

**SOURCE, SOUS VIDE ET ACTUALISABLE, DE NANOPARTICULES  
POUR INTERACTIONS LASER-MATIÈRE À HAUTE INTENSITÉ.**

Par

Guillaume St-Germain

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
*Maître es Sciences, M.Sc.*  
en sciences de l'énergie et des matériaux

**Jury d'évaluation**Président du jury et  
examineur interneFabio Boschini  
INRS

Examineur externe

André Staudte  
Conseil national de recherches Canada

Directeur de recherche

François Légaré  
INRS



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite remercier le directeur de recherche pour mon mémoire de maîtrise, Prof François Légaré, pour l'opportunité qu'il m'a offert. Non seulement pour m'avoir accepté lors d'un stage, mais aussi pour m'avoir proposé de continuer mes travaux lors de cette maîtrise sous sa coordination.

Je souhaite spécifiquement remercier mon superviseur de maîtrise, Jeffrey Allan Powell, pour son aide et ses conseils tout au long de mes travaux et ce même après avoir quitté l'INRS. De même, je fais part de ma gratitude à Stéphane Payeur pour son encadrement lors de mon stage ainsi qu'au début de ma maîtrise.

Je remercie en outre certains membres de l'équipe technique de l'INRS et du groupe de recherche ALLS, Antoine Laramée et Joël Maltais pour le soutien fournis pour la réalisation de certains montages de mes expériences, ainsi que William Levesque pour l'obtention de pièces techniques.

Je veux également témoigner ma gratitude aux professeurs François Légaré, Andreas Ruediger et François Vidal pour avoir partagé leurs connaissances de manière informative et intéressante lors des cours magistraux que j'ai fréquentés.

Additionnellement, j'aimerais remercier les amis que je me suis fait à l'INRS lors de cette maîtrise, Tristan Guay, Antoine Payeur, Robin Reig et Sarah Cavo, d'une part pour leur écoute et leurs conseils avisés, d'autre part pour avoir rendu le quotidien plus agréable et pour les nombreuses parties de Volley-ball et de foosball.

Pour terminer, je souhaite remercier ma famille et mes amis pour le soutien moral et l'appui qu'ils m'ont fourni, me permettant de persévérer et d'aboutir ma maîtrise.



## RÉSUMÉ

Les travaux d'Arthur Ashkin sur les forces optiques, qui ont débuté dans les années 1970 [2], ont permis de mettre au point une technique précieuse qui est utilisée dans de nombreux domaines de la recherche scientifique. La pince optique a montré des propriétés remarquables telles que sa capacité à manipuler des objets de taille micro et nanométrique et à les confiner à l'intérieur d'un foyer laser. Cette méthode a été utilisée pour piéger et refroidir des atomes, manœuvrer des cellules vivantes et étudier l'optique quantique.

Les pinces optiques sont souvent employées dans le vide, où l'interaction avec l'environnement extérieur est réduite au minimum. Une limitation courante dans cette configuration est le chargement et le rechargement de l'échantillon dans le piège de manière efficace.[10, 16] L'intérêt d'une technique de chargement in situ et rafraîchissable dans le vide est considérable, en particulier en ce qui concerne les applications potentielles dans les interactions laser-matière de haute intensité.

Nous avons donc proposé une technique permettant d'intégrer une pince optique pour nanoparticules, utilisable dans une chambre à vide, qui peut être facilement et rapidement rechargée pour être utilisée dans des interactions laser-matière de haute intensité. Cette conception permet de surmonter les limites antérieures du rechargement d'une pince à vide tout en augmentant le confinement spatial de la nanoparticule par rapport au foyer de haute intensité. Ce type de configuration a le potentiel d'augmenter considérablement la reproductibilité des expériences à taux de répétition élevé, en particulier au sein de la communauté des chercheurs étudiant l'interaction laser-matière.

Nous avons démontré expérimentalement la faisabilité de réapprovisionner en nanoparticules des pinces optiques dans une chambre à vide sans avoir à casser le vide ou à utiliser un système à deux étapes. Cette démonstration a été effectuée tout d'abord en mettant en place expérimentalement des pinces optiques simples et fonctionnelles permettant de confiner des particules de moins de 100 nm. Ensuite, en mettant en place une source de nanoparticules sous vide, permettant l'introduction d'un faisceau de particules de moins de 100 nm sans rompre le vide. Enfin, la capacité de manipuler ces particules afin de permettre le piégeage optique a été démontrée. Des méthodes de livraison alternatives ou complémentaires ont également été brièvement examinées et discutées en cours de route.

Des solutions ou des propositions sont présentées afin d'améliorer la technique globale, les sections individuelles ou de résoudre certains problèmes rencontrés lors de l'expérimentation.

**Mots-clés** Pince optique; nanoparticules; vide.



## ABSTRACT

Arthur Ashkin's work on optical forces beginning in the 1970's[2] brought about the development of a valuable technique that is utilized in numerous fields of scientific research. The optical tweezer has shown remarkable properties such as its ability to manipulate micro- and nano-sized objects and confine them within a laser focus. This method has been used to trap and cool atoms, maneuver living cells, and study quantum optics.

Optical tweezers are often employed in vacuum where the interaction with the outside environment is minimized. A common limitation in this configuration is the loading and reloading of the sample into the trap in an efficient manner.[10, 16] The appeal of an in situ, refreshable loading technique in vacuum is considerable, especially concerning the potential applications in high-intensity laser-matter interactions.

We have henceforth proposed a technique to integrate a vacuum-based optical tweezer for nanoparticles that is easily and rapidly refreshable for use in high-intensity laser-matter interactions. The design overcomes previous limitations of the reloading of an in-vacuum tweezer while increasing the spatial confinement of the nanoparticle relative to the high-intensity focus. This type of configuration has the potential to greatly increase the reproducibility of higher repetition rate experiments, especially within the community studying laser-matter interactions.

We have experimentally demonstrated the feasibility of replenishing optical tweezers in a vacuum chamber with nanoparticles without the need to break vacuum or a two stage system. Such demonstration was done by first, experimentally setting up simple and functional optical tweezers allowing the confining of sub 100 nm particles. Secondly, putting in place an in-vacuum source of nanoparticles, permitting the introduction of a beam of sub 100 nm particles without breaking vacuum. Lastly, showcasing the ability to manipulate said particles in order to allow optical trapping. Alternative or supportive delivery methods were also briefly examined and discussed along the way.

Solutions or propositions are presented in order to improve the overall technique, individual sections, or to fix certain problems met during experimentation.

**Keywords** Optical Tweezer; Nanoparticle; Vacuum.



# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iii
RÉSUMÉ .....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX .....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xvii
<b>1 PINCE OPTIQUE.....</b>	<b>1</b>
1.1 FONDEMENTS THÉORIQUES.....	2
1.1.1 <i>Forces optiques</i> .....	2
1.1.2 <i>Polarisabilité d'une sphère dielectrique</i> .....	2
1.1.3 <i>Approximation par champ Gaussien</i> .....	3
1.1.4 <i>Distance d'équilibre et Puits de potentiel</i> .....	4
1.2 MODÉLISATION .....	5
1.2.1 <i>Distance d'équilibre</i> .....	6
1.2.2 <i>Puit de potentiel</i> .....	7
1.3 EXPÉRIMENTATION .....	8
1.3.1 <i>Montage expérimental</i> .....	8
1.3.2 <i>Santé et Sécurité avec des nanoparticules</i> .....	10
1.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	10
1.4.1 <i>Pince Optique avec un objectif de microscope</i> .....	10
1.4.2 <i>Pince optique avec un miroir parabolique</i> .....	15
1.4.3 <i>Nanoparticule de silice</i> .....	18
<b>2 MÉTHODE ALTERNATIVE D'ACHEMINEMENT .....</b>	<b>19</b>
2.1 PROPULSION PIÉZOÉLECTRIQUE .....	19
2.1.1 <i>Transducteur Piézoélectrique</i> .....	19
2.1.2 <i>Montage</i> .....	21
2.1.3 <i>Résultats</i> .....	23
2.2 CHAMP ÉLECTRIQUE ALTERNATIF.....	24
2.2.1 <i>Piège d'ions</i> .....	24

2.2.2	Montage.....	26
2.2.3	Expérimentation.....	27
2.2.4	Résultats et Observations.....	28
2.3	AÉROSOL.....	31
2.4	DISCUSSION.....	33
<b>3</b>	<b>SOURCE DE FAISCEAU DE NANOPARTICULES.....</b>	<b>35</b>
3.1	ATOMISEUR.....	35
3.2	SÉCHEUR D'AÉROSOL.....	37
3.3	LENTILLE AÉRODYNAMIQUE.....	41
<b>4</b>	<b>MANIPULATION DE FAISCEAU DE NANOPARTICULES.....</b>	<b>43</b>
4.1	MONTAGE.....	43
4.1.1	<i>Solution/Source de nanoparticules.....</i>	44
4.1.2	<i>Champ électrique.....</i>	45
4.1.3	<i>Cible.....</i>	47
4.2	RÉSULTATS.....	48
4.3	DISCUSSION.....	51
4.3.1	<i>Contrôle des charges électriques sur les nanoparticules.....</i>	53
4.3.2	<i>Contrôle de la vitesse des nanoparticules.....</i>	54
4.3.3	<i>Source sous vide et actualisable, de nanoparticules pour l'étude de l'interaction laser-matière à haute intensité.....</i>	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>57</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>ANNEXE.....</b>	<b>61</b>
6.1	DÉVELOPPEMENT MATHÉMATIQUE.....	61
6.1.1	<i>Forces optiques en approximation de champ gaussien : Gradient Force.....</i>	61
6.1.2	<i>Forces optiques en approximation de champ gaussien : Scattering force.....</i>	63
6.1.3	<i>Champ électrique Vs Gravité.....</i>	65
6.1.4	<i>Distance minimum pour ralentir les nanoparticules.....</i>	65
6.2	MIROIR PARABOLIQUE.....	67
6.3	PROTOCLE EXPÉRIMENTALE.....	68
6.3.1	<i>Piège optique.....</i>	68
6.3.2	<i>Dilution.....</i>	69

6.3.3	<i>Source en faisceau de nanoparticules</i> .....	70
6.4	ANALYSE IMAGE J .....	71
6.5	DATA SHEET NANOPARTICULE .....	71



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 NANODIAMANT EN LÉVITATION DANS UNE PINCE OPTIQUE.....	1
FIGURE 1.2 DISTANCE D'ÉQUILIBRE DE LA PINCE OPTIQUE APRÈS LE FOCUS DU LASER POUR UN NA DE 0.4, ' $\lambda$ '=532 NM ET UNE PUISSANCE DE 100MW EN FONCTION DE LA TAILLE D'UNE PARTICULE DE DIAMANT.....	6
FIGURE 1.3 PROFONDEUR DU PUIT POUR UN NA DE 0.4, ' $\lambda$ '=532 NM ET UNE PUISSANCE DE 100MW EN FONCTION DE LA TAILLE D'UNE PARTICULE DE DIAMANT.....	7
FIGURE 1.4 PROFONDEUR DU PUIT EN MULTIPLE DE $k_B T$ POUR UN NA DE 0.4, ' $\lambda$ '=532 NM EN FONCTION DE LA PUISSANCE ET DE LA TAILLE D'UNE PARTICULE DE DIAMANT. ....	8
FIGURE 1.5 SCHÉMA POUR LE MONTAGE AVEC L'OBJECTIF DE MICROSCOPE.....	9
FIGURE 1.6 MONTAGE EXPÉRIMENTAL POUR L'EXPÉRIENCE UTILISANT L'OBJECTIF DE MICROSCOPE. 9	9
FIGURE 1.7 SCHÉMA POUR LE MONTAGE AVEC LE MIROIR PARABOLIQUE. ....	9
FIGURE 1.8 FOCALISATION DU FAISCEAU LASER AVEC UN OBJECTIF DE MICROSCOPE.....	11
FIGURE 1.9 NUAGE DE POUDRE DE NANODIAMANTS. ....	12
FIGURE 1.10 NANODIAMANT ACCÉLÉRÉ PUIS PIÉGÉ PAR LES FORCES OPTIQUES.....	13
FIGURE 1.11 DEUX NANODIAMANTS EN LÉVITATION OPTIQUE À DEUX POSITIONS DISTINCTES 14	14
FIGURE 1.12 IMAGE DU FAISCEAU LASER PAR LE MIROIR PARABOLIQUE.....	17
FIGURE 2.1 SCHÉMA D'UN TRANSDUCEUR PIÉZOÉLECTRIQUE. IMAGE EXTRAITE DE [7]. ....	20
FIGURE 2.2 EFFET PIEZOÉLECTRIQUE (QUARTZ). IMAGE EXTRAITE DE [18]. ....	20
FIGURE 2.3 MONTAGE AVEC UN TRANSDUCEUR PIEZOÉLECTRIQUE. CONTRÔLEUR PIÉZO-ÉLECTRIQUE EN ARRIÈRE PLAN.....	22
FIGURE 2.4 LIGNES DE CHAMPS ÉLECTRIQUES POUR DEUX CHARGES IDENTIQUES POSITIVES (A) ET NÉGATIVES (B).IMAGE EXTRAITE DE [25]. ....	25
FIGURE 2.5 MONTAGE POUR LA MISE EN PLACE D'UN PIÈGE D'IONS. DE GAUCHE À DROITE : VARIAC, TRANSFORMATEUR, BOÎTE D'ISOLEMENT AVEC LA RONDELLE. ....	26
FIGURE 2.6 PLUSIEUR SPORES DE LYCOPHYTES CHARGÉS PIÉGÉS DANS UN PIÈGE D'IONS..	29
FIGURE 2.7 UN SPORE DE LYCOPHYTE CHARGÉ PIÉGÉ DANS UN PIÈGE D'IONS .....	30
FIGURE 2.8 PHOTO SEM (SCANNING-ELECTRON-MICROSCOPY) DE SPORES DE LYCOPODIUM CLAVATUM.IMAGE EXTRAITE DE [6]. ....	31
FIGURE 2.9 NANOPARTICULE DE SILICE 100nm PROVENANT DE LA SOURCE EN AEROSOL FLOTANT AUTOUR DU PIÈGE OPTIQUE.....	32

FIGURE 3.1 SECTION TRANSVERSAL D'UN ATOMISEUR PAR COLLISION. IMAGE EXTRAITE DE [23](COURTESY OF TSI, INC) .....	36
FIGURE 3.2 TAILLE DES GOUTELLETES D'AÉROSOLE PROVENANT DE L'ATOMISER TSI EN FONCTION DE PRESSION D'APPUI. IMAGE EXTRAITE DE [23].....	37
FIGURE 3.3 SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT D'UN "NAFION™ DRYER". EXTRAIT DE [22].....	38
FIGURE 3.4 SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT D'UN SÉCHEUR PAR DIFFUSION (TSI MODEL 3062) . EXTRAIT DE [27].....	39
FIGURE 3.5 COMPARAISON DE LA PERFORMANCE D'UN SÉCHEUR PAR DIFFUSION ET D'UN SÉCHEUR PAR NAFION™ EN FONCTION DU TEMPS. EXTRAIT DE [23].....	40
FIGURE 3.6 SIMULATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE LENTILLE AÉRODYNAMIQUE. EXTRAIT DE [30].....	41
FIGURE 3.7 SCHÉMA DE LA LENTILLE AÉRODYNAMIQUE. EXTRAIT DE [23].....	42
FIGURE 4.1 SCHÉMA DE L'EXPÉRIENCE DE SÉPARATION DE FAISCEAU. ....	44
FIGURE 4.2 LOI DE PASCHEN POUR DIFFÉRENTS GAZ. TENSION DE CLAQUAGE POUR DIFFÉRENTS GAZ EN FONCTION DE LA PRESSION × ÉCART.(EXTRAIT DE [13]) .....	46
FIGURE 4.3 TRACES DE NANOPARTICULES DE $SiO_2$ DE 100 NM INCRUSTÉ DANS UN GEL-BOX™ LORS DE LA DÉVIATION D'UN FAISCEAU PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE. (TENSION RESPECTIVE DE GAUCHE À DROITE :0V,-440V,-310V,0V,280V) .....	48
FIGURE 4.4 ANALYSE EN ÉCHELLE DE GRIS SUR L'INVERSE DE L'IMAGE D'UNE TRACE DE NANOPARTICULES DE $SiO_2$ INCRUSTÉES DANS UN GEL-BOX™ LORS DE LA DÉVIATION D'UN FAISCEAU PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE.....	49
FIGURE 4.5 ANALYSE EN ÉCHELLE DE GRIS DES TRACES DE LA FIGURE 4.3 RESPECTIVEMENT DE HAUT EN BAS -440V, -310V,+280V .....	50
FIGURE 4.6 TRAJECTOIRES SIMULÉES DE NANOPARTICULES DE SILICE DE 100NM POSSÉDANT QUELQUE CHARGES ÉLÉMENTAIRES À TRAVERS UN CHAMPS ÉLECTYRIQUE DE 50kV. 52	
FIGURE 4.7 SCHÉMA D'UNE SOURCE SOUS VIDE ET ACTUALISABLE, DE NANOPARTICULES POUR L'ÉTUDE DE L'INTERACTION LASER-MATIÈRE À HAUTE INTENSITÉ. ....	55
FIGURE 6.1 PARAMÈTRE DU MIROIR PARABOLIQUE UTILISÉ. ....	67
FIGURE 6.2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL .....	68
FIGURE 6.3 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL .....	69
FIGURE 6.4 EXEMPLE D'ANALYSE EN ÉCHELLE DE GRIS AVEC LE LOGICIEL IMAGEJ .....	71

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	DIMENSIONS DE RONDELLES POUR LE PIÈGE D'IONS .....	27
TABLEAU 3.1	DIMENSIONS DU SYSTÈME DE LA LENTILLE AÉRODYNAMIQUE. EXTRAIT DE [23].....	42
TABLEAU 4.1	PRESSION DANS LA CHAMBRE À VIDE LORS DU FONCTIONNEMENT DE LA SOURCE EN FAISCEAU DE NANOPARTICULES. ....	45
TABLEAU 4.2	TENSION POUR LAQUELLE LE DISJONCTEUR DE LA SOURCE HAUTE TENSION À ÉTÉ DÉCLENCHÉ AINSI QUE LA VALEUR DU CHAMPS ÉLECTRIQUE CORRESPONDANT.....	47
TABLEAU 4.3	POSITION DES CENTRES DES PICS DES GRAPHIQUES DE LA FIGURE 4.5.....	50
TABLEAU 4.4	DISTANCE ENTRE LES PICS DES GRAPHIQUES DE LA FIGURE 4.5.....	50



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

$\alpha'$	Partie réelle de la polarisabilité d'un dipôle diélectrique.
$\alpha''$	Partie imaginaire de la polarisabilité d'un dipôle diélectrique
$\epsilon_0$	Constante diélectrique du vide
$\epsilon_m$	Constante diélectrique relative du milieu
$\epsilon_p$	Constante diélectrique relative d'une particule
$\lambda$	Longueur d'onde
$\omega_0$	Largeur d'un faisceau au point focal
$k$	Nombre d'onde
$NA$	Ouverture Numérique
$NP$	Nanoparticule
$V$	Volume
$VdW$	Forces de Van Der Waals
$z_0$	Longueur de Rayleigh
$\phi$	Phase d'un champ électrique
$\mathbf{n}_E$	Vecteur unitaire dans la direction de la polarisation d'un champ électrique
$E_0$	Amplitude réelle d'un Champ électrique
INRS	Institut national de la recherche scientifique



# 1 PINCE OPTIQUE

---

La pince optique est un instrument scientifique qui permet la manipulation de particule microscopique et sous microscopique. Il s'agit d'une technique utilisée de plus en plus souvent dans divers domaines de la science depuis sa découverte par Arthur Ashkin et ses collègues en 1986 [4]. Lorsqu'un laser est suffisamment focalisé, il est possible de piéger les particules dans la zone la plus intense du faisceau. On peut parler de lévitation lorsque les particules en question sont dans l'air ou dans le vide. Il est intéressant de rechercher cette technique pour un laboratoire d'optique puisque la pince optique permet de maintenir dans un chemin optique à une position précise une particule. L'objectif du chapitre présenté est donc d'investiguer la lévitation optique. Cette recherche se fait par une recherche de littérature ainsi que la mise en place d'un montage simple d'une pince optique. Le présent chapitre est divisé en trois grandes parties. La première section traite du fonctionnement théorique d'une pince optique ainsi que de la mise en place d'un modèle simple. La seconde section explique le montage expérimental mis en place afin de créer une pince optique. Finalement la troisième section traite des différentes observations faites lors de différentes expériences.

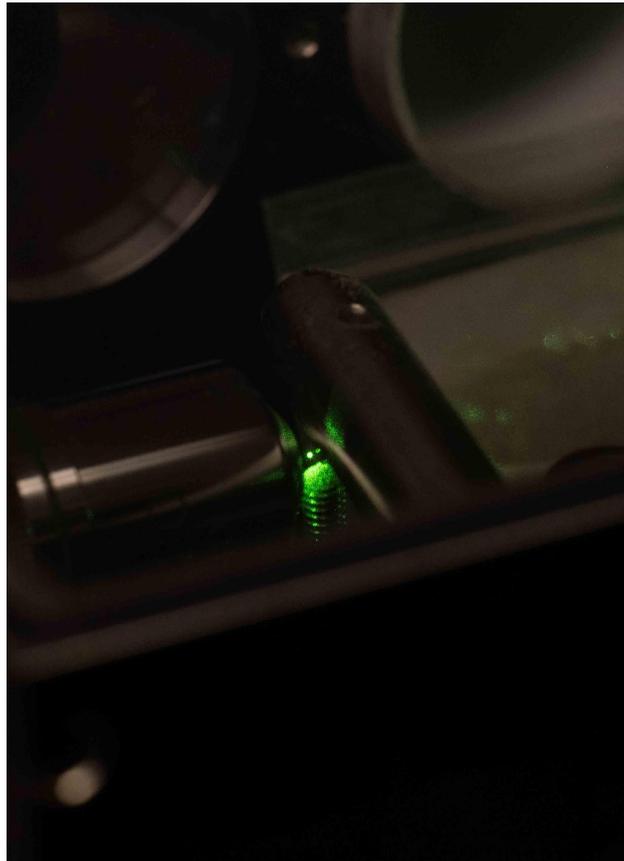


FIGURE 1.1 : Nanodiamant en lévitation dans une pince optique.

---

## 1.1 Fondements Théoriques

### 1.1.1 Forces optiques

Selon les calculs de Novotny et Hecht [20], il est possible de définir la moyenne temporelle des forces optiques sur un dipôle immergé dans un champ électrique de la forme suivante;

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = E_0(\mathbf{r})e^{i\phi(\mathbf{r})}\mathbf{n}_E \quad (1.1)$$

Où  $E_0$  est l'amplitude réelle,  $\phi$  la phase et  $\mathbf{n}_E$  le vecteur unitaire dans la direction de la polarisation.

Dans un tel cas la force peut être exprimée selon deux termes :

$$\langle \mathbf{F} \rangle = \frac{\alpha'}{4} \nabla E_0^2 + \frac{\alpha''}{2} E_0^2 \nabla \phi \quad (1.2)$$

Où  $\alpha'$  et  $\alpha''$  sont respectivement la partie réelle et imaginaire de la polarisabilité  $\alpha$  du dipôle diélectrique.

Le premier terme qui régit la force moyenne est dénommé en anglais par "gradient force" et est proportionnel à la partie réelle de la polarisabilité. Le second terme est dénommé "scattering force" et est proportionnel à la partie imaginaire de la polarisabilité.

### 1.1.2 Polarisabilité d'une sphère diélectrique.

La polarisabilité pour une particule sphérique est donnée par la formule de Clausius-Mossotti. [20]

$$\alpha = 3V\epsilon_0 \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (1.3)$$

Où  $V = 4/3\pi a^3$  est le volume de la particule, avec  $a$  le rayon.  $\epsilon_0$  est la constante diélectrique du vide,  $\epsilon_m$  est la constante diélectrique relative du milieu et  $\epsilon_p$  la constante diélectrique relative de la particule.

La force de dispersion provient de la conservation de quantité de mouvement lors d'absorptions ou de diffusion de photons par la particule. Cependant, les photons dispersés vont avoir un impact sur le champ électrique incident et conséquemment avoir un impact sur les forces qui affectent la particule. Ce phénomène est connu sous le nom de réaction de radiation ("radiation reaction") [10]. Afin de prendre en compte cet effet il est possible d'introduire une polarisabilité effective à la particule [20].

$$\alpha_{eff} = \alpha \left( 1 - i \frac{k^3}{6\pi\epsilon_0} \alpha \right)^{-1} \quad (1.4)$$

Où  $k$  est le nombre d'onde associé au laser utilisé pour la pince optique.

Il est possible de remarquer que même pour une particule sans perte ( $Im(\epsilon_p) = 0$ ), la présence de polarisabilité effective donne une polarisabilité complexe. La force de dispersion proportionnelle à la partie imaginaire de celle-ci ne disparaît pas[10].

### 1.1.3 Approximation par champ Gaussien

Le champ électrique utilisé pour la création d'une pince optique est comparable à un faisceau gaussien. En utilisant une telle approximation, il est possible de décrire le champ électrique en fonction de son amplitude et de sa phase afin d'obtenir un modèle simple des forces optiques. On définit ainsi le champ de la manière suivante[28] :

$$E_0(\mathbf{r}) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \quad (1.5)$$

$$\phi(\mathbf{r}) = kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)} \quad (1.6)$$

On retrouve dans les équations (1.5) et (1.6),  $E_0$  le champ électrique au focus,  $\omega_0$  la largeur du faisceau au focus et  $z_0$  la longueur de Rayleigh. Les paramètres des faisceaux gaussiens suivants sont aussi inclus :

— La largeur du faisceau :

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}} \quad (1.7)$$

— Le rayon de courbure :

$$R(z) = z \left( 1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right) \quad (1.8)$$

— La phase de Gouy

$$\eta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.9)$$

A l'aide des équations (1.2), (1.5) et (1.6) on peut calculer les forces optiques selon l'approximation d'un champ gaussien.

$$\text{Soit } F_{grad} = \frac{\alpha'}{4} \nabla (E_0(\mathbf{r}))^2.$$

$$F_{grad} = -\alpha' I_0(\mathbf{r}) \begin{bmatrix} \frac{x}{\omega(z)^2} \\ \frac{y}{\omega(z)^2} \\ z \left( \frac{z_0^2}{2(z_0^2+z^2)^2} \right) \left( \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 + 1 - 2 \left( \frac{x}{\omega_0} \right)^2 - 2 \left( \frac{y}{\omega_0} \right)^2 \right) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\text{où } I_0(\mathbf{r}) = E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2 \frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} = E_0(\mathbf{r})^2$$

$$\text{Soit } F_{scat} = \frac{\alpha''}{2} E_0(\mathbf{r})^2 \nabla \phi(\mathbf{r})$$

$$F_{scat} = \frac{\alpha''}{2} I_0(\mathbf{r}) k \begin{bmatrix} \frac{x}{R(z)} \\ \frac{y}{R(z)} \\ 1 - \frac{x^2+y^2+\frac{2z_0}{k}}{2zR(z)} + \frac{z_0^2(x^2+y^2)}{z^2 R(z)^2} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Note : Je souhaite mentionner que les résultats présentés aux équations (1.10) et (1.11) sont semblables aux résultats que J.Giesler [10] trouve lors de son approximation plus détaillée qui prend en compte l'asymétrie du point focal selon les axes  $x$  et  $y$ . Les détails de mes calculs sont donc joints en annexe. Les résultats présentés dans la section suivante proviennent de manipulation mathématique entamée par J.Vjay [28] pour lesquels l'oeuvre de J.Giesler semble être en accord.

#### 1.1.4 Distance d'équilibre et Puits de potentiel.

La force de gradient est une force qui pousse la particule, coincée dans la pince optique, dans la direction du point le plus intense du champ. La force de dispersion est une force qui pousse principalement dans la direction de propagation du faisceau. il existe donc un point d'équilibre entre ces deux forces qui se trouve un peu après le focus du champ.

Ce décalage peut être calculé et prend la forme suivante[28] :

$$z_{eq} = \frac{1}{4} \frac{\alpha''}{\alpha'} z_0 (z_0 k - 1) \quad (1.12)$$

---

Il est intéressant de remarquer que la position d'équilibre dépend de la taille de la particule ainsi que de l'ouverture numérique utilisée. Cependant  $z_{eq}$  ne dépend pas de la puissance du faisceau.

Malgré la présence d'une force non conservative ("scattering force"), il est possible de représenter la pince optique pour des nanoparticules par un puits de potentiel de la forme suivante : [10]

$$U = \frac{-\alpha'}{4} I_0(\mathbf{r}) \quad (1.13)$$

Ainsi la profondeur du puits est :

$$\Delta U = \frac{\alpha' P}{\pi c \epsilon_0 w_0^2} \quad (1.14)$$

## 1.2 Modélisation

Afin de comprendre le comportement d'une pince optique, une simple modélisation de celle-ci a été mise en place.

Dans le but de garder les équations simples, l'approximation paraxiale a été utilisée afin de déterminer les paramètres du faisceau gaussien. Selon cette approximation on peut poser :

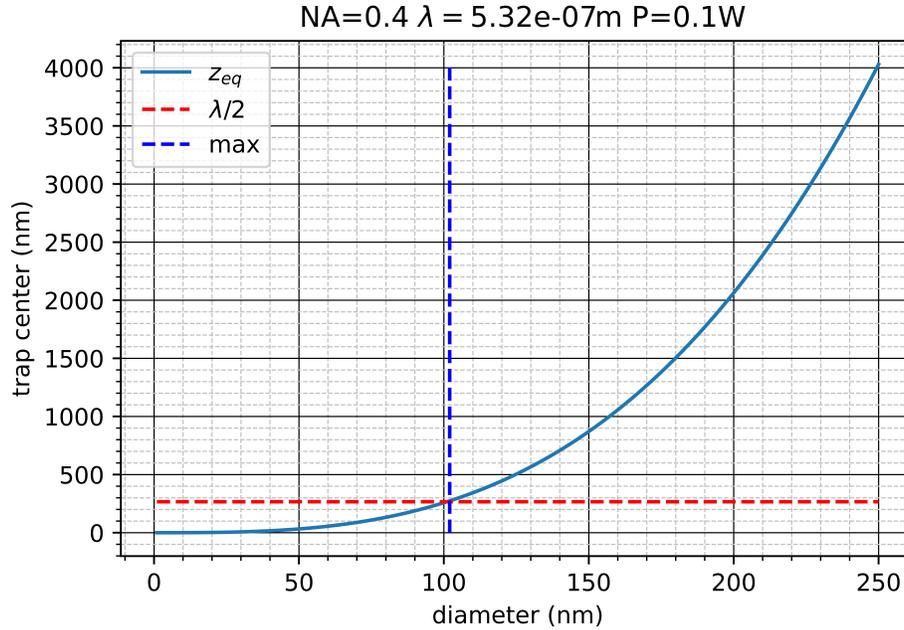
$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi NA} \quad (1.15)$$

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi NA^2} \quad (1.16)$$

On note cependant que l'approximation paraxiale est de plus en plus erronée lorsque l'ouverture numérique (NA) augmente. On retient donc que les valeurs présentées par cette modélisation ne sont pas exactes. La modélisation par approximation paraxiale est utilisée comme guide et pour exemplifier le comportement de la pince optique.

### 1.2.1 Distance d'équilibre

A l'aide des équations (1.12) et (1.16) on génère le graphique suivant.



**FIGURE 1.2 : Distance d'équilibre de la pince optique après le focus du laser pour un NA de 0.4,  $\lambda=532$  nm et une puissance de 100mW en fonction de la taille d'une particule de diamant.**

Il est présenté sur ce graphique la distance d'équilibre de la pince optique ainsi que 2 droites additionnelles. D'après la référence de Giesler[10], il est raisonnable de considérer que le puits d'une pince optique est stable si le déplacement de la particule créé par la distance d'équilibre est inférieur à la moitié de la longueur d'onde du laser utilisé. Autrement dit il faut que  $z_{eq} < \lambda/2$ . Ce critère, représenté par la droite en pointillé rouge ( $\lambda/2$ ), permet donc de déterminer pour un système particulier la taille maximale qu'une pince soit capable de piéger (représenté par la droite en pointillé bleu).

## 1.2.2 Puit de potentiel

A l'aide des équations (1.14) et (1.15) on génère le graphique suivant.

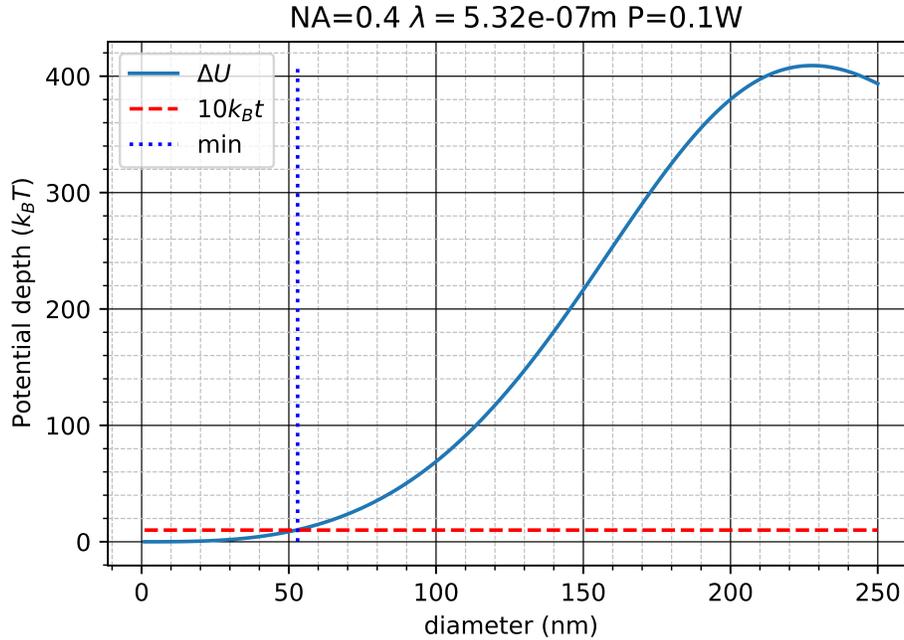
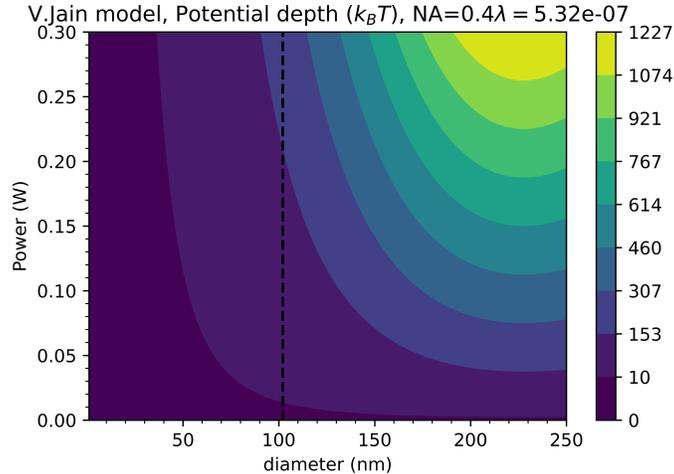


FIGURE 1.3 : Profondeur du puit pour un NA de 0.4,  $\lambda=532$  nm et une puissance de 100mW en fonction de la taille d'une particule de diamant.

Il est présenté dans ce graphique une profondeur de puits en fonction de la taille d'une particule de diamant. De même que dans la figure 1.2, la figure 1.3 présente deux droites additionnelles. Selon les travaux d'Ashkin [4], afin qu'il soit peu probable qu'une particule puisse s'échapper à cause d'excitation thermique et que la pince optique soit donc stable, la profondeur du puits de potentiel devrait être au moins de  $10k_B T$ . (Critère représenté par la droite en pointillé rouge.) Il advient donc que l'on peut déterminer un critère de taille minimum sur une particule dans un système particulier. (Représenté par la droite en pointillé bleu.)

Avec les deux critères déterminés précédemment il est possible de déterminer une plage de taille de particule que l'on peut piéger dans un système. La figure 1.4 représente le comportement du puit de potentiel qui a été créé initialement lors de la mise en place des expériences présentées postérieurement. Cette simulation a permis de déterminer quelle taille de nano-diamant devrait être utilisée afin d'obtenir des résultats satisfaisants.



**FIGURE 1.4 : Profondeur du puit en multiple de  $k_B T$  pour un NA de 0.4,  $\lambda=532$  nm en fonction de la puissance et de la taille d'une particule de diamant.**

## 1.3 Expérimentation

### 1.3.1 Montage expérimental

Le montage utilisé pour la lévitation de nanoparticules de diamant est présenté dans la figure 1.5. Ce montage est constitué d'une source laser continue à 532 nm possédant une puissance variable de 0.01 à 5 Watts. Une section de quatre miroirs (532 nm à un angle  $45^\circ$ ) est utilisée afin de baisser la hauteur du faisceau laser et de permettre l'alignement. Le jeu de miroirs est suivi d'une boîte d'isolement dont la fenêtre d'entrée est une lame de Brewster. La lame de Brewster est utilisée comme fenêtre d'entrée afin de réduire les pertes de puissance. Dans la boîte d'isolement, on retrouve l'optique utilisé afin de générer le focus ainsi qu'un bras amovible (depuis l'extérieur) qui permet d'acheminer les diamants au focus. Finalement, une caméra est installée sur le côté de la boîte d'isolement afin de pouvoir observer la position du focus du laser et de détecter la présence d'une particule piégée.

Deux montages ont été réalisés. Un premier montage utilise un objectif de microscope de  $NA=0.4$  afin de focaliser le faisceau laser. Celui-ci est présenté dans la figure 1.6. Dans ce montage il a été nécessaire de rajouter une paire de lentilles avant l'objectif de microscope. En effet l'objectif de microscope utilisé n'image pas à l'infini. Le jeu de lentilles permet de créer un oculaire. Les lentilles utilisées permettent d'avoir une distance focale d'environ 18.75 cm. (Les deux lentilles utilisées possèdent une distance focale de 30 cm et de 50 cm.) Celles-ci sont installées à une distance de  $2f$  hors de la boîte d'isolement. On note cependant que le standard DIN (Deutsche industrie Norm) pour les microscopes est de 16 cm. L'utilisation d'une lentille de 8 cm permettrait probablement d'obtenir un meilleur focus avec l'objectif de microscope.

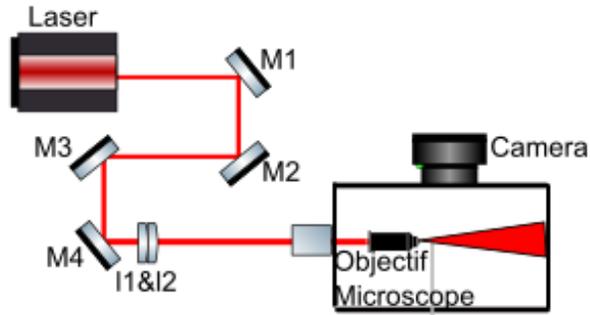


FIGURE 1.5 : Schéma pour le montage avec l'objectif de microscope.

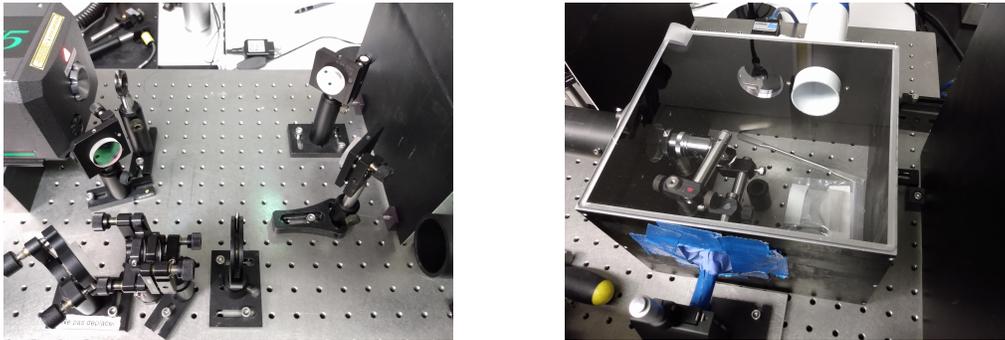


FIGURE 1.6 : Montage expérimental pour l'expérience utilisant l'objectif de microscope.

Un second montage utilise un miroir parabolique afin de focaliser le faisceau laser (voir figure 1.7). Le détail du miroir parabolique est fourni en annexe. Dans ce montage, un élargisseur de faisceau a été utilisé afin de pouvoir remplir l'intégralité du miroir parabolique. L'élargisseur de faisceau a été postérieurement enlevé afin de pouvoir utiliser le miroir parabolique avec une ouverture numérique plus faible ainsi que de manière hors axe optique.

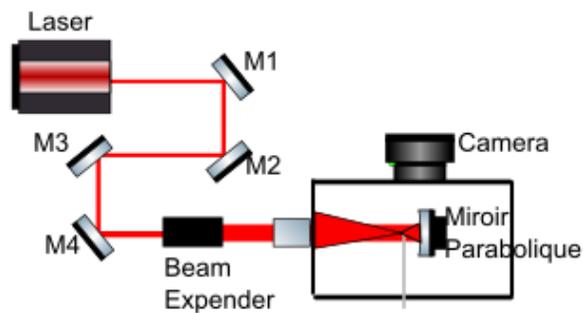


FIGURE 1.7 : Schéma pour le montage avec le miroir parabolique.

---

### 1.3.2 Santé et Sécurité avec des nanoparticules

Les nanoparticules sont une nouvelle technologie des matériaux développée récemment. Les propriétés particulières de ces nanomatériaux ont favorisé le développement rapide de leur utilisation et ce beaucoup plus rapidement que le développement des OEL ("Occupational Exposure Limits") [8]. Le monde se trouve dans une situation où les risques pour la santé et la sécurité d'individus exposés à ces matériaux sont méconnus. Certaines expériences mises en place ont principalement utilisé de la poudre de nanodiamants (0-0.1 $\mu m$ ). Due au manque d'information disponible sur les effets des nanodiamants sur le corps humain, des articles portant sur des substances similaires ont été utilisées afin de déterminer les mesures de sécurité à mettre en place. Les considérations faites par le gouvernement du Canada [8] relève que les personnes exposées à ce genre de particule présentent un taux plus élevé de certaines maladies pulmonaires. De façon similaire, la compagnie "Abrasive technology"[1] mentionne un risque cancérigène dans sa fiche de sécurité des matériaux pour ces poudres de diamant ( $\frac{1}{4}\mu m$  et plus). Le manque d'information sur une exposition humaine ne permet pas d'avoir une évaluation claire des risques mais les données existantes sont suffisantes pour admettre la présence de risques.

En soi, l'information sur les risques toxicologiques est faible mais un consensus est fait sur les risques potentiels et sur la nécessité de réduire les possibles expositions. À cette fin, un protocole expérimental particulier a été mis en place (Celui-ci est fournie en annexe). Le protocole vient en particulier faire mention des EPI (Équipement de protection personnelle) nécessaires à la manipulation. Additionnellement une boîte d'isolation mentionner précédemment a aussi été installée. Le but de la boîte est double. Elle permet la manipulation de la poudre vers la pince optique sans risque d'exposition mais permet aussi de couper toute forme de courant d'air pouvant extirper une particule piégée. Cette boîte est d'ailleurs reliée avec le système de ventilation du laboratoire comme on peut le voir dans la figure 1.6.

## 1.4 Résultats et Discussion

### 1.4.1 Pince Optique avec un objectif de microscope

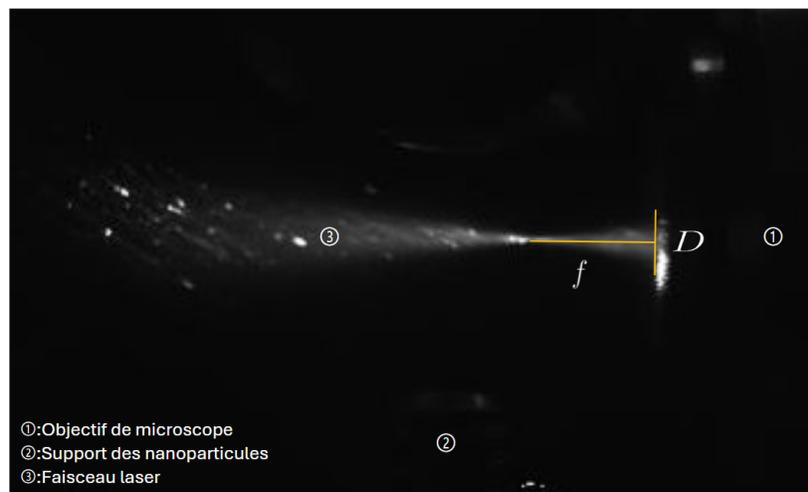
#### 1.4.1.1 Estimation de l'ouverture numérique et évaluation qualitative ce son impact

La mise en place d'une pince optique par objectif de microscope a été faite avec un objectif d'une ouverture numérique de 0.4. Cependant, comme mentionné antérieurement, le jeu de lentille utilisé pour remplacer l'oculaire possède une distance focale de 18.75cm alors que le standard DIN (2 fois la distance focale) est de 16cm. Notre montage n'achemine pas le faisceau avec la di-

---

vergence optimale de l'objectif de microscope. Additionnellement il est possible que le faisceau laser ne remplisse pas l'ouverture complète de l'objectif. On souhaite donc expérimentalement déterminer une approximation de l'ouverture numérique utilisée pour nos expériences.

On mesure sur la figure 1.8 la distance entre le focus et l'objectif ( $f$ ) ainsi que le diamètre du faisceau à la sortie de l'objectif ( $D$ ). On obtient avec ImageJ les distances en pixels suivantes :  $f = 49.503$ ,  $D = 26.5$ . Par la relation suivante,  $NA = D/2f$  on estime que l'ouverture numérique utilisée est de 0.27.



**FIGURE 1.8 : Focalisation du faisceau laser avec un objectif de microscope.**

Il est intéressant de connaître l'ouverture numérique de son montage puisque celui-ci est un des paramètres importants de la pince optique. Selon les recherches effectuées ainsi que les expériences exécutées pendant une première revue de littérature, il est possible de caractériser qualitativement le comportement de l'ouverture numérique sur la pince optique. Une ouverture numérique élevée permet de créer une pince optique plus puissante. La profondeur du puits créé augmente et les forces appliquées sur la particule aussi. Cependant la taille du puits diminue. Cela résulte en un piège plus stable mais plus difficile à remplir.

La modélisation discutée précédemment permet de spéculer l'impact du NA sur la taille des particules qui puissent être piégées. Une ouverture numérique grande permet de piéger à la fois des particules plus petites mais aussi plus grandes qu'une faible ouverture numérique. L'augmentation de la profondeur du puit permet de prendre des particules plus petites tandis que l'augmentation du gradient de l'intensité rapproche le centre de la pince vers le focus et permet de prendre des particules plus larges.

---

### 1.4.1.2 Technique de piégeage

La méthode utilisée pour remplir la pince optique consiste simplement à acheminer un monticule de particule de nanodiamants dans le focus du faisceau. Cela est réalisé en déposant une petite quantité de poudre de nanodiamants sur le revers d'une vis. Cette vis est attachée par une barre métallique à une platine de translation à 3 axes permettant ainsi de contrôler l'emplacement du monticule dans la boîte. L'idée derrière cette méthode est que, en retirant lentement le monticule du focus, les forces en jeu soient suffisamment grandes pour récupérer une particule de la surface du monticule.

Cependant il est difficile de vérifier que cette méthode fonctionne correctement. Lorsque le monticule est dans le focus du faisceau, la caméra est saturée par la lumière diffractée et il devient impossible de voir correctement l'interaction au focus. Certains essais semblent malgré tout avoir fonctionné de cette manière.

Par ailleurs un autre phénomène fut observé lors d'expérimentations. Lorsque la puissance est suffisamment élevée, il est possible de faire soulever un petit nuage de particules. (Voir figure 1.10). Ce nuage apparaît lorsque le focus du laser se retrouve à la surface du monticule. On suppose que celui-ci est le résultat de force thermique et non optique.

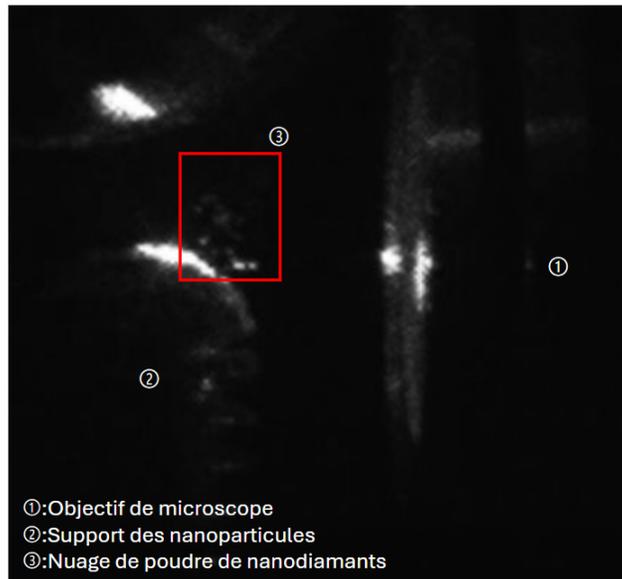


FIGURE 1.9 : Nuage de poudre de nanodiamants.

Malgré le fait que ce phénomène était imprévu, il est possible d'utiliser celui-ci afin de piéger les nanoparticules. Les particules soulevées dans le nuage retombent lentement. Certains trajets suivis passent dans le faisceau laser entre le focus et l'objectif. Les particules sont par la suite accélérées vers le focus ou elles sont retenues par la pince optique.

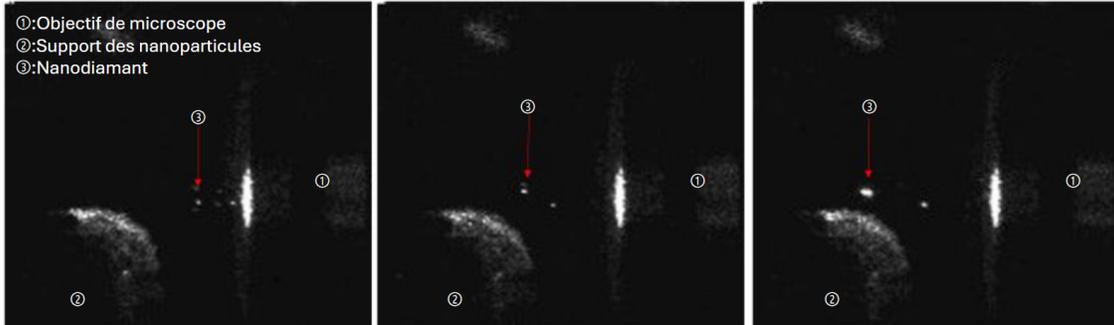


FIGURE 1.10 : Nanodiamant accéléré puis piégé par les forces optiques.

Les forces optiques ont été observées sur les nanoparticules de diamants jusqu'à quelques millimètres du point focal. Il est important de rendre compte du fait que toutes les particules mises en mouvements par les forces optiques n'atteignent pas le point focal du laser. Celles qui s'y rendent ne sont pas nécessairement arrêtées et prises dans le piège optique.

#### 1.4.1.3 Caractéristiques de la pince optique observée.

Pendant la période d'analyse d'un piège optique dans l'air, plusieurs particules ont été attrapées avec le montage possédant l'objectif de microscope. La sous-section suivante présente de manière brève certaines observations faites lors de ces expériences.

Puissance du laser :

Plusieurs puissances du laser ont été utilisées afin de piéger les nanoparticules de diamant. Les puissances enregistrées pour des essais réussis vont de 0.07 Watt à 0.12 Watt. Cependant, lors de quelques expériences, la puissance du laser fut baissée après que la présence d'une particule ait été confirmée. Il a été noté que certaines particules étaient perdues à partir du moment où la puissance du laser atteignait 0.03 Watt tandis que certaines restaient piégées à 0.01 Watt. (La puissance la plus basse testée.) Il est estimé que la puissance nécessaire pour piéger avec notre montage est plus élevée que celle nécessaire pour tenir une particule. En effet, la nature de notre technique de piégeage en serait la cause. Celle-ci nécessite assez de puissance pour extirper une particule du monticule (directement ou par nuage).

Temps nécessaire pour piéger :

La technique de piégeage mis en place n'est pas exactement systématique. Il n'est pas possible de reproduire le même mouvement ou le même nuage à chaque essai. Il en résulte que le temps nécessaire pour réussir à piéger varie. Une fois habitué au montage, il faut habituellement entre 3 à 10 minutes pour piéger une particule. Cependant, le temps nécessaire peut varier amplement. Une expérience faite n'a nécessité qu'un seul essai afin de piéger une particule. Le temps nécessaire était donc moins d'une minute. À l'opposé une expérience a nécessité une multitude d'essais avant d'obtenir une particule dans la pince optique. Cela a pris près d'une heure à réaliser. Ainsi un point important à soulever est qu'il serait pertinent de développer une technique de chargement du puits plus systématique si la pince optique est utilisée comme outil pour une autre expérience. C'est pour cette raison que les chapitres suivants s'intéressent à d'autres méthodes pour acheminer des nanoparticules vers un piège optique.

Piège double :

Il est présenté sur la figure 1.11 une situation particulière qui a été observée. Deux particules de nanodiamant ont été prises au piège dans le faisceau du laser à une distance de près d'un millimètre. Bien qu'il ne soit pas impossible de piéger plusieurs particules dans un seul puit, en utilisant des nanoparticules, il ne serait pas possible de les distinguer avec une caméra. La distance les séparant serait très faible. La possibilité de piéger deux particules de manière distincte implique la présence de deux points de focalisation de la lumière. Ce phénomène peut être le résultat de plusieurs choses. Il est spéculé que le deuxième lieu de focalisation (le point le plus proche de l'objectif de microscope) soit le résultat d'une réflexion entre le jeu de deux lentilles utilisé pour remplacer l'oculaire. Ce lieu a d'ailleurs été observé comme un puit moins stable que son prédécesseur. (Il reçoit moins de puissance, cela est en accord avec l'idée d'une réflexion.)



FIGURE 1.11 : Deux nanodiamants en lévitation optique à deux positions distinctes

---

En soi, les particules piégées dans la pince optique étaient lévitées de manière stable. Certaines particules sont restées autour d'une heure dans leur puit avant d'être retirées manuellement. Leur stabilité a permis de mettre en place des expériences simples.

Dans un premier temps, il a été tenté de déplacer la position du point focal à l'aide des miroirs. Malheureusement, la position du point focal n'a pas semblé être affectée par les quelques essais. On estime que la nature autocorrective des objectifs de microscope compensait le déplacement généré par la rotation des miroirs. Les particules subissant ces expériences n'ont pas été affectées par les déplacements des miroirs. Elles ont seulement été perdues lorsque le faisceau fut interrompu par l'extrémité de l'ouverture de l'objectif de microscope.

Dans un second temps, il a été tenté d'ouvrir la ventilation de la boîte d'isolement lorsqu'une particule a été attrapée. Le but de cette tentative était de voir s'il serait possible de créer un vide avec une particule prise au piège. Malheureusement, presque instantanément après l'ouverture de la ventilation, la particule a été délogée. Il ne serait donc pas possible de créer un vide avec le montage utilisé lorsqu'une particule est déjà dans la pince. Il serait nécessaire de créer un puit plus profond.

Finalement, une dernière expérience consistait à interrompre brièvement le faisceau laser et observer s'il était possible de maintenir la particule dans la pince optique. Aucun calcul exhaustif n'a été fait afin de déterminer la durée d'interruption maximum afin de garder la particule en place. Cependant, un enregistrement a été fait confirmant la possibilité d'interrompre le faisceau. L'enregistrement présente trois interruptions où une particule est présente dans le piège optique avant et après celles-ci. Ces interruptions ne présentent qu'une image assombrie. En considérant que l'enregistrement a été fait avec une fréquence d'images autour de 100 fps, le temps entre chaque image est d'environ 10ms. Au maximum, ces interruptions sont donc de 20ms. De plus, l'enregistrement présente une interruption du faisceau où 2 images sont assombries après laquelle la particule est perdue. Il est possible d'estimer que le temps maximum que l'on peut interrompre le faisceau est entre 20ms et 30ms.

## **1.4.2 Pince optique avec un miroir parabolique.**

### **1.4.2.1 Utilisation de l'élargisseur de faisceau.**

Le montage optique avec un miroir parabolique (voir Annexe pour les paramètres) utilisait initialement un élargisseur de faisceau. Celui-ci permettait de remplir l'ouverture du miroir et d'obtenir une focalisation avec une grande ouverture numérique. L'élargisseur de faisceau était ajustable et aurait permis d'observer le comportement de particule piéger lors d'une variation de l'ouverture

---

numérique. Malheureusement, il n'a pas été possible de piéger une particule avec ce montage. (figure 1.7). Cependant, les observations faites lors des expérimentations suggèrent qu'il n'est pas impossible de faire léviter des nanoparticules avec un miroir parabolique. Certains articles confirment d'ailleurs cette hypothèse. [29].

Il a été possible d'estimer quelques facteurs qui peuvent expliquer les difficultés rencontrées. D'une part, lorsque le miroir est utilisé avec son ouverture numérique maximum, il devient très sensible. Il est alors difficile d'aligner correctement celui-ci et le point focal peut être alors déformé et ne pas piéger correctement la particule. D'autre part, le faisceau incident au miroir est coupé à certains endroits. Afin de pouvoir imagier avec la caméra le point focal de la parabole, il était nécessaire d'introduire une ombre afin d'éviter des réflexions directes du laser dans la caméra. De plus, la méthode utilisée afin d'acheminer la poudre de nanodiamant implique un bras mécanique dans le faisceau incident. En outre, lorsque la poudre est au niveau du faisceau, plus de la moitié de la lumière est bloquée. (Lumière provenant de dessous le support.) (Voir figure 1.12). Ces perturbations impliquent qu'une bonne partie de la puissance fournie par le laser est perdue ainsi que, lors du chargement de la pince optique, la tache focale n'est pas celle attendue par la limite de diffraction.

#### **1.4.2.2 Utilisation du miroir de manière hors axe**

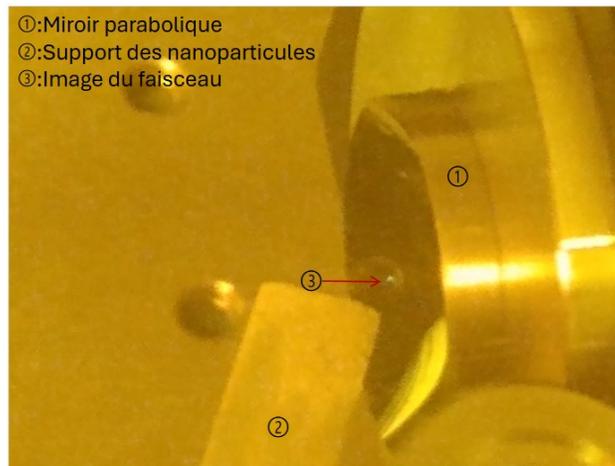
Suite aux difficultés rencontrées avec l'élargisseur de faisceau, celui-ci a été retiré. Cela a permis de contourner les problèmes mentionnés antérieurement. En effet, n'utilisant plus l'ouverture numérique complète, l'alignement du miroir n'était plus aussi sensible. Il était aussi possible d'utiliser la caméra sans se soucier d'un faisceau direct. De plus, la réflexion a été dirigée vers le bas, évitant ainsi toute obstruction du support pour la poudre.

Un tel montage a permis l'observation d'un comportement similaire à ceux observés avec l'objectif de microscope. Un comportement en particulier est la création des nuages de nanoparticules créés par l'interaction entre le point focal ainsi que le monticule de nanoparticules. La présence de ce phénomène qui a été utilisé afin de déloger les particules du monticule et subséquemment piéger les particules avec l'objectif de microscope est un bon signe pour pouvoir piéger avec le miroir parabolique. Malheureusement, suite aux quelques expériences effectuées, il n'a pas été possible de faire léviter une nanoparticule avec le miroir parabolique. Il est de fait que les expériences effectuées avec le miroir parabolique n'ont pas permis de faire léviter des nanoparticules. On soulève cependant qu'il ne s'agit pas d'un résultat impossible. Il est par contre plus difficile de piéger les particules avec un miroir parabolique qu'avec un objectif de microscope.

---

Deux potentielles idées pourraient venir en aide à la réalisation d'une expérience réussie. D'une part, après réévaluation des enregistrements des expériences avec l'objectif de microscope, il serait intéressant d'utiliser un support afin de rediriger les nuages vers une zone "d'interaction" qui se trouve avant le point focal. En effet, le montage avec l'objectif de microscope possédait une barre qui servait à recharger la vis d'un monticule de particules. (Voir figure 1.11). Cette barre n'a pas été réutilisée pour les expériences avec le miroir parabolique, mais semble avoir un impact sur le parcours suivi par les nuages de nanoparticules. Il est bien possible que celui-ci ait aidé au succès du montage avec l'objectif de microscope.

Par ailleurs, le miroir parabolique utilisé pour nos expériences possède une caractéristique gênante à la réalisation des expériences. Comme on peut l'observer sur la figure 1.12, le miroir parabolique utilisé crée une image laser et celle-ci est observable dans toutes les directions.



**FIGURE 1.12 : Image du faisceau laser par le miroir parabolique**

En outre, cette image du laser est de très haute intensité. La figure 1.12 a été prise à travers les lunettes de protection qui possèdent une densité optique de 7. Cette tache lumineuse semble provenir du point focal de la parabole et obstrue ainsi l'observation de celui-ci. Il serait donc intéressant d'utiliser un autre miroir parabolique, soit un miroir possédant une distance focale plus longue ou un miroir parabolique hors axe.

---

### **1.4.3 Nanoparticule de silice.**

Toutes les expériences précédentes ont été exécutées avec des nanoparticules de diamant. Une reprise des expériences, utilisant ce montage, a été réalisée avec des nanoparticules de silice de 80 nm de diamètre. Il n'a pas été possible de caractériser proprement le comportement de cette matière, mais il est possible de rendre compte des différences observées. Tout d'abord, il est important de mentionner que les expériences ne se sont pas terminées avec un succès. Il a été possible d'observer comme différence que les particules de silice diffusent beaucoup plus la lumière que les particules de nanodiamants. De plus, aucun nuage de nanoparticule n'a été observé. En prenant compte de ces observations, on peut estimer que la nature des nuages provient de force thermique qui n'est pas suffisamment grande avec la silice puisqu'elle absorbe moins.

## 2 MÉTHODE ALTERNATIVE D'ACHEMINEMENT

---

En raison des difficultés éprouvées quant à l'utilisation de nanoparticules de silices pour les expériences de piège optique dans l'air, un intérêt s'est porté vers la mise en place de méthode d'acheminement vers le point focal minimisant les interactions d'adhésion entre les nanoparticules et un support. En effet, l'effet thermique qui a été observé lors des expériences avec les nanodiamants a joué un rôle important dans la facilitation d'une capture réussie et celui-ci n'a pas été observé avec les particules de silice. Ainsi, trois méthodes d'acheminement des nanoparticules en suspension dans l'air ont été testées. Ce chapitre traite des trois méthodes utilisées ainsi que de leurs résultats observés; une propulsion piézoélectrique, un champ électrique alternatif et des charges électriques et une source de nanoparticules en aérosol.

### 2.1 Propulsion Piézoélectrique

En se basant sur les œuvres de Israelachvili [12] et Heim [11], Jan Giesler fait part du fait que les forces de Van Der Waals agissant sur une sphère de silice sont supérieures aux forces d'attraction gravitationnelles agissant sur celle-ci. Soit  $176nN$  pour le premier contre  $0.1pN$  pour le second avec un rayon de  $1\mu m$  [10]. Il propose alors l'utilisation d'un transducteur piézoélectrique afin d'accélérer les nanoparticules et de surmonter les forces de Van Der Waals. Ainsi, il a été effectué des expériences afin de propulser des nanoparticules de silice avec un transducteur piézoélectrique vers un piège optique.

#### 2.1.1 Transducteur Piézoélectrique

Un transducteur piézoélectrique est un transducteur qui convertit une énergie mécanique en un signal électrique. Celui-ci exploite les propriétés piézoélectriques de certains matériaux afin d'exprimer le stress et la fatigue exercés sur le dernier par une variation de potentiel électrique. L'effet inverse, un signal électrique vers une déformation mécanique, est aussi possible. Un transducteur piézoélectrique est généralement composé d'un matériau piézoélectrique recouvert sur deux faces opposées par une couche mince d'un matériau conducteur, comme représenté dans le schéma de la figure 2.1.

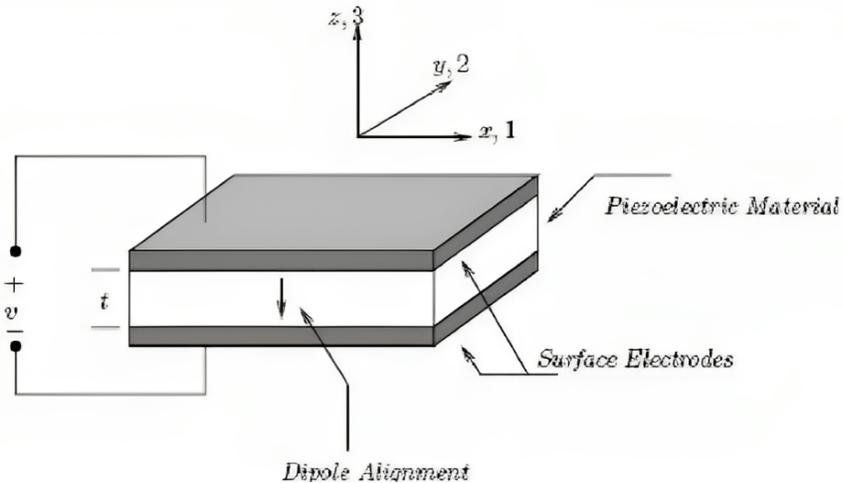


FIGURE 2.1 : Schéma d'un transducteur Piézoélectrique. Image extraite de [7].

Dans un état au repos, les moments dipolaires électriques présents dans un cristal piézoélectrique sont équilibrés. Cependant, la déformation des mailles par une force externe engendre un déséquilibre des charges. Les moments dipolaires ne s'équilibrent plus et il y a accumulation de charges sur les surfaces opposées du cristal. L'application d'un stress mécanique engendre donc une tension aux surfaces opposées. Inversement, l'application d'une tension au cristal engendre un déséquilibre des charges qui s'exprime par la déformation de celui-ci [18].

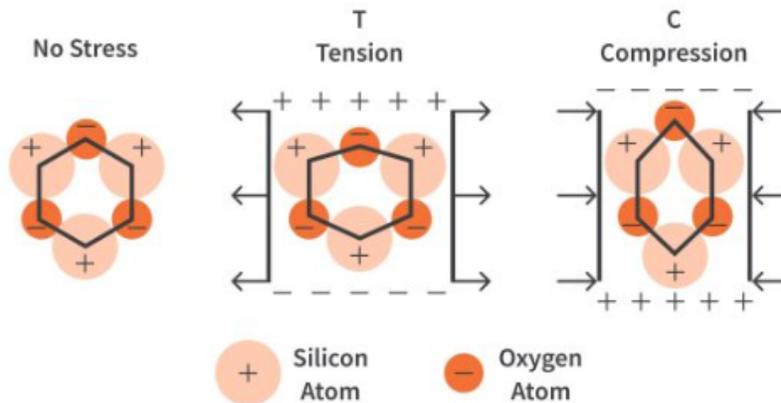


FIGURE 2.2 : Effet piézoélectrique (Quartz). Image extraite de [18].

Dans son œuvre [10], Jan Giesler fait part du fait que l'utilisation d'un transducteur piézoélectrique afin de surmonter des forces de Van der Waals en jonction avec un piège optique a déjà été exécutée par Ashkin [3] et Li[17] avec des microsphères. Cependant, il fait part des raisons expliquant pourquoi il n'a pas utilisé cette technique pour ces travaux avec des nanoparticules. En effet, il dérive de la manière suivante la taille minimum d'une particule qu'un transducteur piézoélectrique typique puisse séparer d'un substrat.

---

La force d'inertie, pour une particule sur un piézoélectrique sinusoïdalement conduit, est donnée par [10] :

$$F_{piezo} = m\omega_p^2 q_p \quad (2.1)$$

Où  $m$  est la masse de la particule,  $q_p$  est l'amplitude de l'oscillation et  $\omega_p$  est la fréquence d'oscillation du piézoélectrique.

La force de Van der Waals, dans la limite DMT de la théorie de Derjaguin-Muller-Toporov, est donnée par [12] :

$$F_{VdW} = 4\pi a\gamma \quad (2.2)$$

Où  $a$  est le rayon de la particule et  $\gamma$  est l'énergie de surface effective.

Ainsi, l'accélération nécessaire pour relâcher une particule est :

$$a_p = \omega_p^2 q_p = \frac{4\pi a\gamma}{m} \quad (2.3)$$

Il est alors possible de mettre en lien la taille minimum d'une particule avec une accélération maximum qu'un transducteur piézoélectrique peut fournir. Pour des valeurs typiques, il s'agit de  $a_{min} \approx 1\mu m$  [10].

La méthode de propulsion par transducteur piézoélectrique ne semble pas favorable à la réalisation d'une technique d'acheminement de nanoparticules vers un piège optique. Néanmoins, celle-ci a été essayée et est présentée subséquemment.

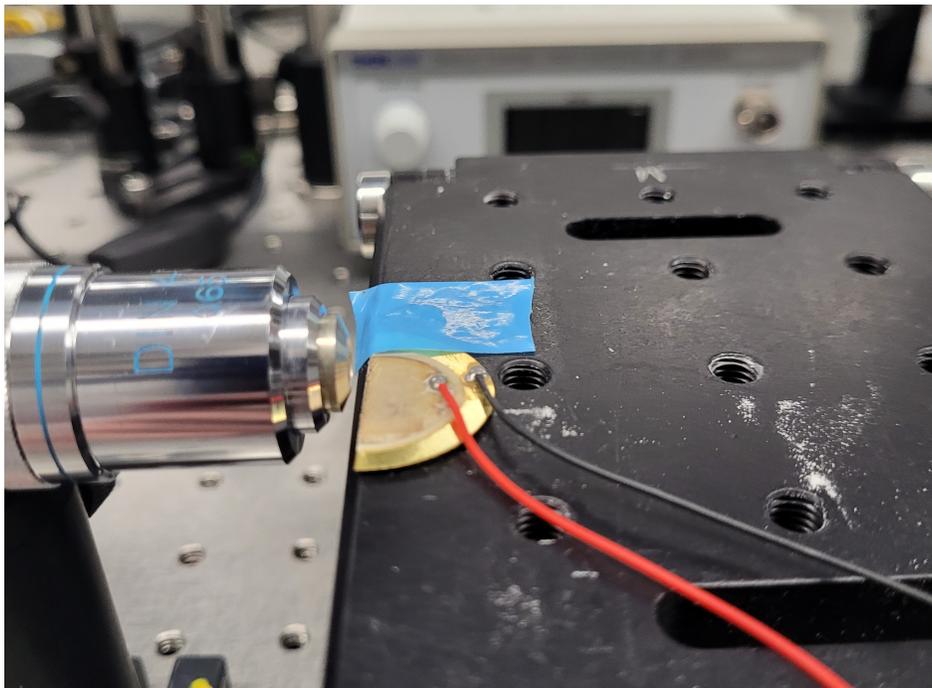
### 2.1.2 Montage

Dans le but de tester l'utilité d'un transducteur piézoélectrique afin de propulser des nanoparticules vers un piège optique, un simple montage a été mis en place. De manière similaire aux expériences précédemment décrites, il a d'abord été nécessaire de mettre en place un piège optique. À ces fins, le montage présenté dans la figure 1.5 utilisant un objectif de microscope afin de focaliser le laser a été réutilisé.

---

Un transducteur piézoélectrique installé sur un support dont la hauteur est ajustable a été placé sous le point focal du laser. Le piézo est alimenté par un contrôleur de piézoélectrique, soit pour le conduire par une fonction sinusoïdale ou pour lui donner un coup brusque de manière intermittente. Cet agencement est présenté dans la figure 2.3.

En prenant compte des résultats de Giesler précédemment partagés, il n'a pas été tenté d'extraire une nanoparticule seule du piézoélectrique. Similairement aux expériences précédentes, un monticule de particules a été déposé sur le transducteur piézoélectrique avant que celui-ci ne soit isolé puis activé. Cette disposition fut choisie en espérant que, de manière quoique brute, les nanoparticules soient projetées par le transducteur piézoélectrique vers la pince optique et qu'ensuite les forces optiques observées auparavant accélèrent une nanoparticule dans le puit où celle-ci sera piégée.



**FIGURE 2.3 : Montage avec un transducteur piezoélectrique. Contrôleur Piézoélectrique en arrière plan.**

Les nanoparticules utilisées pour les expériences avec le transducteur piézoélectrique sont les mêmes que dans les expériences discutées dans le chapitre 1. Soit des nanodiamants de taille 100 nm et moins et des nanoparticules de silice de taille 80 nm. Pour ce qui est du montage optique, les paramètres optiques sont aussi les mêmes que précédemment :

Longuer d'onde : 532 nm,

Ouverture numérique : 0.4.

Puissance du laser : 70mW et plus.

---

### 2.1.3 Résultats

Le protocole mis en place afin d'amener les particules au point focal du laser est en soi similaire à celui mentionné auparavant et décrit en annexe. L'utilisation d'un transducteur piézoélectrique a ici pour but d'essayer de remplacer le phénomène de nuage de particules sans reposer sur un effet thermique. L'utilisation d'un piézoélectrique permettrait ainsi d'essayer de piéger des nanoparticules autres que celles de diamants comme celles de  $SiO_2$  qui n'ont pas pu être piégés avec la méthode précédente. Une propulsion piézoélectrique permettrait aussi de suspendre dans l'air les particules sans nécessiter de mettre le monticule de poudre dans le point focal. Le piège optique ne serait pas bloqué et serait "visible" pendant toute la procédure.

En soi, l'incorporation du transducteur piézoélectrique au montage a atteint l'objectif que l'on souhaitait obtenir. Il a été possible de propulser dans l'air des nanoparticules sans venir obstruer le piège optique. Cependant, cette expérience ne s'est pas avérée être un succès. L'utilisation d'un piézoélectrique possède ces défauts.

Dans un premier temps, une pincée de nanoparticules est déposée sur le transducteur piézoélectrique. Celui-ci est ensuite utilisé pour surmonter les Forces Van Der Waals entre le substrat et les nanoparticules. Par contre, il est raisonnable de croire que des forces d'interactions entre les particules sont encore présentes. (Tel que des forces de  $VdW$  ). On se retrouve donc avec un regroupement de nanoparticules dont la taille cumulative est non favorable aux paramètres utilisés pour la mise en place du piège optique. Ce constat est supporté de manière qualitative en comparant la vitesse à laquelle les particules retombent. Dans le cas d'un nuage généré par effets thermiques, les particules tombent lentement tandis que dans le cas où les particules sont propulsées par le transducteur piézoélectrique, elles tombent plus rapidement.

Dans un second temps, il est difficile de proprement propulser la poudre de nanoparticule vers le puits optique. En effet, puisqu'un monticule de particules est utilisé afin de s'assurer que certaines particules soient éjectées, il est possible que trop de particules soient projetées et qu'elles s'obstruent mutuellement, empêchant ainsi l'accès au point focal. De plus, le montage simple utilisé ne permet pas de contrôler avec précision la direction ou la vitesse de la propulsion.

Dans un troisième temps, les nanoparticules ne sont pas propulsées très loin du piézoélectrique. En raison de l'ouverture numérique utilisée, il devient difficile de rapprocher le piézoélectrique sans interférer avec le faisceau. Il faudrait ainsi installer le piézoélectrique de manière inclinée ou au-dessus du piège optique. Cependant, cela amènerait à une utilisation rapide des nanoparticules.

---

Finalement, certains aspects du montage pourraient être développés afin de permettre une meilleure technique d'acheminement des particules. Principalement, il faudrait réduire la quantité de nanoparticules déposées et utiliser un transducteur piézoélectrique de meilleure qualité qu'un diaphragme piézoélectrique. Mais en raison des défauts observés et du manque d'observation d'interaction entre les particules utilisées (nanodiamants et particule de silice), alors que ceux-ci étaient présents dans les précédentes expériences, le montage de propulsion piézoélectrique a été rapidement mis de côté et n'a pas été repris.

## **2.2 Champ électrique alternatif**

À la suite du visionnement d'une expérience présentée par James Orgill, créateur de la chaîne "The Action Lab"[21], il est venu l'idée d'essayer d'incorporer un piège d'ions comme étape intermédiaire afin de suspendre des nanoparticules dans l'air en voisinage d'un piège optique. En effet, grâce aux travaux entamés par Jeffrey Allan Powell, il a été possible d'avoir accès à une source de nanoparticules retenant des charges électriques. Cette source sera d'ailleurs détaillée dans le chapitre 3.

L'idée derrière la mise en place d'un piège d'ions est la suivante. Des nanoparticules possédant une charge électrique résiduelle sont introduites dans les environs d'un piège d'ions. Celui-ci possède une zone d'interaction plus grande qu'un piège optique et serait plus simple à remplir. Les particules oscillent et sont coincées dans le champ électrique alternatif du piège d'ions. Elles sont ensuite acheminées vers le puits optique. Le champ électrique est finalement réduit, diminuant son emprise sur les particules jusqu'à tant que le piège optique domine les effets du piège d'ions et à son tour prenne le contrôle des nanoparticules.

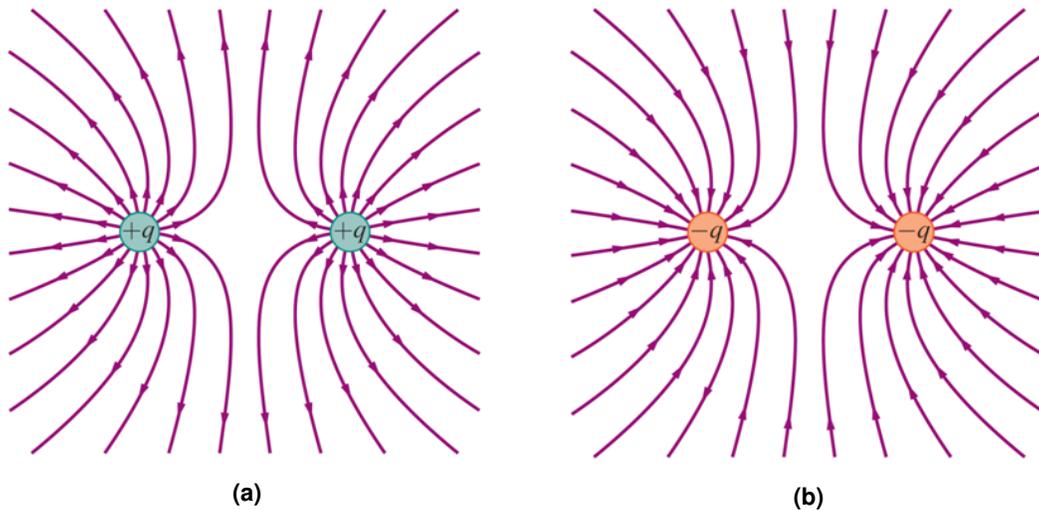
### **2.2.1 Piège d'ions**

Un piège d'ions est habituellement une combinaison de champs électriques et/ou magnétiques afin de capturer des particules chargées électriquement. Ces particules, telles que des ions ou des particules possédant des ions en surface, subissent une force en présence d'un champ électrique ou magnétique. En manipulant les champs et donc, par extension, les forces appliquées sur les particules, il est possible de les confiner dans un petit volume.

---

Les deux types de piège d'ions typique sont : le piège de Penning [26] qui utilise des champs électriques et magnétiques statiques, le piège de Paul ("Quadrupole ion trap") [15] qui utilise un champ électrique oscillatoire et un champ statique. Il est possible de générer un piège d'ions plus simple que les précédents en utilisant qu'un seul champ électrique, quoique celui-ci ne permette qu'un confinement moindre dans l'espace. Cependant, le théorème d'Earnshaw établit qu'un ensemble de charges ponctuelles ne peut être maintenu dans un équilibre stable uniquement par des interactions d'ordre électrostatique entre les charges[24]. Il est alors seulement possible de générer un piège d'ions avec un champ oscillatoire.

Considérons un disque percé en son centre chargé électriquement. Il est possible de comparer une section plan de son champ électrique à celui généré par deux charges ponctuelles identiques dans un plan (voir figure 2.4).

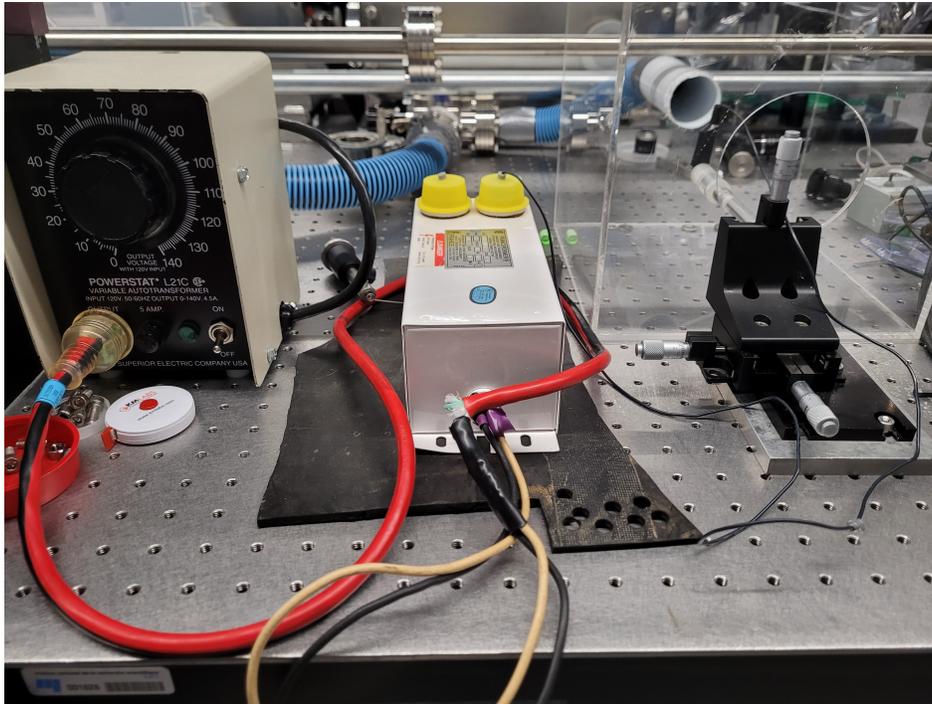


**FIGURE 2.4 : Lignes de champs électriques pour deux charges identiques positives (a) et négatives (b).Image extraite de [25].**

Une particule de charge de même signe que celui du disque, introduite près du centre de celui-ci, sera repoussée vers l'axe de révolution et s'éloignera du disque. Pour une particule de charge opposée introduite aux mêmes environs, elle sera attirée vers un côté du disque selon son décalage radial par rapport à l'axe de révolution. En présence d'une tension alternative de fréquence suffisamment élevée alimentant un disque percé, il est possible de générer un champ oscillatoire dans lequel une particule chargée ne possède pas un temps de réponse suffisamment court pour atteindre le disque ou pour s'échapper du champ avant que l'influence de celui-ci change, et ce, malgré la présence de la gravité.

## 2.2.2 Montage

Le montage mis en place afin de mettre en place un piège d'ions est le suivant (voir figure 2.5) : Le système est branché sur le circuit électrique commun dans le but de recevoir une alimentation de 120 V à 60 Hz. Un Variac est utilisé pour pouvoir contrôler la tension fournie au piège. Un transformateur est utilisé afin d'augmenter la tension du système. Une rondelle ("washer") reçoit le courant dans le but de générer un champ électrique alternatif de 60 Hz.



**FIGURE 2.5 : Montage pour la mise en place d'un piège d'ions. De gauche à droite : Variac, Transformateur, Boîte d'isolement avec la rondelle.**

Dans l'intention d'utiliser des nanoparticules avec le piège d'ions, il est nécessaire de mettre en place un système pour isoler celui-ci. Il est possible de réutiliser le principe mis en place dans les expériences des sections précédentes. Cependant, la boîte utilisée dans ceux-ci est en partie métallique et est directement connectée avec la table optique sur laquelle le montage est installé. Considérant que le piège d'ions nécessite qu'une pièce métallique soit laissée à découvert et sur haute tension, il a été nécessaire de construire une autre enceinte non conductrice afin d'isoler électriquement la pièce métallique, mais aussi de se protéger des nanoparticules (voir figure 2.5). La boîte est connectée au système d'évacuation d'air du bâtiment dans le but de ventiler au besoin l'enceinte. En outre, non présenté dans la figure 2.5 est un soufflet en caoutchouc improvisé qui sert à fermer la boîte tout en laissant passer un câble d'alimentation et un bras en acrylique qui tient la rondelle.

Le transformateur utilisé est un transformateur de marque "Franceformer". Pour usage standard, il s'agit d'un transformateur pour néon qui prend pour entrer 120V à 60Hz et fournit 5 kV, 30 mA à 60 Hz. L'utilisation du variac permet de contrôler l'entrée au transformateur et donc de fournir de 0 V à 5 kV à 60Hz à la rondelle. Quelques rondelles de tailles différentes ont été utilisées pour la mise en place du piège d'ions. L'utilisation de différentes tailles a été décidée afin de pouvoir observer si ce facteur a un impact majeur sur la qualité du piège d'ions. Les dimensions utilisées sont présentées dans le tableau 2.1.

Rondelles	ID (inch)( $\Delta = \pm 1/16$ )	OD (inch)( $\Delta = \pm 1/16$ )
1	0.312	0.734
2	0.281	0.625
3	0.343	0.562

**TABLEAU 2.1 : Dimensions de rondelles pour le piège d'ions**

### 2.2.3 Expérimentation

De manière similaire à l'expérience réalisée par James Orgill, le piège optique a d'abord été essayé avec de la poudre de lycopodium [21]. Cette poudre est composée de spores provenant de lycophytes ou de fougère. Il s'agit de microparticule organique. Bien qu'il s'agisse ici de particules d'une taille d'un ordre de grandeur supérieur à ce que l'on souhaite utiliser avec un piège optique, user de ces particules permet de répliquer l'expérience de James Orgill et de ce fait prouver la bonne mise en place du piège d'ions.

Afin d'attraper une particule dans le piège d'ions, il est nécessaire que celle-ci possède une ou plusieurs charges électriques. Le champ électrique utilisé pour piéger étant alternatif, il n'est pas nécessaire de posséder spécifiquement des charges positives ou négatives. Des charges sont introduites à la poudre de lycopodium en exploitant le phénomène d'électricité statique. Une tige d'acrylique est chargée par frottement avec un morceau de linge (de composition 80% polyesters, 20% polyamides). La poudre de lycopodium est ensuite déposée sur la tige et par contact accumule une certaine quantité de charges.

Une fois chargées, les particules sont éjectées de la tige par répulsion électrique. La barre d'acrylique est alors insérée dans la boîte d'isolement et rapprochée du piège d'ions. Pour pouvoir s'éjecter, les particules doivent posséder une charge électrique et peuvent alors interagir avec le piège d'ions. Les particules dont la trajectoire rentre à proximité du centre de la rondelle sont finalement piégées dans le champ électrique oscillatoire.

---

Une source laser est alignée afin de passer à travers le centre de la rondelle. Cette source de lumière permet avec de la diffusion de voir facilement les particules attrapées par le piège d'ions. Une fois l'expérience réalisée, il est possible de répéter la même démarche avec d'autres particules. En particulier, l'expérience peut être répliquée avec des poudres de nanoparticule telle que celles utilisées pour le piège optique, soit des nanodiamants et des nanosphères de silice ( $SiO_2$ ).

On note ici que pour des raisons de sécurité, la boîte d'isolement est connectée au système de filtration d'air du bâtiment. Cependant, pour des raisons de faisabilité, l'accès à ce système est bloqué lors de l'introduction des particules ainsi que lorsque celles-ci sont prises dans le piège d'ions. En autre situation, les particules seraient aspirées par le système de filtration d'air.

## **2.2.4 Résultats et Observations**

### **2.2.4.1 Poudre de Lychophite**

Suite à la réalisation du montage et des démarches expérimentales décrites précédemment, il a été possible de piéger des spores de Lycophytes/fougères dans un piège d'ions généré par un seul champ électrique alternatif. La méthode utilisée projette une certaine quantité de particules vers le piège d'ions. On se retrouve alors souvent dans un cas où plusieurs particules se trouvent attrapées dans le piège en même temps. (voir figure 2.6). Les particules possédant des charges de même signe se repoussent et s'organisent jusqu'à atteindre un équilibre. Elles oscillent dans le champ électrique à une fréquence identique ou à la moitié de celle du champ en fonction des interactions entre elles.

De manière générale, les particules suivent une trajectoire le long de l'axe de révolution de la rondelle avec un décalage vers le bas dû à un équilibre avec la gravité. (Les particules ne peuvent pas être exactement sur l'axe de révolution, elles sont donc attirées vers un côté en particulier lorsque les charges sont de signe opposé.) Le trajet ressemble à un V allant d'un bord à l'autre de la rondelle à la moitié de la fréquence du champ. Ces particules peuvent se déplacer de manière synchrone (ensemble) ou asynchrone (dans un sens opposé). Il a été cependant observé que certaines particules oscillent dans le plan de la rondelle à la fréquence du champ.



**FIGURE 2.6 : Plusieurs spores de Lycophytes chargés piégés dans un piège d'ions**

L'utilisation d'un piège d'ions a pour objectif d'agir comme étape intermédiaire à l'alimentation de nanoparticules pour un piège optique. Il est d'intérêt de pouvoir contrôler où se trouve la particule dans le piège d'ions afin de pouvoir transférer celle-ci. En diminuant la tension sur la rondelle grâce au variac, il est possible d'influencer la trajectoire des particules sous l'emprise du champ électrique. Lorsque la tension est réduite, la forme en « v » de la trajectoire augmente jusqu'au point où les particules atteignent la rondelle. Il est alors possible d'éliminer les particules prises dans le piège d'ions une par une en commençant par les particules les plus éloignées du centre. On peut obtenir de manière régulière une seule particule dans le piège d'ions. (voir figure 2.7)

On note par ailleurs que l'utilisation du piège d'ions avec la poudre de lycopodium a été réalisée avec des rondelles de différentes tailles présentées dans le tableau 2.1. Bien que la géométrie des rondelles ne diffère pas (tous des disques percés) et que leurs dimensions varient légèrement, le fait que les spores de lycophytes se soient trouvées prises par le piège d'ions révèle que celui-ci n'est pas critiqueusement dépendant de l'objet utilisé comme source du champ électrique.



FIGURE 2.7 : Un spore de Lycophyte chargé piégé dans un piège d'ions

#### 2.2.4.2 Nanoparticule

Suite à la réalisation du piégeage de microparticule dans le piège d'ions, celui-ci a été testé avec des nanoparticules. À ces fins, le protocole d'écrit ultérieurement a été réutilisé avec des nanoparticules de diamants et de silice. Il s'agit ici des mêmes nanoparticules utilisées dans les expériences précédentes, soit, des nanodiamants en poudre de taille inférieure à 100 nm et de nanoparticules de  $SiO_2$  en poudre de 80 nm.

Malheureusement, malgré de nombreux essais, il n'a pas été possible de capturer des nanoparticules avec le piège d'ions. Par observation, il est possible de supposer les aspects qui n'ont pas fonctionné lors de l'expérience. En effet, il n'a pas été possible de constater l'éjection des nanoparticules de la barre d'acrylique chargée électriquement. On suppose ainsi que le transfert de charge par contact est non existant ou du moins insuffisant. Cela pourrait s'expliquer par la différence de composition entre les particules et/ou de leur géométrie. En effet, les nanoparticules utilisées sont sphériques et relativement lisses (voir Annexe Data Sheet Nanoparticule) tandis que les spores de lycopodium possèdent une surface beaucoup plus complexe comme présenter dans la figure 2.8. Cela pourrait aussi s'expliquer par le fait qu'à cette taille, la quantité qui peut être accumulée est insuffisante pour générer une force de répulsion électrique surmontant les forces d'adhésion à une surface.

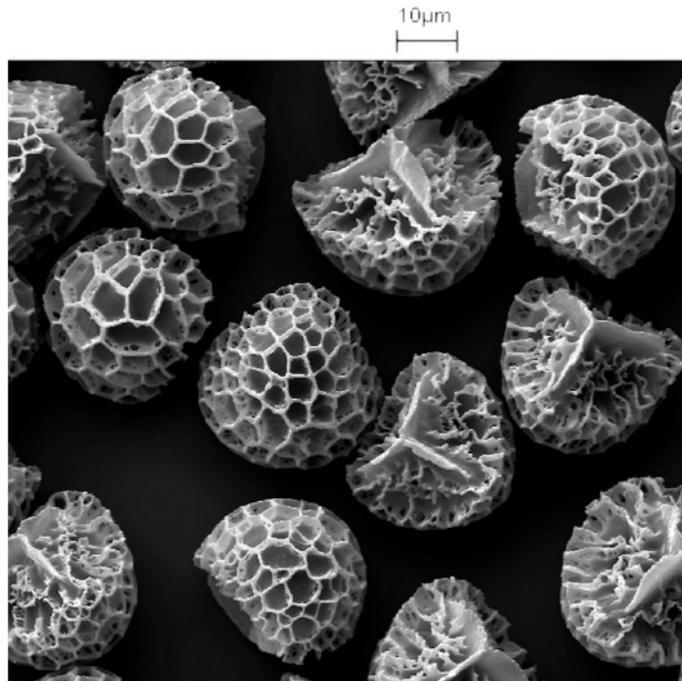
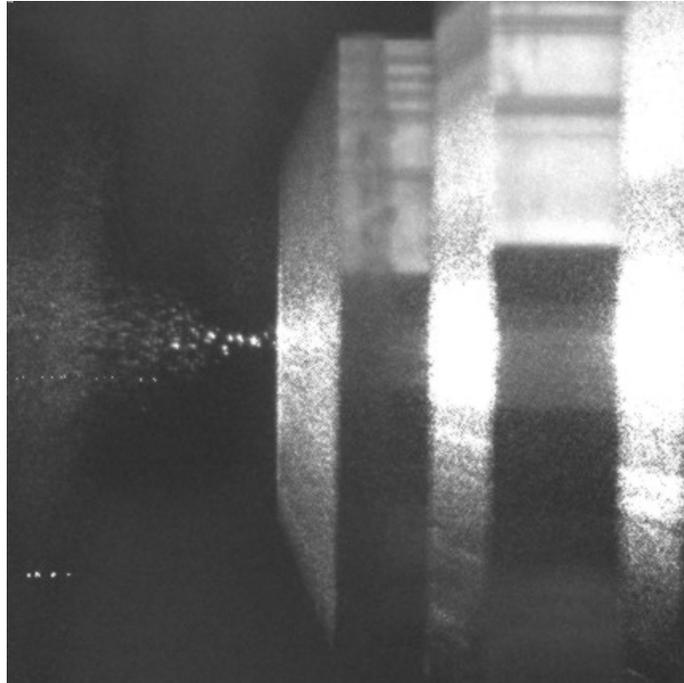


FIGURE 2.8 : Photo SEM (Scanning-electron-microscopy) de spores de *Lycopodium clavatum*. Image extraite de [6].

### 2.3 Aérosol

Les travaux de Jeffrey Allan Powell ont permis la facilité d'accès à une source de nanoparticules sous forme d'aérosol [23]. Il a été envisagé d'utiliser cette source comme méthode alternative d'acheminement de nanoparticules pour le piège optique. La description détaillée du fonctionnement de la source de nanoparticules est décrite dans le chapitre 3 où celle-ci est utilisée comme source de nanoparticules pour une chambre à vide. De manière brève, la source permet de transformer une solution contenant des nanoparticules en un aérosol. En contrôlant la concentration de la solution utilisée, il est possible d'estimer que, au maximum, une nanoparticule est présente dans une gouttelette. La bruine est ensuite transportée par un gaz porteur à travers une section de déshumidification afin de retirer la plus grande quantité d'eau autour des nanoparticules.

La source en aérosol de nanoparticules est connectée à la boîte d'isolement précédemment discutée dans les chapitres 1 et 2. Un piège optique est construit à l'intérieur de la boîte à l'aide d'un objectif de microscope de la même manière que dans le chapitre 1. La boîte est ensuite remplie avec le gaz porteur (Azote) et des nanoparticules de silice de  $100nm$  comme présenter dans la figure 2.9. L'accès au système d'évacuation d'air du bâtiment permet d'évacuer le gaz et les nanoparticules avant d'ouvrir la boîte s'il y a besoin.



**FIGURE 2.9 : Nanoparticule de Silice  $100nm$  provenant de la source en aerosol Flotant autour du piège optique.**

Il a été possible d'observer des nanoparticules en suspension dans l'air grâce à la diffusion du faisceau laser utilisé ( $532nm$ ) dans ce montage sur les particules. On note cependant que l'utilisation de cette technique afin d'alimenter le piège d'une nanoparticule n'a pas fonctionné. Il n'a pas été possible d'observer une nanoparticule de silice maintenir sa position au point focal du faisceau. De plus, il n'a pas été possible d'observer un effet des forces optiques sur ces nanoparticules. Contrairement au chapitre 1 où il a été clairement possible de regarder des nanoparticules de diamants se faire accélérer par le faisceau, et ce même dans les cas où ces particules ne se retrouvaient pas attrapées dans le piège par ces forces. Les nanoparticules de silices observées n'ont manifesté aucun mouvement outre que le faible vortex généré lors de leur introduction dans la boîte d'isolement.

On note d'ailleurs que cette expérience fut testée sur une plage de puissance du laser de  $[0.01-1]$  Watt (CW @ $532$  nm). Ce balayage en puissance devrait couvrir à la fois des puissances trop faibles pour coincer les particules de silice, mais aussi des puissances plus que suffisamment grandes selon le même type de simulation utilisé dans le chapitre 1. Une différence dans le comportement des particules aurait dû être perceptible.

---

Il a été possible de montrer dans le chapitre 4 que la source de nanoparticules développée par J.A. Powell est capable de laisser une charge électrique résiduelle sur les nanoparticules. Les détails de cet aspect sont décrits dans les chapitres subséquents. Considérant cette propriété, il a alors aussi été envisagé d'utiliser le piège d'ions en parallèle avec la source de nanoparticule en aérosol. En effet, il n'a pas été possible d'amener en suspension les nanoparticules à l'aide de l'électricité statique. La source en aérosol permettrait de présenter au piège d'ions des particules chargées et en suspension. Encore une fois, malheureusement, une interaction entre les nanoparticules et le piège d'ions n'a pas été observée.

Il est difficile d'estimer exactement pourquoi il n'a pas été possible d'utiliser la source en aérosol à pression atmosphérique afin de remplir le piège optique d'une nanoparticule. En raison d'un manque d'interaction apparente entre les particules de  $SiO_2$  et le piège optique créé par un faisceau  $532nm$  à la fois lors de l'expérience en poudre du chapitre 1 et en aérosol du chapitre 2, il serait possible de supposer que la combinaison des deux engendre des complications dans l'exécution des expériences. Cependant, la réalisation de cet agencement a déjà été réalisée. [14]. La source du problème réside donc ailleurs.

## 2.4 Discussion

À travers ce chapitre, quelques méthodes alternatives de cheminement de nanoparticules à un piège optique ont été investiguées. Malgré le fait que celles-ci n'ont pas permis l'obtention de résultats satisfaisants, ces recherches ont permis d'observer des méthodes qui pourraient fonctionner étant donné un développement plus approfondi. L'utilisation d'un piézoélectrique comme plateforme de lancement pour de la poudre de nanoparticules vers le piège optique a présenté plusieurs défauts. Il a alors été décidé que cette méthode n'est pas convenable. L'utilisation d'un piège d'ions comme étape intermédiaire au piège optique a présenté des résultats intéressants avec des microparticules malgré le fait que les résultats avec les nanoparticules laissent à désirer. Cependant, il est probable que, avec un piège plus développé, comme le piège de Penning ou le piège de Paul brièvement mentionné auparavant, il soit possible d'attraper des nanoparticules et utiliser cette technique. L'utilisation d'une source en aérosol a étonnamment donné peu de résultats malgré le fait que cette technique crée une situation similaire aux expériences exécutées dans le chapitre 1. On note cependant que seules des particules de silice ont été testées et que des résultats satisfaisants pourraient être observés avec les nanoparticules de nanodiamants. De plus, la source en aérosol utilisée a été créée avec l'intention de fonctionner pour une chambre à vide. Seule une section de la source a été utilisée afin de remplir la boîte d'isolement. Il est possible que les particules n'aient pas été complètement déshumidifiées et que cela ait enfreint le fonctionnement du piège d'ions.



### 3 SOURCE DE FAISCEAU DE NANOPARTICULES

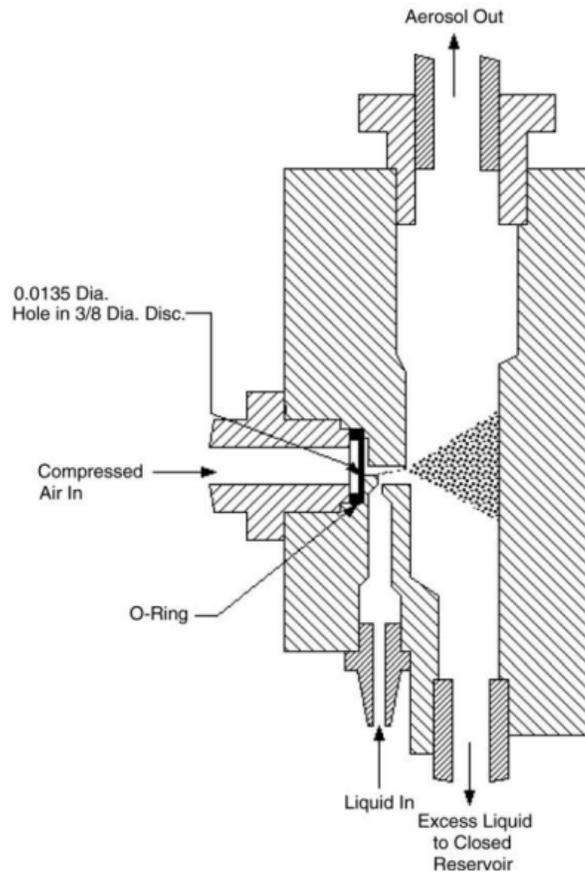
---

Les techniques mises en place dans les chapitres 1 et 2 afin de remplir un piège optique d'une nanoparticule ont toutes été testées à pression atmosphérique. Cependant, un certain intérêt est porté à l'installation d'un piège optique dans une chambre à vide dans le but de pouvoir l'utiliser lors d'expérience d'interaction laser-matière à haute intensité. Il est alors nécessaire d'instaurer une méthode d'acheminement de nanoparticule à une pince optique qui soit compatible avec une chambre à vide.

En raison du matériel et de l'expertise à disposition, un intérêt particulier s'est porté pour l'utilisation d'une source en faisceau de nanoparticules. Cette technique permet de produire des nanoparticules monomères isolées sous états gazeux et permettrait d'obtenir un flux de nanoparticules optimisé afin de placer dans une pince optique une nanoparticule par tir laser lors d'expérience haute intensité [23]. De plus, la source en faisceau de nanoparticules fonctionne à l'aide de particules en solution. L'utilisation de méthodes de synthèse en solution permet d'avoir un meilleur contrôle sur le rendement, la taille et la forme des nanoparticules contrairement à des méthodes de synthèse telles que la pulvérisation, l'ablation laser ou la pyrolyse [23]. La technique décrite précédemment a été développée par Jeffrey Allan Powell lors de sa thèse de doctorat "Strong field driven dynamics of metal and dielectric nanoparticles". Le matériel utilisé provient de son montage. Ce chapitre a pour objectif de discuter du fonctionnement de celui-ci. La source de nanoparticules fonctionne principalement en trois étapes : une aérosolisation, la déshumidification de l'aérosol, la focalisation aérodynamique des particules.

#### 3.1 Atomiseur

La première section de la source a pour objectif de générer un aérosol de nanoparticules. Ceci est atteint à l'aide d'un atomiseur commercial de type collision (TSI, Model 3076). La figure 3.1 présente la section transversale du modèle et expose son fonctionnement interne [23]. Un gaz comprimé est canalisé à travers un orifice, après lequel il s'étend pour former un jet de gaz à grande vitesse. Un effet de pression attire la solution de nanoparticules dans le jet de gaz ou celle-ci est mise en aérosol par force de cisaillement. Les gouttelettes dont la taille est relativement large (dans l'ordre de grandeur du micron) sont projetées sur la paroi opposée et retombent dans la solution tandis que les gouttelettes plus fines sortent par le haut de l'atomiseur avec le gaz porteur [23]. Dans sa thèse, J.Powell mentionne aussi que la pression d'appui et le débit de l'échantillon exercent chacun un effet modéré sur les propriétés de l'aérosol.



**FIGURE 3.1 : Section transversal d'un atomiseur par collision. Image extraite de [23](Courtesy of TSI, Inc)**

Afin de maximiser la probabilité que seulement des nanoparticules uniques soient présentes dans les gouttelettes sortant de l'atomiseur, il est nécessaire d'ajuster la concentration en nanoparticules de la solution utilisée. Prenons en considération une concentration initiale ajustée à  $\approx 5 \times 10^{10} NP/ml$ . Il est possible d'estimer une distance moyenne entre les nanoparticules de  $(5 \times 10^{10} NP/cm^3)^{-\frac{1}{3}} \approx 3\mu m$  [23].

Dans sa thèse, J.Powell exécute une analyse de taille des gouttelettes provenant de l'atomiseur TSI. Cette analyse est présentée dans la figure 3.2 obtenue à l'aide d'un compteur optique de particule de TSI (OPS Model 3330) dont la taille minimum d'échantillonnage est de 500 nm[23].

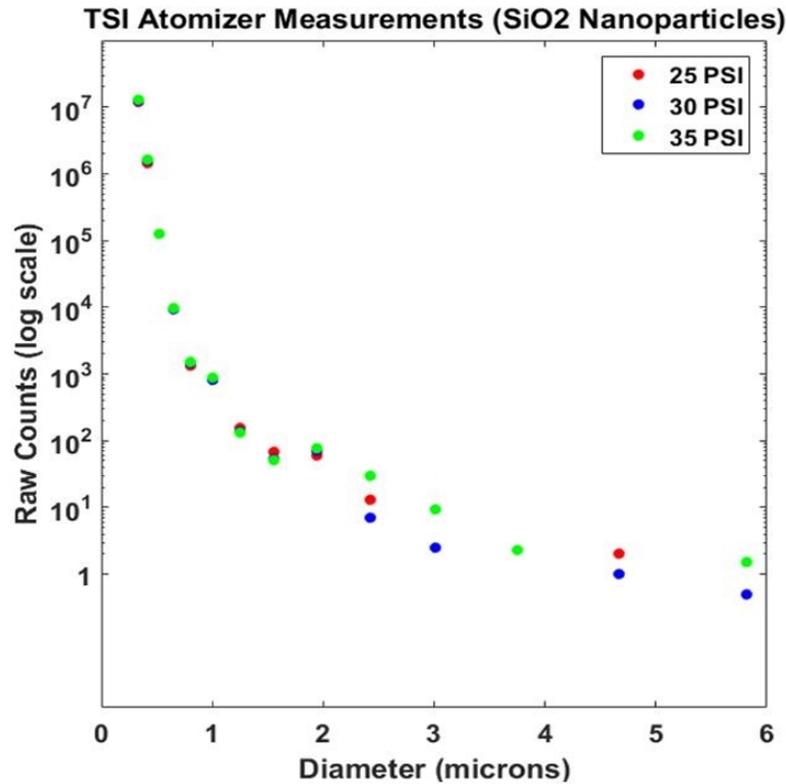


FIGURE 3.2 : Taille des gouttelettes d'aérosol provenant de l'atomiser TSI en fonction de pression d'appui. Image extraite de [23]

Il est possible d'observer sur la figure 3.2 que la vaste majorité des gouttelettes sortant de l'atomiseur sont de moins de  $1\mu m$ . Considérant la distance de  $3\mu m$  entre les nanoparticules estimées auparavant, il est raisonnable de supposer que la probabilité d'avoir plus d'une nanoparticule dans une gouttelette de l'aérosol d'une solution homogène est minimisée [23].

### 3.2 Sécheur d'aérosol

À la sortie de l'atomiseur, les nanoparticules sont transportées par le gaz porteur dans des gouttelettes de solvant. Il est alors nécessaire de les séparer afin d'obtenir des nanoparticules isolées sous état « gazeux ». La seconde section de la source en faisceau de nanoparticules a alors pour objectif de retirer le solvant des nanoparticules. La section de séchage utilisée possède elle-même deux sous-sections exploitant deux méthodes différentes dans le but d'atteindre son objectif.

La première sous-section consiste en un "Nafion™ dryer" (MD-700 Large Diameter Nafion™ dryer; Perma Pure, LLC). Cette technologie est un copolymère de tétrafluoroéthylène (Teflon) et perfluoro-3,6-dioxa-4methyl-7octene-sulfonic acide[23]. Un "Nafion™ dryer" a la capacité d'enlever tout ce qui agit comme une base ou possède un groupe hydroxyle (groupe (-OH)). Cela permet de retirer de l'eau, de l'alcool, etc., et de laisser passer des gaz tels que l'azote et l'oxygène ainsi que les nanoparticules[23].

Le "Nafion™ dryer" absorbe le solvant à travers une réaction cinétique de premier ordre. Cette réaction est stimulée par la différence en pression de vapeur entre l'intérieur (haut taux d'humidité) et l'extérieur (faible taux d'humidité) du tube de séchage [23]. Son fonctionnement est présenté dans la figure 3.3, lorsque les gouttelettes de l'aérosol sont introduites dans la partie intérieure du tube de séchage, elle rencontre un environnement sec et s'évapore, réduisant leur taille. L'humidité est ensuite extraite par la maille de "Nafion™". Un aspect pratique d'un "Nafion™ dryer" est que celui-ci agit seulement comme une membrane catalysant le déplacement du solvant. En utilisant un débit de gaz de purge sec dans la section extérieure du tube de séchage (voir figure 3.3), eau et autre solvant sont totalement évacués du système. Un "Nafion™ dryer" possède alors la capacité de fonctionner pendant de longue durée sans saturer [23].

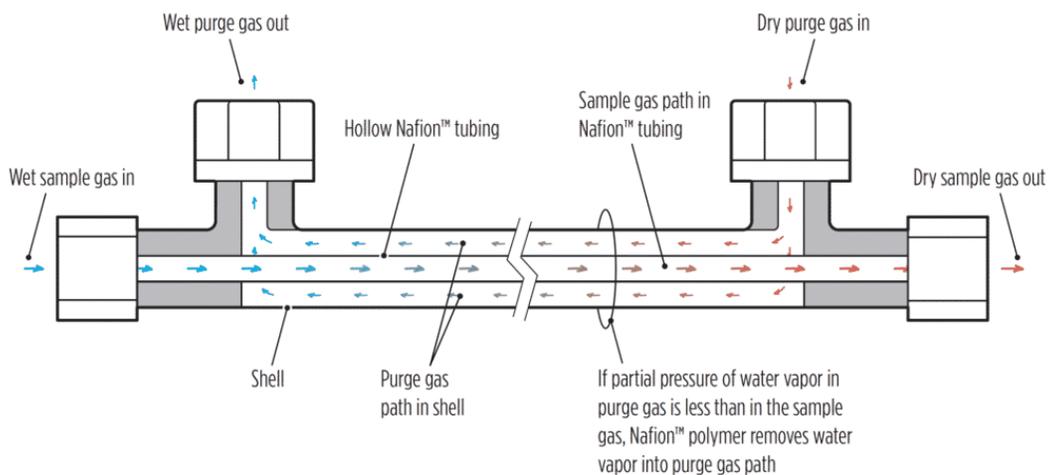


FIGURE 3.3 : Schéma du fonctionnement d'un "Nafion™ dryer". Extrait de [22]

La deuxième sous-section du sécheur d'aérosol consiste en un sécheur par diffusion (TSI Model 3062). Ce sécheur fonctionne similairement au "Nafion™ dryer" dans le principe où il crée un environnement sec afin de faire évaporer le solvant des gouttelettes de l'aérosol et de laisser passer le gaz porteur et les nanoparticules. Le sécheur par diffusion utilise cependant des billes de silices (section externe) agencées autour de là où l'aérosol s'écoule (section interne) au lieu d'un gaz de purge. De plus, il n'utilise pas de Nafion™ comme maille servant à séparer les deux sections du tube de séchage. Voir figure 3.4.

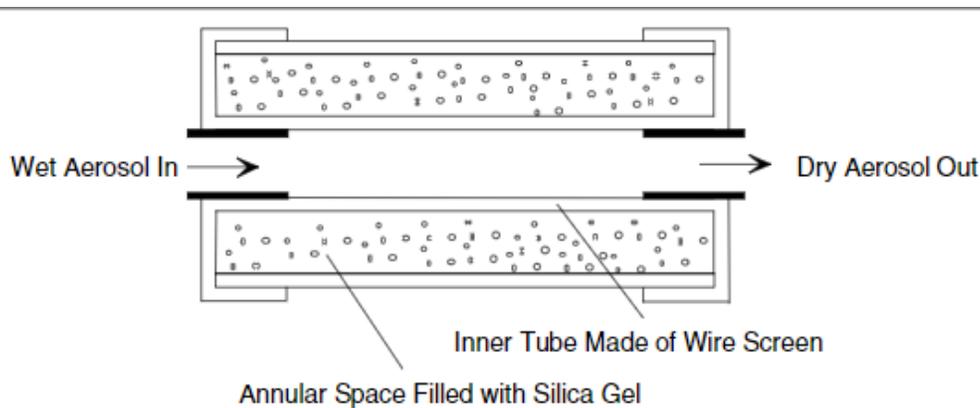
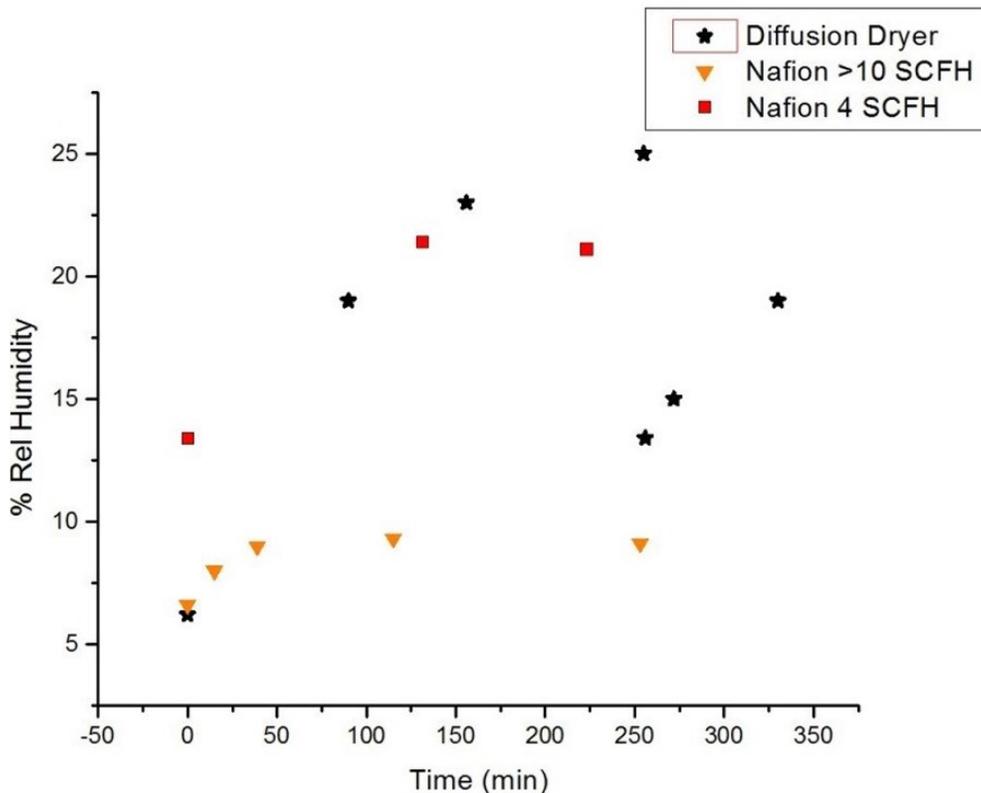


FIGURE 3.4 : Schéma du fonctionnement d'un sécheur par diffusion (TSI Model 3062) . Extrait de [27]

Il est intéressant de noter que le sécheur par diffusion est, dans le cadre de notre utilisation, inférieur au sécheur par Nafion™. En effet, les billes de silice génèrent un environnement sec en absorbant l'eau introduite dans le système. Ainsi, lorsqu'une quantité d'eau est introduite continuellement lors du fonctionnement de celui-ci via l'aérosol, la capacité des billes de silices diminue graduellement jusqu'à saturation. Lors de longues périodes de fonctionnement, l'efficacité du sécheur par diffusion se réduira au fur et à mesure du déroulement d'une expérience. Afin de revenir à un état initial, il est nécessaire de sortir les billes de silices, de les cuire, puis de les réinstaller. De plus, les billes de silices sont peu efficaces à retirer des alcools (éthanol, méthanol) qui peuvent être utilisés comme solvant [23]. Ainsi, l'utilisation du sécheur par diffusion est seulement pour compléter le sécheur par Nafion™, et est installé après celui-ci afin de réduire la quantité d'eau absorbée par les billes de silices et ainsi augmenter son temps d'utilisation avant de devoir cuire les billes.

Dans sa thèse, J.Powell fait une analyse de la performance des deux sécheurs, indépendamment l'un de l'autre, lors de leur fonctionnement sur de longues durées. Cette analyse est faite par la mesure de l'humidité relative à la sortie des sécheurs avec un psychromètre avec bulbe humide Testo 605-H2. Les résultats qu'il a obtenus sont présentés dans la figure 3.5 et représentent bien les caractéristiques mentionnées précédemment des deux types de sécheur utilisés.



**FIGURE 3.5 : Comparaison de la performance d'un sécheur par diffusion et d'un sécheur par Nafion™ en fonction du temps. Extrait de [23]**

On observe dans le cas du sécheur par diffusion qu'il peut initialement amener l'humidité relative à 6%, mais que celle-ci augmente rapidement avec le temps qui passe jusqu'à atteindre 25%. Les billes de silice les plus proches du chemin de l'aérosol sont saturées. Les données pour le sécheur à diffusion redescendent vers 15% lorsque le sécheur à diffusion est secoué, permettant ainsi d'amener des billes de silices qui n'ont pas encore été saturées vers le centre du tube [23].

Dans le cas du sécheur à Nafion™, il est possible d'observer dans les deux tests que l'humidité relative plafonne. Le sécheur à Nafion™ atteint éventuellement un régime stable mettant en évidence que celui-ci ne sature pas en fonction du temps. On remarque aussi qu'augmenter le débit du gaz de purge de 4 SCFH (Standard cubic feet per minute) à plus de 10 SCFH permet de réduire le plafond de plus de 20% d'humidité relative à moins de 10% [23]. En combinant les deux sécheurs l'un à la suite de l'autre, il a été possible de maintenir des valeurs de moins de 5% pour l'humidité relative, jusqu'à atteindre autour de 3% d'humidité relative lorsque les billes de silices avaient été récemment cuites.

### 3.3 Lentille aérodynamique

À la sortie de la section de séchage d'aérosol, on obtient principalement des nanoparticules dans un gaz porteur. Il advient à notre avantage d'introduire de manière contrôlée les particules dans la chambre à vide. À ces fins, une lentille aérodynamique est installée entre les sècheurs d'aérosols et la chambre à vide, permettant ainsi de produire un faisceau de nanoparticules.

La configuration de la lentille aérodynamique utilisée fut initialement développée par un groupe de recherche de l'Université du Minnesota en 1995 [23]. Le fonctionnement d'une lentille aérodynamique repose sur le principe de compression et d'expansion d'un flux axisymétrique à travers une embouchure ou une ouverture lorsque celui-ci est actionné par une différence de pression [23]. La figure 3.6 permet d'exemplifier ce fonctionnement. À la suite d'une compression d'un débit de gaz portant des particules à une ouverture, les particules (Trajet décrit par la ligne pleine), possédant un moment d'inertie supérieur au gaz (trajet décrit par la ligne pointillée), restent plus près du centre du système que ce dernier [23].

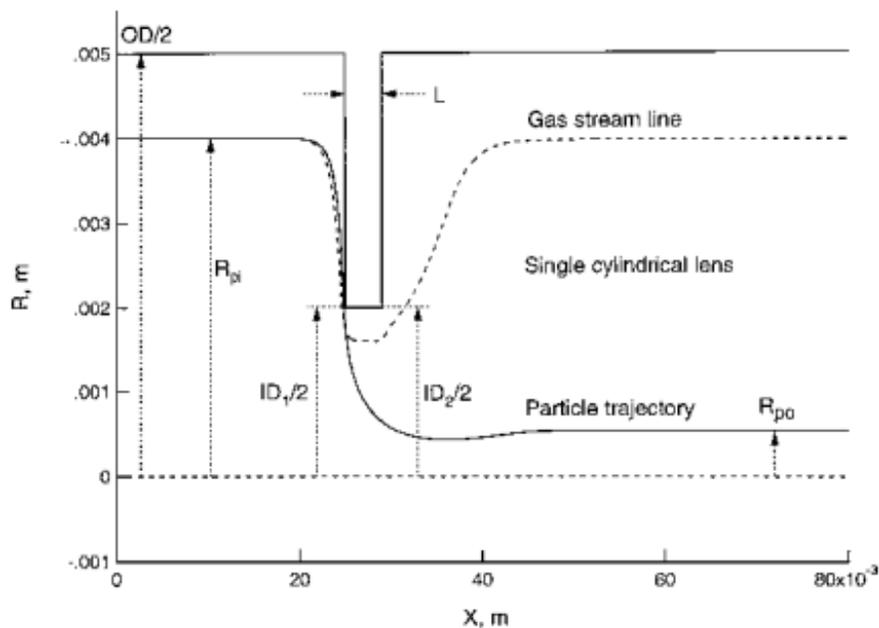


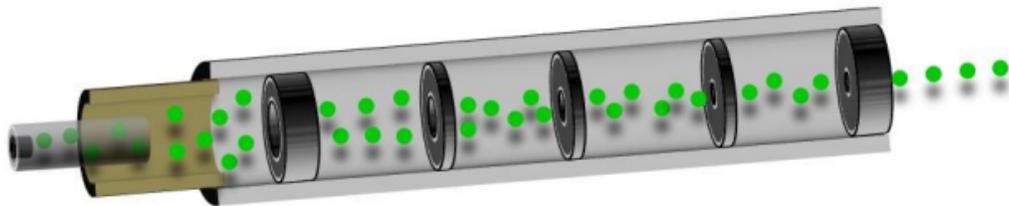
FIGURE 3.6 : Simulation du fonctionnement d'une lentille aérodynamique. Extrait de [30]

Le principe décrit est alors répété plusieurs fois afin de focaliser les particules sous la forme d'un faisceau de plus en plus mince. Dans le cas du système récupéré de Jeffrey Allan Powell, la lentille aérodynamique est composée de 6 ouvertures. Les dimensions du système sont fournies dans le tableau 3.1.

Ouverture	Diamètre de l'ouverture (mm)	Distance entre les ouvertures (mm)
Orifice critique	0.150	
1 <sup>er</sup> ouverture	5.3	49.5
2 <sup>nd</sup> ouverture	5.0	50.5
3 <sup>ème</sup> ouverture	4.7	50.5
4 <sup>ème</sup> ouverture	4.4	50.5
5 <sup>ème</sup> ouverture	4.24	60
6 <sup>ème</sup> ouverture	4.0	75

**TABEAU 3.1 : Dimensions du système de la lentille aérodynamique. Extrait de [23]**

La figure 3.7 schématise le système complet de la lentille aérodynamique. Le gaz porteur et les nanoparticules sortant de la section de séchage sont introduits dans la lentille aérodynamique par un embout en verre. (À partir de la gauche sur le schéma.) Cet embout en verre fait sur mesure possède une forme interne similaire à un entonnoir. Son diamètre interne évolue de 3 mm à une ouverture de 150  $\mu m$ . Cette ouverture permet de réguler la quantité de gaz introduit dans la lentille aérodynamique. Cette ouverture est alors dénommée d'orifice critique. Elle permet de maintenir une différence de pression entre celle de l'atmosphère et celle de quelques torrs pour laquelle la lentille aérodynamique est conçue [23].



**FIGURE 3.7 : Schéma de la lentille aérodynamique. Extrait de [23]**

Plusieurs paramètres tels que la taille des ouvertures et des particules, la pression et le flux de gaz lors de l'opération du système peuvent avoir un effet sur le bon fonctionnement d'une lentille aérodynamique. Plusieurs expériences, incluant des CFD ("complex computational fluid dynamics"), ont été exécutées par J.Powell et al. afin d'optimiser cette source en faisceau de nanoparticules [5, 23].

## 4 MANIPULATION DE FAISCEAU DE NANOPARTICULES

---

Grâce à la source de nanoparticules fournie par J.Allan Powell, il a été possible de mettre à disposition une source de nanoparticules, sous vide et actualisable. Cette source permet de fonctionner sans avoir à briser le vide. Il est bien entendu qu'un grand vide ne peut être maintenu lors du fonctionnement de la source, néanmoins il est possible de stabiliser la pression dans l'enceinte autour de 200 mTorr. Il advient, cependant, d'une complication lors de la conjugaison entre la source en faisceau de nanoparticules et la mise en place d'un piège optique dans une chambre à vide. En effet, lors du passage des nanoparticules dans la lentille aérodynamique, les particules sont accélérées le long de leur direction de propagation. Celles-ci rentrent dans la chambre à vide à vitesse élevée, près de 200 m/s. La vitesse des particules est alors trop grande pour être attrapée par un piège optique. D'après J.Giesler [10], il est nécessaire que la vitesse des nanoparticules en approche du puits soit inférieure à 10 m/s. Afin de pouvoir utiliser la source en faisceau de nanoparticules dans l'objectif de remplir un piège optique dans une chambre à vide, il est nécessaire de ralentir les nanoparticules. Lors de ces travaux, J.Powell a réalisé que sa source laissait des charges électriques sur les nanoparticules. Il est alors venu l'idée d'utiliser des champs électriques statiques dans la chambre à vide afin de manipuler le faisceau de nanoparticules.

### 4.1 Montage

Afin de tester la faisabilité et de ralentir les nanoparticules introduites dans la chambre à vide à l'aide d'un champ électrique, une simple expérience est mise en place. Un champ électrique perpendiculaire à la direction de propagation des nanoparticules est introduit dans la chambre à vide. Des nanoparticules sont alors tirées avec la source en faisceau sur une cible. Cette expérience permet de déterminer l'impact du champ sur la trajectoire des nanoparticules en observant la distance des particules déviées sur la cible par rapport aux particules non affectées.

La figure 4.1 schématise le fonctionnement de l'expérience en question. Les nanoparticules (sphère jaune) sont propulsées dans une chambre à vide à l'aide de la source en faisceau discutée dans le chapitre 3. Elles passent entre deux plaques électriquement chargées, formant un champ électrique (les lignes de champs sont représentées par les flèches noires). Les nanoparticules sont ainsi déviées de leur trajectoire selon leur charge électrique et rentrent en collision dans un bloc de gel où elles restent coincées.

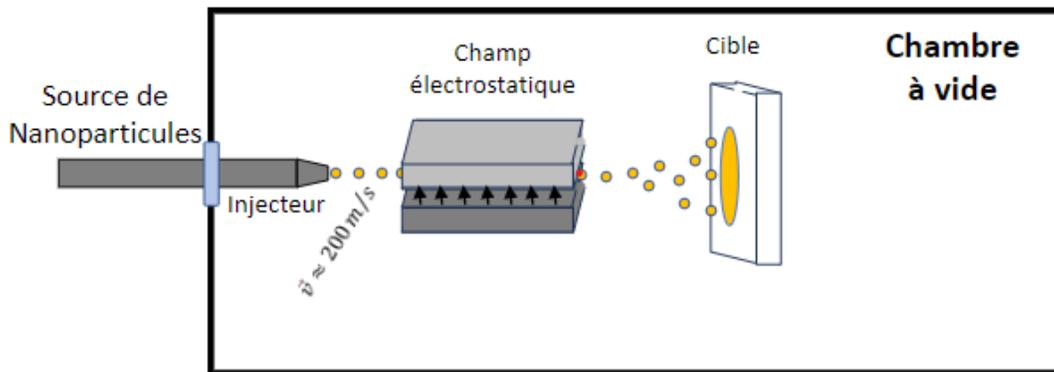


FIGURE 4.1 : Schéma de l'expérience de séparation de faisceau.

La configuration généralement utilisée pour ce montage présente une distance d'environ 3.5 cm entre l'embout de la source en faisceau de nanoparticules et les plaques métalliques du champ électrique ainsi qu'une distance d'environ 10 cm entre les plaques métalliques et la cible. Un protocole détaillé pour l'exécution d'un tir de nanoparticules sur la cible, après l'installation du montage, est fourni en annexe, dans la section 5.3 Protocole expérimentale.

#### 4.1.1 Solution/Source de nanoparticules.

Les nanoparticules utilisées lors de ces expériences sont des nanoparticules sphériques de silice en solution provenant de Nanocomposix, Inc. Différentes tailles de nanoparticules sont utilisées afin de qualifier l'impact de la masse des nanoparticules sur la faisabilité du ralentissement du faisceau par champ électrique. Les tailles utilisées varient de 50 nm à 400 nm. Les certificats d'analyse des solutions utilisées sont fournis dans l'annexe Data sheet nanoparticule. Ceux-ci présentent l'erreur sur la taille des nanoparticules ainsi que leurs distributions statistiques.

La concentration en particules des différents échantillons procurés est autour de  $10^{12}$  NP/mL. En tenant compte de ce qui est mentionné dans le chapitre précédant, afin de minimiser la présence de plus d'une particule par gouttelette d'aérosol, une concentration en particule autour de  $5 \times 10^{10}$  NP/mL est exigée. Ainsi, il a été nécessaire de faire une dilution des échantillons de Nanocomposix par un facteur 100 dans le but d'obtenir une solution dont la concentration est appropriée à la source de nanoparticules en faisceau. Un protocole expérimental détaillé pour la préparation par dilution de la solution est fourni en annexe dans la section 5.3 Protocole expérimental.

#### 4.1.2 Champ électrique.

Le champ électrique est généré à l'aide de deux plaques métalliques carrées de côté 6 cm. Ces plaques sont maintenues à une distance fixe à l'aide de deux séparateurs en céramique de 7 mm d'épaisseur. Une différence de tension est appliquée aux deux plaques à l'aide d'une source d'alimentation haute tension : Stanford Research Systems, Inc Model PS350/5000V-25W.

Un élément à prendre en compte pour cette expérience est que, plus le champ électrique est fort, plus l'impact sur les particules chargées sera important. Il est dans notre intérêt de maximiser le champ instauré. Cependant, la pression dans la chambre à vide lors du fonctionnement de la source de nanoparticules n'est pas extrêmement faible à cause de l'apport du gaz porteur dans l'enceinte. En tenant compte du phénomène décrit par la loi de Paschen, présenté dans la figure 4.2, on réalise que la pression dans la chambre à vide se rapproche du minimum pour la tension de claquage de plusieurs gaz. Deux pompes ont été utilisées pour la chambre à vide, une pompe "dry scroll", (Varian Triscroll pump Model PTS06003230VPI) et une pompe "roots". Les pressions présentées dans le tableau 4.1 ont été mesurées dans la chambre à vide, avec une jauge à vide PFEIFFER TPR280 lors du fonctionnement de la source de nanoparticules avec une pression d'appui d'un gaz d'azote de 30 PSI qui agit comme gaz porteur.

On note ici que le nombre total de fois que la pression a été mesurée ne représente pas le nombre total d'expériences exécutées. Lors d'expériences subséquentes au relèvement de la pression, celle-ci a toujours été surveillée et n'a pas montré de valeur s'éloignant de celle présentée dans le tableau 4.1.

	Pression(torr)	Mesuré X fois sur différentes expériences.
Scroll Pump	1.04	6
	1.05	13
	1.06	3
Roots Pump	$1.76 \times 10^{-1}$	2
	$1.78 \times 10^{-1}$	2
	$1.8 \times 10^{-1}$	2
	$2.0 \times 10^{-1}$	2
	$2.09 \times 10^{-1}$	1
	$2.1 \times 10^{-1}$	5

**TABLEAU 4.1 : Pression dans la chambre à vide lors du fonctionnement de la source en faisceau de nanoparticules.**

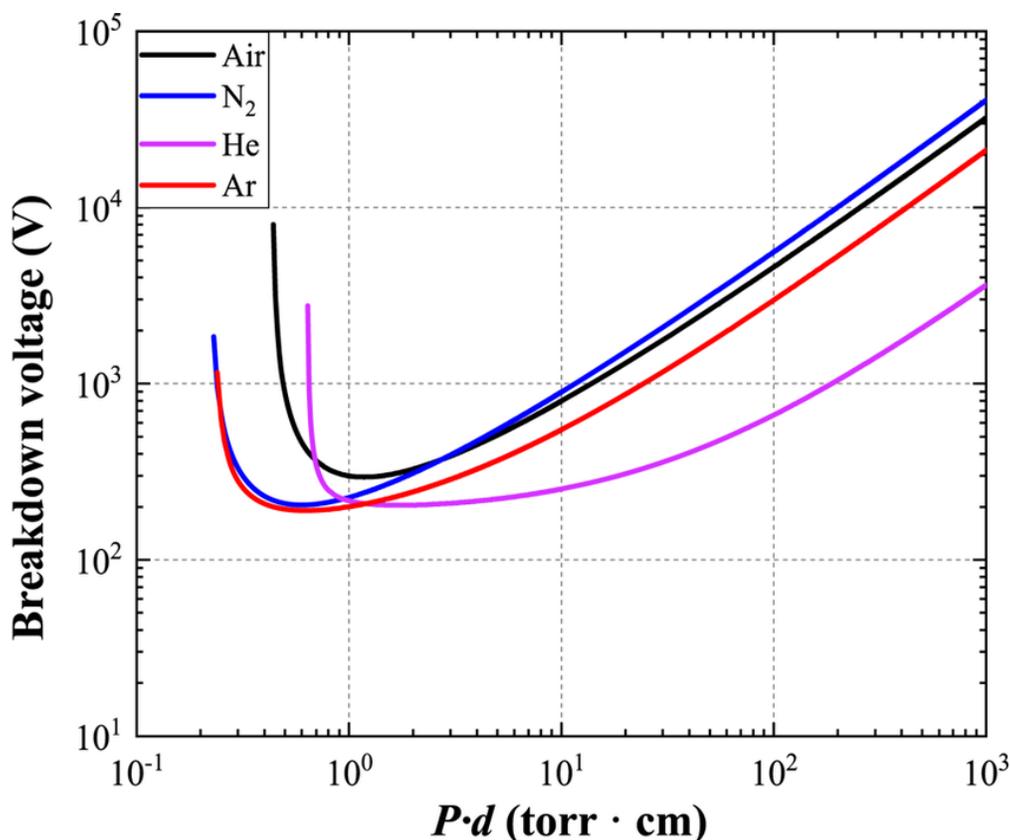


FIGURE 4.2 : Loi de Paschen pour différents gaz. Tension de Claquage pour différents gaz en fonction de la pression × écart.(Extrait de [13])

En comparant les valeurs obtenues, présentées dans le tableau 4.1 avec les valeurs de la figure 4.2 et en considérant l'écart de 7 mm entre les plaques métalliques, il est possible de faire état du constat suivant. L'utilisation de la pompe "scroll" amène à une situation où la tension de claquage est essentiellement minimisée. Cela limite grandement la tension qui peut être appliquée entre les plaques métalliques. Il a alors été nécessaire d'utiliser la pompe "roots" afin de permettre la génération d'un plus grand champ électrique.

Par la suite, le montage a été testé lors du fonctionnement de la source avec la pompe "roots" afin de déterminer pour quelle valeur de la tension appliquée aux plaques métalliques le disjoncteur de la source haute tension serait déclenché. (Dans quel cas il y aurait eu claquage). Le tableau 4.2 présente les tensions mesurées lorsque celles-ci étaient augmentées par paliers de 10V ou de 1V. Le tableau présente aussi la pression lors de l'expérience et la valeur équivalente du champ électrique considérant un écart de 7 mm entre les plaques. On note que les valeurs du champ obtenues ne correspondent pas nécessairement aux tensions de claquage décrites par la loi de Paschen. En effet, le passage des nanoparticules entre les plaques ainsi que la pression locale du gaz (Proximité des plaques à l'embout de la source en faisceau) permettrait de réduire la tension de claquage.

	Pression (Torr)	Tension (V) (Pas de 10V)	Champ électrique (kV/m)	Tension (V) (Pas de 1V)	Champ électrique (kV/m)
Plaques métalliques, 7mm de séparation, Humidité relative 2.4%	$1.76 \times 10^{-1}$	350	50	360	51.4
		360	51.4	361	51.6
		360	51.4	362	51.7
		360	51.4	362	51.7
		360	51.4	362	51.7
Plaques métalliques, 7mm de séparation, Humidité relative 2.4%, Face Extérieure recouvert de Kapton tape	$1.80 \times 10^{-1}$	400	57.1	415	59.3
		400	51.4	414	59.1
		410	58.6	403	57.6
		420	60	407	58.1
		420	60	406	58

**TABLEAU 4.2 : Tension pour laquelle le disjoncteur de la source haute tension à été déclenché ainsi que la valeur du champ électrique correspondant.**

Il est présenté dans le tableau 4.2 des résultats de deux montages. La différence entre ceux-ci est le fait que dans le deuxième montage, les faces extérieures des plaques métalliques ont été recouvertes d'un ruban adhésif de Kapton dans l'objectif d'isoler celles-ci du reste de l'enceinte. On perçoit grâce au tableau 4.2 que cela nous a permis d'atteindre une plus haute tension. Il a été possible de mettre en place un champ électrique de plus de 57 kV/m dans la chambre à vide lors du fonctionnement de la source en faisceau de nanoparticules. On note cependant que lors de l'utilisation sur de longue durée (plusieurs dizaines de minutes), il était possible que le disjoncteur de la source de tension soit déclenché lorsque la tension appliquée était supérieure à 380V (54.3kV/m).

### 4.1.3 Cible

La cible utilisée afin de recueillir la distribution des nanoparticules déviée par le champ électrique est un Gel-Box<sup>TM</sup> de la compagnie Gel-Pak. Plus spécifiquement Gel-Box<sup>TM</sup> de la série AD (Gel-Pak 8). Il s'agit " d'une boîte à charnière en plastique avec un gel exclusif ou un élastomère Vertec sans silicone appliqué directement sur le fond" [9].

L'utilisation d'un gel permet de retenir les différentes nanoparticules à leur location lorsque celles-ci rentrent en collision avec le gel. Lors de l'utilisation de la source en faisceau de nanoparticules sur plusieurs dizaines de minutes à travers le champ électrique, il est possible de voir apparaître sur le gel transparent une trace (Blanche dans le cas des nanoparticules de silice). Cette trace représente la distribution des nanoparticules dans un plan à une distance fixe du champ électrique. Il est alors possible d'analyser ces traces et de témoigner de l'impact du champ électrique sur la propagation du faisceau de nanoparticules.

---

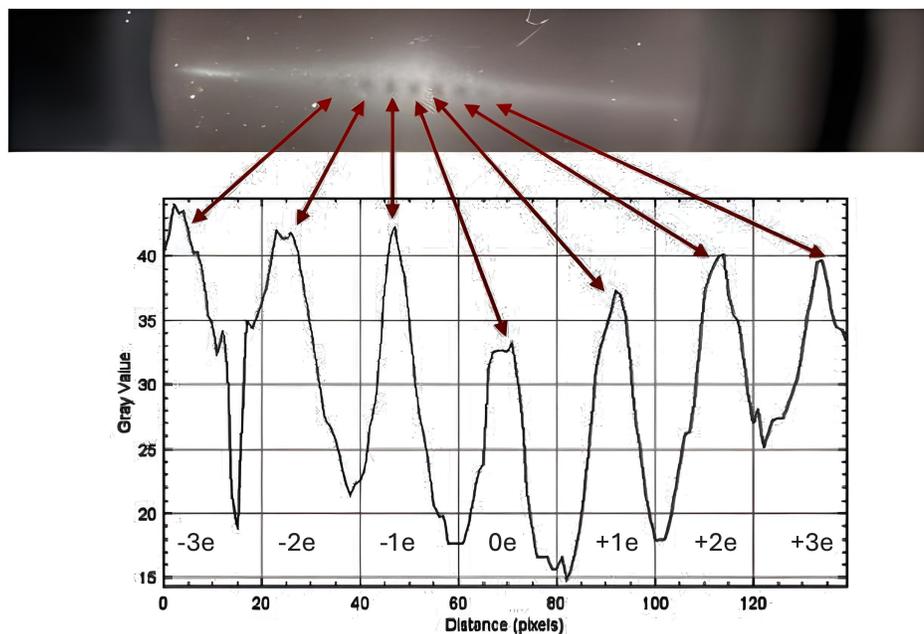
Cependant, l'utilisation d'un gel afin de préserver la distribution des nanoparticules présente un défaut qui ne fut observé que subséquemment aux expériences. La qualité/netteté des traces diminue lentement au cours du temps. Il devient difficile après plusieurs mois de rendre compte de certains motifs précédemment présents. Ceci est un des aspects qui a rendu difficile l'obtention d'images nettes des traces dans le gel.

## 4.2 Résultats

Les traces obtenues dans le gel à la suite de la déviation du faisceau de nanoparticules par un champ électrique sont typiquement semblables à celles représentées dans la figure 4.3. Il est possible d'observer dans cette figure des traces circulaires. Ces deux traces correspondent aux tirs exécutés lorsque la source de tension n'est pas allumée. Sans la présence du champ électrique, les nanoparticules de silice ne sont pas déviées, cela permet d'obtenir une référence sur la position des particules ne possédant pas de charges lors de tirs subséquents. (Le Gel-Box<sup>TM</sup> est installé sur une platine de translation afin de déplacer la cible sur un axe seulement.) Lorsque le champ électrique est appliqué, on observe alors les traces étirées de la figure 4.3. Les traces sont étirées de haut et de bas, cela permet d'affirmer la présence de particules chargées positivement et négativement. Cet aspect est renforcé par le fait que pour la troisième trace étirée présentée dans la figure 4.3, le champ électrique a été inversé. On note que les traces étirées semblent plus courtes vers le haut que vers le bas. On suppose que cela s'explique par le fait que la trajectoire des particules les plus chargées a été interrompue par la plaque métallique et que l'asymétrie est créée par le fait que le faisceau n'a pas été centré entre les plaques métalliques. Cet effet peut être remédié en utilisant de plus grands séparateurs entre les plaques ou en recentrant le faisceau à travers les plaques.



FIGURE 4.3 : Traces de nanoparticules de  $SiO_2$  de 100 nm incrusté dans un Gel-Box<sup>TM</sup> lors de la déviation d'un faisceau par un champ électrique. (Tension respective de gauche à droite :0V,-440V,-310V,0V,280V)

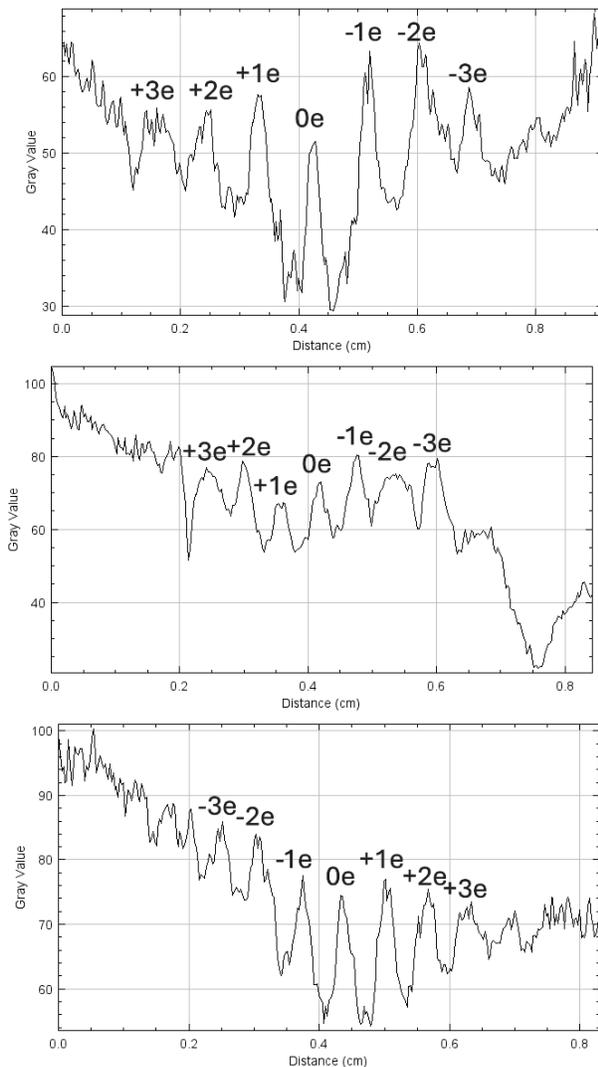


**FIGURE 4.4 :** Analyse en échelle de gris sur l'inverse de l'image d'une trace de nanoparticules de  $SiO_2$  incrustées dans un Gel-Box<sup>TM</sup> lors de la déviation d'un faisceau par un champ électrique.

La trace présentée et analysée dans la figure 4.4 est la trace la plus à droite de la figure 4.3 observée à travers une loupe. Un aspect particulier qui peut être observé dans les figures 4.3 et 4.4 est la présence d'un motif discret à l'intérieur des traces dont les particules ont été déviées. Afin de mieux mettre en évidence ce motif, le contraste de ces deux images a été ajusté. De plus, une analyse en échelle de gris est présentée dans la figure 4.4. Cette analyse faite à l'aide de l'éditeur ImageJ a été faite sur l'inverse de l'image associée permettant ainsi d'établir un lien entre les pics aux spots les plus sombres.

Il est supposé que le motif discret possède comme origine le caractère discret des charges électriques. Les points seraient alors des endroits où la concentration de nanoparticules serait plus élevée et représenterait les lieux des impacts des particules possédant différentes charges électriques élémentaires (0e,+1e,-1e,etc.). Le motif discret aurait alors un comportement relié au ratio  $\frac{q}{m}$  (où q est la charge et m est la masse des nanoparticules de silice.) La variation du champ électrique où de la masse des particules aurait alors un effet sur le motif discret observé. En ce qui concerne l'apparence plus sombre des points qui devrait être plus dense, il est supposé que cela soit dû à un effet de lumière. En effet, lors de certaines expériences, le motif discret apparaît comme des points blancs, moins transparents que le reste de la trace.

En utilisant comme référence la taille d'un Gel-Box<sup>TM</sup> de 5.3 cm, il est possible de faire une analyse en échelle de gris avec le logiciel ImageJ des traces afin de vérifier si le motif discret obtenu est dépendant du champ électrique (voir figure 6.4). Il est présenté dans la figure 4.5 les analyses en échelle de gris des trois traces étirées de la figure 4.3. De même que pour l'image 4.4, l'analyse a été faite sur l'inverse de l'image afin d'établir un lien entre les pics et les points du motif discret. Les tableaux 4.3 et 4.4 présente respectivement la position du centre des pics et la distance entre les pics adjacents.



**FIGURE 4.5 : Analyse en échelle de gris des traces de la figure 4.3 respectivement de haut en bas -440V, -310V,+280V**

Pic	Graph -440V (cm)	Graph -310V (cm)	Graph +280V (cm)
-3	0.1604	0.2444	0.2495
-2	0.2418	0.3004	0.3080
-1	0.3309	0.3589	0.3742
Center	0.4226	0.4175	0.4378
+1	0.5167	0.4760	0.5015
+2	0.6084	0.5371	0.5651
+3	0.6924	0.5956	0.6262

**TABLEAU 4.3 : Position des centres des pics des graphiques de la figure 4.5**

Distance entre Pic	Graph -440V (cm)	Graph -310V (cm)	Graph +280V (cm)
Pic-3 → Pic-2	0.0814	0.056	0.0585
Pic-2 → Pic-1	0.0891	0.0585	0.0662
Pic-1 → Centre	0.0917	0.0586	0.0636
Centre → Pic+1	0.0941	0.0585	0.0637
Pic+1 → Pic+2	0.0917	0.0611	0.0636
Pic+2 → Pic+3	0.084	0.0585	0.0611
Moyenne	0.08867	0.05853	0.06278

**TABLEAU 4.4 : Distance entre les pics des graphiques de la figure 4.5**

---

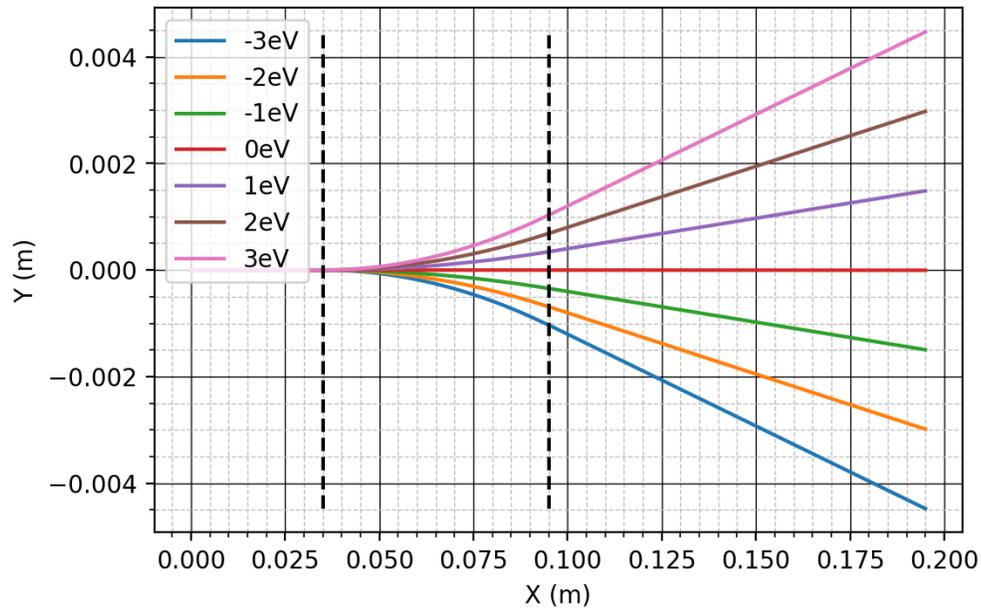
Il est possible d'observer à l'œil nu que le motif discret varie avec le champ électrique appliqué. Les valeurs présentées dans le tableau 4.4 renforcent cette attestation. Les valeurs présentées lorsque le champ est généré par une tension de -440 V et -310 V présentent une réduction de la distance entre les points du motif discret. Il s'agit du phénomène attendu. Un moins grand champ électrique possède un effet moindre sur la trajectoire des particules chargées. En outre, les ratios entre les tensions et les distances moyennes de ces deux traces sont similaires.  $\frac{440}{310} \approx 1.42$  et  $\frac{0.08867}{0.05853} \approx 1.51$ .

Cependant, certaines anomalies sont présentes parmi les différents essais réalisés. En effet, comme les résultats obtenus par la trace lors du champ généré par une tension de +280V, alors que l'espacement est plus petit que pour la trace du -440 V, celui-ci est plus grand que pour la trace du -310 V. Ce phénomène va à l'encontre de ce qui est attendu. Il serait possible de suspecter que l'orientation du champ est un effet considérant les conditions de l'expérience. Cependant, en prenant compte d'autres tirs exécutés exhibant un comportement semblable aux traces -440V et -310 V, il est plus raisonnable de suspecter des variations expérimentales non insignifiantes. Notamment, le taux auquel l'eau est retirée des nanoparticules peut avoir un effet important sur le "poids effectif" des particules. En effet, le poids des nanoparticules exerce un contrôle sur le motif discret. Des tirs ont été exécutés avec des particules de  $SiO_2$  de 400 nm et de 200 nm (voir Annexe Data sheet pour les certificats d'analyse des nanoparticules). Ces particules, possédant des poids respectivement 64 et 8 fois plus élevés que précédemment, ont montré des traces et des motifs discrets plus restreints que les nanoparticules de  $SiO_2$  de 100 nm pour des champs électriques de mêmes valeurs. La distance entre les points du motif discret variait de manière inverse à la masse des particules utilisées. Malheureusement, en raison de l'inconvénient mentionné dans la section 4.1.3 sur la cible, il n'a pas été possible de prendre en photo les résultats observés sur l'impact de la masse sur la trajectoire. Les traces récupérées après ces tirs ne présentaient plus le motif discret au moment où l'on souhaitait les prendre en photo.

### 4.3 Discussion

Les résultats obtenus à la suite des expériences de déviation du faisceau de nanoparticules par champs électriques dans une chambre à vide permettent de mettre en évidence la possibilité de manipuler les nanoparticules de  $SiO_2$ . De plus, les résultats présentent des traces possédant un motif discret qui semblent reliées au caractère discret des charges électriques. En effet, la variation de la masse des particules ou de la tension utilisée pour générer le champ électrique entraîne des variations dans le motif discret qui semble correspondre à ce que l'on attendrait si l'on avait dévié des nanoparticules de  $SiO_2$  possédant quelques charges élémentaires. Cependant, la présence d'incertitude expérimentale ne permet pas d'affirmer ce constat.

Un calcul simple permet de montrer que la présence d'une seule charge élémentaire sur une nanoparticule de silice de taille 100 nm est suffisant pour contrer l'effet de la gravité lorsqu'elle est immergée dans un champ de 50 kV/m. (Voir Annexe 5.1.3) Il n'est donc pas impossible d'obtenir un motif discret à partir de charge élémentaire. Cependant, pour savoir s'il est possible d'avoir une distinction claire (visible à l'œil nu) entre les différents lieux d'impact des nanoparticules possédant une ou plusieurs charges élémentaires, une simple simulation de la trajectoire des particules a été mise en place. Cette simulation en 2D est rudimentaire et ne prend en compte que de l'effet de la gravité et d'un champ d'un plan uniformément chargé.



**FIGURE 4.6 : Trajectoires simulées de nanoparticules de silice de 100nm possédant quelque charges élémentaires à travers un champs électyrique de 50kV.**

La figure 4.6 présente les résultats de la simulation pour les paramètres suivants. Les particules de silice sont de densité de  $2g/cm^3$  et de diamètre 100 nm. Elle possède une vitesse initiale de 200m/s. Le champ appliqué est de 50 kV/m. La section entre les traits noirs en pointillés correspond à la section dans laquelle le champ électrique est présent. Les particules sont en chute libre à l'extérieur. Les distances de propagation correspondent à nos paramètres expérimentaux, soit 3.5 cm entre l'embout de la source en faisceau de nanoparticules et les plaques métalliques du champ électrique, une distance d'environ 10 cm entre les plaques métalliques et la cible et finalement 6 cm dans le champ électrique. Les trajectoires de nanoparticules possédant de -3 à 3 charges élémentaires sont représentées.

---

Ainsi, cette simulation permet de prévoir que dans des conditions semblables à nos expériences, la distance entre les points d'impact de nanoparticules de silice de 100 nm possédant quelques charges élémentaires est dans l'ordre de grandeur du mm. Il s'agit ici d'un ordre de grandeur semblable à celui obtenu expérimentalement. En lieu des résultats expérimentaux et de cette simulation, quoique simpliste, il est raisonnable d'admettre que le motif discret obtenu lors du fractionnement du faisceau de nanoparticules possède comme origine la discrétisation des charges électriques et adopte un comportement en lien avec un ratio  $\frac{m}{q}$  où m est la masse d'une nanoparticule et q sa charge, un multiple de la charge élémentaire.

#### 4.3.1 Contrôle des charges électriques sur les nanoparticules

Il a été possible de démontrer qu'il est possible de manipuler le faisceau de nanoparticules avec un champ électrique. Un certain intérêt s'est alors porté sur les paramètres qui permettent d'ajuster ce contrôle. Les expérimentations ont montré qu'il est possible d'adapter le champ électrique et la masse des particules à un certain degré. On s'est donc demandé s'il était possible d'ajuster le nombre de charges présent sur les nanoparticules. Si cela est possible, cela permettrait de réduire les exigences sur un champ électrique longitudinal afin de ralentir les nanoparticules injectées dans la chambre à vide par le faisceau.

Les charges électriques présentes sur les nanoparticules actuellement sont accumulées lors du processus d'atomisation de la solution. Une première idée a alors été de permettre l'accumulation de charges électriques sur la pièce métallique de l'atomiseur en connectant celle-ci à une électrode d'un générateur Van der Graaf. Il était ainsi espéré que certaines de ces charges soient transférées aux nanoparticules. Toutefois, il n'a pas été possible d'observer une différence entre les traces lorsque le générateur de Van der Graaf était allumé ou éteint. Ainsi, cette méthode soit ne fonctionne pas, où n'affecte pas une quantité significative de nanoparticules. L'utilisation du générateur Van der Graaf a alors été rejetée.

Une seconde idée a été d'introduire des ions aux gouttelettes de la solution atomisée. À ces fins, un générateur d'ion négatif a été incorporé dans le chemin des nanoparticules. Cette méthode a été testée avec la source d'ions introduite avant ou après la section de séchage de la source de nanoparticules. Malheureusement, comme pour le générateur de Van der Graaf, il n'a pas été possible d'obtenir de résultats satisfaisants. Cette méthode a donc aussi été rejetée.

Néanmoins, seules ces deux méthodes ont été vaguement testées. Si une méthode permettait de contrôler artificiellement le nombre de charges sur les nanoparticules, cela permettrait d'avoir un point de contrôle additionnel sur le faisceau de nanoparticules et serait alors recommandé d'ajouter au montage final.

---

### 4.3.2 Contrôle de la vitesse des nanoparticules.

Malheureusement, les expériences exécutées se sont arrêtées à la manipulation du faisceau de nanoparticules de silice avec un champ perpendiculaire à la propagation du faisceau. Bien que cela ait permis de montrer que la manipulation du faisceau est possible et que les nanoparticules de silice possèdent des charges électriques équivalentes à des charges élémentaires, l'objectif était de pouvoir ralentir les nanoparticules de leur vitesse d'entrée de 200m/s à une vitesse inférieure à 10m/s ce qui permettrait de piéger les nanoparticules avec une pince optique.

Cependant, il est possible de déterminer quelle est la distance minimum qu'une nanoparticule de silice doit parcourir dans un champ électrique longitudinal afin d'atteindre une vitesse désirée. Considérons alors les paramètres expérimentaux précédemment obtenus. Soit : une nanoparticule de silice de 100 nm de diamètre et densité  $2 \text{ g/cm}^3$  possédant une vitesse initiale de 200m/s et une charge électrique d'une charge élémentaire, un champ électrique de 50 kV/m. Les démarches mathématiques sont présentées dans l'annexe 5.1.4.

Le calcul utilisé montre que pour ces conditions, une nanoparticule de silice doit parcourir autour de 2.6 m dans le champ électrique. Il s'agit ici d'une distance, bien que non exorbitante, trop grande pour être mise en pratique. On souligne cependant le fait que cette distance est proportionnelle à la masse (au cube du diamètre) et inversement proportionnelle au champ électrique et au nombre de charges élémentaire de la particule. Comme il est possible d'observer sur les résultats des expériences précédentes, les nanoparticules de silice peuvent posséder plusieurs charges élémentaires (au moins jusqu'à  $\pm 3$ ) et ce sans un ajout artificiel. En utilisant des particules un peu plus petites, un champ un peu plus fort et des particules possédant quelques charges élémentaires, il serait alors possible de réduire la distance à parcourir à des valeurs raisonnables. La mise en place d'un système permettant le dépôt de charges sur les nanoparticules aiderait grandement à ces fins.

### 4.3.3 Source sous vide et actualisable, de nanoparticules pour l'étude de l'interaction laser-matière à haute intensité

Malgré le fait que l'utilisation d'un piège optique n'ait pas été expérimentalement combinée avec la source en faisceau de nanoparticules, il est possible de présenter dans la figure 4.7 un schéma du montage envisagé pour la mise en place d'une source sous vide et actualisable, de nanoparticules pour des études de l'interaction laser-matière à haute intensité.

La figure 4.7 présente les différentes étapes du montage en question.

1. La source de nanoparticules transforme en un aérosol puis sèche une solution de nanoparticules.
2. Une source d'électrons dépose des charges sur les nanoparticules qui sont en états gazeux.
3. La lentille aérodynamique injecte les nanoparticules sous la forme d'un faisceau collimaté possédant un rayon submillimètre.
4. Les nanoparticules chargées sont ralenties à l'aide d'un champ électrique longitudinal.
5. Les nanoparticules dérivent dans le cône de lumière d'une optique à focalisation serrée et sont piégées par les forces optiques d'un laser CW.
6. En utilisant la même optique à focalisation serrée, une impulsion laser femtoseconde de haute puissance interagit avec les nanoparticules piégées.
7. Une autre nanoparticule est chargée dans le piège optique, prête à recevoir l'impulsion laser femtoseconde suivante.

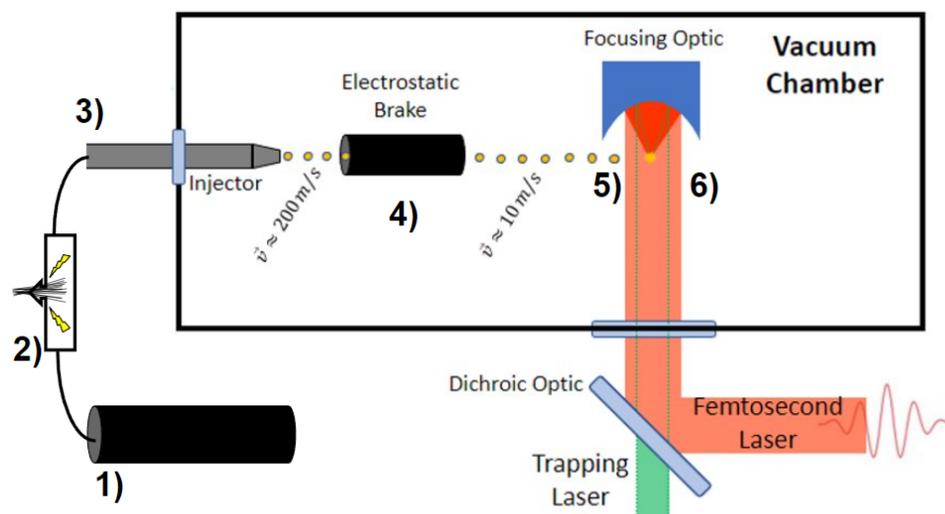


FIGURE 4.7 : Schéma d'une source sous vide et actualisable, de nanoparticules pour l'étude de l'interaction laser-matière à haute intensité.

Un tel montage permettrait d'obtenir des avantages additionnels par rapport à des méthodes plus communes d'acheminement de nanoparticules à un piège optique dans une chambre à vide. Tout d'abord, la source de nanoparticules permet d'injecter une grande variété de tailles et de compositions de nanoparticules. Par la suite, la source permet d'avoir une cible actualisable sans avoir à briser le vide. Finalement, le confinement de la nanoparticule dans le volume focal permet d'améliorer la reproductibilité d'un tir à l'autre en limitant la moyenne du volume focal.



## 5 CONCLUSION

---

La technique de pince optique développée par Arthur Ashkin est à la fois simple et pratique, mais présente aussi des qualités fortes intéressantes pour la mise en place d'expérience Laser-matières à haute intensité. Cependant, cette technique présente quelques complexités quant à l'approvisionnement de particules lors de sa mise en place dans une chambre à vide [10, 16]. Ce mémoire de maîtrise s'est alors intéressé à l'étude d'une source de nanoparticule qui peut être utilisé avec les découvertes d'Arthur Ashkin.

À travers le premier chapitre de ce mémoire, il a été possible de se familiariser avec la pince optique. Il a été possible de mettre en place un montage simple permettant de confiner des nanoparticules de diamants de taille inférieure à 100 nm avec un laser de longueur d'onde 532 nm dans le foyer d'une optique transmissive. On reconnaît, cependant, qu'il n'a pas été possible lors de nos expériences de saisir des nanoparticules de silice de tailles similaires ou de confirmer la présence d'une nanoparticule dans le foyer d'une optique réfléchive. La réalisation de ceci n'est pourtant pas impossible considérant que cela a été exécuté par d'autres chercheurs. Il serait intéressant de répéter les expériences présentées dans ce chapitre avec un laser possédant une plus grande longueur d'onde.

Lors du chapitre 2, plusieurs méthodes alternatives d'acheminement alternatives à celles utilisées dans le chapitre 1 ont été essayées et discutées. D'une part, on s'est intéressé à l'utilisation d'un disque piézoélectrique afin de propulser des nanoparticules vers un piège optique. En lieu des défauts que les expériences ont relevés, cette méthode a été abandonnée. D'autre part, l'utilisation d'un piège d'ions ou d'un atomiseur de solution de nanoparticules s'est présentée comme des méthodes intéressantes. Cependant, le manque de résultats satisfaisant nous a poussé à mettre ces méthodes de côté. Il vaudrait la peine de revisiter ces deux techniques de manières plus approfondies.

La source en faisceau de nanoparticules pour chambre à vide, développé par Jeffrey Allan Powell, a été décrite dans le chapitre trois. Le fonctionnement et caractéristique de chacune des sections de la source sont expliqués afin de rendre compte de leur rôle et utilité pour atteindre l'objectif du mémoire.

---

Le chapitre 4 présente dans un premier temps des expériences réalisées afin de manipuler le faisceau de nanoparticules généré par la source décrite dans le chapitre 3. Ces expériences ont permis de montrer la présence de charge électrique sur les nanoparticules incorporées dans la chambre à vide, ainsi que le fait que ces charges correspondent à quelques charges élémentaires. Dans un second temps, il est discuté dans le chapitre 4 de la faisabilité des étapes manquante pour la réalisation d'une source de nanoparticules qui atteint les caractéristiques que l'on souhaiterait avoir.

Il est de mes regrets de ne pas avoir mis en place des expériences permettant de combiner les différents sujets discutés dans les chapitres de ce mémoire. Il va de soi que la combinaison de la source en faisceau de nanoparticules avec un piège optique dans une chambre à vide présente encore des enjeux qui n'ont pas été testés. En effet, bien que le ralentissement des nanoparticules tirées par la source de particules semble atteignable, cette étape n'a pas été expérimentée. De plus, il sera nécessaire de s'assurer que les particules ralenties puissent atteindre un volume focal restreint à proximité du foyer optique afin d'être confinées dans un piège optique.

Néanmoins, je crois que ce mémoire permet de poser les bases du développement d'une source, sous vide et actualisable, de nanoparticules dont l'utilisation pourrait être intéressante dans le cadre d'études d'interactions laser-matière à haute intensité.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Anderson D (2013) *MATERIAL SAFETY DATA SHEET, DIAMOND POWDER*. Abrasive Technology.
- [2] Ashkin A (1970) *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure*.
- [3] Ashkin A (1971) Optical levitation by radiation pressure.
- [4] Ashkin A, J.M. D, Bjorkholm J, Chu S (1986) *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles Optics*. Optics Letters, 288-290.
- [5] Davino M, Saule T, Helming NG, Powell JA, Trallero-Herrero C (2022) Characterization of an aerosolized nanoparticle beam beyond the diffraction limit through strong field ionization. *Scientific Reports*, 12(1). DOI :10.1038/s41598-022-13466-w.
- [6] Diego-Taboada A, Beckett S, Atkin S, Mackenzie G (2014) Hollow pollen shells to enhance drug delivery. *Pharmaceutics*, 6:80–96. DOI :10.3390/pharmaceutics6010080.
- [7] El-Badawy A (2023) Active vibration suppression of a cutting tool utilizing the finite element method.
- [8] Emploiement, Canada DS (2021) Engineered nanoparticles health and safety considerations.
- [9] Gel-Pak (2024) *Gel-box™ gel (ad series) or Vertec™ (AV series) : Developing unique materials for device handling : Hayward, CA*. [https://www.gelpak.com/gel-box-ad/?gad\\_source=1](https://www.gelpak.com/gel-box-ad/?gad_source=1).
- [10] Gieseler J (2014) *Dynamics of optically levitated nanoparticles in high vacuum*. ICFO.
- [11] Heim L, Blum J, Preuss M, Butt H (1999) *Adhesion and friction forces between spherical micrometer sized particles*. Physical Review Letters 83, 3328-3331.
- [12] Israelachvili J (2011) *Intermolecular and Surface Force*. Academic Press.
- [13] Jiang J, Li Z, Li W, Ranjan P, Wei X, Zhang X, Zhang C (2023) A review on insulation challenges towards electrification of aircraft. *High Voltage*, 8(2):209–230. DOI :10.1049/hve2.12304.
- [14] Jin Y, Yu X, Zhang J (2018) Optically levitated nanosphere with high trapping frequency. *Science China Physics, Mechanics amp; Astronomy*, 61(11). DOI :10.1007/s11433-018-9230-6.
- [15] Knoop M (2015) *Paul traps*. [https://indico.cern.ch/event/315947/sessions/61194/attachments/606588/834751/Paul\\_traps\\_until\\_page\\_79.pdf](https://indico.cern.ch/event/315947/sessions/61194/attachments/606588/834751/Paul_traps_until_page_79.pdf). Physics with Trapped Charged Particles, Les Houches/F.
- [16] Li N, Zhu Xm, Li Wq, Fu Zh, Hu Mz, Hu Hz (2019) Review of optical tweezers in vacuum. *Frontiers of Information Technology amp; Electronic Engineering*, 20(5):655–673. DOI :10.1631/fi-tee.1900095.
- [17] Li T, Kheifets S, Raizen MG (2011) Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum. *Nature Physics*, 7(7):527–530. DOI :10.1038/nphys1952.
- [18] Maestre S (2022) *What is piezoelectric effect?* <https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-piezoelectric-effect>.

- 
- [19] nanoComposix (2024) *Silica physical properties*. Website.  
<https://nanocomposix.com/pages/silica-physical-properties>.
- [20] Novotny, Lukas Hecht B (2006) *Principles of nano-optics*. Cambridge University Press.
- [21] Orgill J (2022) *Building An Ion Trap To Levitate Particles*. YouTube.
- [22] PermaPure (2022) *MD-Series Gas Sample Dryers*. Website.  
<https://www.permapure.com/environmental-scientific/products/solutions-for-gas-drying/md-series-gas-sample-dryers/> (version : 2022-07).
- [23] Powell J (2017) *Strong-field driven dynamics of metal and dielectric nanoparticles*. Thèse de doctorat, Kansas State University.
- [24] Scott WT (1959) Who Was Earnshaw? *American Journal of Physics*, 27(6):418–419. DOI :10.1119/1.1934886.
- [25] Sebastiano (2021) *Field lines of two charges whose algebraic sum is not zero*. <https://physics.stackexchange.com/q/671494>. Physics Stack Exchange. URL :<https://physics.stackexchange.com/q/671494> (version : 2021-10-13).
- [26] Thompson R (2018) *Penning Traps Lecture 1*. Les Houches Lectures. URL :[https://indico.cern.ch/event/596966/sessions/217664/attachments/1580468/2497296/Les\\_Houches\\_2018\\_Penning\\_L1.pdf](https://indico.cern.ch/event/596966/sessions/217664/attachments/1580468/2497296/Les_Houches_2018_Penning_L1.pdf).
- [27] TSIincorporated (2003) *Diffusion dryer instrucion manual*. <https://manualzz.com/doc/27666382/model-3062-diffusion-dryer-instruction-manual>.
- [28] Vijay J (2017) *Levitated optomechanics at the photon recoil limit*. Harvard University, University of Rochester.
- [29] Vovrosh J, Rashid M, Hempston D, Bateman J, Paternostro M, Ulbricht H (2017) *Parametric feedback cooling of levitated optomechanics in a parabolic mirror trap*. Journal of the Optical Society of America.
- [30] Xuefeng Zhang, Kenneth A. Smith DRWJJJTJ, Kolb CE (2002) A numerical characterization of particle beam collimation by an aerodynamic lens-nozzle system : Part i. an individual lens or nozzle. *Aerosol Science and Technology*, 36(5):617–631. DOI :10.1080/02786820252883856.

## 6 ANNEXE

---

### 6.1 Développement mathématique

#### 6.1.1 Forces optiques en approximation de champ gaussien : Gradient Force

$$\begin{aligned} F_{grad} &= \frac{\alpha'}{4} \nabla (E_0(\mathbf{r}))^2 \\ &= \frac{\alpha'}{4} \nabla \left( E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right)^2 \\ &= \frac{\alpha'}{4} \nabla \left( E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\ &= \frac{\alpha'}{4} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \left( E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \end{bmatrix} \\ &= \frac{\alpha'}{4} \begin{bmatrix} E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\ E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \frac{\partial}{\partial y} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\ E_0^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Soit  $\frac{\partial}{\partial x} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) &= e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left( -2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2} \right) \\ &= e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -2\frac{2x}{\omega(z)^2} \end{aligned}$$

On obtient de manière similaire :  $\frac{\partial}{\partial y} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) = e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -2\frac{2y}{\omega(z)^2}$

Soit  $\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right)$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \right) \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} + \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times \frac{\partial}{\partial z} \left( e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \right) \\
&= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)} \right) \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} + \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \frac{\partial}{\partial z} \left( -2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2} \right) \\
&= \frac{-2z}{z_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} + \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \left( 4\frac{z(x^2+y^2)}{\omega_0^2 z_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)^2} \right) \\
&= \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \left( \frac{-2z}{z_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)} + 4\frac{z(x^2+y^2)}{\omega_0^2 z_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)^2} \right) \\
&= \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4z \left( \frac{1}{2(z_0^2 + z^2)} - \frac{z_0^2(x^2+y^2)}{\omega_0^2(z_0^2(1 + \frac{z^2}{z_0^2}))^2} \right) \\
&= \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4z \left( \frac{(z_0^2 + z^2)}{2(z_0^2 + z^2)^2} + \frac{z_0^2}{2(z_0^2 + z^2)^2} \left( -2\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\omega_0}\right)^2 \right) \right) \\
&= \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4z \left( \frac{z_0^2}{2(z_0^2 + z^2)^2} \right) \left( \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\omega_0}\right)^2 \right)
\end{aligned}$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}
F_{grad} &= \frac{\alpha'}{4} \left[ \begin{array}{c} E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4\frac{x}{\omega(z)^2} \\ E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4\frac{y}{\omega(z)^2} \\ E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} \times e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \times -4z \left( \frac{z_0^2}{2(z_0^2+z^2)^2} \right) \left( \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\omega_0}\right)^2 \right) \end{array} \right] \\
&= -\alpha' E_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}} \left[ \begin{array}{c} \frac{x}{\omega(z)^2} \\ \frac{y}{\omega(z)^2} \\ z \left( \frac{z_0^2}{2(z_0^2+z^2)^2} \right) \left( \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\omega_0}\right)^2 \right) \end{array} \right] \\
&= -\alpha' I_0(\mathbf{r}) \left[ \begin{array}{c} \frac{x}{\omega(z)^2} \\ \frac{y}{\omega(z)^2} \\ z \left( \frac{z_0^2}{2(z_0^2+z^2)^2} \right) \left( \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\omega_0}\right)^2 \right) \end{array} \right]
\end{aligned}$$

---

### 6.1.2 Forces optiques en approximation de champ gaussien : Scattering force.

$$\begin{aligned}
 F_{scat} &= \frac{\alpha''}{2} E_0(\mathbf{r})^2 \nabla \phi(\mathbf{r}) \\
 &= \frac{\alpha''}{2} I_0(\mathbf{r}) \nabla \left( kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)} \right) \\
 &= \frac{\alpha''}{2} E_0(\mathbf{r})^2 \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)}) \\ \frac{\partial}{\partial y} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)}) \\ \frac{\partial}{\partial z} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)}) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Soit  $\frac{\partial}{\partial x} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)})$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)}) &= \frac{\partial}{\partial x} kz - \frac{\partial}{\partial x} \eta(z) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right) \\
 &= 0 + 0 + \frac{kx}{R(z)}
 \end{aligned}$$

Il est possible d'obtenir de manière similaire  $\frac{\partial}{\partial y} (kz - \eta(z) + k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)}) = \frac{ky}{R(z)}$

Soit  $\frac{\partial}{\partial z}(kz - \eta(z) + k \frac{(x^2+y^2)}{2R(z)})$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\partial}{\partial z}kz - \frac{\partial}{\partial z}\eta(z) + \frac{\partial}{\partial z} \frac{k(x^2+y^2)}{2R(z)} \\
&= k - \frac{\partial}{\partial z} \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \frac{k(x^2+y^2)}{2z(1+\frac{z_0^2}{z^2})} \\
&= k - \frac{z_0}{z_0^2+z^2} - \frac{k(x^2+y^2)}{4z^2(1+\frac{z_0^2}{z^2})^2} \frac{\partial}{\partial z} (2z(1+\frac{z_0^2}{z^2})) \\
&= k - \frac{z_0}{z_0^2+z^2} - \frac{k(x^2+y^2)}{4z^2(1+\frac{z_0^2}{z^2})^2} \left( 2(1+\frac{z_0^2}{z^2}) + 2z \frac{\partial}{\partial z} (1+\frac{z_0^2}{z^2}) \right) \\
&= k - \frac{z_0}{z_0^2+z^2} - \frac{k(x^2+y^2)}{4z^2(1+\frac{z_0^2}{z^2})^2} \left( 2(1+\frac{z_0^2}{z^2}) + 2z \frac{-2z_0^2}{z^3} \right) \\
&= k - \frac{z_0}{z_0^2+z^2} - \frac{k(x^2+y^2)}{4R(z)^2} \left( 2\frac{R(z)}{z} - \frac{4z_0^2}{z^2} \right) \\
&= k - \frac{z_0}{zR(z)} - \frac{k(x^2+y^2)}{2zR(z)} + \frac{kz_0^2(x^2+y^2)}{z^2R(z)^2} \\
&= k \left( 1 - \frac{x^2+y^2+\frac{2z_0}{k}}{2zR(z)} + \frac{z_0^2(x^2+y^2)}{z^2R(z)^2} \right)
\end{aligned}$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}
F_{scat} &= \frac{\alpha''}{2} E_0(\mathbf{r})^2 \left[ \begin{array}{c} \frac{kx}{R(z)} \\ \frac{ky}{R(z)} \\ k \left( 1 - \frac{x^2+y^2+\frac{2z_0}{k}}{2zR(z)} + \frac{z_0^2(x^2+y^2)}{z^2R(z)^2} \right) \end{array} \right] \\
&= \frac{\alpha''}{2} I_0(\mathbf{r}) k \left[ \begin{array}{c} \frac{x}{R(z)} \\ \frac{y}{R(z)} \\ 1 - \frac{x^2+y^2+\frac{2z_0}{k}}{2zR(z)} + \frac{z_0^2(x^2+y^2)}{z^2R(z)^2} \end{array} \right]
\end{aligned}$$

---

### 6.1.3 Champ électrique Vs Gravité

Il est possible d'approximer la force exercée par l'attraction gravitationnelle terrestre sur une nanoparticule de silice par la formule suivante :

$$F_G = gm$$

Où  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  et  $m$ (kg) est la masse de la nanoparticule.

La force exercée par un champ électrique sur une charge électrique est :

$$\vec{F}_C = q\vec{E}$$

On considère un champ uniforme, on simplifie alors à

$$F_C = qE$$

Où  $q$ (C) est la charge de la particule et  $E(\frac{V}{m})$  la valeur du champ électrique (ex :50kV/m).

Si on pose  $F_G = F_C$  on obtient alors :

$$\begin{aligned} qE &= gm \\ q &= \frac{gm}{E} \\ q &= \frac{g \times d^{\frac{4}{3}} \pi r^3}{E} \end{aligned}$$

Où  $d$  est la densité des nanoparticules (environ  $2 \frac{g}{cm^3}$  selon [19]) et  $r$  est le rayon de celles-ci. Considérant qu'une charge élémentaire est  $1.602 \times 10^{-19}C$ , on a alors le nombre minimum de charges élémentaires sur une nanoparticule de silice de 100 nm de diamètre donné par :

$$\begin{aligned} q &= \frac{9.81 \times 2000 \times \frac{4}{3} \pi (50 \times 10^{-9})^3}{50000 \times 1.602 \times 10^{-19}} \\ &\approx 1.29 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

### 6.1.4 Distance minimum pour ralentir les nanoparticules

Considérons une nanoparticule de silice de 100 nm de diamètre et densité  $2g/cm^3$  possédant une vitesse initiale de 200m/s et une charge électrique d'une charge élémentaire, un champ électrique de 50 kV/m.

D'après la deuxième loi de Newton pour un objet dont la masse ne change pas dans le temps on a :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (6.1)$$

Où  $\vec{F}$  est une force appliquée sur l'objet,  $m$  sa masse et  $\vec{a}$  son accélération. En simplifiant le problème, considérons des forces constantes dans le temps, une seule dimension et pas de friction. On a alors comme seule force celle exercée par le champ sur une particule chargée  $\vec{F} = q\vec{E}$  où  $q$  est la charge et  $\vec{E}$  le champ électrique. Ainsi :

$$\begin{aligned} -qE &= ma \\ a &= \frac{-qE}{m} \\ \int a dt &= \int \frac{-qE}{m} dt \\ v(t) &= \frac{-qE}{m}t + v_0 \\ x(t) &= \frac{-qE}{2m}t^2 + v_0t + x_0 \end{aligned}$$

si on pose  $v(t) = 10m/s$ ,  $v_0 = 200m/s$  et  $x_0 = 0$ . on a alors :

$$\begin{aligned} \frac{qE}{m}t &= v_0 - v(t) \\ t &= \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \\ t &= \frac{2000 \times \frac{4}{3}\pi(50 \times 10^{-9})^3(200 - 10)}{1.602 \times 10^{-19} \times 50000} \\ t &\approx 0.024839892s \end{aligned}$$

On pose  $t$  dans  $x(t)$  pour déterminer la distance parcourue :

$$x(t) = \frac{-qE}{2m} \left( \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \right)^2 + v_0 \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \quad (6.2)$$

$$x(t) = \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \left( \frac{-qE}{2m} \left( \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \right) + v_0 \right) \quad (6.3)$$

$$x(t) = \frac{m(v_0 - v(t))}{qE} \left( \frac{-(v_0 - v(t))}{2} + v_0 \right) \quad (6.4)$$

$$x(t) \approx 2.608m \quad (6.5)$$

## 6.2 Miroir Parabolique

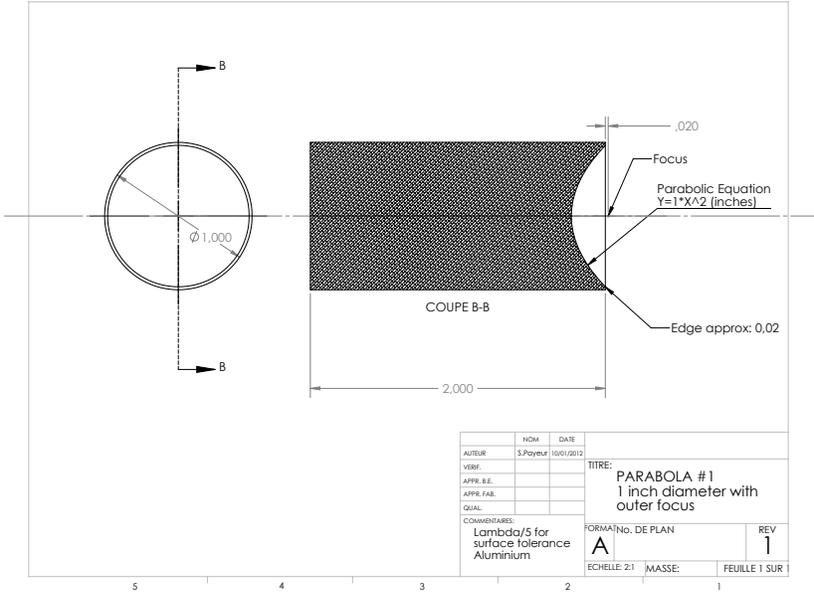


FIGURE 6.1 : Paramètre du miroir parabolique utilisé.

## 6.3 Protocole Expérimentale

### 6.3.1 Piège optique

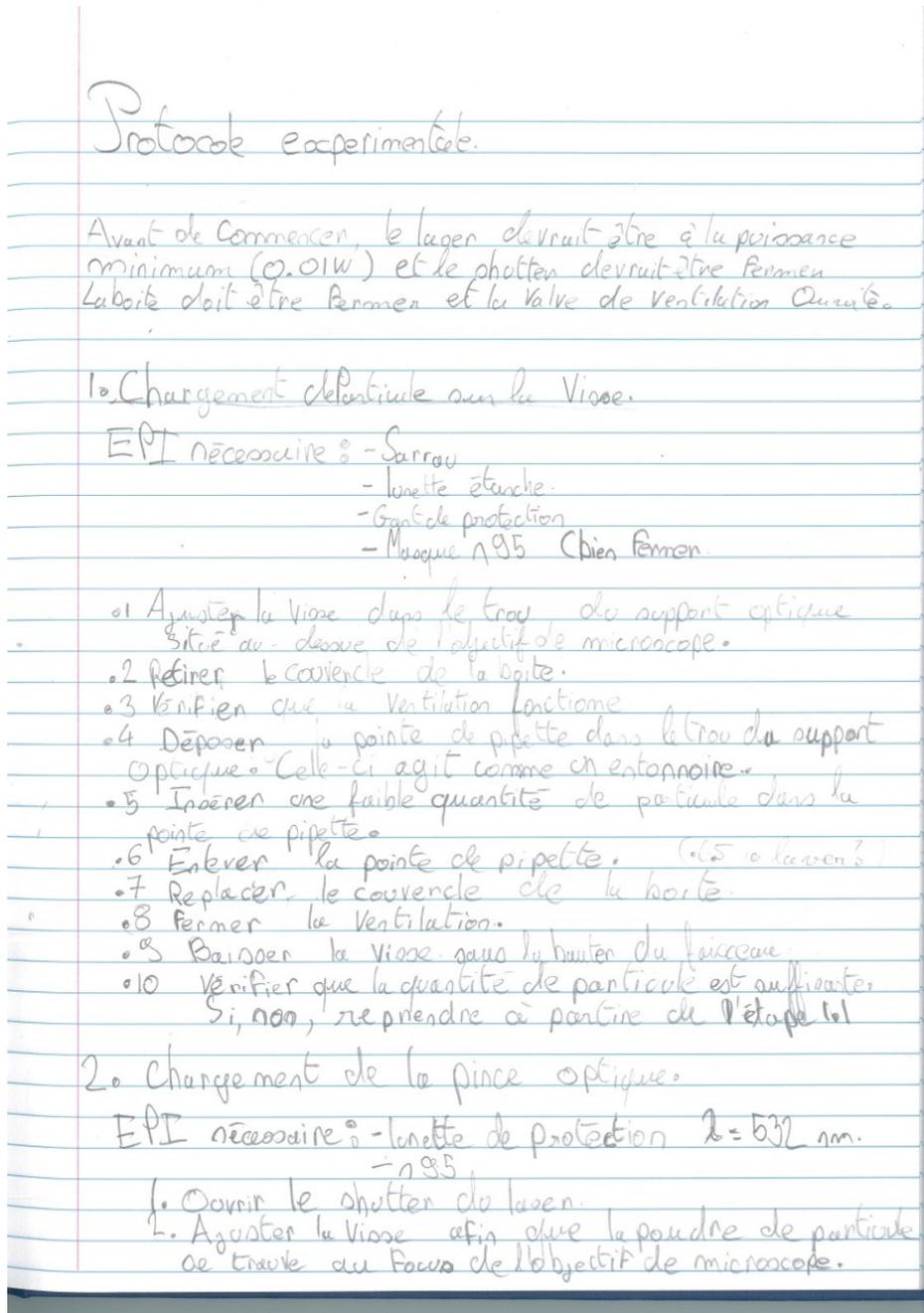


FIGURE 6.2 : Protocole expérimental

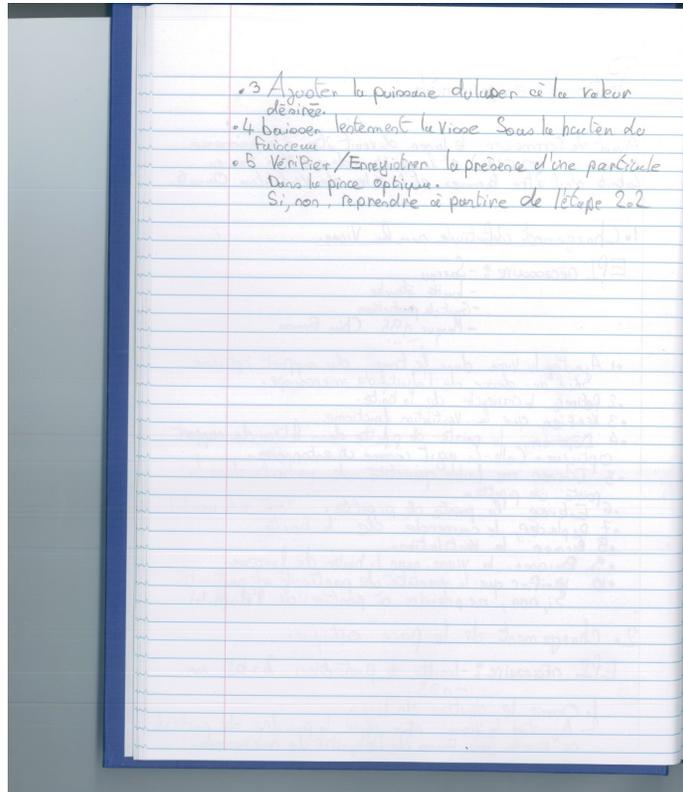


FIGURE 6.3 : Protocole expérimental

### 6.3.2 Dilution

Protocole de préparation de la solution de nanoparticules par une dilution de facteur 100.

- Agiter la solution mère afin d'homogénéiser celle-ci.
- À l'aide d'une micropipette, prélever  $200\mu\text{l}$  de la solution mère .
- Déposer le prélèvement dans une éprouvette graduée ou une fiole jaugée de 20 ml.
- Compléter les 20 ml avec de l'eau distillée.
- Verser dans un tube à essai de la source de nanoparticules la solution fille.
- Agiter pour homogénéiser avant chaque expérience.

Attention, l'utilisation de produits tels que du savon afin de nettoyer les tubes à essai de la source de nanoparticules peut agir comme de la malpropreté si ceux-ci sont mal rincés. Cela s'explique par le fait que la section de séchage n'est pas conçue pour retirer ces produits.

---

### 6.3.3 Source en faisceau de nanoparticules.

Mise en marche de la source en faisceau de nanoparticules.

- Ouvrir la valve du gaz de purge pour la section de séchage et ajuster celle-ci afin d'avoir un flux de plus de 10 SCFH. Ici, on utilise l'accès au gaz sec de l'édifice comme gaz de purge et la valve est ajustée à 60 PSI.  
Cette étape est exécutée en premier dans le but de créer un environnement sec avant la mise en marche de la source. Cette étape peut prendre quelques minutes, surveiller la jauge d'humidité relative installée après la section de séchage. Celle-ci doit atteindre en dessous de 5% avant d'ouvrir la valve du gaz porteur/d'appui.
- Installer le tube à essai contenant la solution désirée à l'atomiseur.
- Mettre en marche la/les pompes à vide afin de faire le vide dans la chambre à vide. (Attendre que la pression se stabilise.)
- Allumer la source de tension et ajuster celle-ci à la valeur désirée.
- Ouvrir la valve du gaz porteur/d'appui et ajuster la pression à 30 PSI. Ici, on utilise un gaz d'azote.
- Ouvrir la valve entre la section de séchage et la lentille aérodynamique afin de laisser entrer le gaz porteur et les nanoparticules dans la chambre à vide.
- Surveiller les jauges d'humidité relative, de pression et de tension lors du tir afin de s'assurer que l'expérience se déroule conformément. Ici, on tire pendant environ 45 min.
- Fermer la valve entre la section de séchage et la lentille aérodynamique.
- Fermer la valve du gaz porteur/d'appui.
- Fermer la source de tension.
- Fermer la/les pompe(s) à vide.
- Défaire le vide dans la chambre à vide. (Soit à travers la lentille aérodynamique une fois que celle-ci est déconnectée de la section de séchage ou à travers toute autre installation sur la chambre conçue à ces fins.)
- Récupérer la cible ou ajuster son emplacement afin de faire un autre tir et répéter à partir de la deuxième étape.
- Fermer la valve du gaz de purge pour la section de séchage.

### 6.4 Analyse Image J

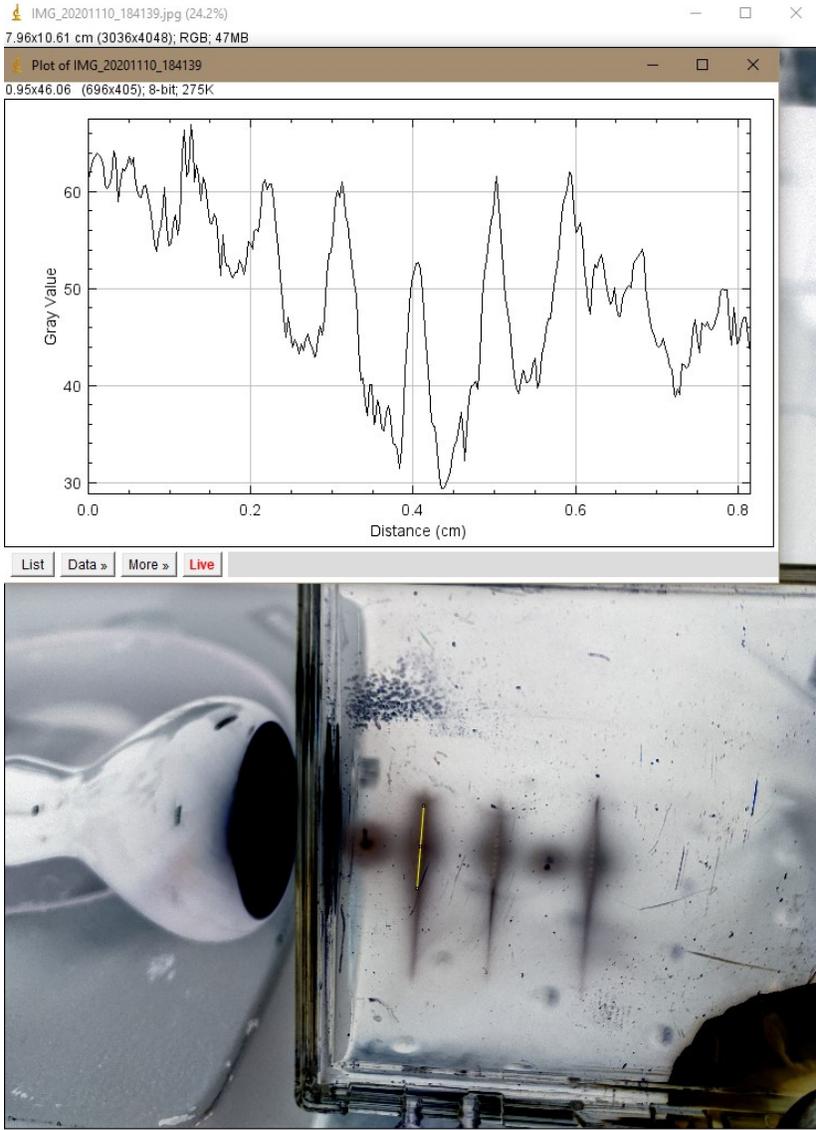


FIGURE 6.4 : Exemple d'analyse en échelle de gris avec le logiciel ImageJ

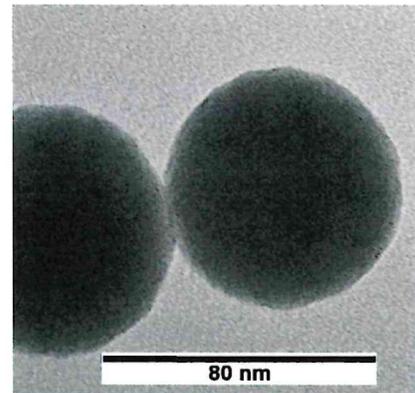
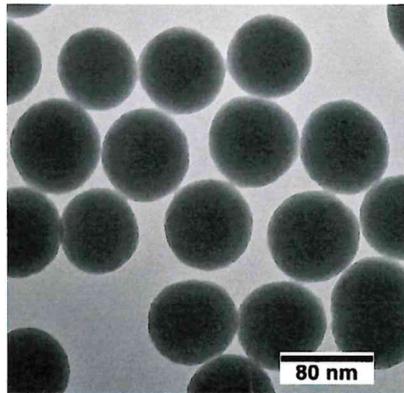
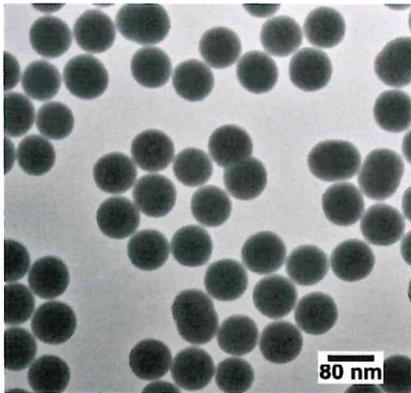
### 6.5 Data Sheet Nanoparticule

# 80 nm Silica Nanospheres, NanoXact™, Dried

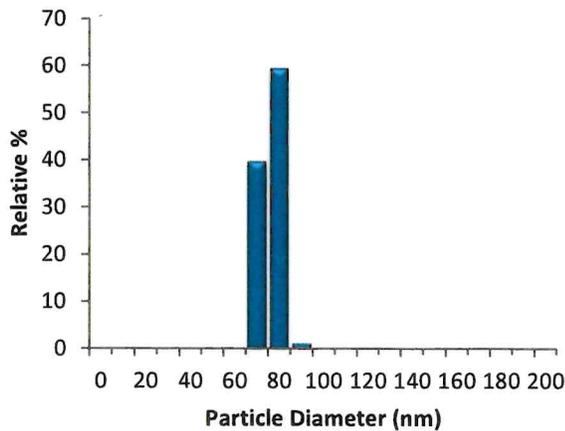
**Product Number: SISD80**

**Lot Number: LBE0087-IAD0069**

<b>Diameter ± Std.Dev (TEM)*:</b>	81 ± 4 nm	<b>Particle Form:</b>	Powder
<b>Coefficient of Variation*:</b>	4.3 %	<b>Particle Surface:</b>	Silanol
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	33.5 m <sup>2</sup> /g particles	<b>Mass Concentration (SiO<sub>2</sub>):</b>	> 99 %

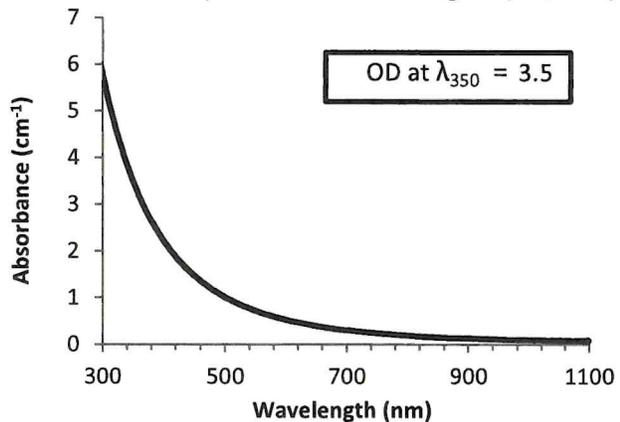


### Size Distribution



### Optical Properties

When redispersed in water at 10 mg/mL (SiO<sub>2</sub> basis)



### Characterization Instrumentation

<b>Diameter and Size Statistics:</b>	JEOL 1010 Transmission Electron Microscope; ImageJ
<b>Mass Concentration:</b>	AND HM-202 Analytical Balance (Gravimetric Analysis)
<b>Spectral Properties:</b>	Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer

**Storage: Cool and dry place.**

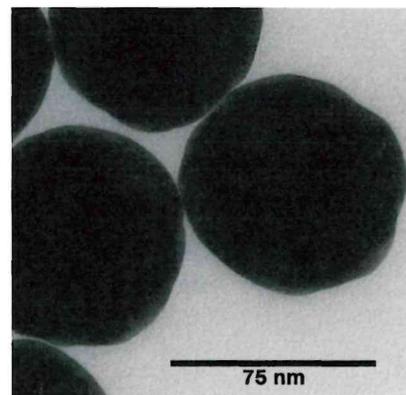
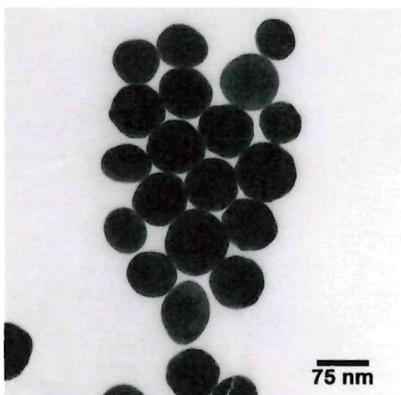
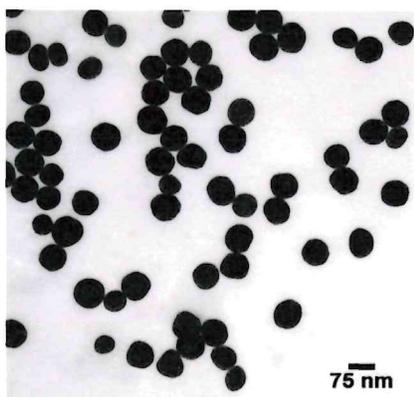
**DO NOT FREEZE. AVOID INHALATION. Sonicate to resuspend.**

Note: Mass listed on vial represents mass of metal/metal-oxide only. See above for total mass details.

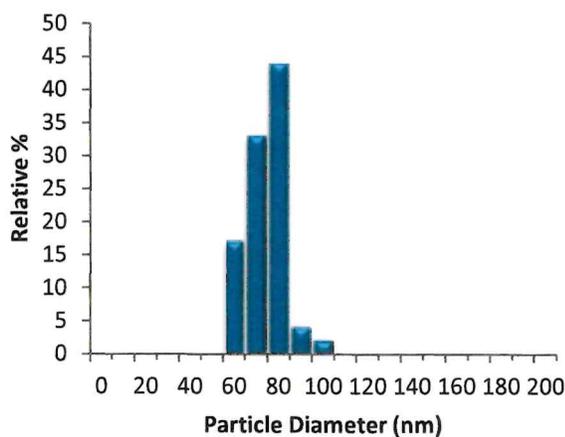
## 75 nm Gold Nanospheres, PVP, Econix™, Dried

**Product Number: GEPD75**
**Lot Number: PSK0195-SAM0277**

<b>Diameter ± Std.Dev (TEM):</b>	79 ± 8 nm	<b>Particle Form:</b>	Powder
<b>Coefficient of Variation:</b>	10.6 %	<b>Particle Surface:</b>	PVP 40 kDa (Polymer)
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	3.8 m <sup>2</sup> /g particles	<b>Mass Concentration (Au):</b>	15 % by mass
		<b>Mass Concentration (PVP):</b>	85 % by mass

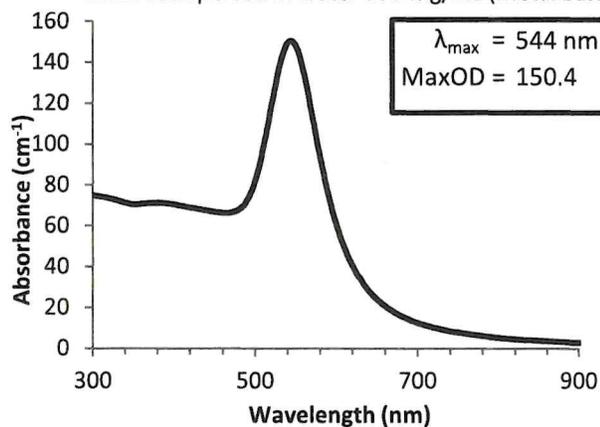


### Size Distribution



### Optical Properties

When redispersed in water at 5 mg/mL (Metal basis)



### Characterization Instrumentation

<b>Diameter and Size Statistics:</b>	JEOL 1010 Transmission Electron Microscope; ImageJ
<b>Mass Concentration:</b>	Thermo Fisher X Series 2 ICP-MS
<b>Spectral Properties:</b>	Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer

Storage: Cool and dry place.

**DO NOT FREEZE. AVOID INHALATION. Sonicate to resuspend.**

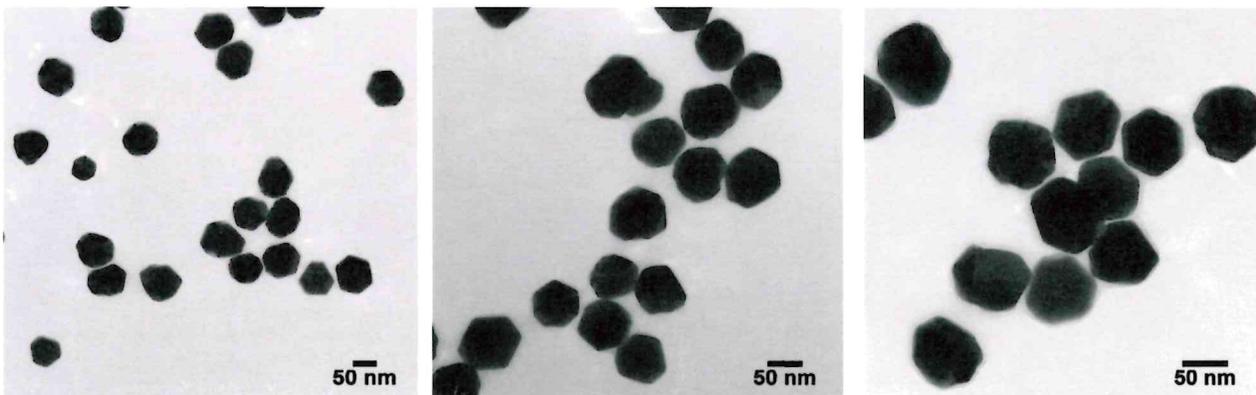
Note: Mass listed on vial represents mass of metal/metal-oxide only. See above for total mass details.

## 75 nm Silver Nanoparticles, PVP, Econix™, Dried

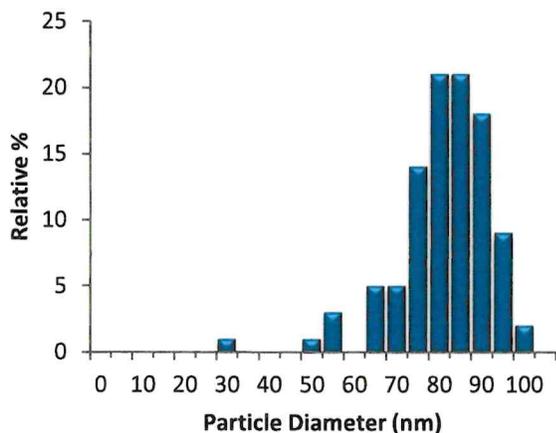
**Product Number:** SEPD75

**Lot Number:** ALJ0044-MGM2473

<b>Diameter ± Std.Dev (TEM):</b>	79 ± 11 nm	<b>Particle Form:</b>	Powder
<b>Coefficient of Variation:</b>	13.8 %	<b>Particle Surface:</b>	PVP 40 kDa (Polymer)
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	7 m <sup>2</sup> /g particles	<b>Mass Concentration (Ag):</b>	30 % by mass
		<b>Mass Concentration (PVP):</b>	70 % by mass

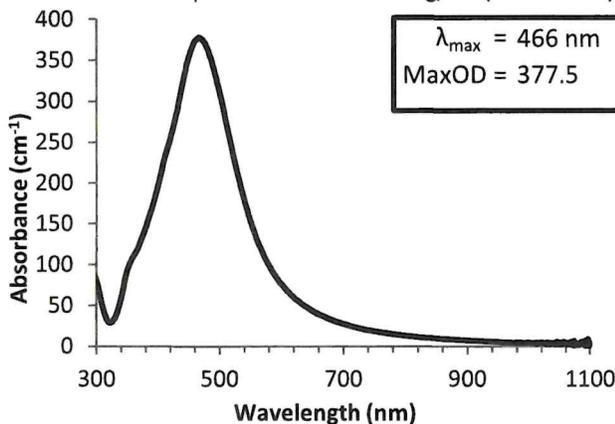


### Size Distribution



### Optical Properties

When redispersed in water at 5 mg/mL (Metal basis)



### Characterization Instrumentation

<b>Diameter and Size Statistics:</b>	JEOL 1010 Transmission Electron Microscope; ImageJ
<b>Mass Concentration:</b>	Thermo Fisher X Series 2 ICP-MS
<b>Spectral Properties:</b>	Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer

Storage: Cool and dry place away from light.

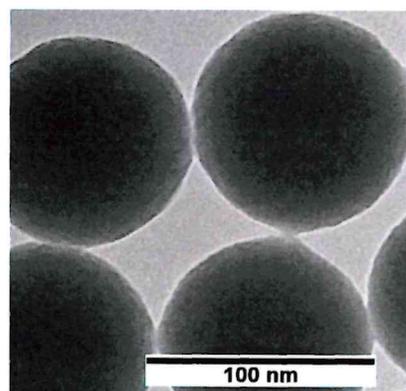
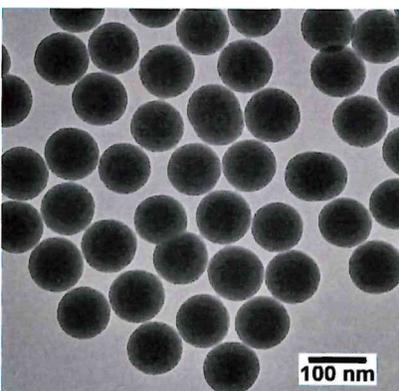
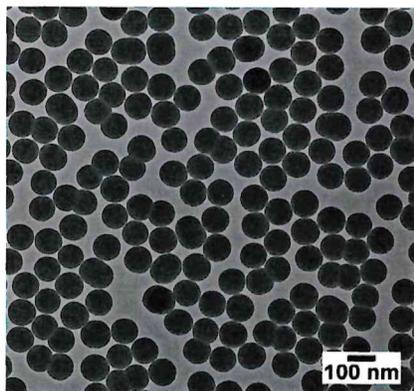
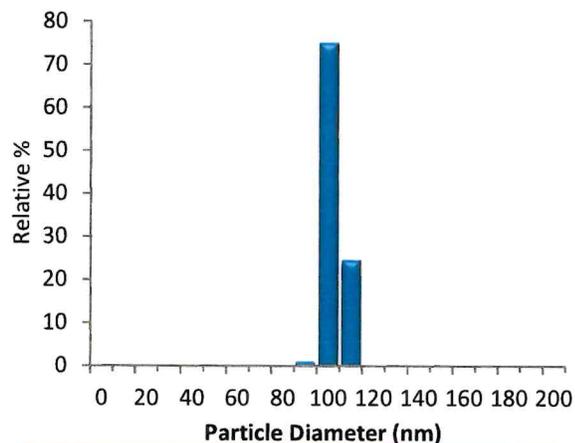
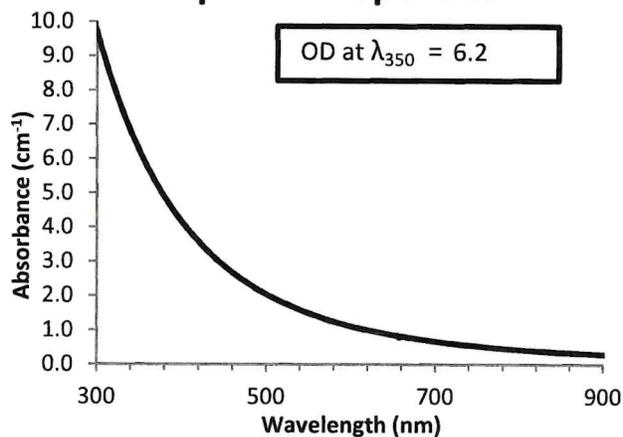
**DO NOT FREEZE. AVOID INHALATION. Sonicate to resuspend.**

Note: Mass listed on vial represents mass of metal/metal-oxide only. See above for total mass details.

## 100 nm Silica Nanospheres, NanoXact™

**Product Number: SISN100**
**Lot Number: JSF0129**

<b>Diameter ± Std.Dev (TEM*):</b>	98 ± 3 nm	<b>Hydrodynamic Diameter:</b>	126 nm
<b>Coefficient of Variation*:</b>	2.8 %	<b>Zeta Potential:</b>	-59 mV
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	28 m <sup>2</sup> /g	<b>pH of Solution:</b>	9.5
<b>Mass Concentration (SiO<sub>2</sub>):</b>	10.5 mg/mL	<b>Particle Surface:</b>	Silanol
<b>Particle Concentration (Calc'd)*:</b>	9.6E+12 particles/mL	<b>Solvent:</b>	Milli-Q Water


**Size Distribution**

**Optical Properties**


### Characterization Instrumentation

**Diameter and Size Statistics:**
**Mass Concentration:**
**Spectral Properties:**
**Hydrodynamic Diameter/Zeta Potential:**
**pH:**

JEOL 1010 Transmission Electron Microscope; ImageJ  
 AND HM-202 Analytical Balance (Gravimetric Analysis)  
 Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer  
 Malvern Zetasizer Nano ZS  
 Horiba - Laqua Twin pH Meter

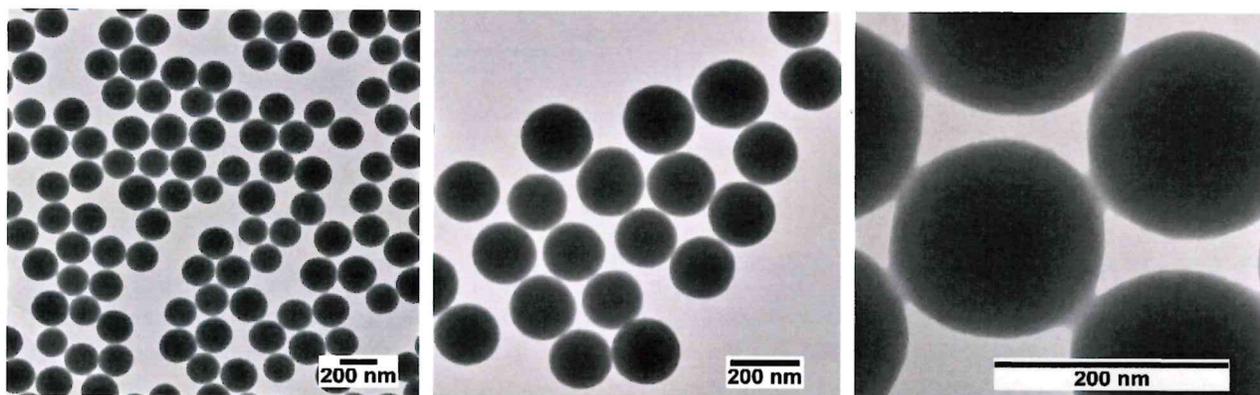
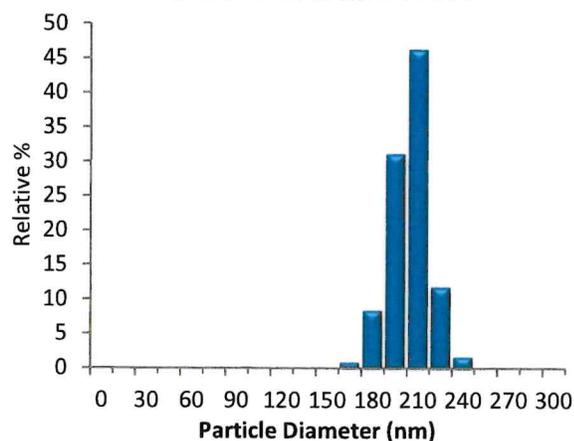
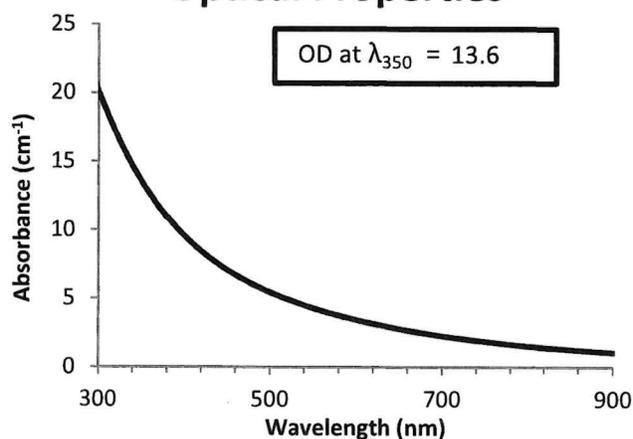
Shake vigorously before use. Bath sonicate if needed. Storage: 2-25°C. DO NOT FREEZE.

\*Particle size data is based on measurements of singlet particles only. Particle concentration calculated using density of 2.2 g/cm<sup>3</sup>

## 200 nm Silica Nanospheres, NanoXact™

**Product Number: SISN200**
**Lot Number: JDR0029**

<b>Diameter ± Std.Dev (TEM):</b>	197 ± 12 nm	<b>Hydrodynamic Diameter:</b>	226 nm
<b>Coefficient of Variation:</b>	6.1 %	<b>Zeta Potential:</b>	-54 mV
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	14 m <sup>2</sup> /g	<b>pH of Solution:</b>	9.3
<b>Mass Concentration (SiO<sub>2</sub>):</b>	10.9 mg/mL	<b>Particle Surface:</b>	Silanol
<b>Particle Concentration (Calc'd)*:</b>	1.2E+12 particles/mL	<b>Solvent:</b>	Milli-Q Water


**Size Distribution**

**Optical Properties**


### Characterization Instrumentation

**Diameter and Size Statistics:**
**Mass Concentration:**
**Spectral Properties:**
**Hydrodynamic Diameter/Zeta Potential:**
**pH:**

JEOL 1010 Transmission Electron Microscope; ImageJ

AND HM-202 Analytical Balance (Gravimetric Analysis)

Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer

Malvern Zetasizer Nano ZS

Horiba - Laqua Twin pH Meter

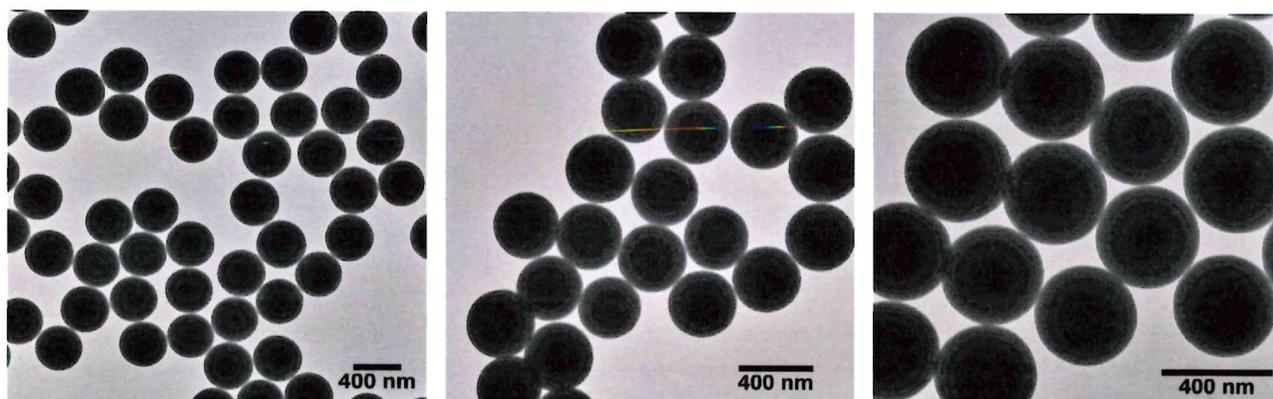
Shake vigorously before use. Bath sonicate if needed. Storage: 2-25°C. DO NOT FREEZE.

\*Particle concentration calculated using density of 2.2 g/cm<sup>3</sup>

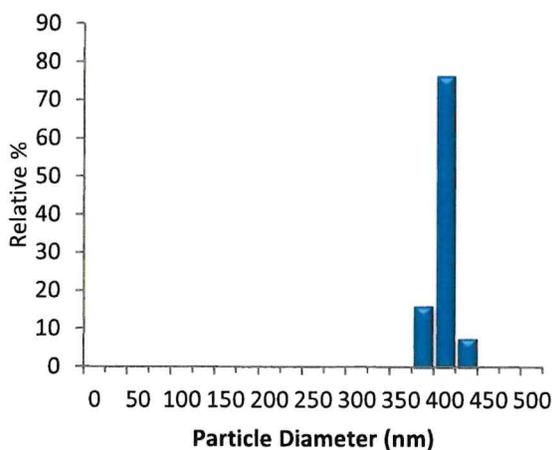
# 400 nm Silica Nanospheres, NanoXact™

Lot Number: JLF0116

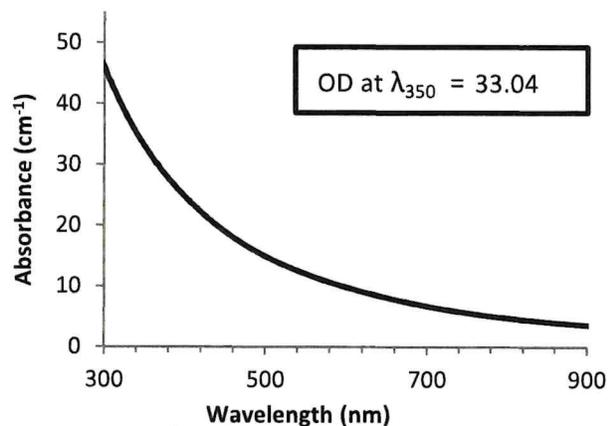
<b>Diameter ± Std.Dev (TEM):</b>	386 ± 11 nm	<b>Hydrodynamic Diameter:</b>	441 nm
<b>Coefficient of Variation:</b>	2.9 %	<b>Zeta Potential:</b>	-62 mV
<b>Surface Area (Calc'd):</b>	7.1 m <sup>2</sup> /g	<b>pH of Solution:</b>	9.7
<b>Mass Concentration (SiO<sub>2</sub>):</b>	10.89 mg/mL	<b>Particle Surface:</b>	Silanol
<b>Particle Concentration (Calc'd):</b>	1.6E+11 particles/mL	<b>Solvent:</b>	Milli-Q Water



## Size Distribution



## Optical Properties



### Characterization Instrumentation

<b>Diameter and Size Statistics:</b>	JEOL 1010 Transmission Electron Microscope
<b>Mass Concentration:</b>	Gravimetric Analysis- AND HM-202
<b>Spectral Properties:</b>	Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer
<b>Hydrodynamic Diameter/Zeta Potential:</b>	Malvern Zetasizer Nano ZS
<b>pH:</b>	Horiba - Laqua Twin pH Meter

Shake vigorously before use. Bath sonicate if needed. Storage: 25°C. DO NOT FREEZE.