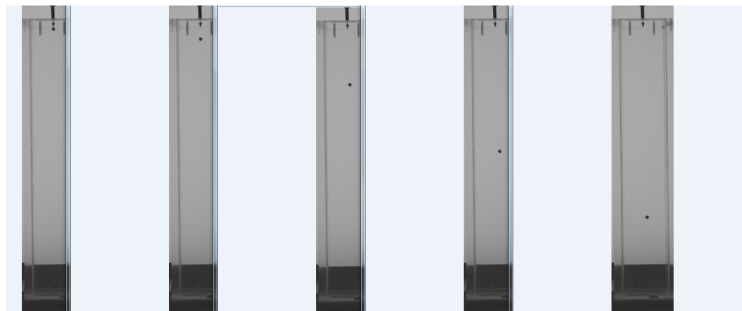


FIGURE 6.8 – images obtenue après conversion de la vidéo

6.2.3 Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 10mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur,

en effet l'arrière plan qui devrait apparaître gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig6.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fal
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0,'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
```

```

end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```


Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure?? nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to bina
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background averag
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background substract
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutt
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and wh
[I, J] = find(tmp>=Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

6.2.4 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 8mm dans l'eau

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig5.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(5.24), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image read
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background substract
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

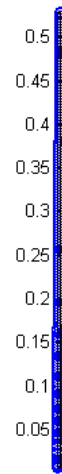


FIGURE 6.9 – Trajectoire de la sphère de 8mm non revêtue dans l'eau

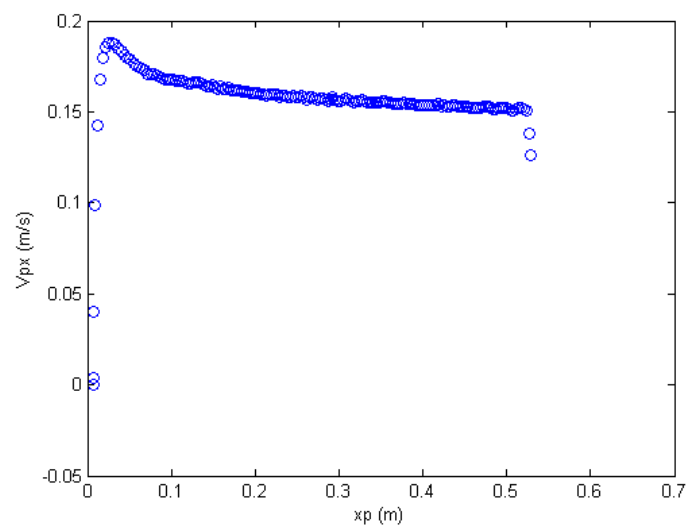


FIGURE 6.10 – Courbe de la vitesse sphère de la 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.



FIGURE 6.11 – images obtenue après conversion de la vidéo

6.2.5 Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre non revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 8mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig6.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fall
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelpe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0, 'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance init

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage).^2)/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

```



```
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;
```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 6.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutting
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp >= Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
    BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sav
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
    subplot(1, 11, n)
    file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
    load(file2read);
    imagesc(BWImage);
    colormap(gray) % To change the colours and the landscape
    axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

6.2.6 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère non revêtue de 5mm dans la glycérine

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig6.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(6.12), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration of
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.



FIGURE 6.12 – Trajectoire de la sphère de 5mm non revêtue dans la glycérine

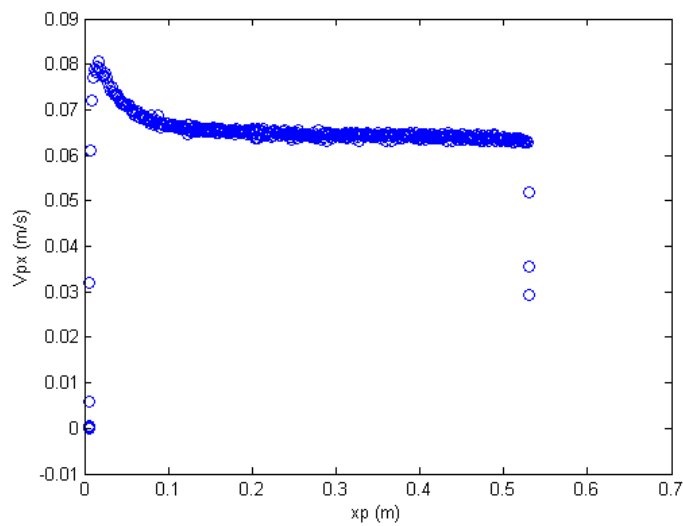


FIGURE 6.13 – Courbe de la vitesse sphère de la 5mm dans la glycérine obtenu après post-traitement



FIGURE 6.14 – images obtenue après conversion de la vidéo

6.3 Traitement des données des sphères revêtues dans la glycérine

6.3.1 Traitement des données des sphères de 10mm de diamètre revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous convertissons la vidéo en images, le nombre d'image dépend de la durée de la vidéo, plus le diamètre de la sphère est grand, plus la vidéo est courte. Les images sont ainsi sauvées avec un fichier type TIFF (.tif) lisible par Matlab. C'est à ce niveau que débute effectivement les opérations de post traitement avec le langage de programmation Matlab. Les scripts écrits pour les différentes étapes du post traitement avec Matlab seront mis à la fin de notre rapport. Nous montrons ci-dessous pour une seule expérience les différentes figures obtenues lors de notre post-traitement. Les résultats des autres expériences seront quant à eux mis dans l'annexe à la fin de notre rapport, mais le procédé de travail de post traitement est le même pour toutes les expériences.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

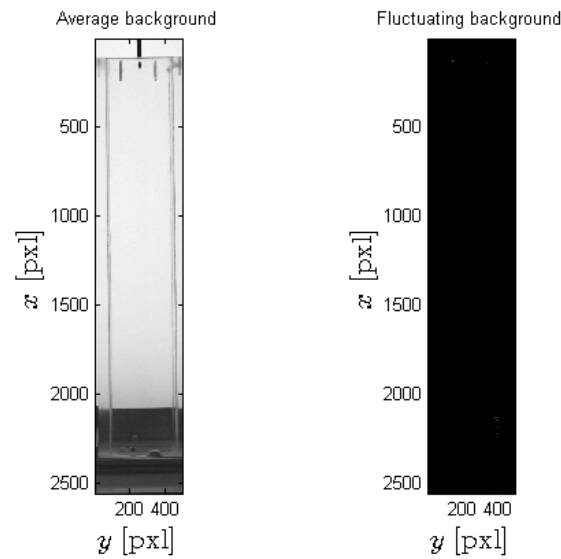


FIGURE 6.15 – Changement de couleur de l’arrière-plan

Voici le script Matlab nous permettant de changer l’arrière plan (fig6.15)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphé Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0, 'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background computation
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image variance

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting &
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVa

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

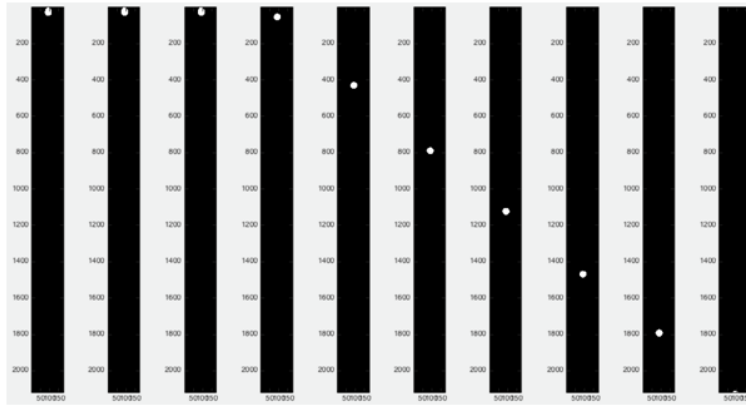


FIGURE 6.16 – Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 6.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average image
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');
    
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp>=Treshold);
BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end

```

```
clear all;
```



```

h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%% Background substracting
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage, y, x)
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save, 'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape

```

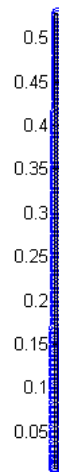


FIGURE 6.18 – Trajectoire de la sphère de 10mm revêtue dans la glycérine

```
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;
```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

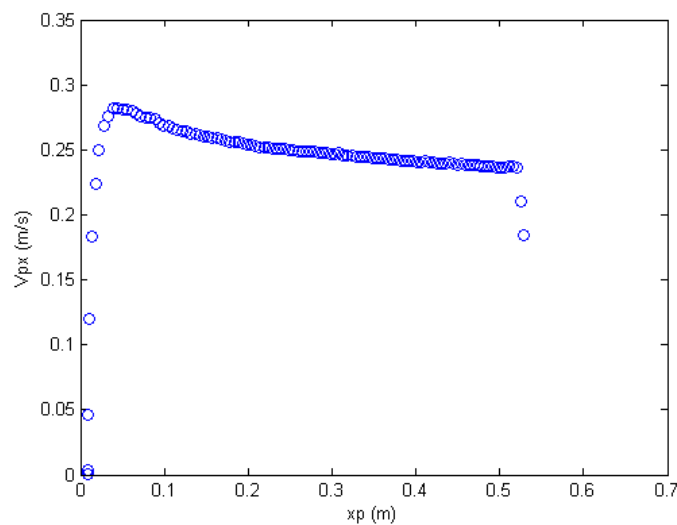


FIGURE 6.19 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de la 10mm dans la glycérine obtenu après post-traitement

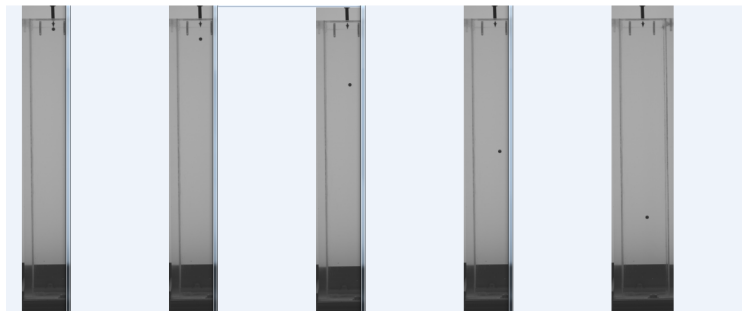


FIGURE 6.20 – images obtenue après conversion de la vidéo

6.3.3 Traitement des données des sphères de 8mm de diamètre non revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 10mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur,

en effet l'arrière plan qui devrait apparaître gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig6.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the fall
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0,'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0,'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
```

```

end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting & saving
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVariance');

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)
title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 6.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelph Clepin, Nicolas Mazzelie)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameters
load('Parameters.mat');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0, 'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp >= Treshold);

```

```

BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
end
clear all;

```

6.3.4 Trajectoire, vitesse et l'accélération de la sphère de 8mm revêtue dans la glycérine

Une fois capable de distinguer la sphère dans liquide, nous pouvons maintenant suivre son mouvement afin de déterminer, puis tracer sa trajectoire, et surtout sa vitesse qui nous intéresse. Pour cela nous prenons le centre de gravité (fig6.17) comme référentiel et nous le suivons image après image, l'ensemble des images nous donnera sa trajectoire(6.21), grâce au paramètre (Pix2m) trouver lors de l'étalonnage, nous pouvons trouver la distance parcourue par la sphère du point de vue de la caméra, et ensuite en la dérivant par le temps on trouve les vitesses instantanées qui à leur tour nous permettent d'avoir la courbe de la vitesse le long de la trajectoire.

Le script matlab qui de localiser le centre de masse puis la trajectoire et calculer les vitesses est le suivant :

```
% Program computing the trajectory, the velocity and the acceleration
% the falling sphere.
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameters
load('Parameters.mat', 'NbImageFall', 'FrameRate', 'pix2m');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
load(file2read);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
```

```

waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;

```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.



FIGURE 6.21 – Trajectoire de la sphère de 8mm revêtue dans la glycérine

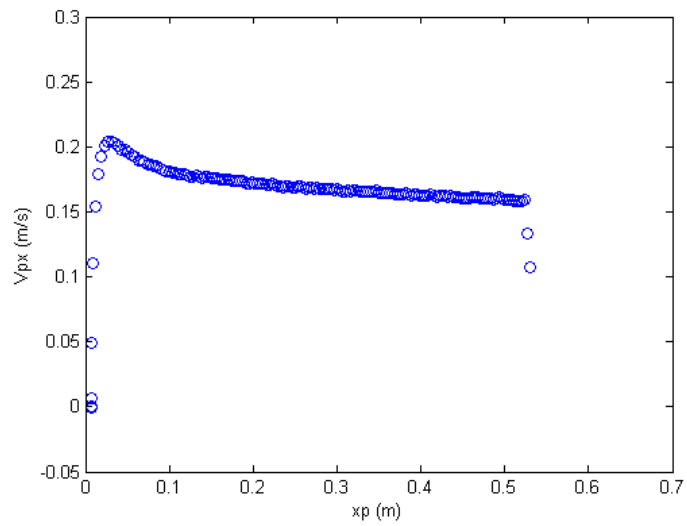


FIGURE 6.22 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de 8mm dans la glycérine obtenu après post-traitement

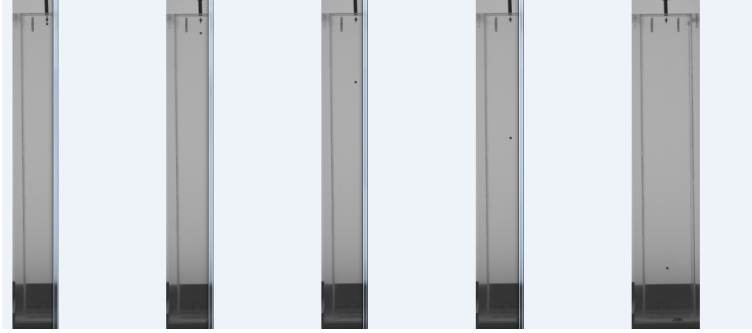


FIGURE 6.23 – images obtenue après conversion de la vidéo

Le travail fait ci dessus à été réalisé pour 10 expériences de chute, donc les résultats et les analyses que nous feront seront basés sur la moyenne de ces 10 expériences.

6.3.5 Traitement des données des sphères de 5mm de diamètre revêtues dans la glycérine

Grâce au logiciel de la caméra installé sur l'ordinateur, nous avons converti la vidéo en images, le nombre d'image est supérieur à celui des sphères de 8mm de diamètre car la vitesse est plus petite. Nous montrons ci-dessous les différentes figures et images obtenues lors de notre post-traitement pour une seule expérience de chute.

Changement de couleur de l'arrière-plan

Ici, il s'agit tout simplement d'éviter les fluctuations de lumière pouvant nuire à la caméra, c'est pourquoi nous faisons un changement de couleur, en effet l'arrière plan qui devrait apparaitre gris, nous le convertissons en noir, puisque la couleur noir absorbe toutes les autres radiations lumineuses, il serait plus convenable d'avoir un fond noir pouvons absorber toute éventuelle autre radiation lumineuse provenant d'ailleurs.

Voici le script Matlab nous permettant de changer l'arrière plan (fig6.3)

```
% Program computing the background image to be subtracted to the falling
% images.
%
```



```

% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphe Clepin, Nicolas Mazzelie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of par
load('Parameters.mat', 'NbImageNoise', 'Xresolution', 'Yresolution')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background comp
%Average image initialization
BackgroundAverage = zeros(Xresolution, Yresolution);

h = waitbar(0, 'Average background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read)); % i'm reading this image
BackgroundAverage = BackgroundAverage + tmp/NbImageNoise;
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fluctuating Background comp
BackgroundVariance = zeros(Xresolution, Yresolution); %Image varianc

h = waitbar(0, 'Fluctuating background computation: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageNoise
file2read = sprintf('Background/BackImg/Back%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
BackgroundVariance = BackgroundVariance + ((tmp - BackgroundAverage)
waitbar(indIm / NbImageNoise);
end
close(h);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results plotting &
save('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage', 'BackgroundVa

figure;
subplot(121);
imagesc(BackgroundAverage)

```

```

title('Average background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
subplot(122);
imagesc(BackgroundVariance)
title('Fluctuating background');
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image
xlabel('$y$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)
ylabel('$x$ [pxl]', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 16)

clear all;

```

Dé-bruitage de l'image

Une fois l'arrière plan changé nous allons enlever les "flou ou bruit", imposer à notre système à reconnaître seulement 2 types de couleur : la couleur blanche que nous attribuons à la sphère et la couleur noir tout le reste, ainsi on pourra suivre uniquement notre sphère. La figure 6.16 nous montre effectivement que nous avons attribué à notre sphère la couleur blanche dans un fond noir et donc on peut parfaitement suivre son mouvement.

Le script matlab qui permet de faire ce changement est le suivant :

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Program to process images of falling sphere from grayscale to binary
% images.
%
% Date: 29/04/2015 (author: Yousseu Adelphé Clepin, Nicolas Mazzelier)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of parameter
load('Parameters.mat');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calling of background average
load('Background/Background.mat', 'BackgroundAverage');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average Background computation
h = waitbar(0,'Image processing: please wait...');
for indIm = 1 : NbImageFall
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Image reading
file2read = sprintf('Fall/FallImg/Fall%.5d.tif', indIm);
tmp = double(imread(file2read));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Background subtraction
tmp = -tmp + BackgroundAverage;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Cutoff
tmp = tmp(Xindexmin:Xindexmax, Yindexmin:Yindexmax);
tmp = mat2gray(tmp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Conversion in black and white
[I, J] = find(tmp>=Treshold);
BWImage = zeros(size(tmp));
for n = 1 : length(I)
BWImage(I(n), J(n)) = 1;
end
BWImage = bwareaopen(BWImage, BubbleTreshold);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Saving
file2save = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indIm);
save(file2save, 'BWImage');
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 11, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);

```



```

dim = size(BWImage);
x = [1:dim(1)]*pix2m;
y = [1:dim(2)]*pix2m;
[yy, xx] = meshgrid(y, x);

Sp(indIm) = Integration2D(BWImage, y, x);
xp(indIm) = Integration2D(xx.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
yp(indIm) = Integration2D(yy.*BWImage, y, x)./Integration2D(BWImage,
waitbar(indIm / NbImageFall);
end
close(h);

time = [0:NbImageFall-1]/FrameRate;

Vpx = DeriveRegul1D(xp, time);
Vpy = DeriveRegul1D(yp, time);
apx = DeriveRegul1D(Vpx, time);
apy = DeriveRegul1D(Vpy, time);

file2save = sprintf('Fall/SphereMotion.mat');
save(file2save,'Sp', 'xp', 'yp', 'Vpx', 'Vpy', 'apx', 'apy');

figure
NbImShow = 10;
indImShow = round(linspace(1, NbImageFall, NbImShow));
for n = 1 : NbImShow
subplot(1, 10, n)
file2read = sprintf('Fall/BWImage/Fall%.5d.mat', indImShow(n));
load(file2read);
imagesc(BWImage);
colormap(gray) % To change the colours and the landscape
axis image % to modify the aspect ratio
hold on;
plot(yp(indImShow(n))/pix2m, xp(indImShow(n))/pix2m, '+r')
end

figure

```



FIGURE 6.24 – Trajectoire de la sphère de 5mm revêtue dans la glycérine

```
plot(yp, xp, 'o')
axis image

clear all;
```

La courbe de la vitesse est obtenue en mettant ensemble toute les vitesses instantanées le long de la trajectoire, cette opération est faisant en utilisant la commande "Plot" de matlab après avoir défini les axes.

Une fois terminé le post-traitement des données recueillies lors des chutes des différents types de sphères et de divers diamètre dans l'eau, et puis dans le glycérol, nous pouvons passer maintenant à l'analyse des résultats.

Rappelons une fois de plus que l'analyse et la conclusion ne se fera qu' à partir des valeurs moyennes de la vitesse terminale, car toutes les expériences ont été faites en utilisant les sphères différentes : pour les expériences avec les sphères 10mm nous avons utilisé 3 sphères, pour celles de 8mm , 3 sphères ont aussi été utilisées et pour celles de 5mm, 4 sphères ont été utilisées et lors de la caractérisation de nos sphères, nous avons vu que les sphères bien qu'ayant le même diamètre, ont des masses différentes, bien que l'écart entre les masses soit de l'ordre d'un centième voir un millième. En plus ayant utilisé la masse moyenne des sphères lors du calcul de la densité qui nous sera utile pour les calculs théorique, il nous parait

6.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DES SPHÈRES REVÊTUES DANS LA GLYCÉRINE167

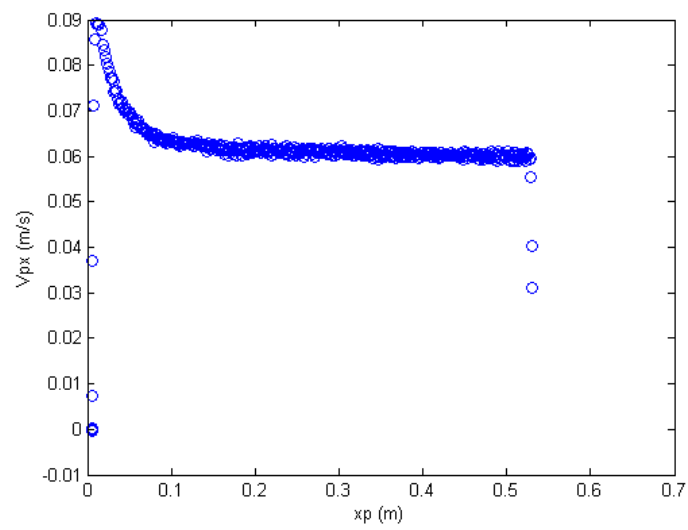


FIGURE 6.25 – Courbe de la vitesse sphère revêtue de 5mm dans la glycérine obtenu après post-traitement

logique d'utiliser aussi la valeur de la vitesse moyenne que nous obtiendrons pour les des 10 chutes.

Chapitre 7

Analyse des résultats et discussion

Dans cette partie, nous présenterons les résultats obtenus dans l'eau et dans la glycérine après le post-traitement, ensuite nous essayerons de voir et si possible quantifier l'effet du revêtement super hydrophobe en terme de réduction de traînée.

7.1 Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans l'eau.

Comme pour le post-traitement nous présentons les résultats en fonction des diamètres des sphères, cependant étant donné que l'objectif est de voir un éventuel effet du revêtement super hydrophobe, les résultats des 2 types de surfaces (revêtues et non revêtues) seront mis ensemble pour une plus facile comparaison.

7.1.1 Résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans l'eau.

Après nos 10 expériences de chute, nous traçons sur un même graphique les courbes de vitesse issue de nos 10 chutes(fig7.1, fig7.4, fig7.8, fig7.11, fig7.15 et fig7.18), ensuite nous présentons la courbe relative à la vitesse moyenne(fig7.2, fig7.5, fig7.9, fig7.12, fig7.16, fig7.19) des 10 chutes et celle montrant la variation des autres vitesses autour de la vitesse moyenne(fig7.3, fig7.6, fig7.10, fig7.13, fig7.17, fig7.20).

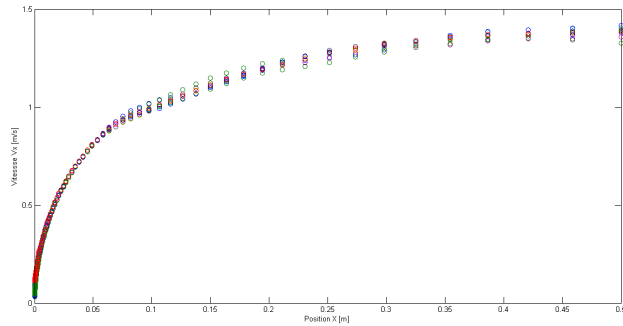


FIGURE 7.1 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm non revêtues dans l'eau

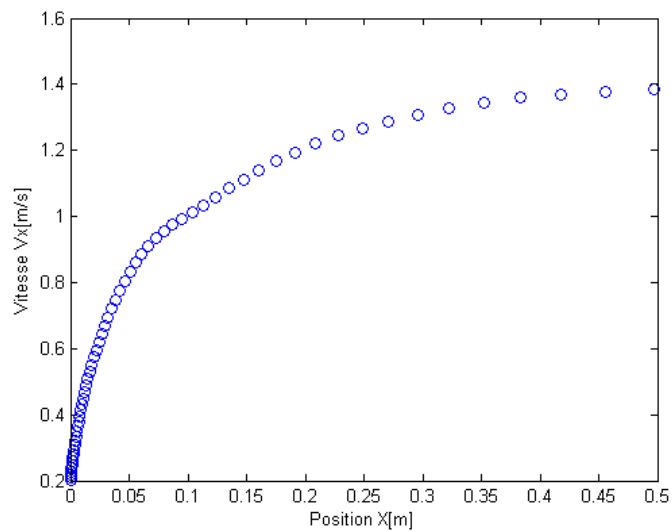


FIGURE 7.2 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm non revêtues dans l'eau

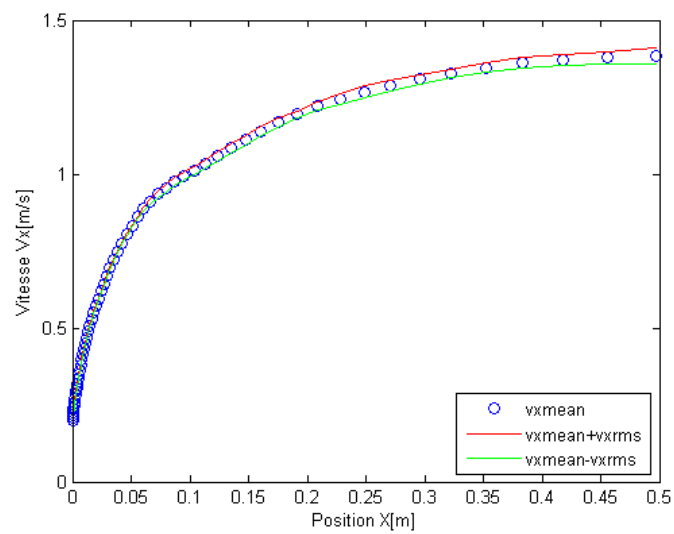


FIGURE 7.3 – Variation autour de la vitesse moyenne : on observe la bonté de notre dispositif et notre méthode de travail par la similitude des résultats.

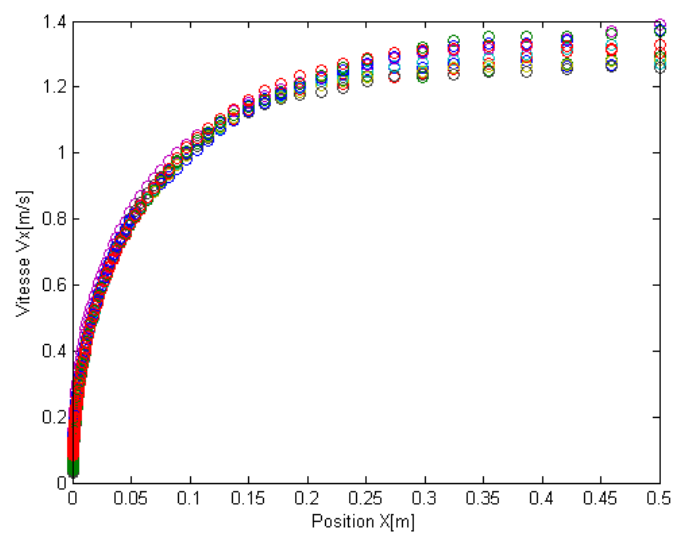


FIGURE 7.4 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm revêtues dans l'eau

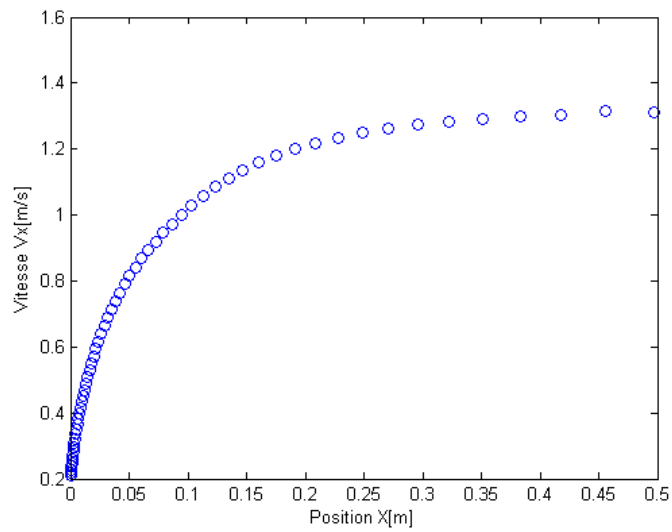


FIGURE 7.5 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm revêtues dans l'eau

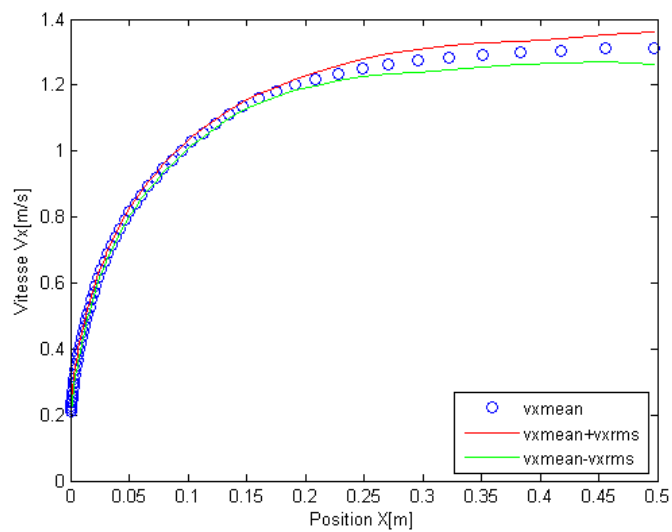


FIGURE 7.6 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 10mm revêtues

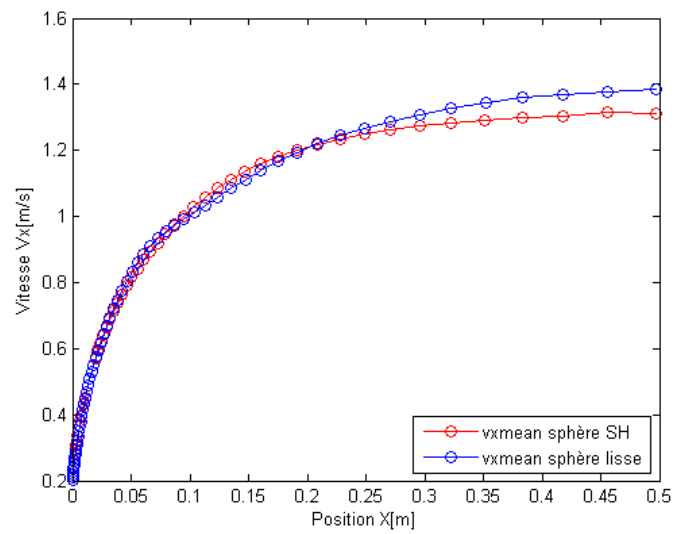


FIGURE 7.7 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 10mm revêtues et non revêtues dans l'eau

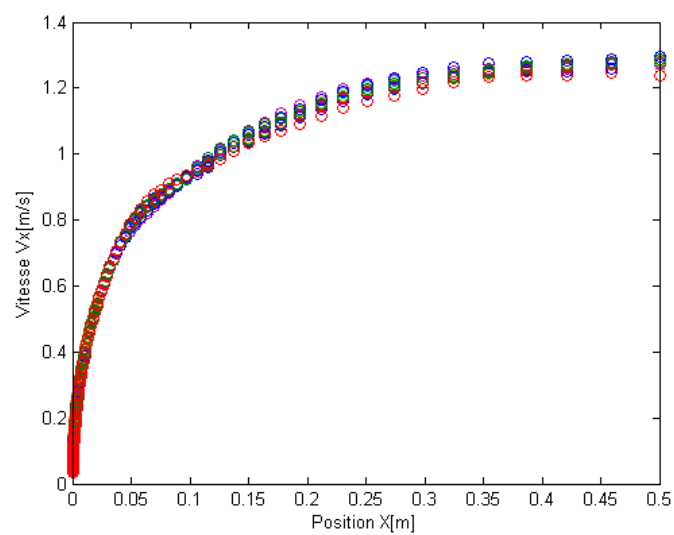


FIGURE 7.8 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau

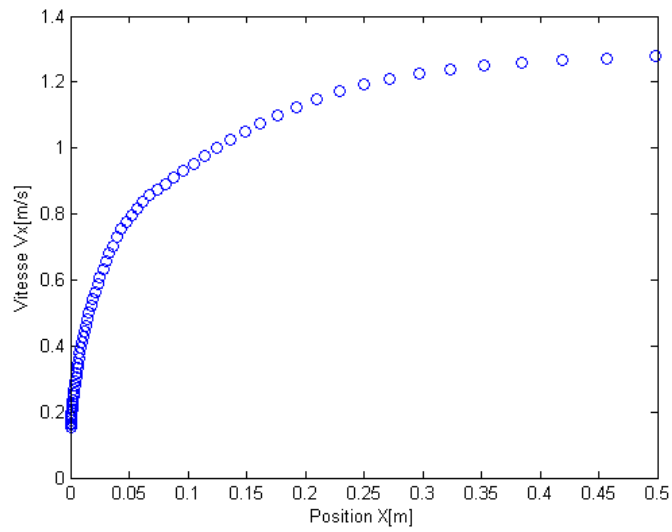


FIGURE 7.9 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau

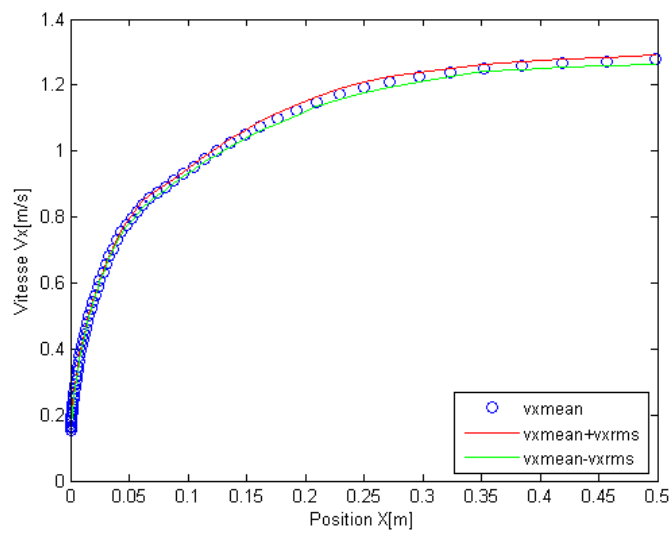


FIGURE 7.10 – Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau

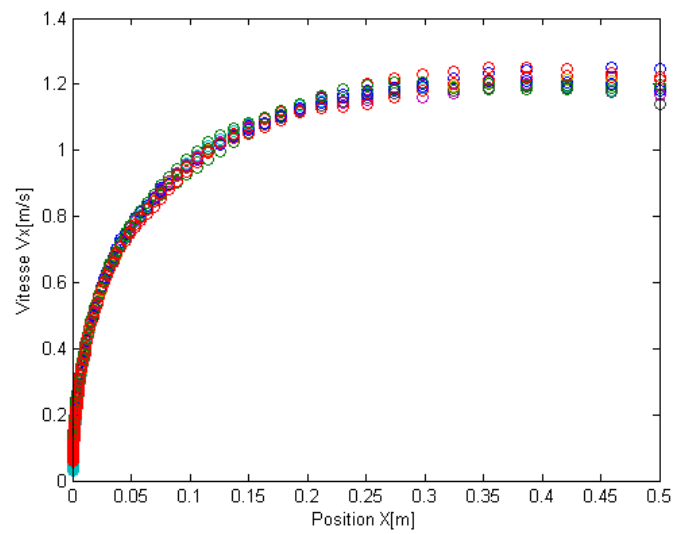


FIGURE 7.11 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm revêtues dans l'eau

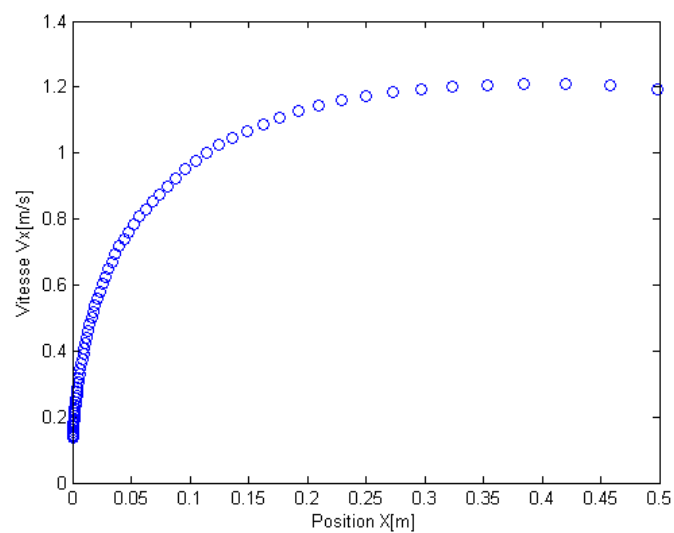


FIGURE 7.12 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm revêtues dans l'eau

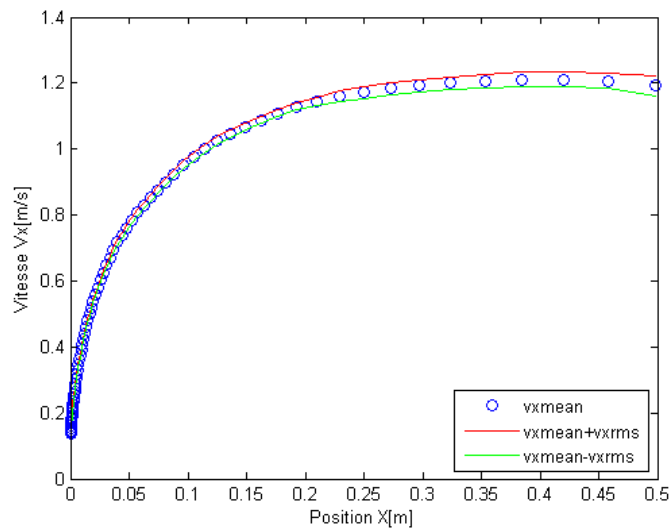


FIGURE 7.13 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 8mm revêtues

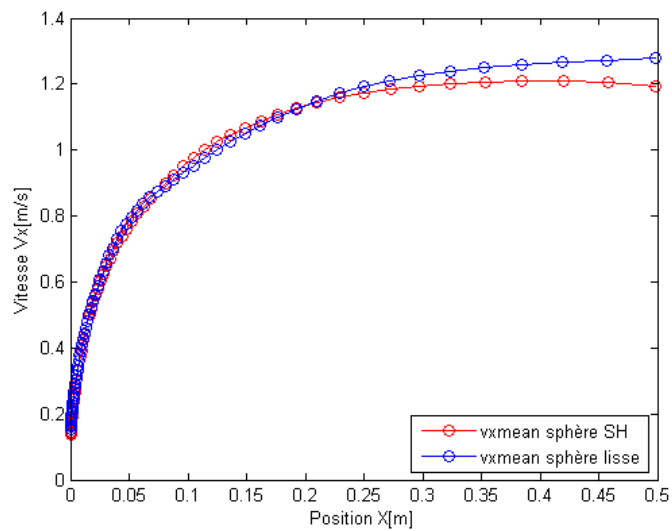


FIGURE 7.14 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 8mm revêtues et non revêtues dans l'eau

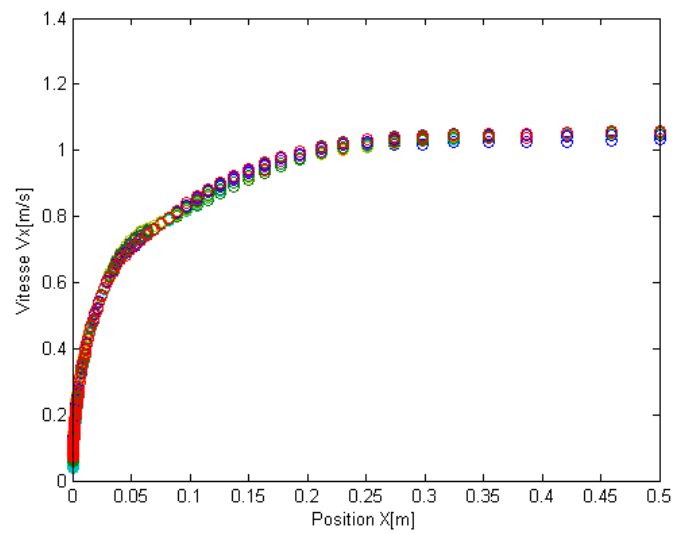


FIGURE 7.15 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau

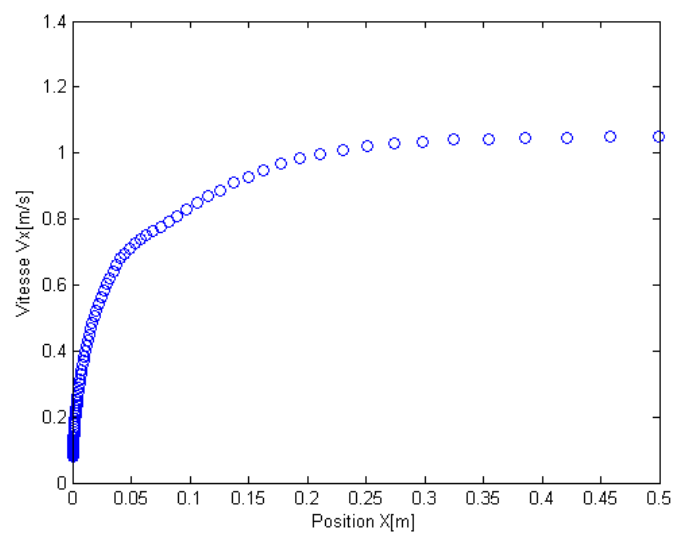


FIGURE 7.16 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau

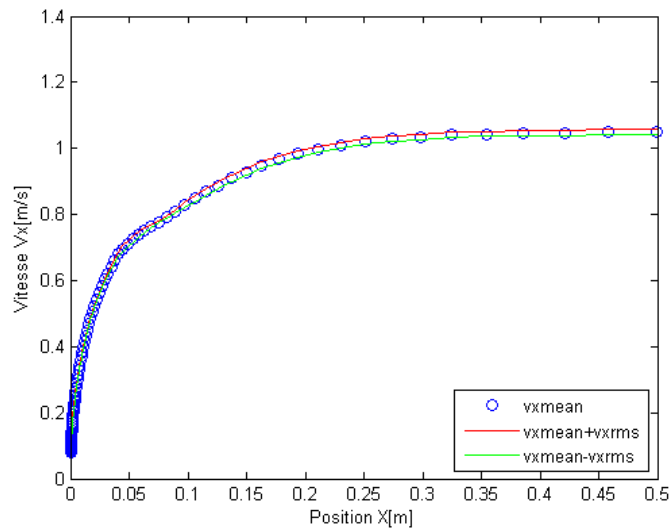


FIGURE 7.17 – Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau

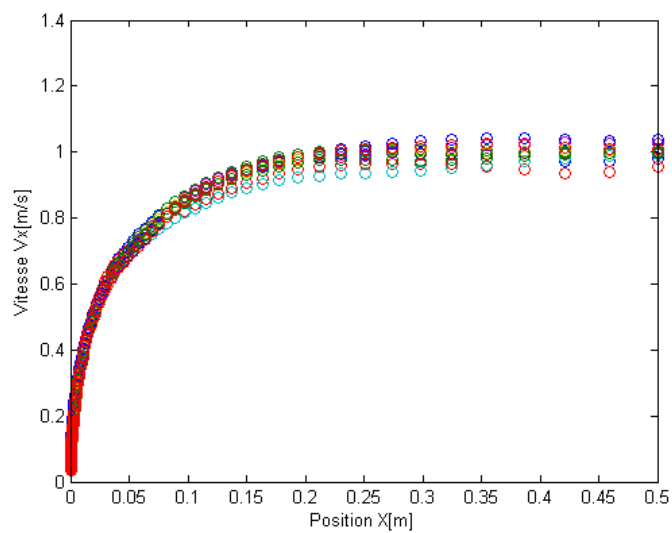


FIGURE 7.18 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm revêtues dans l'eau

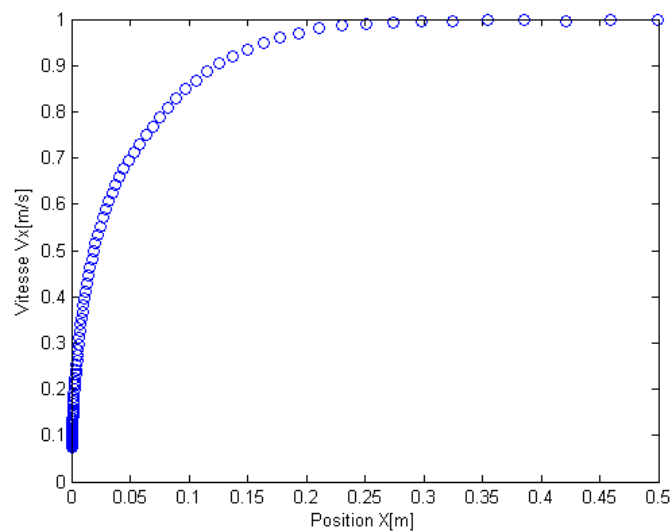


FIGURE 7.19 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm revêtues dans l'eau

7.1.2 Analyse des résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans l'eau.

Nous pouvons à présent commenter et analyser les résultats obtenues, on observe avant tout que les courbes relatives aux vitesses de chaque chute (fig7.1, fig7.4, fig7.8, fig7.11, fig7.15 et fig7.18) des sphères revêtues et non revêtues ont la même allure et en plus les valeurs des vitesses terminales sont légèrement différentes en raison des différences de masses comme nous l'avons constaté lors de la caractérisation des sphères. Rappelons que les différences de masse trouvées étaient de l'ordre d'un millième. Les observations faites ci-dessus témoignent de la bonté du dispositif expérimental et de la validité des résultats obtenus.

Les courbes(fig7.3, fig7.6, fig7.10, fig7.13, fig7.17, fig7.20) nous montrent comment les courbes de chaque chute varie autour des courbes de vitesse moyenne respectives (fig7.2, fig7.5, fig7.9, fig7.12, fig7.16, fig7.19). Pour ce qui est de la trajectoire du mouvement, on voit que les sphères ont toute une trajectoire plus ou moins inclinée selon leur masse, cette trajectoire non rectiligne est due aux instabilités qui se créent dans le sillage après le passage de la sphère.

Lorsqu'on trace sur une même figure les courbes des vitesses moyennes des sphères revêtues et non revêtues (fig7.7, fig7.14, 7.21) dans l'eau dans le but de les comparer et voir l'effet du revêtement super hydrophobe, on constate que la vitesse terminale des sphères revêtues est inférieure à

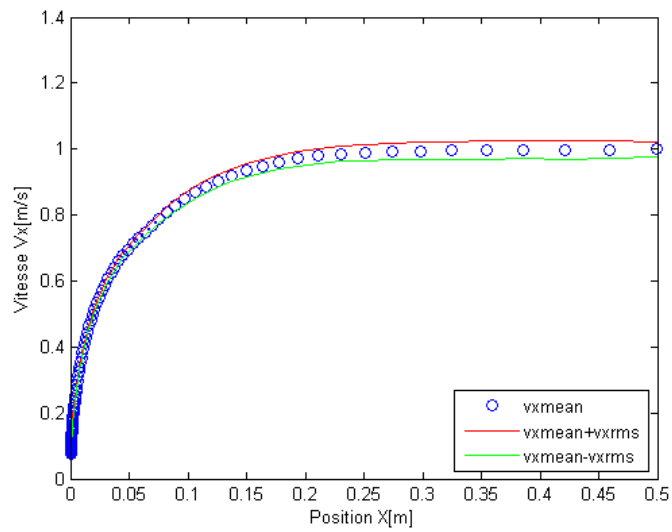


FIGURE 7.20 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 5mm revêtues

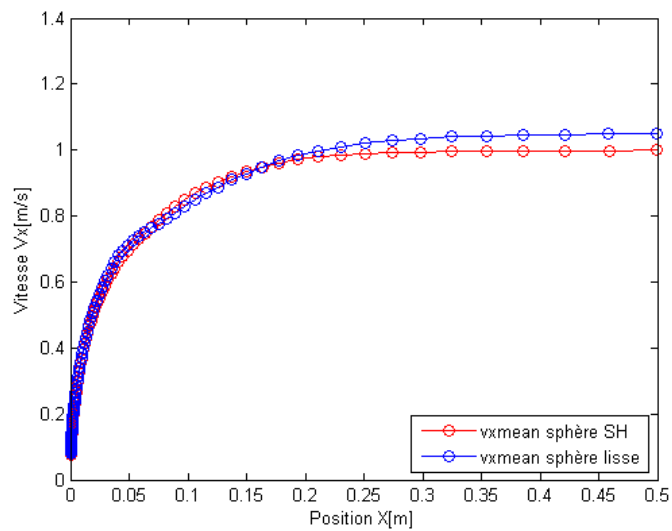


FIGURE 7.21 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 5mm revêtues et non revêtues dans l'eau

celle des sphères non revêtues, donc le revêtement aurait plutôt un effet contraire à celui attendu qui est d'augmenter la vitesse. En effet, nous avons :

- Pour les sphères de 8mm dans l'eau, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$\begin{aligned} V_{term1} &= 1,2752m/s \\ V_{term2} &= 1,1892m/s \\ \frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} &= \frac{1,2752 - 1,1892}{1,2752} = 0,0704 \approx \mathbf{7\%} \end{aligned}$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$\begin{aligned} C_{d1} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} \\ C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} \end{aligned}$$

en considérant que $U_2 = U_1 - 7\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$\begin{aligned} C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{7}{100}U_1)^2 A} \\ \frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} &= \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{7}{100}U_1)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}} \quad (7.1) \\ &= 1 - \frac{1}{(1 - \frac{7}{100})^2} = -0,1562 \approx \mathbf{-15,6\%} \end{aligned}$$

on note une augmentation du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 15%

- Pour les sphères de 5mm dans l'eau, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$V_{term1} = 1,0541m/s$$

$$V_{term2} = 1,0009m/s$$

$$\frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} = \frac{1,0542 - 1,0009}{1,0542} = 0,0505 \approx \mathbf{5,5\%}$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$C_{d1} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}$$

$$C_{d2} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A}$$

en considérant que $U_2 = U_1 - 5,5\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$\begin{aligned} C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{5,5}{100}U_1)^2 A} \\ \frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} &= \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{5,5}{100}U_1)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}} \\ &= 1 - \frac{1}{(1 - \frac{5,5}{100})^2} = -0,1197 \approx \mathbf{-12\%} \end{aligned} \quad (7.2)$$

on note une augmentation du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 12%.

• Pour les sphères de 10mm dans l'eau, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$V_{term1} = 1,3802m/s$$

$$V_{term2} = 1,3117m/s$$

$$\frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} = \frac{1,3802 - 1,3117}{1,3802} = 0,0496 \approx \mathbf{5\%}$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$C_{d1} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}$$

$$C_{d2} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A}$$

en considérant que $U_2 = U_1 - 5\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$C_{d2} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{5}{100}U_1)^2 A}$$

$$\frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} = \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho (U_1 - \frac{5}{100}U_1)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}} \quad (7.3)$$

$$= 1 - \frac{1}{(1 - \frac{5}{100})^2} = -0,1080 \approx -11\%$$

on note une augmentation du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 11%

Bien que nous soyons intéressés seulement par la vitesse terminale, il est important de noter que sur les Courbes de comparaisons (fig7.7, fig7.14, et fig7.21), il existe des zones où la vitesse des sphères revêtues est supérieur à celle des sphères non revêtues et à ces zones on a observé comment la couche d'air n'était plus symétriquement répartie autour des sphères.

Le script matlab nous ayant permit de tracer les courbes des vitesses moyennes est

```
x = logspace(log10(1e-4), log10(0.5), 100);
for n = 1 : 10
load([num2str(n) '\Fall\SphereMotion.mat']);
indZero = find(Vpx>0.02, 1);
v(n, :) = interp1((xp(indZero:end)-xp(indZero)), Vpx(indZero:end), x);
end
```

```
vxmean = mean(v);  
vxrms = std(v);  
vymean = mean(v);  
vyrms = std(v);
```

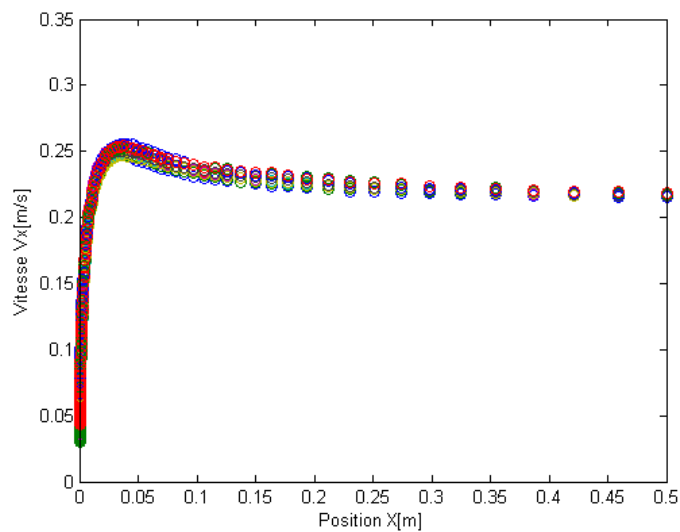



FIGURE 7.22 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm non revêtues dans la glycérine

7.2 Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans la glycérine.

7.3 Analyse des résultats obtenus lors des chutes dans la glycérine.

Comme pour l'eau, nous présentons les résultats en fonction des diamètres des sphères, cependant étant donné que l'objectif est de voir un éventuel effet du revêtement super hydrophobe, les résultats des 2 types de surfaces (revêtues et non revêtues) seront mis ensemble pour une plus facile comparaison.

7.3.1 Résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans la glycérine.

Après nos 10 expériences de chute, nous traçons sur un même graphique les courbes de vitesse issue de nos 10 chutes (fig7.22, fig7.25, fig7.29, fig7.32, fig7.36 et fig7.39), ensuite nous présentons la courbe relative à la vitesse moyenne (fig7.23, fig7.26, fig7.30, fig7.33, fig7.37, fig7.40) des 10 chutes et celle montrant la variation des autres vitesses autour de la vitesse moyenne (fig7.24, fig7.27, fig7.31, fig7.34, fig7.38, fig7.41).

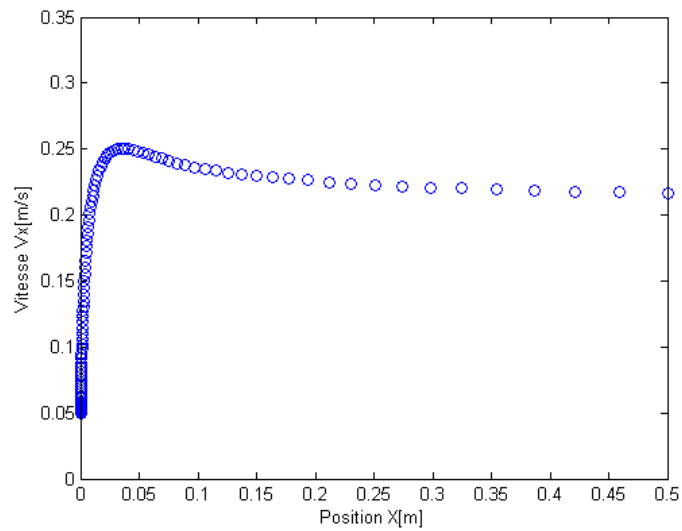


FIGURE 7.23 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm non revêtues dans la glycérine

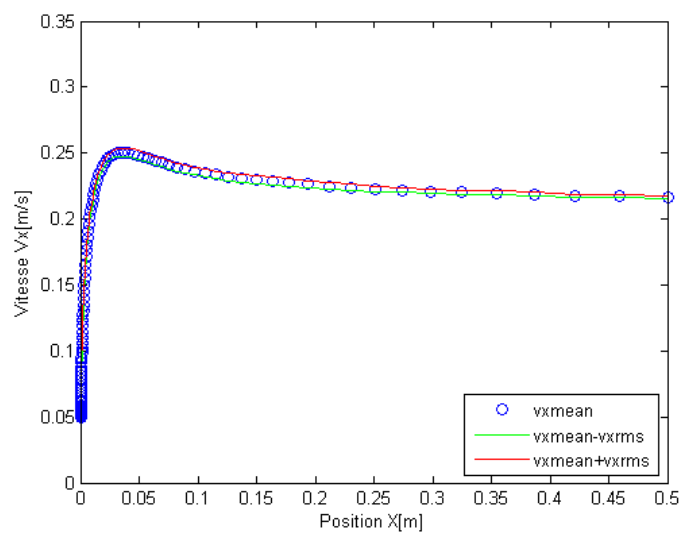


FIGURE 7.24 – Variation autour de la vitesse moyenne : on observe la bonté de notre dispositif et notre méthode de travail par la similitude des résultats.

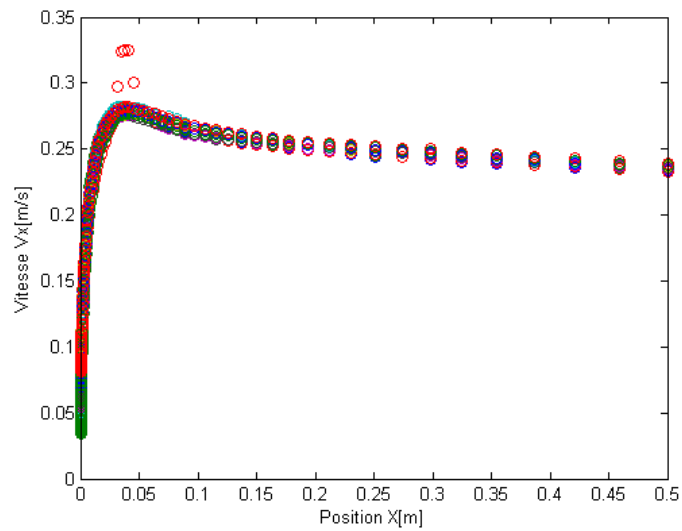


FIGURE 7.25 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm revêtues dans la glycérine

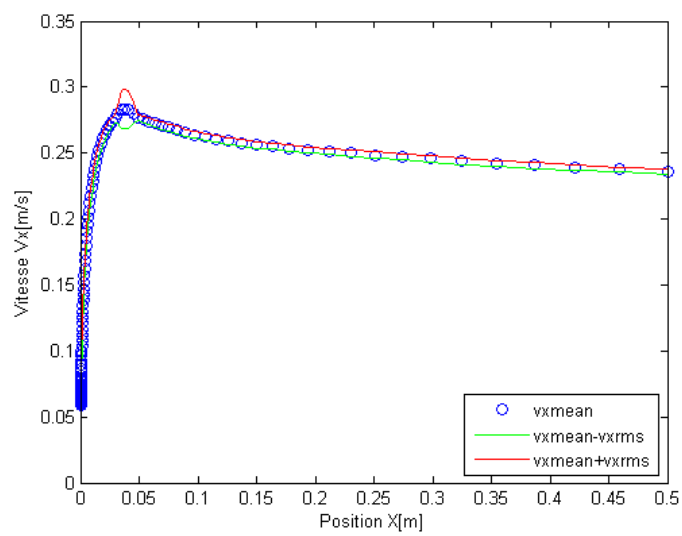


FIGURE 7.26 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm revêtues dans la glycérine

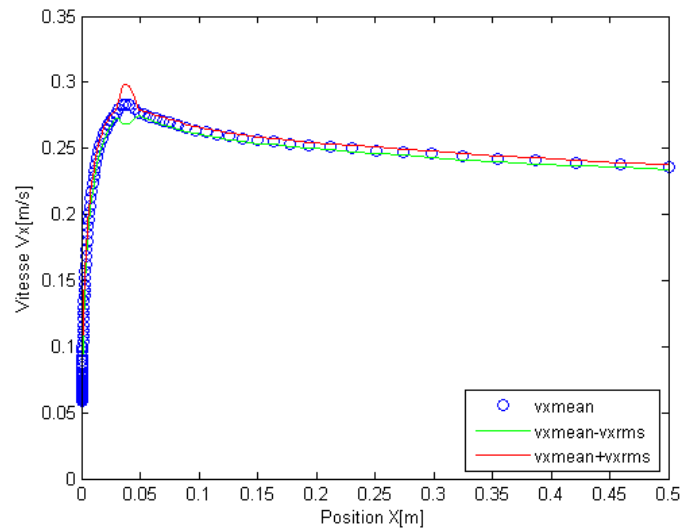


FIGURE 7.27 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 10mm revêtues

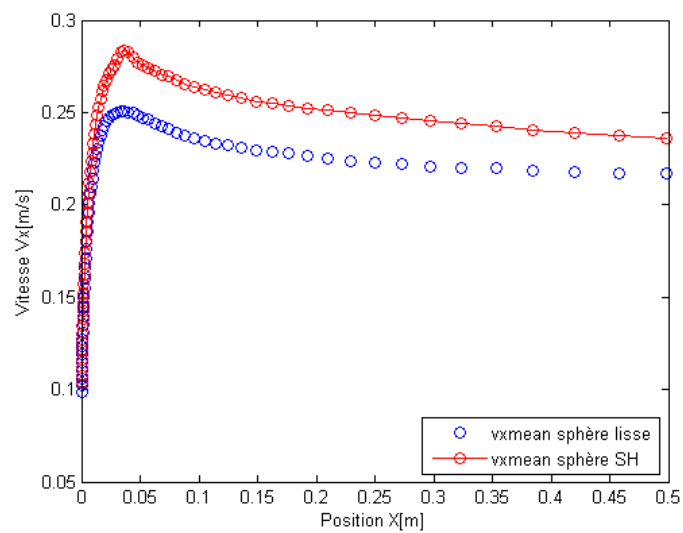


FIGURE 7.28 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 10mm revêtues et non revêtues dans la glycérina

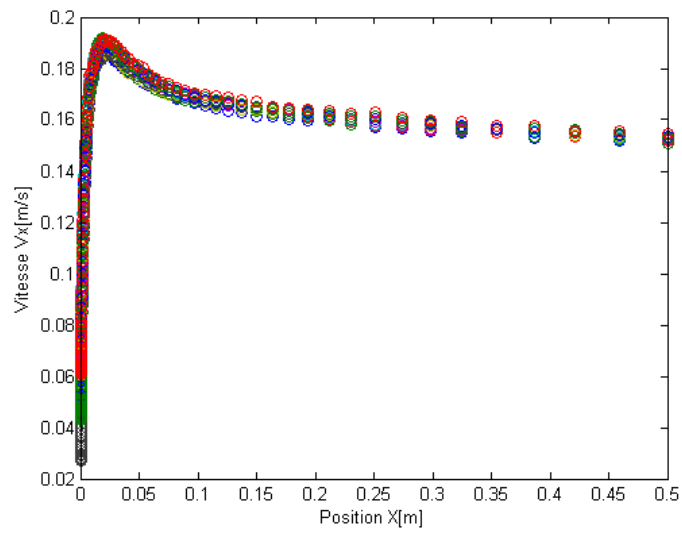


FIGURE 7.29 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine

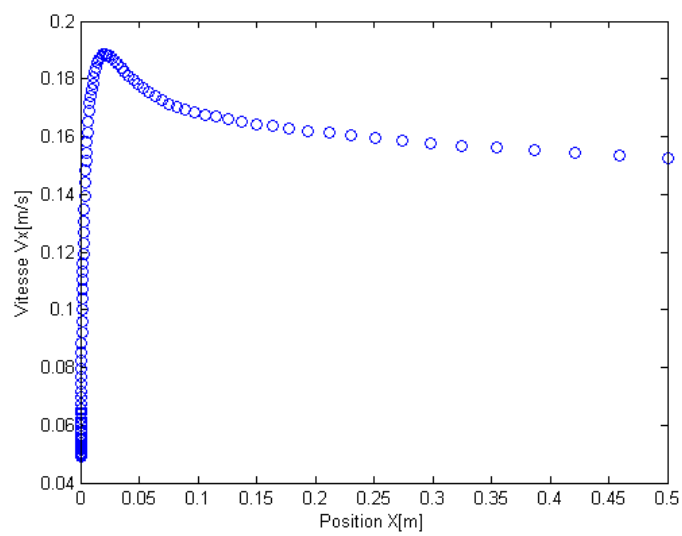


FIGURE 7.30 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine

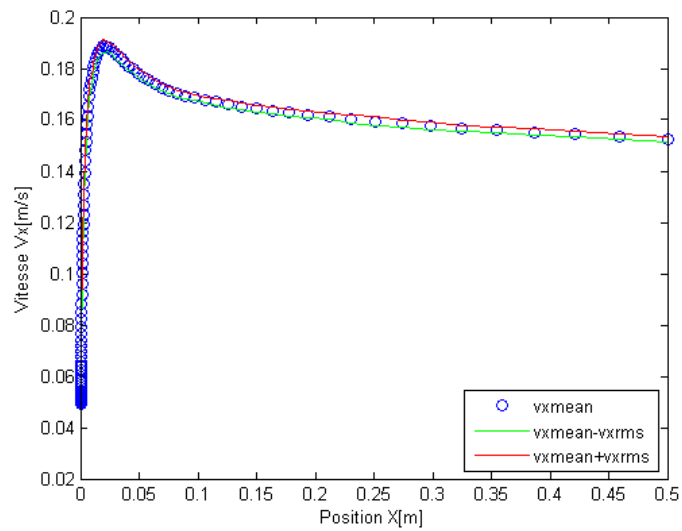


FIGURE 7.31 – Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine

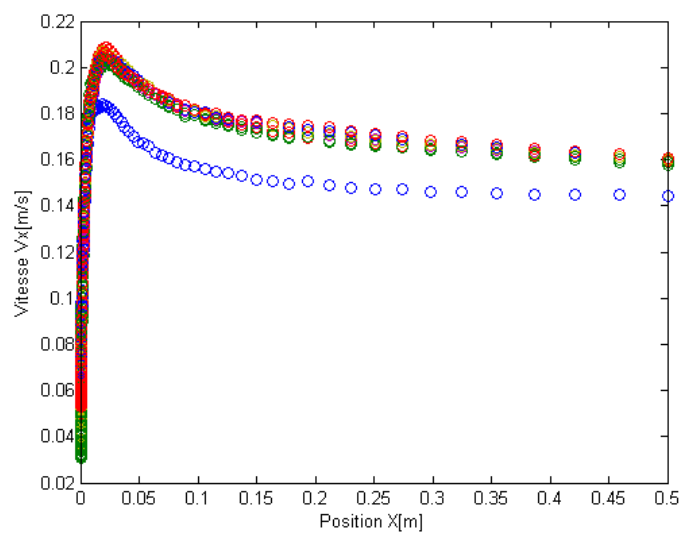


FIGURE 7.32 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm revêtues dans la glycérine

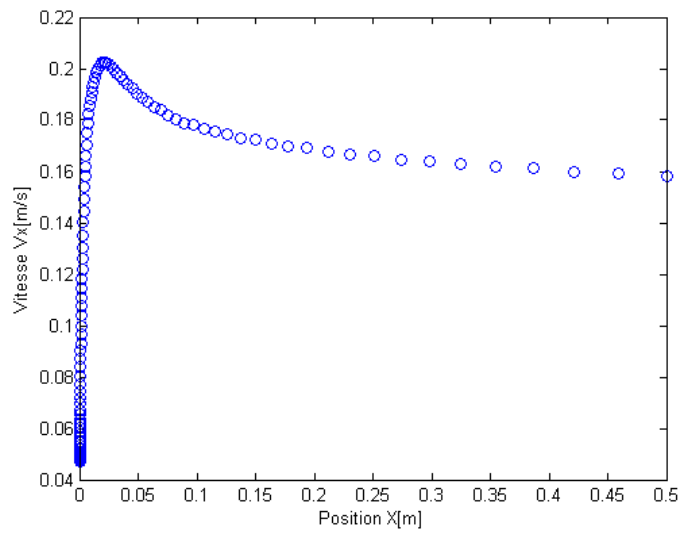


FIGURE 7.33 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm revêtues dans la glycérine

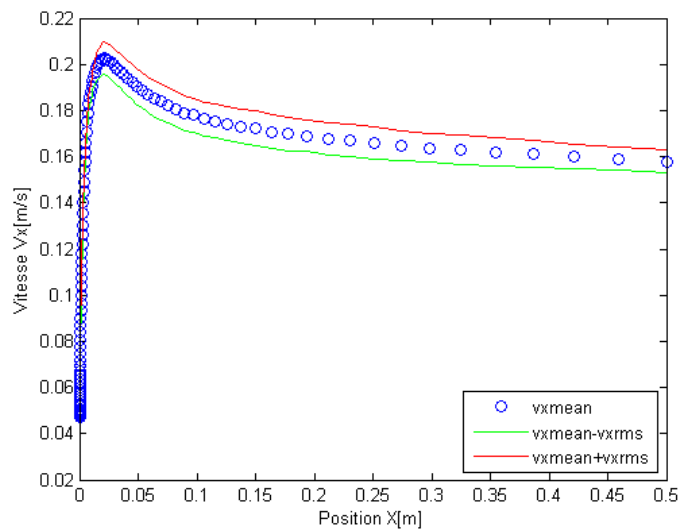


FIGURE 7.34 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 8mm revêtues

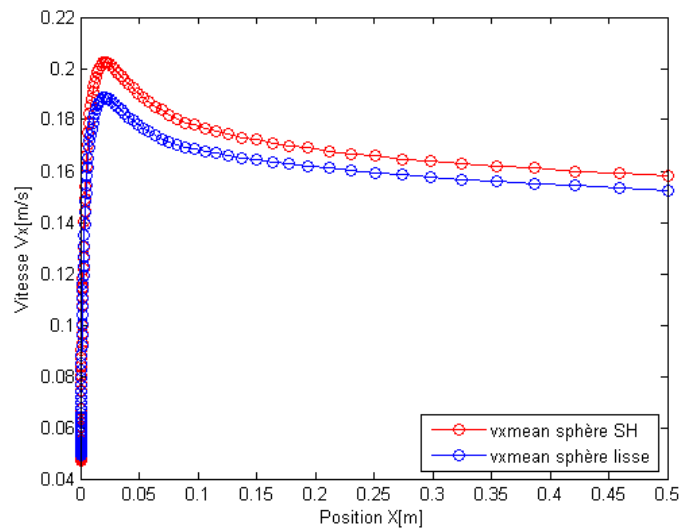


FIGURE 7.35 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 8mm revêtues et non revêtues dans la glycérine

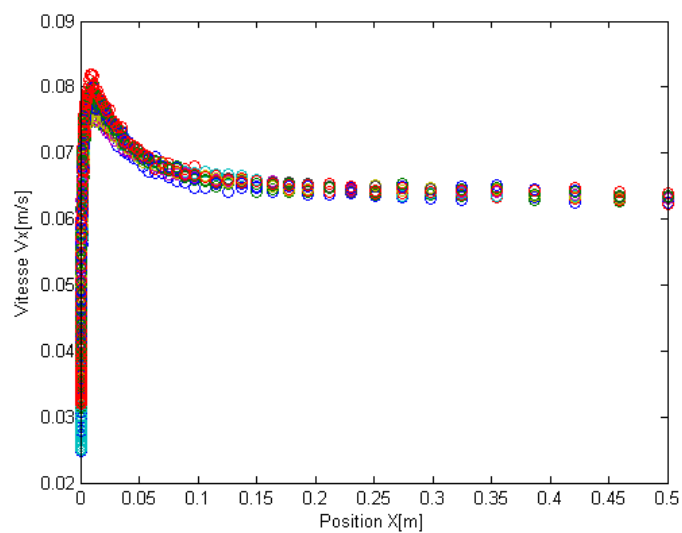


FIGURE 7.36 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine

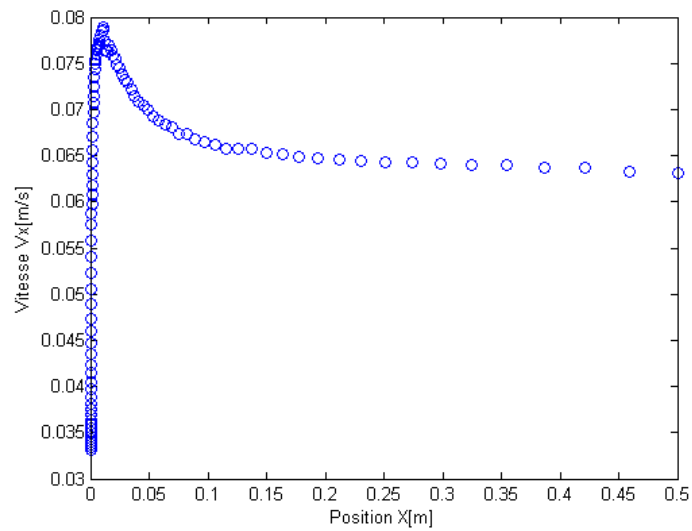


FIGURE 7.37 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine

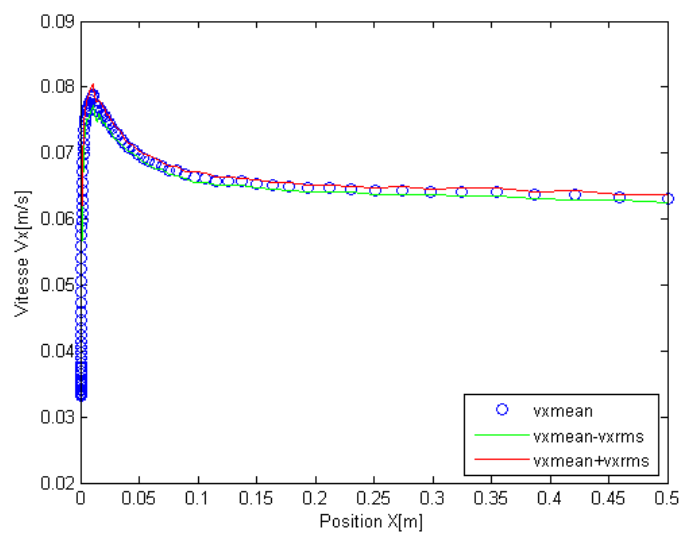


FIGURE 7.38 – Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine

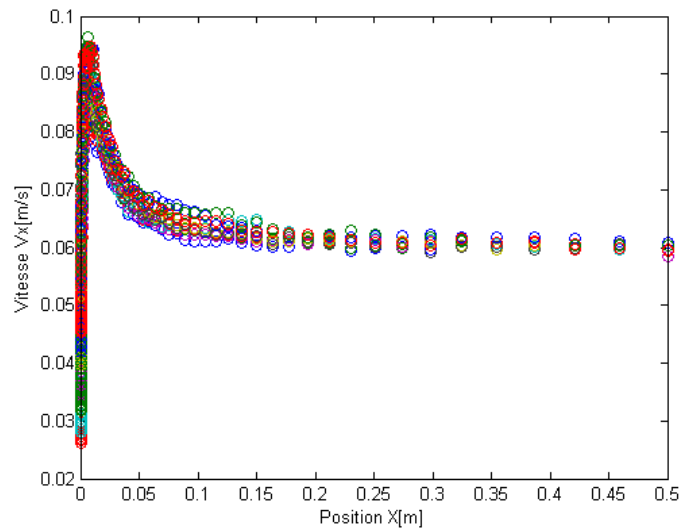


FIGURE 7.39 – Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm revêtues dans la glycérine

7.3.2 Analyse des résultats des sphères de 10 mm, 8mm et 5mm dans la glycérine.

Nous pouvons à présent commenter et analyser les résultats obtenues, on observe avant tout que les courbes relatives aux vitesses de chaque chute (fig7.22, fig7.25, fig7.29, fig7.32, fig7.36 et fig7.39) des sphères revêtues et non revêtues ont la même allure et en plus les valeurs des vitesses terminales sont légèrement différentes en raison des différences de masses comme nous l'avons constaté lors de la caractérisation des sphères. Rappelons que les différences de masse trouvées étaient de l'ordre d'un millième. Les observations faites ci-dessus témoignent de la bonté du dispositif expérimental et de la validité des résultats obtenus.

Les courbes (fig7.24, fig7.27, fig7.31, fig7.34, fig7.38, fig7.41) nous montrent comment les courbes de chaque chute varie autour des courbes de vitesse moyenne respectives (fig7.23, fig7.26, fig7.30, fig7.33, fig7.37, fig7.40). Pour ce qui est de la trajectoire du mouvement, on voit que les sphères ont une trajectoire rectiligne.

Lorsqu'on trace sur une même figure les courbes des vitesses moyenne des sphères revêtues et non revêtues (fig7.28, fig7.35, 7.42) dans la glycérine dans le but de les comparer et voir l'effet du revêtement super hydrophobe, on constate que la vitesse terminale des sphères revêtues est supérieur à celle des sphères non revêtues, donc le revêtement a un effet qui est celui d'augmenter la vitesse. En effet, nous avons :

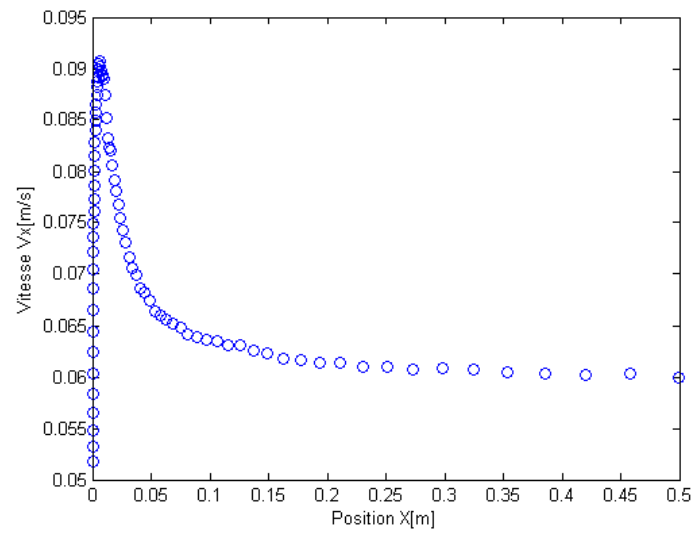


FIGURE 7.40 – Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm revêtues dans la glycérine

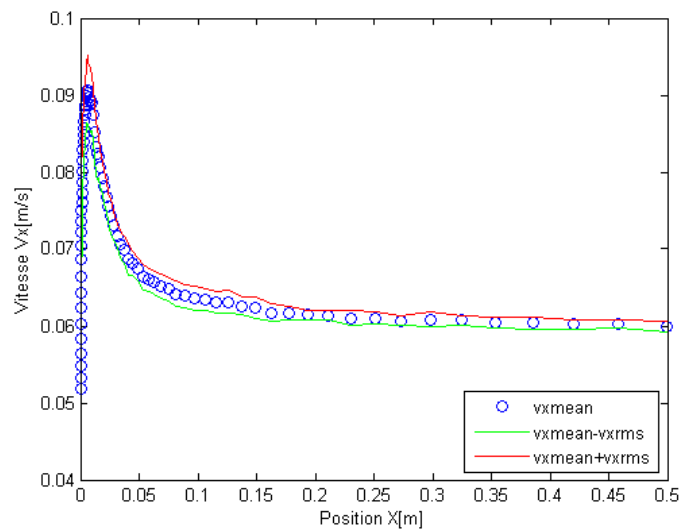


FIGURE 7.41 – Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 5mm revêtues

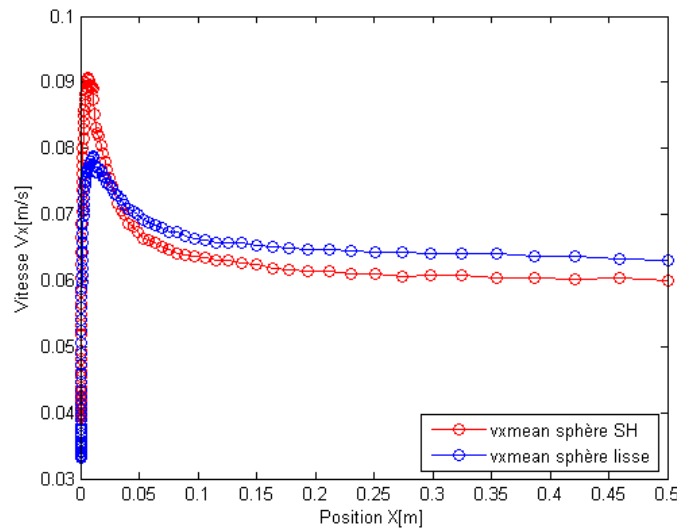


FIGURE 7.42 – Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 5mm revêtues et non revêtues dans la glycérine

• Pour les sphères de 8mm dans la glycérine, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$V_{term1} = 0,1524m/s$$

$$V_{term2} = 0,1582m/s$$

$$\frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} = \frac{0,1524 - 0,1582}{0,1524} = -0,038 \approx 4\%$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$C_{d1} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}$$

$$C_{d2} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A}$$

en considérant que $U_2 = U_1 + 4\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$\begin{aligned}
C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho(U_1 + \frac{4}{100}U_1)^2 A} \\
\frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} &= \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho(U_1 + \frac{4}{100}U_1)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}} \\
&= 1 - \frac{1}{(1 + \frac{4}{100})^2} = 0,0754 \approx \mathbf{7,5\%}
\end{aligned} \tag{7.4}$$

on note une réduction du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 7,5%

- Pour les sphères de 5mm dans la glycérine, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$\begin{aligned}
V_{term1} &= 0,0631m/s \\
V_{term2} &= 0,0596m/s \\
\frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} &= \frac{0,0631 - 0,0596}{0,0631} = 0,0554 \approx \mathbf{5,5\%}
\end{aligned}$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$\begin{aligned}
C_{d1} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} \\
C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A}
\end{aligned}$$

en considérant que $U_2 = U_1 - 5,5\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$\begin{aligned}
C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho(U_1 - \frac{5,5}{100}U_1)^2 A} \\
\frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} &= \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho(U_1 - \frac{5,5}{100}U_1)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}}
\end{aligned} \tag{7.5}$$

$$= 1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{5,5}{100}\right)^2} = -0,1197 \approx \mathbf{-12\%}$$

on note une augmentation du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 12%. Résultat tout à fait surprenant étant donné que pour les autres sphères les résultats sont ceux dont on s'y attendait.

• Pour les sphères de 10mm dans la glycérine, soit V_{term1} la vitesse terminale de la sphère non revêtue et V_{term2} celle de la sphère revêtue, nous pouvons calculer la variation de vitesse due au revêtement

$$\begin{aligned} V_{term1} &= 0,2178m/s \\ V_{term2} &= 0,2390m/s \\ \frac{V_{term1} - V_{term2}}{V_{term1}} &= \frac{0,2178 - 0,2390}{0,2178} = -0,0973 \approx \mathbf{-10\%} \end{aligned}$$

évaluons à présent son effet sur le coefficient de traînée C_d : comme pour le cas de la vitesse terminale, soit C_{d1} le coefficient de traînée de la sphère non revêtue et C_{d2} celui de la sphère revêtue

$$\begin{aligned} C_{d1} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} \\ C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} \end{aligned}$$

en considérant que $U_2 = U_1 + 10\%U_1$ et que l'aire ($A = 4\pi r^2$) des deux sphères est égale (on considère l'épaisseur de la couche d'air \ll au rayon des sphères), on trouve l'effet du revêtement sur le C_d après l'opération suivante

$$\begin{aligned} C_{d2} &= \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_2^2 A} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho \left(U_1 + \frac{10}{100}U_1\right)^2 A} \\ \frac{C_{d1} - C_{d2}}{C_{d1}} &= \frac{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A} - \frac{D}{\frac{1}{2}\rho \left(U_1 + \frac{10}{100}U_1\right)^2 A}}{\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_1^2 A}} \quad (7.6) \\ &= 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{10}{100}\right)^2} = 0,1735 \approx \mathbf{17\%} \end{aligned}$$

on note une réduction du coefficient de traînée due au revêtement d'environ 17%

Le script matlab nous ayant permit de tracer les courbes des vitesses moyennes est

```
x = logspace(log10(1e-4), log10(0.5), 100);
for n = 1 : 10
load([num2str(n) '\Fall\SphereMotion.mat']);
indZero = find(Vpx>0.02, 1);
v(n, :) = interp1((xp(indZero:end)-xp(indZero)), Vpx(indZero:end), x);
end
vxmean = mean(v);
vxrms = std(v);
vymean = mean(v);
vyrms= std(v);
```

Au vu de tous ces résultats satisfaisants ou non, on a la preuve que la clef du problème se trouve dans la couche d'air qui se forme entre les interfaces solide-liquide en condition de super-hydrophobicité. Analysons attentivement le rôle de la couche d'air. En considérant que la viscosité de l'air est inférieur à celle de l'eau, on pourrait en effet assumer que la couche de petites bulles d'air puissent jouer un role fondamentale dans la réduction de la friction entre le liquide et la superficie superhydrophobe, ce qui est vrai en régime laminaire (où la petite couche d'air fonctionne comme lubrifiant), mais pas en régime turbulent, où, paradoxalement, la superhydrophobicité peut etre un obstacle au mouvement. D'autre part, la relation de Laplace relative à la variation de pression à l'interface causé par la courbure de la surface prouve que plus petit est le rayon de courbure des bulles plus grand sera la différence de pression sur les deux faces de la superficie de separation entre les deux fluides (air/eau). Par exemple, il a été trouvé qu'un rayon de 0,10mm d'une bulle de gaz issues d'une bouteille de champagne crée une différence de pression de 1,5 kPa suffisant pour soutenir une colonne d'eau de 15cm.

Il n'est donc pas du tout impossible et "bête" l'hypothèse selon laquelle l'air ne fonctionne plus comme lubrifiant, mais plutôt comme un support et par conséquent ralenti le mouvement dans le liquide.

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

Nos expériences de chutes de sphères revêtues et non revêtues nous ont donné des informations nécessaires (mais pas suffisantes) en ce qui concerne l'effet du revêtement super hydrophobe. Rappelons les résultats obtenus

Dans l'eau au nous avons eu :

✓ Pour les sphères de 5mm une baisse de vitesse terminale d'environ 5,5% correspondant à une augmentation de la traînée d'environ 12%.

✓ Pour les sphères de 8mm une baisse de la vitesse terminale d'environ 7% qui corresponde à une augmentation de la traînée d'environ 15%.

✓ Pour les sphères de 10mm une baisse de la vitesse terminale d'environ 5% qui corresponde à une augmentation de la traînée d'environ 11%.

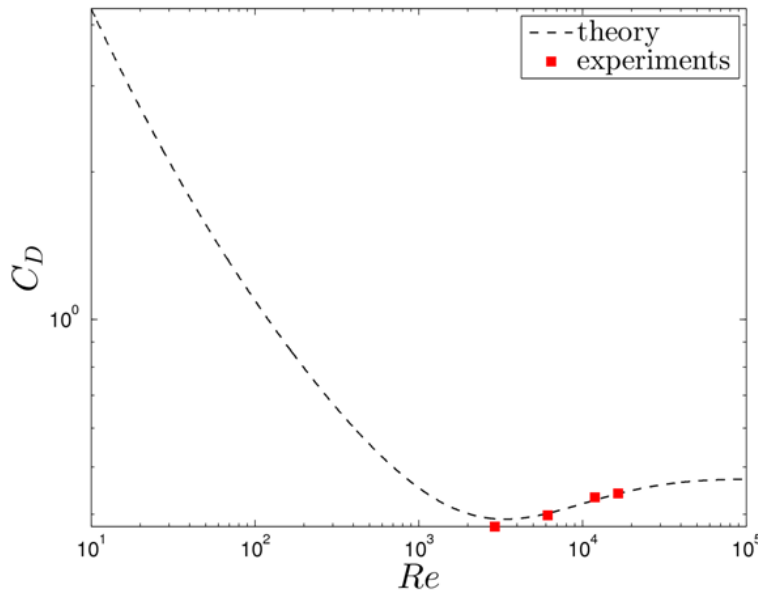
Dans la glycérine par contre, nous avons eu :

✓ Pour les sphères de 5mm une baisse de vitesse la terminale d'environ 5,5% correspondant à une augmentation de la traînée d'environ 12%.

✓ Pour les sphères de 8mm une augmentation de la vitesse terminale d'environ 4% qui corresponde à une réduction de la traînée d'environ 7.5%.

✓ Pour les sphères de 10mm une baisse de la vitesse terminale d'environ 10% qui corresponde à une augmentation de la traînée d'environ 17%.

On note que les effets attendus se sont vérifié dans la glycérine(regime laminaire) donc à bas nombre de Reynolds, dans l'eau par contre, bien que n'étant pas encore dans un régime turbulent, nous avons pu observé deux phénomènes : sur une très petite zone, l'effet du revêtement est positif parlant d'augmentation de vitesse, mais après on observe une diminution progressive de la vitesse à tel point que le revêtement devient néfaste. En se basant sur la nature de la surface et considérant le fait que dans l'eau

FIGURE 8.1 – Courbe $C_d = f(Re)$

la couche d'air se déplace en aval de la sphère, on pourrait penser que on passe d'un état Cassie qui est stable à un état Wenzel moins stable qui entrainerai donc ce changement d'allure de la courbe.

On comprends aujourd'hui assez bien de mécanismes de la super hydrophobie, et les dynamiques anormales des gouttes dans un tel état témoignent de l'intérêt pratique de ces matériaux : on peut penser réaliser des vitrages, des bétons ou des tissus super hydrophobes se fondant sur ces principes. Les principales questions en suspens sont d'ordre pratique. Ainsi :

1) Comment assurer un bon vieillissement à ces matériaux ? Les textures sont susceptibles de se remplir des huiles en suspensions dans l'air, et le matériau dès lors non seulement perd ses propriétés, mais il est par construction très difficile à nettoyer ;

2) Quel design optimum donner aux micro-structures ? Plus d'une centaine de procédé différent de fabrication de surface super hydrophobes ont été publiés ces trois dernières années, avec des dessins de structure très différents conduisant tous à des angles de contact très élevés. Mais on ne sais pas aujourd'hui quel design optimise le matériau, en fonction en particulier de l'application recherchée (anti-pluie, anti-buée, anti-givre, anti-salissure) ou des contraintes imposées (transparence du matériau, effet de couleur, etc) ; on ne sait pas non plus quel dessin minimise l'hystérésis de l'angle,

ou contribue le mieux à réaliser un état fakir «robuste», non susceptible de transiter vers un état de Wenzel collant.

La distinction entre les deux états super hydrophobes pourrait bien être centrale pour une raison riche de promesses. On sait depuis quelques années qu'un glissement est susceptible de se produire sur les surfaces super hydrophobes qui se déplacent dans l'eau. Or C. Cottin-Bizonne et al. ont montré en 2003 qu'une surface texturée peut amplifier (considérablement) ou réduire (tout aussi considérablement) cet effet : dans l'état Wenzel, on perd presque tout glissement, et on retrouve une friction banale ; au contraire dans l'état fakir, on amplifie (logiquement) beaucoup cet effet, engendrant ainsi des matériaux à très faible friction. La vérification expérimental de ces idées (qui est en effet l'objectif de notre thèse) est aujourd'hui un thème majeur de l'hydrodynamique aux interfaces, dont les conséquences pratiques sont évidentes (coques de bateaux, maillot de bain, micro-canaux glissants pour la micro fluidique). Les matériaux super hydrophobes «fakir» pourraient bien être non seulement non-collants, mais aussi super-glissants.

Bibliographie

1. E.G Shafrin et W.A. Contact angle, wettability and adhesion. *Advances in Chemistry Series*, 43, pp. 145-157, 1964
2. R.N Wenzel. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.*, 28, pp. 988, 1936
3. A.B.D Cassie et S. Baxter. wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.*, 40, pp. 546-551, 1944.
4. D.Vadillo Caractérisation des phénomènes hydrodynamiques lors de l'impact des gouttes sur différentes surfaces. Phd thesis, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 2007
5. P. Joseph, C. Cottin-Bizonne, J-M. Benoit, C. Ybert, C. Journet, P. Tabeling et L. Bocquet. Slippage of water past superhydrophobic carbon nanotube forest in microchannels. *Physical Review Letters*, 97, pp. 156104, 2006.
6. C.H Choi et C-J Kim. Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surfaces. *Physical Review Letters*, 96, pp. 066001, 2006.
7. E. Lertora, C. Gambaro. Dispense del corso di materiali polimerici, Bagnabilità.
8. G. McHale. Terminal velocity and drag reduction measurements on superhydrophobic spheres.
9. N. Mordant et J-F . Pinton. Velocity measurement of a settling sphere. *The European Physical Journal B*. 2000
10. N. Lyotard, W.L.Shew, L. Bocquet, J-F Pinton. Polymer and surface roughness effects on the drag crisis for falling spheres. *The European Physical Journal B*. 2007
11. NANOLAB-UNIMORE. Superfici Nanostrutturate.

Table des figures

2.1	(Gauche) : interaction moléculaire dans un liquide et sur la surface, (Droite) : représentation des interactions dans une goutte, en rouge celle qui crée la tension de surface	18
2.2	tension de surface	19
2.3	goutte liquide posée sur un substrat liquide en mouillage partiel : la valeur de l'angle de contact statique θ_0 est imposée par l'équilibre des forces capillaires linéiques qui s'appliquent sur la ligne de contact triple (L.T)	21
2.4	(a) : modèle de Wenzel, la goutte envahit complètement les anfractuosités, (b) : modèle de Cassie-Baxter, la goutte touche seulement les extrémités de la superficie	23
2.5	modèle de Wenzel : angle de contact apparent θ_0^* sur une surface solide rugueuse.	24
2.6	modèle de Cassie-Baxter : angle de contact apparent θ_0^* sur une surface lisse composite.	27
2.7	Courbure de l'interface liquide-gaz sur une surface fakir	28
2.8	l'hysteresis de l'angle de contact est un paramètre de type dynamique : il donne des informations sur la mobilité de la goutte sur une surface	30
2.9	Vitesse de glissement V_g et longueur de glissement b , lors de l'écoulement d'un liquide sur un solide.	31
3.1	Evolution du coefficient de traînée d'une sphère avec le nombre de reynolds	36
3.2	forces présentes lors du mouvement de la bille dans la phase terminale	38
3.3	Introduction des notations utilisées pour le calcul de la force de frottement visqueux qui s'exerce sur une sphère de rayon a , placée dans un écoulement de vitesse U	42

3.4	Évaluation de la part représentée par la traînée de frottement dans la traînée totale qui s'applique sur une sphère immergée dans un écoulement caractérisé par un nombre de Reynolds $> 10^4$	45
4.1	Schéma du dispositif expérimental	48
4.2	Position du centre de la sphère entre images succesives	49
5.1	Photo du papier à carreaux durant l'étalonnage à différentes hauteurs : a) 0,12m ; b) 0,18m ; c) 0,24m.	62
5.2	images obtenue après conversion de la vidéo	63
5.3	Changement de couleur de l'arrière-plan	64
5.4	Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.	66
5.5	centre de masse de la sphère pendant sa chute	69
5.6	Trajectoire de la sphère de 10mm non revêtue dans l'eau	71
5.7	Courbe de la vitesse sphère de la 10mm dans l'eau obtenu après post-traitement	72
5.8	images obtenue après conversion de la vidéo	72
5.9	Trajectoire de la sphère de 8mm non revêtue dans l'eau	79
5.10	Courbe de la vitesse sphère de la 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement	79
5.11	images obtenue après conversion de la vidéo	81
5.12	Trajectoire de la sphère de 5mm non revêtue dans l'eau	88
5.13	Courbe de la vitesse sphère de la 5mm dans l'eau obtenu après post-traitement	88
5.14	images obtenue après conversion de la vidéo	89
5.15	Changement de couleur de l'arrière-plan	90
5.16	Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.	92
5.17	centre de masse de la sphère pendant sa chute	95
5.18	Trajectoire de la sphère de 10mm revêtue dans l'eau	97
5.19	Courbe de la vitesse sphère revêtue de la 10mm dans l'eau obtenu après post-traitement	98
5.20	images obtenue après conversion de la vidéo	98
5.21	Trajectoire de la sphère de 8mm revêtue dans l'eau	105
5.22	Courbe de la vitesse sphère revêtue de 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement	105

5.23	images obtenue après conversion de la vidéo	106
5.24	Trajectoire de la sphère de 5mm revêtue dans l'eau	112
5.25	Courbe de la vitesse sphère revêtue de 5mm dans l'eau obtenu après post-traitement	113
6.1	Photo du papier à carreaux durant l'étalonnage à différentes hauteurs : a) 0,048m ; b) 0,072m ; c) 0,144m ; d) 0,168 ; e)0,192	116
6.2	images obtenue après conversion de la vidéo	117
6.3	Changement de couleur de l'arrière-plan	118
6.4	Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.	120
6.5	centre de masse de la sphère pendant sa chute	123
6.6	Trajectoire de la sphère de 10mm non revêtue dans la glycérine	125
6.7	Courbe de la vitesse sphère de la 10mm dans la glycérine obtenu après post-traitement	126
6.8	images obtenue après conversion de la vidéo	126
6.9	Trajectoire de la sphère de 8mm non revêtue dans l'eau	133
6.10	Courbe de la vitesse sphère de la 8mm dans l'eau obtenu après post-traitement	133
6.11	images obtenue après conversion de la vidéo	135
6.12	Trajectoire de la sphère de 5mm non revêtue dans la glycérine	142
6.13	Courbe de la vitesse sphère de la 5mm dans la glycérine obtenu après post-traitement	142
6.14	images obtenue après conversion de la vidéo	143
6.15	Changement de couleur de l'arrière-plan	144
6.16	Dé-bruitage : Sphère en couleur blanche et arrière plan en couleur noir.	146
6.17	centre de masse de la sphère pendant sa chute	149
6.18	Trajectoire de la sphère de 10mm revêtue dans la glycérine	151
6.19	Courbe de la vitesse sphère revêtue de la 10mm dans la glycérine obtenu après post-traitement	152
6.20	images obtenue après conversion de la vidéo	152
6.21	Trajectoire de la sphère de 8mm revêtue dans la glycérine	159
6.22	Courbe de la vitesse sphère revêtue de 8mm dans la glycérine obtenu après post-traitement	159

6.23	images obtenue après conversion de la vidéo	160
6.24	Trajectoire de la sphère de 5mm revêtue dans la glycérine .	166
6.25	Courbe de la vitesse sphère revêtue de 5mm dans la glycérine obtenue après post-traitement	167
7.1	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm non revêtues dans l'eau . .	170
7.2	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm non revêtues dans l'eau	170
7.3	Variation autour de la vitesse moyenne : on observe la bonté de notre dispositif et notre méthode de travail par la simi- litude des résultats.	171
7.4	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm revêtues dans l'eau	171
7.5	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm revêtues dans l'eau	172
7.6	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 10mm revêtues	172
7.7	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 10mm revêtues et non revêtues dans l'eau	173
7.8	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau . . .	173
7.9	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau	174
7.10	Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 8mm non revêtues dans l'eau	174
7.11	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm revêtues dans l'eau	175
7.12	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm revêtues dans l'eau	175
7.13	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 8mm revêtues	176
7.14	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 8mm revêtues et non revêtues dans l'eau	176
7.15	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau . . .	177
7.16	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau	177

7.17	Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 5mm non revêtues dans l'eau	178
7.18	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm revêtues dans l'eau	178
7.19	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm revêtues dans l'eau	179
7.20	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 5mm revêtues	180
7.21	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 5mm revêtues et non revêtues dans l'eau	180
7.22	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm non revêtues dans la glycérine	185
7.23	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm non revêtues dans la glycérine	186
7.24	Variation autour de la vitesse moyenne : on observe la bonté de notre dispositif et notre méthode de travail par la similitude des résultats.	186
7.25	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 10mm revêtues dans la glycérine .	187
7.26	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 10mm revêtues dans la glycérine	187
7.27	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 10mm revêtues	188
7.28	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 10mm revêtues et non revêtues dans la glycérina	188
7.29	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine	189
7.30	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine	189
7.31	Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 8mm non revêtues dans la glycérine	190
7.32	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 8mm revêtues dans la glycérine .	190
7.33	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 8mm revêtues dans la glycérine	191
7.34	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 8mm revêtues	191

7.35	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 8mm revêtues et non revêtues dans la glycérine	192
7.36	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine	192
7.37	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine	193
7.38	Variation autour de la vitesse moyenne des sphères de 5mm non revêtues dans la glycérine	193
7.39	Courbe de la vitesse en fonction de la position des toutes les chutes des sphères de 5mm revêtues dans la glycérine .	194
7.40	Courbe de la vitesse moyenne en fonction de la position des sphères de 5mm revêtues dans la glycérine	195
7.41	Variation autour de la vitesse moyenne : cas des sphères de 5mm revêtues	195
7.42	Comparaison de la vitesse moyenne des sphères de 5mm revêtues et non revêtues dans la glycérine	196
8.1	Courbe $C_d = f(Re)$	202