



**HAL**  
open science

# Etude des mécanismes de contamination particulaire et des moyens de détection : proposition et évaluation de solutions innovantes pour la détection en temps-réel de la sédimentation des particules sur les surfaces critiques

Nina Menant

## ► To cite this version:

Nina Menant. Etude des mécanismes de contamination particulaire et des moyens de détection : proposition et évaluation de solutions innovantes pour la détection en temps-réel de la sédimentation des particules sur les surfaces critiques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONTT268 . tel-01809003

**HAL Id: tel-01809003**

**<https://theses.hal.science/tel-01809003>**

Submitted on 6 Jun 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Délivré par l'**Université de Montpellier**

Préparée au sein de l'école doctorale  
**Informations, Structures et Systèmes (ED 166 I2S)**

Et de l'unité de recherche  
**LIRMM**

Spécialité :  
**Systèmes Automatiques et Microélectronique**

Présentée par  
**Nina Menant**

**ETUDE DES MECANISMES DE CONTAMINATION  
PARTICULAIRE ET DES MOYENS DE DETECTION :  
PROPOSITION ET EVALUATION DE SOLUTIONS  
INNOVANTES POUR LA DETECTION EN TEMPS-REEL  
DE LA SEDIMENTATION DES PARTICULES SUR LES  
SURFACES CRITIQUES**

*Version destinée aux rapporteurs*

Soutenue le 16 décembre 2016 devant le jury composé de

M. Henri CAMON, Directeur de Recherches, CNRS  
M. François-Xavier OUF, Ingénieur, IRSN  
M. Pascal NOUET, Professeur, LIRMM  
M. Laurent LATORRE, Professeur, LIRMM  
Mme. Delphine FAYE, Ingénieure, CNES  
M. Xavier LAFONTAN, Ingénieur, Intesens

Rapporteur  
Rapporteur  
Directeur de thèse  
Co-directeur de thèse  
Examineur  
Examineur





# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>7</b>
<b>I . CONTEXTE ET THEORIE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE</b> .....	<b>11</b>
I.1. CONTEXTE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE SURFACIQUE .....	13
<i>I.1.1. Introduction</i> .....	13
<i>I.1.2. Historique</i> .....	13
<i>I.1.3. La notion d'aérosol</i> .....	15
I.2. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LA CONTAMINATION PARTICULAIRE .....	17
<i>I.2.1. Les trois types de contamination</i> .....	17
<i>I.2.2. Notions fondamentales sur les particules</i> .....	18
I.3. ASPECTS DYNAMIQUES DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE .....	26
<i>I.3.1. Les mécanismes de transport</i> .....	26
<i>I.3.2. Dépôt d'une particule sur une surface</i> .....	30
<i>I.3.3. Influence de la taille des particules sur leur taux de dépôt</i> .....	31
<i>I.3.4. Interaction particules-surface et particule-particule</i> .....	32
<i>I.3.5. Remise en suspension des particules</i> .....	34
<i>I.3.6. Modélisation des aérosols</i> .....	40
<i>I.3.7. Paramètres influençant le taux de sédimentation des particules</i> .....	43
I.4. LA CONTAMINATION PARTICULAIRE DANS LE DOMAINE DU SPATIAL .....	47
<i>I.4.1. Intérêt de la compréhension des phénomènes de sédimentation des particules</i> .....	47
<i>I.4.2. Les risques de contamination particulaire pendant les phases d'intégration au sol</i> .....	48
<i>I.4.3. Effets de la contamination particulaire sur les surfaces sensibles</i> .....	50
I.5. CONCLUSION DU CHAPITRE I .....	55
<b>II . ÉTAT DE L'ART DES MOYENS DE MESURE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE</b> .....	<b>57</b>
II.1. INTRODUCTION .....	59
II.2. MOYENS DE MESURE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE VOLUMIQUE .....	60
<i>II.2.1. Le système d'impaction</i> .....	60
<i>II.2.2. Mesure gravimétrique</i> .....	63
<i>II.2.3. La pesée de filtre</i> .....	63
<i>II.2.4. Les cristaux de quartz</i> .....	64
<i>II.2.5. Les microbalances à élément oscillant</i> .....	65
<i>II.2.6. Mesure optique</i> .....	67
<i>II.2.7. Utilisation de MEMS pour la mesure de masse des particules déposées</i> .....	73
<i>II.2.8. Autres types de mesures volumiques</i> .....	76
II.3. LES MOYENS DE MESURE PASSIFS DE LA CONTAMINATION DES SURFACES .....	79
<i>II.3.1. Caractérisation des dépôts particuliers</i> .....	79
<i>II.3.2. Les méthodes directes de caractérisation sur la surface exposée</i> .....	79

II.3.3. Les méthodes indirectes de caractérisation de particules après détachement de la surface de collecte.	82
II.3.4. Le PFO-photomètre : analyse de l'obscurcissement sur une surface témoin .....	85
II.4. INTERET D'UNE MESURE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE SURFACIQUE LOCALE EN TEMPS REEL.....	89
II.4.1. Mise en perspective des objectifs .....	89
II.4.2. Différence entre les contaminations particulaires volumique et surfacique .....	89
II.4.3. Expériences menées .....	90
II.4.4. Mesure de la contamination particulaire surfacique en temps-réel par détection optique.....	93
II.4.1. L'holographie appliquée à la détection de particules sédimentées.....	94
II.4.2. Mesure des particules par analyse d'images .....	97
II.4.3. Détection optique des particules sédimentées par rétrodiffusion.....	99
II.5. COMPARAISON ET LIMITES.....	101
II.6. CONCLUSION DU CHAPITRE II .....	103
<b>III . ETUDE DES SOLUTIONS DE DETECTION DES PARTICULES SEDIMENTEES SUR UNE SURFACE .....</b>	<b>105</b>
III.1. INTRODUCTION .....	107
III.2. LES CONTRAINTES DE DETECTION .....	109
III.2.1. Etude du milieu « salle propre » .....	109
III.2.2. Spécifications du capteur .....	110
III.3. ETUDE DES MODES DE DETECTION ENVISAGEABLES .....	115
III.3.1. Etude de différents principes de mesure .....	115
III.3.2. Choix du principe de mesure.....	120
III.4. ETUDE DU PRINCIPE DE DETECTION OPTIQUE .....	122
III.4.1. Les différentes interactions particules-lumière .....	122
III.4.2. Les composants de la cellule de mesure.....	125
III.4.3. Description et analyse des différents systèmes.....	128
III.4.4. Choix technologiques réalisés .....	132
III.5. CONCLUSION .....	133
<b>IV . DEVELOPPEMENT DE LA CELLULE DE MESURE .....</b>	<b>134</b>
IV.1. INTRODUCTION .....	136
IV.2. DEFINITION DU SYSTEME OPTIQUE DE FOCALISATION .....	137
IV.2.1. Les bases de l'optique géométrique.....	137
IV.2.2. Les différents types d'aberrations.....	138
IV.2.3. Les différents types de lentilles .....	141
IV.2.4. Spécifications du système optique .....	143
IV.3. DEFINITIONS D'UN MODELE NUMERIQUE .....	149
IV.3.1. Bases du modèle numérique .....	150
IV.3.2. Optimisation du modèle.....	151
IV.3.3. Définition de la fonction de mérite.....	152
IV.3.4. Analyse des résultats.....	153

IV.4. SIMULATIONS DU SYSTEME OPTIQUE .....	155
IV.4.1. Etudes de solutions avec des lentilles simples.....	155
IV.4.2. Etude de solutions avec des lentilles asphériques.....	160
IV.4.3. Choix technologiques .....	164
IV.4.4. Conception d'une solution sur étagère avec deux lentilles asphériques .....	166
IV.5. CONCLUSION DU CHAPITRE IV .....	179
<b>V . REFLEXIONS AUTOUR DE L'ARCHITECTURE DU CAPTEUR.....</b>	<b>180</b>
V.1. INTRODUCTION.....	182
V.2. DESCRIPTION DU PRINCIPE DE MESURE .....	183
V.2.1. Séquencement du principe de détection .....	183
V.2.2. Cas particuliers.....	185
V.3. PERSPECTIVES.....	187
V.3.1. Tests complémentaires .....	187
V.3.2. Conception du capteur .....	188
V.4. CONCLUSION DU CHAPITRE V .....	194
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>195</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS .....</b>	<b>199</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>201</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>205</b>
<b>ANNEXE A : TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTS MOYENS DE MESURE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE VOLUMIQUE ET SURFACIQUE.....</b>	<b>212</b>
<b>ANNEXE B : CAHIER DE SPECIFICATIONS DU CAPTEUR.....</b>	<b>213</b>
<b>ANNEXE C : INFLUENCE DU DEFOCUS SUR UN SYSTEME OPTIQUE A DEUX LENTILLES ASPHERIQUES LIMITE PAR LA DIFFRACTION .....</b>	<b>214</b>



## INTRODUCTION GENERALE

L'industrie des « salles propres » est née d'un besoin industriel dans les années 1960. A l'époque, le développement de nouvelles technologies de plus en plus sensibles incita les usines de production à se questionner sur l'influence de l'environnement sur la qualité des produits. Les recherches montrèrent, entre autre, le rôle déterminant de la température, de la pression et de l'humidité dans la qualité des procédés mais également la présence néfaste des poussières pour garantir la fiabilité des produits manufacturés. Les *poussières* sont aujourd'hui plus largement regroupées sous la dénomination de *particules*, et leur présence indésirable sous les termes de *contamination particulaire*. La construction de salle à environnement contrôlé s'est alors développée, et de nombreuses industries y ont porté un intérêt croissant : la micro-électronique fut notamment un acteur majeur dans l'essor des *salles blanches*, aujourd'hui connues sous le nom de *salles propres*.

L'évolution du domaine du spatial au cours des dernières décennies du XX<sup>ème</sup> siècle mena rapidement les constructeurs de satellites à intégrer ceux-ci dans des salles propres. Actuellement, tous les satellites sont assemblés dans des salles classées ISO 5 à ISO 8<sup>1</sup>. La nécessité de garantir l'extrême fiabilité des satellites a imposé à l'industrie du spatial un contrôle de la contamination particulaire de plus en plus rigoureux. Aujourd'hui, les salles propres voient leur taux de contamination surveillés *via* des compteurs optiques qui indiquent la quantité de particules dans un volume d'air prélevé dans la salle. La classification des salles et plus précisément, des zones de propreté dans la salle, se fait par ce moyen métrologique. La mesure de la contamination particulaire volumique est faite en temps-réel afin de connaître l'état de la salle à tout moment. Tous les modes de production sensibles à la contamination fonctionnent sur le même modèle.

Néanmoins, les méthodes jusqu'alors acceptées sont devenues limitantes vis-à-vis des exigences croissantes des salles propres. En effet, les compteurs optiques de particules couramment utilisés fournissent une information qui n'est pas représentative de l'ensemble des événements locaux de contamination particulaire susceptibles de se produire. L'étude préliminaire décrite dans le chapitre 1 de ce mémoire présente le périmètre métrologique actuel des salles propres. De nos jours, il est devenu indispensable de pouvoir maîtriser la contamination particulaire durant tout le cycle de vie d'une salle propre et ce de manière précise et quantitative. Plus précisément, c'est la contamination des surfaces qui est critique pour les procédés de fabrication et d'assemblage. En effet, les particules en suspension dans un aérosol ne viennent pas entraver le bon déroulement des

---

<sup>1</sup> La classification ISO sera présentée et détaillée au cours du chapitre 1.

opérations dans une salle propre. En revanche, leur dépôt sur des surfaces sensibles à la contamination est particulièrement décisif pour atteindre les exigences de fiabilité imposant l'utilisation d'une salle propre. Dans le domaine du spatial, l'assemblage et l'intégration des satellites et de ses instruments font partie d'un procédé unique (*i.e.* qui ne s'intègre pas à une chaîne de fabrication industrielle) très peu automatisé. Cette spécificité implique l'intervention de nombreux opérateurs au cours de la vie à terre du satellite. L'homme étant une source de particules considérablement importante, son intervention peut engendrer une contamination locale du satellite. Afin de protéger les surfaces sensibles des particules, de nombreuses précautions sont prises, à commencer par la protection des surfaces dont la contamination serait particulièrement critique. Nous verrons au cours du chapitre I que les modes de contamination sont si diversifiés que de nombreux paramètres influent sur le dépôt des particules. La complexité des phénomènes de transport et de sédimentation des particules rend la simulation et la prédiction de ces phénomènes particulièrement difficile. Si des études de modélisation de la contamination particulaire existent, il n'en reste pas moins indispensable de contrôler les taux de contamination surfacique dans les salles propres jusqu'au lancement en orbite des satellites.

La mesure de la contamination particulaire surfacique est un challenge dans l'industrie des salles propres. Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) a défini un axe de recherche et développement afin de proposer un nouveau type d'instrumentation pour réaliser le monitoring de la contamination des surfaces dans les salles d'assemblage, d'intégration et de test des satellites. Les chapitres II et III de ce mémoire seront l'occasion de déterminer les paramètres limitant les moyens de mesures et les contraintes liées au milieu particulier des salles à environnement contrôlé dont les salles d'intégration des satellites font partie. La norme ISO 14644 s'appliquant aux salles propres impose depuis 2012 la classification des salles en fonction de la quantité de particules par mètre carré, et ce pour différentes tailles de particules. Les deux informations indispensables pour contrôler le taux de contamination des surfaces sont donc d'une part le nombre de particules, et d'autre part la taille de ces particules. La mesure de ces deux paramètres sera donc indispensable pour caractériser la propreté des surfaces. L'objectif d'une telle évaluation est de pouvoir garantir les niveaux de propreté définis dans le cahier des charges des produits. En outre, si un événement de contamination a lieu, des mesures pourront être prises afin de remédier à ce problème. La remédiation sera d'abord locale, en procédant au nettoyage des surfaces concernées avec un procédé adapté au type de contamination, et ensuite globale en améliorant les processus de prévention de la contamination particulaire surfacique.

Afin de satisfaire le besoin grandissant de mesurer le taux de contamination des surfaces, des recherches ont été menées au cours des dernières années afin de proposer des instrumentations

adaptées. Jusqu'à présent, les mesures sont essentiellement *passives*, c'est-à-dire qu'elles nécessitent l'intervention d'un opérateur pour réaliser la quantification des particules. Outre l'influence que peut avoir l'opérateur sur la mesure, celle-ci ne peut pas être réalisée en temps-réel et présente des limites en termes de résolution de par le nécessaire transfert des particules vers les moyens de mesure. Les développements récents proposent de résoudre ces problèmes grâce à des instrumentations temps-réel. Ces appareils sont destinés à être installés directement dans la salle propre afin de procéder à un suivi de la contamination particulaire surfacique. L'étude des différents moyens de mesure existants ou en cours de développement est détaillée au cours du second chapitre de ce mémoire. Actuellement, il n'existe pas de capteur miniaturisé permettant le contrôle de la contamination particulaire surfacique au plus près des zones critiques des salles propres, et notamment dans notre contexte, au plus près des surfaces critiques des satellites.

Cette thèse s'inscrit dans ce cadre en proposant une étude des phénomènes de dépôts des particules sur les surfaces et des différents moyens de mesure existants. Le travail de thèse ci-présent est précurseur dans le domaine de la contamination particulaire surfacique en établissant un état de l'art poussé et en étudiant toutes les contraintes spécifiques aux salles propres. L'objectif final est de proposer un principe de détection des particules innovant et répondant aux exigences de la classification des salles propres. Le développement d'un capteur miniaturisé et autonome implique l'intégration de nouvelles contraintes par rapport aux instrumentations actuelles. En outre, les objectifs de résolution du capteur développé au cours de ce travail de thèse sont supérieurs à ceux des équipements actuellement disponibles sur le marché. Ainsi, le capteur doit permettre de détecter des particules de l'ordre du micron alors que les techniques actuelles sont limitées à la détection de particules supérieures à 5 microns. De plus, cette résolution ne doit pas être atteinte aux dépens de la sensibilité et de la précision de la mesure. L'application directe d'un tel capteur est le développement d'un réseau de capteurs intégrés, autonomes, sans-fil et en temps réel afin de proposer un contrôle local de la contamination particulaire surfacique.

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres. Le chapitre I est scindé en quatre parties. La première aborde de manière détaillée le contexte de la contamination particulaire surfacique. Les secondes et troisièmes parties présentent des notions fondamentales sur la contamination particulaire, en se focalisant notamment sur les aspects dynamiques du transport des particules conduisant à leur sédimentation. La quatrième partie décrit les particularités de la contamination particulaire dans le domaine du spatial, en présentant les conséquences critiques de la présence de particules sur les surfaces des satellites et de leurs instruments. Le chapitre II est un état de l'art des moyens de mesure de la contamination particulaire. La première partie décrit les moyens de mesure couramment utilisés pour contrôler la propreté des salles en termes de contamination volumique. La seconde partie

présente les moyens de mesure existants actuellement pour inspecter la propreté des surfaces ; ces moyens de mesure sont passifs et par conséquent différés dans le temps. La troisième partie décrit l'intérêt d'une mesure de la contamination particulaire en temps-réel et permettant de connaître avec précision le taux de contamination au plus près des zones critiques. Enfin, la quatrième partie propose une analyse des différents développements récemment effectués avec des objectifs similaires à ceux de cette thèse. Le chapitre III contient une étude des solutions de détection des particules déposées sur une surface. Au cours de la première partie, l'analyse des contraintes de détection permet ainsi d'établir un cahier des charges détaillé. En s'appuyant sur les spécifications définies, la seconde partie balaye différents modes de détection avant de présenter le choix du principe de mesure effectué. Les troisièmes et quatrièmes parties de ce chapitre sont consacrées au développement du capteur en définissant précisément les verrous technologiques. Le chapitre IV se focalise sur le développement de la cellule de mesure du capteur afin de résoudre les challenges établis au cours du chapitre précédent. Ainsi, les développements proposés au cours de ce chapitre permettent *in fine* de proposer une solution répondant aux spécifications établies. Le chapitre V conclut le travail de cette thèse en balayant le champ des perspectives et des développements à réaliser afin de rendre la solution industrialisable.

# I. CONTEXTE ET THEORIE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE

---



## I.1. Contexte de la contamination particulaire surfacique

### I.1.1. Introduction

La maîtrise de la contamination requiert la connaissance des phénomènes de transport et de dépôt des contaminants, ainsi que des facteurs physiques pouvant affecter ces processus. Ce premier chapitre a pour objectif de regrouper un certain nombre de connaissances portant sur la contamination particulaire surfacique. Le but *in fine* est de pouvoir orienter correctement la recherche d'un principe de détection de la sédimentation des particules. En outre, le contexte de l'étude sera présenté en abordant les problématiques liées à la contamination dans le domaine du spatial. Cette étude servira en partie de base à l'élaboration d'un cahier des charges dans la troisième partie du mémoire. La bibliographie s'appuie principalement sur des ouvrages de références portant sur la science des aérosols et des contaminants.

### I.1.2. Historique

Le concept de contamination particulaire est directement associé au développement des salles propres<sup>2</sup>. Une salle propre est définie comme une enceinte fermée dans laquelle la concentration de particules est maîtrisée. Des règles de construction et d'utilisation précises sont établies afin de limiter l'introduction, la production et la rétention de particules à l'intérieur de l'enceinte. Les paramètres relatifs au fonctionnement en condition de propreté, comme par exemple la température, la pression ou l'humidité, sont contrôlés.

Au début des années 1950, les Américains ont observé que certaines fabrications ou assemblages ne pouvaient plus se faire dans les conditions habituelles des ateliers, sous peine d'échec de la fabrication ou de problèmes ultérieurs de fiabilité du matériel. La raison principale de ces difficultés est la poussière, qui est un composant naturel de l'atmosphère terrestre, mais qui est généralement invisible car les tailles des particules en suspension sont inférieures à la limite de visibilité de l'œil (Figure 3). De nombreuses pièces sont touchées : les gyroscopes présents dans les missiles, les roulements à billes miniatures, les contacts électriques, etc.

---

<sup>2</sup> Le terme de « salle propre » remplace celui de « salle blanche » depuis la parution de la norme NF EN ISO 14644-1 en 1999.



**Figure 1 : La première salle à flux laminaire construite par Sandia corporation (Source : [www.ultraproprete.com](http://www.ultraproprete.com))**

Des nouvelles méthodes de production « hors poussières » sont alors imaginées. L'US Air Force, avec la Sandia corporation, va soutenir les efforts de recherche technique qui vont porter sur tous les aspects du problème (Figure 1). Dès 1960, des solutions pratiques sont proposées telles que le développement des compteurs optiques de particules, la mise au point des filtres à haute efficacité et la maîtrise de la technique de « l'écoulement laminaire » (Figure 2). Cette technique, impliquant la génération de flux d'air verticaux, permet de plaquer les poussières au sol, hors des zones de travail. Très rapidement, la notion de propreté est définie avec la publication d'une norme militaire puis fédérale, la Fédéral Standard 209, qui va être utilisée jusqu'à la reprise du dossier par le CEN puis l'ISO. Au début des années 1960, un nouveau secteur économique est né : l'industrie des salles propres ou zones à contamination maîtrisée. En revanche, la communauté scientifique n'a réellement pris conscience de l'importance de la contamination particulaire que dans les années 1970. En effet, la création de l'ICCCS (International Confederation of Contamination Control Societies) en 1972 a permis de regrouper les sociétés scientifiques spécialisées dans ce domaine dans la plupart des pays alors industrialisés. L'ASPEC (Association pour la Prévention et l'Étude de la Contamination), fondée en 1970, est l'organisme français officiel représentatif au sein du Comité international.

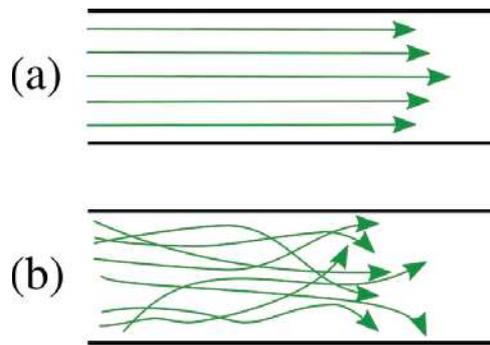


Figure 2 : Comparaison entre un flux laminaire (a) et un flux turbulent (b)

### I.1.3. La notion d'aérosol

Inventé par Schmauss en 1920, le mot aérosol désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air et dans des conditions normales, cette définition correspond de manière conventionnelle à des particules de dimensions inférieures à  $100\ \mu\text{m}$  (PM100)<sup>3</sup> ; la taille limite des particules les plus fines est arbitraire et on considère usuellement qu'elle est de l'ordre du nanomètre (la limite de taille des clusters moléculaires). Les aérosols sont les vecteurs de la pollution et de la radioactivité atmosphérique, en intervenant dans des phénomènes naturels tels que la formation des nuages, les modifications de la couche d'ozone ou les échanges océan-atmosphère (1). Depuis que l'Homme maîtrise la science des aérosols, de nombreuses utilisations industrielles en sont faites : la filtration, l'épuration de l'air, la climatisation et la construction de salles à environnement contrôlé. Toutefois, la micro-électronique, et les nanotechnologies de manière générale, voient les propriétés fonctionnelles de leurs dispositifs altérées par la présence de contamination. Citons également les industries agroalimentaires et pharmaceutiques qui, soumises à des normes strictes, mettent en place des chaînes entières de production dites « propres ». Enfin, la maîtrise de la contamination est essentielle à une très grande échelle : celle de la population. En effet, la sûreté des réacteurs nucléaires nécessite la mise en place d'une « hygiène industrielle ». Les hôpitaux et autres établissements de santé sont également très sensibles à la contamination, celle-ci étant en partie responsable d'un très grand nombre d'infections tous les ans.

---

<sup>3</sup> La notation PM X (en anglais pour *Particulate matter*) inclut toutes les particules en suspension de diamètre inférieur à X  $\mu\text{m}$ .

Une définition plus appliquée de la notion d'aérosol consiste à dire qu'il s'agit de particules liquide et/ou solide restant suffisamment longtemps en suspension dans un milieu gazeux pour être observables et mesurables. Dans la suite de cette étude, le milieu gazeux sera considéré comme étant l'air aux conditions normales de température et de pression. Il apparaît pertinent de fixer la limite supérieure à 100  $\mu\text{m}$  étant donné que les particules de diamètre supérieur ont une vitesse de sédimentation très importante et par conséquent un temps de résidence dans l'air très court.

## I.2. Notions fondamentales sur la contamination particulaire

### I.2.1. Les trois types de contamination

L'ASPEC définit un contaminant comme toute particule, molécule, entité biologique ou entité non particulaire qui peut affecter de manière négative un processus ou un produit (définis au sens de l'ISO 9000). La contamination est donc l'altération d'un produit ou d'un processus par un contaminant. Il s'agit d'une notion relative à la sensibilité du produit ou du processus, ainsi qu'à la nature et à la quantité de contaminants. Les éléments non-désirés, ou contaminants, peuvent être de taille et de forme variées, et de composition physico-chimique plus ou moins complexe. Il existe trois grands types de contamination :

- La contamination microbiologique concerne des micro-organismes et particules viables susceptibles de se propager,
- La contamination moléculaire ou contamination chimique peut être de deux types : aéroportée (à l'état de gaz ou de vapeur) ou surfacique (à l'état adsorbé à la surface d'un produit) avec des dépôts de monocouches de 1 angström à 100 angström,
- La contamination particulaire désigne les particules inertes susceptibles de se déposer (incluant également les organismes biologiques morts).

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire de thèse porte sur la contamination particulaire. Les particules inertes ont plusieurs origines : tellurique, usure des équipements et des machines, vêtements, renouvellement de la peau, procédés de fabrication (opérations mécaniques, chimiques, etc.). Chaque famille de particules est associée à une gamme de taille (Figure 4). Le seuil de visibilité des particules en lumière intense est d'environ 30  $\mu\text{m}$  (Figure 3). Ce seuil est nettement supérieur aux tailles des contaminants habituellement présents dans l'air et donc aux tailles de référence utilisées pour la classification des zones à contamination maîtrisée ou salles propres.

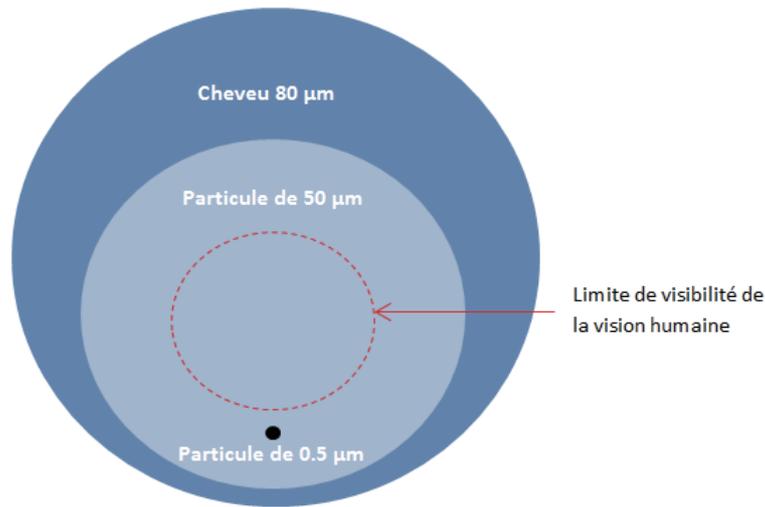


Figure 3 : Illustration de la limite de visibilité de l'œil humain

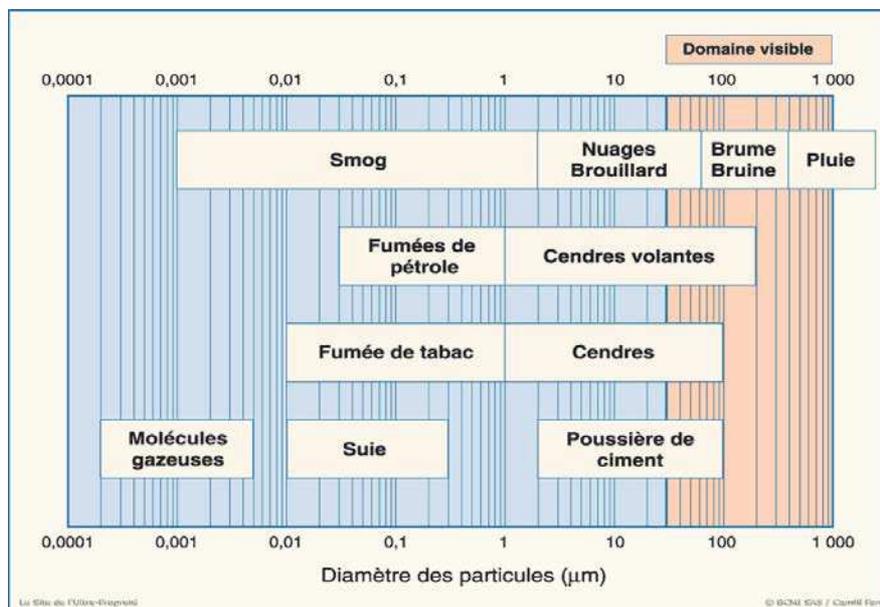


Figure 4 : Échelle des dimensions particulaires (Source : [www.ultraproprete.com](http://www.ultraproprete.com))

## I.2.2. Notions fondamentales sur les particules

### I.2.2.1. Diamètre caractéristique des particules

Dans l'étude du comportement d'un aérosol, la granulométrie a une influence prépondérante. Ainsi nous verrons que les différentes forces et mécanismes qui entrent en jeu dans le déplacement et la sédimentation des particules sont dépendants du diamètre des particules. La section I.3 de ce chapitre s'attache à démontrer l'importance de la taille d'une particule dans son comportement dans un fluide. Lorsque nous parlons de granulométrie, nous parlons donc de la dimension des particules. Un aérosol est le plus souvent caractérisé en assimilant la géométrie de ses particules à une sphère.

En réalité, les particules inertes peuvent se présenter avec différents facteurs de forme, notamment dans le cas des fibres. Afin de simplifier l'étude du mouvement de ces particules, celles-ci sont traditionnellement considérées comme sphériques avec les équivalences suivantes (il existe d'autres diamètres caractéristiques, peu utilisés, dont on peut trouver une liste dans l'ouvrage d'Allen (2)):

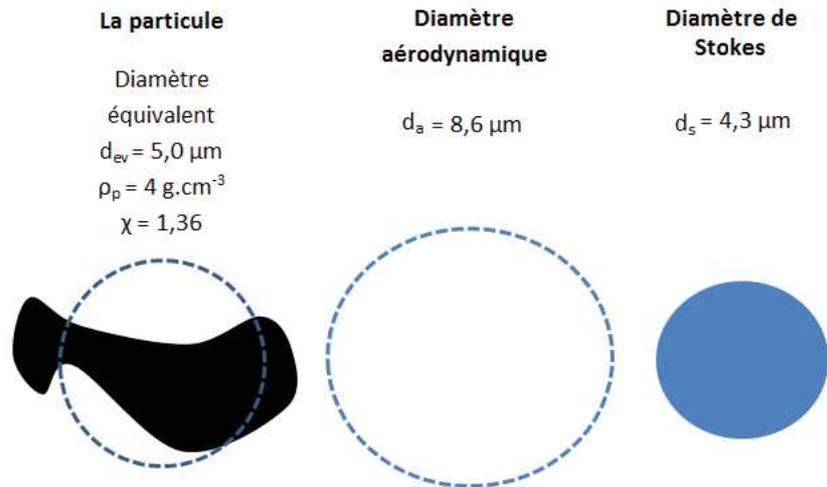
- Le diamètre de Stokes  $d_s$ , correspondant au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de sédimentation que la particule quelconque et une masse volumique  $\rho_b$  égale à celle du matériau constituant la particule quelconque. Cette définition est particulièrement adaptée à des particules de diamètre inférieur à 100 nm dont le comportement est dominé par le mouvement Brownien.
- Le diamètre aérodynamique  $d_{ae}$ , correspondant au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse de sédimentation que la particule quelconque et une masse volumique  $\rho_0 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ . Cette définition est particulièrement adaptée à des particules de diamètre supérieur à 0.5  $\mu\text{m}$  dont le comportement inertiel domine.

$$d_a = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}} d_{50} \quad \text{Équation 1}$$

Où  $\rho$  est la masse spécifique de l'aérosol dont  $\chi$  est le facteur de forme dynamique que nous définirons plus loin dans ce paragraphe et  $d_{50}$  le diamètre médian en masse de la distribution granulométrique des aérosols.

- Le diamètre équivalent en volume  $d_{ev}$ , correspondant au diamètre d'une sphère ayant le même volume que la particule quelconque et la même masse volumique  $\rho_m$  du matériau de la particule considérée (et donc la même masse  $m$ ). Cette définition est particulièrement adaptée à des particules de forme complexe.

$$d_{ev} = \left[ \frac{m}{(\pi/6) \rho_m} \right] \text{Erreur ! Signet non défini.} \quad \text{Équation 2}$$



**Figure 5 : Exemple de calcul des diamètres équivalents d'une particule quelconque**

Il est à noter que ces diamètres équivalents peuvent être sensiblement différents, tel qu'illustré sur la Figure 5. Dans la suite de cette étude, le terme « diamètre » sera communément utilisé pour « diamètre aérodynamique ».

Il est possible de réduire la définition d'un aérosol à un ensemble de particules sphériques portées dans un gaz à l'aide de diamètres statistiques tels que définis ci-dessus. Cependant, les écarts entre les différents diamètres présentés sont d'autant plus grands que la forme d'une particule s'écarte de celle d'une sphère. Il faut ainsi introduire la notion de facteur de forme. Cette nouvelle notion permet de mieux appréhender le problème d'un aérosol quelconque. Deux types de facteurs de forme sont introduits : le facteur de forme géométrique et le facteur de forme dynamique.

Le facteur de forme géométrique peut être de deux types : le facteur de forme en surface  $\alpha_s$  et le facteur de forme en volume  $\alpha_v$ . Ces deux facteurs de forme dépendent du diamètre  $d_p$  de la particule considérée, et sont respectivement fonction de la surface  $S_p$  et du volume  $V_p$  de la particule considérée. Ce sont des nombres sans dimension, des valeurs typiques de certaines formes sont présentées dans le Tableau 1.

$$\alpha_s = \frac{S_p}{d_p^2} ; \alpha_v = \frac{V}{d_p^3} \quad \text{Équation 3}$$

Le facteur de forme dynamique est défini comme le rapport entre la force de traînée de la particule non sphérique considérée et la force de traînée d'une particule sphérique idéale. Il est considéré que la vitesse limite de sédimentation de la particule non sphérique et de la particule sphérique est la même.

$$\chi = \frac{\rho_a}{\rho_p} \left( \frac{d_{ev}}{d_s} \right)^2 \quad \text{Équation 4}$$

Où  $\rho_a$  est la masse spécifique de l'aérosol,  $\rho_p$  la masse du matériau de la particule considérée,  $d_{ev}$  le diamètre équivalent en volume et  $d_s$  le diamètre de Stokes. Pour une sphère, le facteur de forme dynamique est égal à l'unité.

**Tableau 1 : Exemples de facteur de forme dynamique pour quelques types de particules (2)**

Forme	Facteur de forme dynamique
Sphère	1.00
Cube	1.08
Cylindre	1.32
Poussière de quartz	1.36
Poussière de sable	1.57
Poussière de talc	2.04

### I.2.2.2. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (sans dimension) permet de caractériser la nature d'un écoulement à travers un conduit ou autour d'un objet comme une particule. Dans l'étude de la contamination particulaire, le nombre de Reynolds amène à comprendre quelles sont les forces aérodynamiques qui s'exercent sur une particule. Il exprime le rapport entre les forces d'inerties et les forces visqueuses.

$$Re_p = \frac{\rho_g \cdot V_p \cdot d_p}{\eta} \quad \text{Équation 5}$$

Où  $d_p$  est le diamètre de la particule,  $V_p$  la vitesse relative de la particule,  $\rho_g$  la masse volumique du fluide et  $\eta$  la viscosité dynamique du fluide.

Lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 1, le régime d'écoulement autour de la particule est laminaire (Figure 6). Un écoulement laminaire est caractérisé par des lignes de courant symétriques et sans ruptures. À l'inverse, lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 1, le régime est turbulent. Celui-ci se caractérise par des tourbillons qui se forment à l'arrière de la particule.

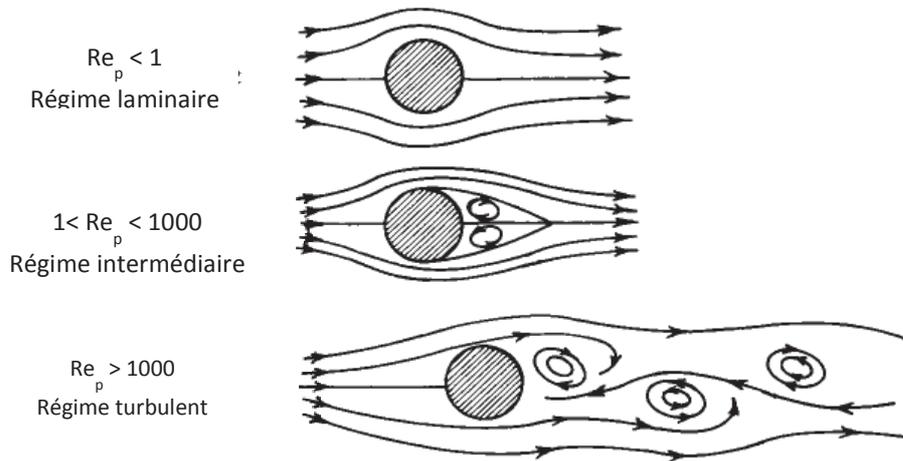


Figure 6 : Régime d'écoulement lorsqu'un flux d'air rencontre une particule (2)

### 1.2.2.3. La contamination particulaire : référentiel normatif

La norme internationale de référence en matière de contamination particulaire est la norme ISO 14644 « Salles propres et environnements maîtrisés apparentés ». Dans toutes les industries sensibles à la contamination, il a d'abord été développé des outils permettant de surveiller la contamination de l'air. Or, pour la majorité des applications, c'est en réalité la contamination des surfaces qui est primordiale. Cette problématique est une préoccupation récente au niveau de la normalisation internationale. L'objectif de cette partie est de présenter de manière succincte les objectifs des différentes normes existantes en matière de contamination particulaire. Les méthodes de mesure décrites et préconisées par ces normes seront analysées dans le chapitre II.

#### a. La norme ISO 14644-1 : classification de la propreté de l'air

La norme ISO 14644-1 (3) a été publiée pour la première fois en juillet 1999. Elle définit les concentrations maximales admissibles dans l'air en fonction de la taille des particules, classe les salles propres et propose des méthodes d'essai pour la mesure et le contrôle de la contamination. La classification concerne des particules de diamètre compris entre 0.1  $\mu\text{m}$  et 5.0  $\mu\text{m}$  (étendue granulométrique). La concentration de particules dans l'air permet l'attribution d'un numéro de classification N (entre 1 et 9) à toute salle propre. Ce numéro permet de rendre compte de la concentration maximale admissible des particules dont le diamètre est supérieur à D.

$$C_N = 10^N \left( \frac{0.1}{D} \right) \quad \text{Équation 6}$$

**Tableau 2 : Classification des salles propres par leurs concentrations maximales admissibles en part/m<sup>3</sup> d'air en fonction de la taille des particules (3)**

Concentrations maximales admissibles en part/m <sup>3</sup> d'air	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1 000	237	102	35	8	
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7				352 000	83 200	2 930
ISO 8				3 520 000	832 000	29 300

**b. La norme ISO 14644-9 : classification de la propreté des surfaces par la concentration de particules (SCP)**

La propreté des surfaces des salles propres en termes de contamination particulaire est une préoccupation majeure et croissante. La norme ISO 14644-9 (4), publiée en septembre 2012, classe la propreté des surfaces des salles propres. Elle définit les concentrations maximales admissibles sur les surfaces en fonction de la taille des particules et propose des modes opératoires de nettoyage des surfaces et des méthodes d'essai pour la mesure et le contrôle de la contamination. Elle décrit également les caractéristiques des surfaces et des particules influant sur la propreté des surfaces. La classification concerne des particules de diamètre compris entre 0.05 µm et 500 µm (étendue granulométrique). La concentration de particules sur les surfaces (SCP) d'une salle propre permet l'attribution d'un numéro de classification N (entre 1 et 8) à toute salle propre. Cette classe spécifie la concentration particulaire totale maximale  $C_{SCP, D}$  admise sur la surface pour des particules de taille supérieure ou égale à un diamètre D donné.

$$C_{SCP, D} = k \left( \frac{10^N}{D} \right) \quad \text{Équation 7}$$

Avec  $C_{SCP, D}$  en particules par mètre carré de surface et D en micromètres. K est une constante égale à 1 µm. On peut déduire de cette équation le numéro de classification :

$$\text{Classe ISO SCP} = N = \log_{10} (D * C_{D,SCP}) \quad \text{Équation 8}$$

**Tableau 3 : Classification des salles propres par leurs concentrations surfaciques maximales admissibles en part/m<sup>2</sup> en fonction de la taille des particules (4)**

Concentration maximale admissible en part/m <sup>2</sup>	≥ 0.1	≥ 0.5	≥ 1	≥ 5	≥ 10	≥ 50	≥ 100
SCP 1	100	20	(10)				
SCP 2	1000	200	100	(20)	(10)		
SCP 3	10000	2000	1000	(200)	(100)		
SCP 4	100000	20000	10000	2000	1000	(200)	(100)
SCP 5	1000000	200000	100000	20000	10000	2000	1000
SCP 6	(10000000)	2000000	1000000	200000	100000	20000	10000
SCP 7			10000000	2000000	1000000	200000	100000
SCP 8					10000000	2000000	1000000

Notons que l'étendue granulométrique des particules est beaucoup plus large dans le cas de la contamination surfacique que dans le cas de la contamination volumique. Les satellites sont communément assemblés dans des salles ISO 5 à ISO 8 suivant la norme ISO 14644-1 en fonction de leur sensibilité à la contamination. Il n'existe pas aujourd'hui de classification des salles d'intégration en fonction de la propreté des surfaces.

### **c. Les normes de l'European Cooperation for Space Standardization (ECSS)**

L'European Cooperation for Space Standardization (ECSS) est un comité coopératif de l'ESA (European Space Agency), des industries du spatial et des agences spatiales nationales membres de l'ESA. L'ECSS établit un ensemble de normes liées au management de projets spatiaux. Nous étudierons ici les deux normes majeures en matière de maîtrise de la contamination au sol :

- L'ECSS-Q-ST-70-01C qui définit les exigences de contamination de tous types pour les systèmes spatiaux,
- L'ECSS-Q-ST-70-50C qui porte sur la surveillance de la contamination particulière pour les systèmes spatiaux et les salles propres.

Ces deux normes font parties de la branche « assurance produit » dans la discipline « matériaux, systèmes mécaniques et procédés ». L'ECSS-Q-ST-70-01C (5) est impliquée dans le management des projets spatiaux en définissant les grands axes des plans de contamination devant être établis lors de la conception d'un système spatial. La norme présentée ici appelle ce plan « Cleanliness Requirement Specification » (CRS). Ce plan doit définir précisément quels sont les niveaux de contamination acceptables pour le système concerné, durant ses différentes phases de vie. Ainsi la norme ECSS-Q-ST-70-01C définit des critères à respecter par rapport aux exigences d'un système spatial.

La dernière version de la norme ECSS-Q-ST-70-50C (6) présentée ici date d'octobre 2011. Cette norme se focalise sur les aspects critiques de la contamination particulaire surfacique dans les systèmes spatiaux, ainsi que dans les salles propres où sont intégrés les systèmes spatiaux. L'objectif est de décrire les exigences en matière de moyen de mesure (précision et reproductibilité). Trois types de mesures sont décrits : mesure de la contamination surfacique sur un échantillon témoin placé à proximité des surfaces critiques (« Particle Fall-Out Measurement (PFO) »), sur un échantillon adhésif après transfert direct des particules de la surface critique (« tape-lift method ») et mesure du nombre de particules dans un fluide de rinçage ayant servi au nettoyage de la surface critique. Enfin, une méthode d'inspection visuelle est également décrite. En ce qui concerne les particules présentes dans l'air, la norme se réfère à l'ISO 14644-1 présentée ci-dessus. Le monitoring de la contamination particulaire pendant le lancement est décrit dans une autre norme, l'ECSS-S-ST-00.

## I.3. Aspects dynamiques de la contamination particulaire

### I.3.1. Les mécanismes de transport

Les phénomènes de sédimentation des aérosols dans des enceintes – milieux fermés par définition – sont liés aux deux types de mécanismes opérant des mouvements d'air. Le premier est la convection naturelle, due aux gradients de températures (provoqués par des transferts de chaleur au niveau des surfaces) dans l'enceinte. Le second mécanisme est la turbulence (convection forcée) qui est associée à une énergie externe au milieu, comme par exemple un ventilateur ou des pompes pour renouveler l'air. Les particules suivent alors un mouvement brownien qui conduit in fine à leur sédimentation. On définit un domaine de proche-paroi où des gradients de concentration de particules apparaissent, en raison de la proximité d'une surface. L'épaisseur de cette couche limite dépend de la taille des particules, des caractéristiques de l'enceinte (viscosité du fluide porteur de l'aérosol, taille de l'enceinte, température, humidité, etc.) ainsi que du degré d'homogénéité de l'aérosol (fonction des énergies externes). La turbulence est de moins en moins influente lorsque la particule s'approche de la paroi (7). Ceci est notamment dû à l'atténuation progressive de la viscosité cinématique turbulente du fluide en proche-paroi (8). D'autres mécanismes entrent également en jeu : la force de gravitation qui dépend notamment de la masse des particules, la force de traînée qui dépend de la surface de la particule, et des mécanismes liés à l'environnement tels que la thermophorèse, l'électrophorèse, la photophorèse ou la turbophorèse. Les particules sont soumises à différentes forces suivant leur taille. Dans une salle propre, on distingue la zone proche des parois où les particules ont tendance à sédimenter sur les surfaces du centre de la salle où les flux sont homogènes et dits turbulents (7) (9).

#### I.3.1.1. La diffusion brownienne

La diffusion brownienne, traduit le mouvement global des particules dans un aérosol lorsqu'il existe un gradient de concentration. Il s'agit d'un mouvement aléatoire. Cette force uniformise la concentration de particules dans tout le volume gazeux. Les particules migrent de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée. La loi de Fick exprime le flux de particules en fonction de leurs coefficients de diffusion et de leurs concentrations :

$$\varphi = -D \frac{dC_n}{dz} \quad \text{Équation 9}$$

Avec  $\phi$  en  $\text{part.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,  $D$  le coefficient de diffusion en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  et  $C_n$  la concentration de particules en  $\text{part.m}^{-3}$ . Le coefficient de diffusion brownienne  $D$  dépend du diamètre des particules  $d_p$  et du coefficient de correction de Cunningham  $C_u$ . Ce facteur de correction augmente lorsque la taille

des particules diminue (il est constant et égal à l'unité pour des particules de taille supérieure à 2  $\mu\text{m}$ )  
 (1). Le coefficient de diffusion brownienne se définit par l'expression de Stokes-Einstein:

$$D = \frac{K_B T C_u}{3\pi \eta d_p} \quad \text{Équation 10}$$

Où  $\eta$  représente la viscosité dynamique ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) du gaz et  $K_B$  la constante de Boltzmann ( $1,38\cdot 10^{23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Le coefficient de diffusion augmente de manière inversement proportionnelle au diamètre des particules. Au phénomène de diffusion brownienne dû à l'existence d'un gradient de concentration au sein de l'aérosol vient s'ajouter le mouvement brownien naturel des particules. Ce mouvement brownien est caractérisé par le déplacement quadratique moyen, qui est une évaluation statistique de la distance totale parcourue par une particule dans une direction durant un temps  $t$  (secondes) :

$$X_{rms} = \sqrt{2Dt} \quad \text{Équation 11}$$

Le mouvement brownien est d'autant plus important que le coefficient de diffusion est grand et donc que le diamètre de la particule est petit.

### **1.3.1.2. Le phénomène de convection (ou de diffusion turbulente)**

Les particules d'un aérosol peuvent se déplacer soit par diffusion soit par convection, c'est-à-dire en suivant les mouvements du fluide. Le nombre de Peclet  $P_e$  (adimensionnel) est utilisé pour déterminer le phénomène dominant :

$$P_e = \frac{U.L}{D} \quad \text{Équation 12}$$

Où  $U$  représente la vitesse moyenne du gaz porteur ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $D$  le coefficient de diffusion des particules ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) et  $L$  une grandeur caractéristique ( $\text{m}$ ). Si  $P_e$  est supérieur à 1 alors la convection est dominante.

### **1.3.1.3. La force de gravitation**

La force de gravitation qui s'exerce sur une particule en suspension dans un aérosol s'exprime par la relation suivante :

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_a) g \quad \text{Équation 13}$$

Où  $g$  est l'accélération de la pesanteur (sur Terre  $980 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $\rho_a$  et  $\rho_p$  sont respectivement les densités de l'air et de la particule. La poussée d'Archimède est usuellement négligée car la densité de l'air est beaucoup plus petite que celle de la particule. La force de gravitation est très fortement

dépendante de la masse de la particule, exprimée ici comme fonction du diamètre de la particule  $d_p$  et de sa densité, caractéristique du matériau qui la compose.

#### 1.3.1.4. La force de traînée

La force de traînée qui s'exerce sur une particule est due à la résistance du fluide lors d'un mouvement de la particule. Cette force n'existe donc pas dans le vide. La loi de Stokes caractérise la force de traînée  $F_D$  :

$$F_D = 3\pi\eta V d_p \quad \text{Équation 14}$$

Où  $V$  est la vitesse de la particule par rapport à la vitesse locale du fluide.

#### 1.3.1.5. La thermophorèse

La thermophorèse existe lorsqu'il règne un gradient de température au sein de l'aérosol. Les particules ont alors tendance à migrer de la région la plus chaude vers la région la plus froide (dans la direction des températures décroissantes). Ce phénomène est dû aux collisions entre les molécules du gaz porteur et la particule. En effet, la face exposée à la région chaude du gradient subit des collisions plus fréquentes par des molécules plus rapides que la face exposée à la région froide. Ceci provoque un déséquilibre des quantités de mouvements et du flux moléculaire qui induit une migration de la particule. La force de thermophorèse  $F_{th}$  est dirigée vers la région la plus froide :

$$F_{th} = -\frac{3\pi\mu^2 d_p H}{\rho_a T} \frac{dT}{dy} \quad \text{Équation 15}$$

Où  $dT/dy$  est le gradient de température et  $H$  est le coefficient de la force de thermophorèse.

$$H \cong \left( \frac{2.34}{1+6.84\lambda/d_p} \right) \left( \frac{k_a/k_p + 4.36\lambda/d_p}{1+2k_a/k_p + 8.72\lambda/d_p} \right) \quad \text{Équation 16}$$

Où  $k_a$  et  $k_p$  sont respectivement les conductivités thermiques de l'air et de la particule.

Le Tableau 4 (10) compare les vitesses de thermophorèse et de sédimentation pour des particules sphériques de même masse volumique et de même conductivité thermique. Il s'agit par conséquent du cas idéal d'un ensemble homogène de particules. Une limite est admise pour des diamètres de particules supérieurs à  $0.5 \mu\text{m}$  : la sédimentation l'emporte sur la thermophorèse. Néanmoins cela peut être contredit dans des cas particuliers de très forts gradients de température, la thermophorèse peut alors devenir le mécanisme prépondérant.

**Tableau 4 : Comparaison entre la vitesse limite de sédimentation et de thermophorèse pour  $\Delta T = 1^\circ\text{K/cm}$  et  $T = 20^\circ\text{C}$**

Diamètre des particules ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse limite de sédimentation (cm/s)	Vitesse de thermophorèse (cm/s)
0,01	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
0,1	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
1,0	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
10,0	0,31	$7,8 \cdot 10^{-5}$

### **I.3.1.6. L'électrophorèse**

Les particules peuvent se charger de très nombreuses façons : par friction, par pulvérisation, par diffusion d'ions, par émission thermo-ionique ou encore par photoélectricité. Si l'aérosol est soumis à un champ électrique alors les particules chargées subissent une force électrostatique, appelée force de Coulomb :

$$F_C = qE = n_e e \quad \text{Équation 17}$$

Où  $q$  est la charge de la particule,  $E$  est le module du champ électrique,  $n_e$  est le nombre d'électrons qui diffère de l'état électriquement neutre (en incluant le signe) et  $e$  est la charge d'un électron ( $-1.6 \cdot 10^{-19}$  C). La charge portée par les particules peut être positive (déficit d'électrons) ou négative (excès d'électrons).

### **I.3.1.7. La photophorèse**

La photophorèse est un phénomène qui apparaît lorsque, sous l'effet d'un rayonnement lumineux, la distribution de la température à la surface d'une particule n'est pas uniforme. L'action à laquelle est soumise la particule est alors d'origine radiométrique. Suivant le type de particule on peut observer une photophorèse positive ou négative. Par exemple, si la particule est fortement absorbante, la face exposée au rayonnement lumineux voit sa température augmenter. La photophorèse est alors positive (i.e. en sens inverse du rayon lumineux) (11).

### **I.3.1.8. La turbophorèse**

La turbophorèse est un phénomène qui apparaît lorsque que certaines régions de l'aérosol sont soumises à une forte turbulence. Les particules ont alors tendance à migrer des zones de fortes turbulences aux zones de faibles turbulences. Ce phénomène est très distinct de celui de diffusion turbulente. La turbophorèse est attribuée à l'interaction entre l'inertie de la particule et l'écoulement turbulent inhomogène du fluide porteur. Elle est particulièrement significative pour les particules

qui ont une inertie importante, c'est-à-dire à proximité des surfaces où le gradient en intensité de turbulence est grand.

### I.3.2. Dépôt d'une particule sur une surface

Le dépôt d'une particule sur une surface est usuellement caractérisé par la vitesse de dépôt  $V_d$  et le taux de dépôt  $\beta$ .

#### I.3.2.1. La vitesse de dépôt $V_d$

La vitesse de dépôt  $V_d$  tient compte de tous les mécanismes de transport de la particule – en particulier de la gravitation et donc de l'orientation de la surface. C'est un paramètre local.

$$V_d = \frac{J}{C_\infty} [=] \frac{\text{nombre de particules déposées par unité de surface et par unité de temps}}{\text{concentration en particules au coeur du fluide}} \quad \text{Équation 18}$$

Où  $J$  est le flux de particules et  $C_\infty$  est la concentration en particules de l'aérosol. La concentration en particules est en général définie au cœur du fluide, éloigné de toute surface.

La vitesse de dépôt d'une particule dépend de nombreux facteurs : la taille et la nature de la particule, la proximité avec une surface, les caractéristiques de la surface (inhérentes ou non au matériau) et aux caractéristiques du milieu. Cette influence sera plus amplement décrite dans la partie I.3.7.

#### I.3.2.2. Le taux de dépôt $\beta$

Le taux de dépôt  $\beta$  ( $s^{-1}$ ) tient compte des pertes de particules (par dépôt sur les surfaces) dans l'air en fonction du temps dans une enceinte fermée et étanche. C'est un paramètre global. Il varie fortement en fonction du diamètre des particules, ainsi que de l'épaisseur de la couche limite.

$$\beta = -\left(\frac{1}{C}\right) \frac{dC(d_p, t)}{dt} \quad \text{Équation 19}$$

Où  $C(d_p, t)$  est la concentration de particules en fonction du temps et par diamètre de particules donné au centre de la pièce. La concentration de particules dans l'air diminue dans le temps selon la loi suivante, où  $C_0$  est la concentration initiale de particules dans l'air:

$$C(t) = C_0 e^{-\beta t} \quad \text{Équation 20}$$

### I.3.3. Influence de la taille des particules sur leur taux de dépôt

Nous avons vu les différents mécanismes jouant sur le dépôt des particules. Tous ces mécanismes dépendent plus ou moins fortement du diamètre des particules. L'évolution de la vitesse de sédimentation de particules sphériques idéales de masse volumique  $\rho_0 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$  en fonction de leur taille (Figure 7) montre que les particules ayant un diamètre supérieur à  $1 \text{ }\mu\text{m}$  ont davantage tendance à sédimenter à cause de la force de gravitation. Pour des diamètres inférieurs à  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ , les particules ont tendance à sédimenter principalement à cause du mouvement brownien. La thermophorèse et l'électrophorèse sont également des mécanismes plus importants pour les particules inférieures à  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ .

On observe un minimum du taux de dépôt pour des particules de diamètre compris entre  $0.10$  et  $1.0 \text{ }\mu\text{m}$ , généralement appelé « mode d'accumulation ». Dans cet intervalle, les deux types de forces (diffusion et gravité) sont en compétition et ont tendance à empêcher les particules de sédimenter. Cette observation est à nuancer en fonction des autres paramètres pouvant influencer les forces agissant sur le dépôt des particules (I.3.7).

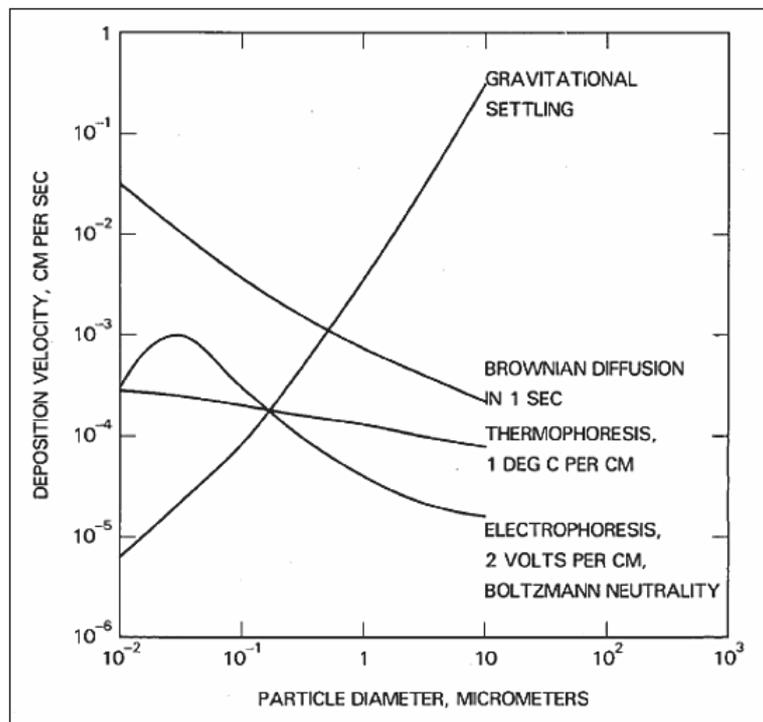


Figure 7 : Évolution de la vitesse de sédimentation des particules en fonction de leur taille pour chaque mécanisme de transport de la particule

La Figure 8 ci-dessous représente l'évolution du taux de dépôt en fonction du diamètre des particules dans le cas d'une enceinte cubique de volume  $1 \text{ m}^3$ . Ce graphique est issu d'une étude expérimentale réalisée en 1972 par Van de Vate (12). Les particules sont considérées comme

sphériques et de densité unité. Pour des diamètres de particules inférieurs à  $0.1 \mu\text{m}$ , le coefficient de dépôt diminue lorsque le diamètre augmente. La diffusion brownienne est prépondérante. Au-delà de  $1 \mu\text{m}$ , le coefficient de dépôt augmente lorsque le diamètre des particules augmente. La force de gravitation est alors prédominante. Ce graphique montre également l'influence de l'épaisseur de la couche limite de diffusion sur le taux de dépôt pour des particules de diamètre inférieur à  $1 \mu\text{m}$ . L'étude a été réalisée pour une épaisseur de couche limite de diffusion de  $0.85 \text{ mm}$  ou de  $0.05 \text{ mm}$  (indépendamment du diamètre des particules). Pour des particules de diamètre inférieur à  $1 \mu\text{m}$ , plus l'épaisseur de la couche limite est faible, plus le coefficient de dépôt est élevé.

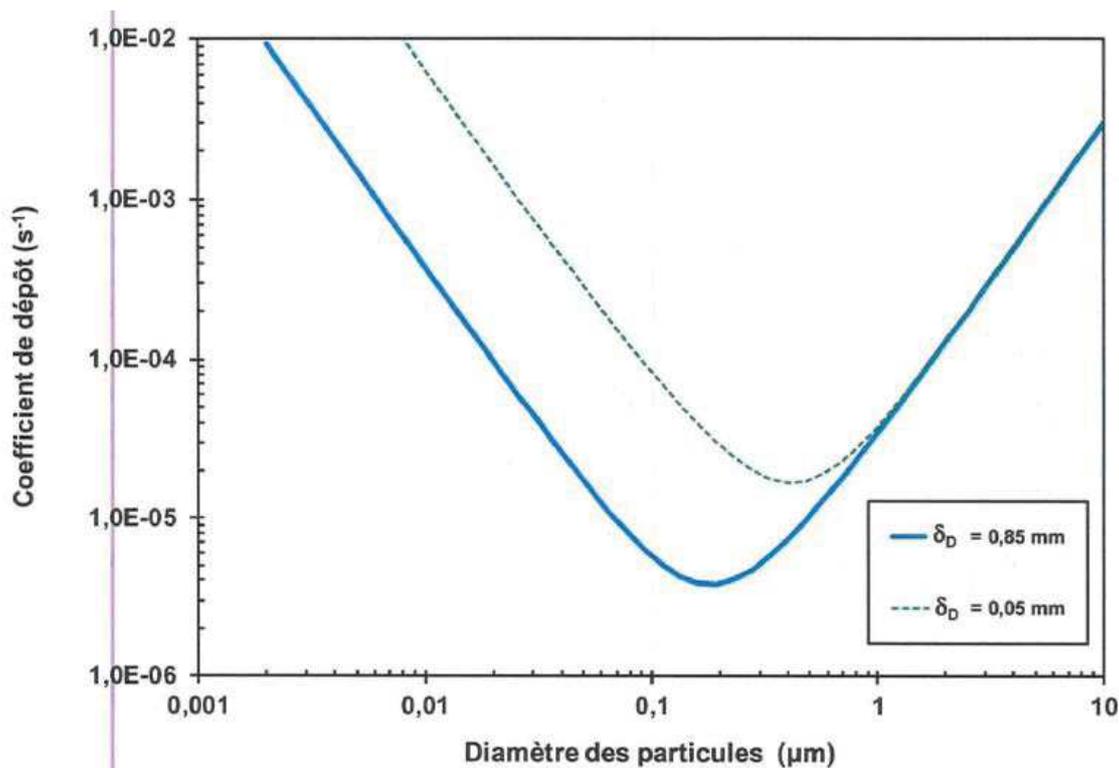


Figure 8 : Évolution du coefficient de dépôt en fonction du diamètre de la particule pour une enceinte cubique de  $1 \text{ m}^3$  (12)

### I.3.4. Interaction particules-surface et particule-particule

L'interaction particule-surface est décrite par les forces d'adhérence existantes entre deux solides. Ces forces sont généralement d'origine électromagnétique et de nature attractive. Les principales forces d'adhérence sont les forces de Van der Waals, les forces électrostatiques et les forces de capillarité. La sédimentation de particules sur une surface recouverte d'un lit de particules sera quant à elle décrite par l'interaction entre deux particules. Ces forces interparticulaires sont des forces de Van der Waals.

Les forces de Van der Waals sont des forces électromagnétiques résiduelles faibles, d'origine quantique. Elles sont proportionnelles au diamètre des particules et varient en  $1/r^2$ ,  $r$  étant la distance particule-surface. Dans le cas de l'interaction entre une particule sphérique de diamètre  $d_p$  et une surface plane, la force de Van Der Waals agissant perpendiculairement à la paroi s'écrit :

$$F_{vdw} = \frac{A}{12r^2} d_p \quad \text{Équation 21}$$

Où  $A$  représente la constante de Hamaker (J) qui dépend de la nature des matériaux en contact et du milieu ambiant. Pour des surfaces lisses,  $r$  est usuellement égale à 4 Å. Dans le cas de surfaces rugueuses et de particules non sphériques la force de Van der Waals peut être considérablement réduite.

Les forces électrostatiques sont significatives pour des particules fortement chargées et de diamètre supérieur à 50  $\mu\text{m}$ . Ces forces proviennent de l'interaction électrostatique produite par la charge électrique de la particule ou de la surface, appelées forces images ou forces coulombiennes.

Les forces de capillarité apparaissent lorsqu'un film liquide recouvre la surface de dépôt. Ce film liquide est généralement présent lorsque de la vapeur d'eau est présente dans l'air. La capillarité augmente l'attraction entre la particule et la surface. Les forces de capillarité dépendent de la taille de la particule ainsi que de la tension superficielle du film liquide.

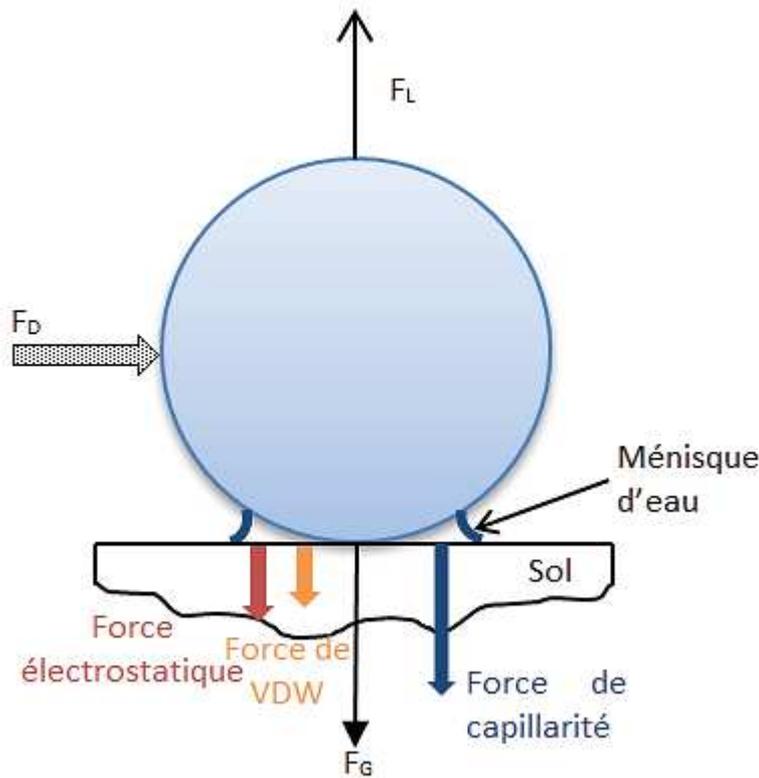
Pour des surfaces parfaitement lisses, dans une atmosphère contenant plus de 90% d'humidité, les forces de capillarité s'expriment par la relation suivante :

$$F_{cap} = 2\pi\Gamma d_p \quad \text{Équation 22}$$

Où  $\Gamma$  est la tension superficielle ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Pour des surfaces réelles, à des humidités relatives plus faibles, les forces de capillarité dépendent fortement de la courbure des aspérités au point de contact entre la particule et la surface. Les effets de capillarité ne sont plus négligeables lorsque l'humidité relative est supérieure à 70% et la surface est hydrophile et la particule hygroscopique. Une relation empirique existe pour exprimer la relation entre les forces d'adhérence globales, le diamètre de la particule (en mètre), et l'humidité relative du milieu (HR en %) (13) :

$$F_{adh} = 0,063d_p(1 + 0,009 HR) \quad \text{Équation 23}$$



**Figure 9 : Forces exercées sur une particule en contact avec une surface et soumise à un écoulement d'air ( $F_D$  étant la force de traînée,  $F_L$  la force de portance et  $F_G$  la force de gravité) (Illustration par interprétation de (13))**

Les forces décrites précédemment sont schématisées sur la Figure 9 ci-dessus. La force de gravitation est extrêmement faible devant les autres forces d'adhérence (pour des particules de diamètre inférieur à  $10 \mu\text{m}$ , elle est quatre fois plus faible que les forces de Van der Waals). La gravité n'intervient pas – ou est négligeable – pour des particules de diamètre inférieur à  $100 \mu\text{m}$ .

### I.3.5. Remise en suspension des particules

La remise en suspension d'une particule en interaction avec une surface est le résultat d'une compétition entre les forces d'adhérence et les forces aérodynamiques. Le coefficient de mise en suspension représente la quantité globale de matière qui a été mobilisée par l'écoulement durant un temps  $\Delta t$ . Il existe trois définitions de ce coefficient : la fraction réentraînée  $K_r$  (le rapport entre la quantité de particules mise en suspension  $\Delta m$  sur la quantité initialement déposée  $m_0$ ), le taux moyen de réentraînement  $T_r$  (le taux de débit massique avec lequel la matière est réentraînée) et le flux de réentraînement  $F_r$  (le débit massique de matière mise en suspension en moyenne durant la durée d'exposition, par unité de surface du dépôt initial s).

$$K_r = \frac{\Delta m}{m_0}, T_r = \frac{\Delta m}{m_0 \Delta t}, F_r = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot s} \quad \text{Équation 24}$$

La force verticale de portance joue un rôle important dans le détachement des particules. En effet, la mise en mouvement des particules se fait avec un angle proche de l'angle droit par rapport à la surface. La force de portance est fortement dépendante du diamètre des particules et de la vitesse de frottement de l'air sur les parois de l'enceinte considérée. À une vitesse donnée, plus une particule est grande plus sa probabilité d'être remise en suspension est importante. Une expression de la force de portance sur une particule sphérique en interaction avec une surface plane placée dans un écoulement transversal pour des petits nombres de Reynolds a été déterminée (14) :

$$F_L = 9,22 \left( \frac{\dot{\gamma}\mu}{4} d_p^2 \right) \left( \frac{\dot{\gamma}}{4\nu} d_p^2 \right) \quad \text{Équation 25}$$

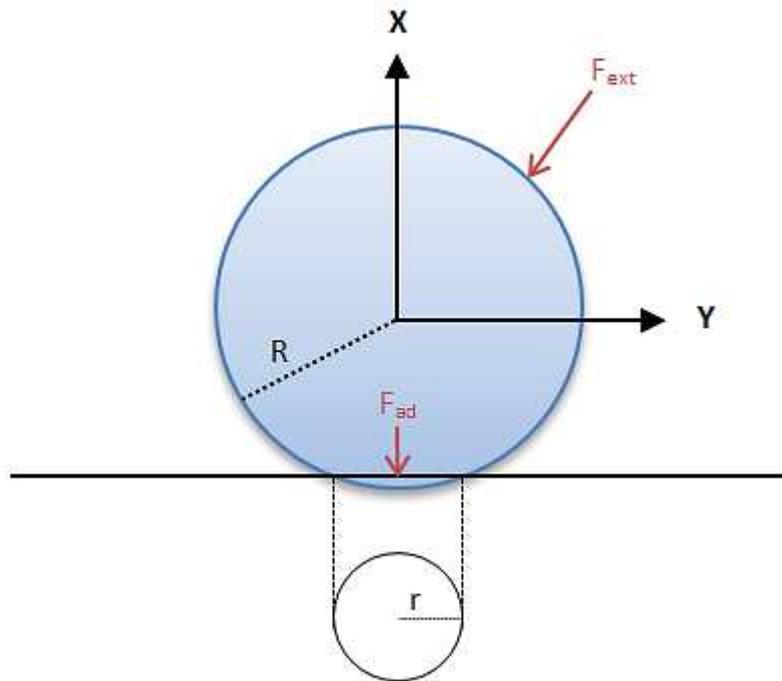
Où  $\dot{\gamma}$  représente le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ) de l'écoulement,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide (Pa.s) et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide porteur de l'écoulement ( $m^2.s^{-1}$ ).

Lorsqu'une particule est soumise à un écoulement d'air, une force résistante aérodynamique apparaît. Si la particule, considérée sphérique, est déposée sur une surface, la force de portance est verticale et la force de traînée est parallèle à la surface. Similairement à la force de portance, la force de traînée dépend du diamètre de la particule et de la vitesse de frottement de l'air. Lorsque l'écoulement est visqueux, la force de traînée s'exerçant sur une sphère en contact avec une surface plane s'exprime ainsi :

$$F_D = 6\pi \cdot \mu \cdot \dot{\gamma} \left( \frac{d_p}{2} \right)^2 f \quad \text{Équation 26}$$

Où  $f$  est la correction de la force de traînée de Stokes (égale à 1.7).

Le détachement d'une particule peut être de trois types (15) : par *lifting-off* (la composante normale de la force appliquée est supérieure aux forces d'adhésion qui retiennent la particule), par *sliding* (la composante tangentielle de la force appliquée est supérieure à la somme des composantes normales qui retiennent la particule multipliée par un coefficient de friction statique), ou par *rolling* (le moment total appliqué sur le bord du cercle de contact entre la particule et la surface est égal à zéro, la particule commence à rouler sur ce point et se détache de la surface). La Figure 10 ci-dessous représente de manière générale la force d'adhérence  $F_{ad}$  d'une particule de rayon  $R$  sur une surface (avec une aire de contact de rayon  $r$ ) et la force extérieure  $F_{ext}$  qui lui est appliquée.



**Figure 10 : Détachement d'une particule d'une surface.  $F_{ad}$  représente la force d'adhérence de la particule à la surface,  $F_{ext}$  représente la force extérieure appliquée à la particule**

Quel que soit le type de détachement, la force impliquée doit être supérieure à la force d'adhérence. La valeur absolue de la force d'adhérence n'est donc pas nécessaire pour déterminer l'importance relative de chaque type de détachement de la particule. Ainsi, on définit un paramètre de force  $F^*$  pour chaque type de mouvement. Ce paramètre sans dimension exprime le rapport entre la force critique extérieure nécessaire pour entraîner la particule et la force d'adhérence entre la particule et la surface. Les équations qui régissent les trois types de détachement sont les suivantes :

Lift-off  $F^* = -\frac{1}{\sin\theta}$  **Équation 27**

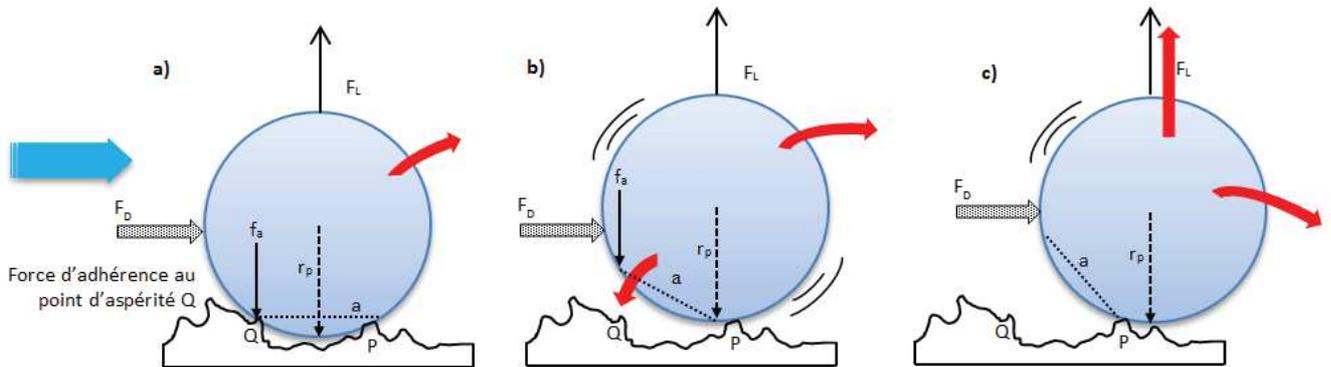
Slide (avec  $k$  le coefficient statique de friction)  $F^* = \frac{k}{(\cos\theta - k \sin\theta)}$  **Équation 28**

Rolling  $F^* = \frac{r/R}{(1 - \alpha/R)\cos\theta - (r/R)\sin\theta + \sin(\phi - \theta)}$  **Équation 29**

Le phénomène de *rolling* – également appelé rock'n roll – a été décrit précisément par Reeks et Hall (16). Il est le modèle de référence dans les cas de remise en suspension de particules sphériques. Les auteurs font rentrer dans un modèle à deux dimensions les aspérités de surface. La force de traînée  $F_D$  et la force de portance  $F_L$  sont prises en compte afin de traduire le mouvement

d'oscillation de la particule autour des points d'aspérités de la surface Q et P sur laquelle elle est posée (Figure 11). Les auteurs expriment le moment aérodynamique de portée-traînée  $\Gamma$  comme une fonction de la distance  $a$  entre deux aspérités et du rayon de la particule  $r_p$ .

$$\Gamma \approx \frac{a}{2} F_L + r_p F_D \quad \text{Équation 30}$$



**Figure 11 : Le modèle Rock'n Roll d'après Reeks and Hall décrit le mouvement de basculement/roulement d'une particule sphérique en contact avec deux points d'aspérité P et Q de la surface :**

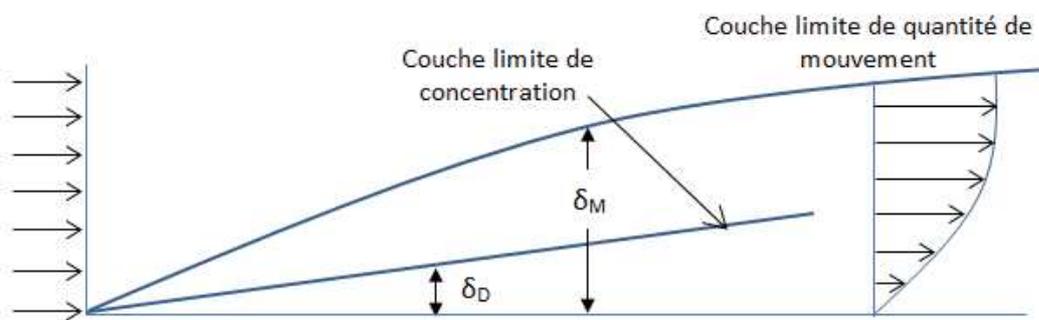
- a) la particule repose sur les deux points d'aspérités de la surface par l'action des forces adhésives;**
- b) un écoulement d'air entraîne la particule dans un mouvement d'oscillations autour du point P dues au couple traînée-portance  $\Gamma$  qui s'oppose au couple de forces adhésives qui tend à maintenir la particule sur la surface ;**
- c) la particule a accumulé suffisamment d'énergie rotationnelle pour briser le contact avec le point d'aspérité Q. Elle peut alors se soulever (si  $F_L > F_D$  – peu plausible) ou se mettre à rouler (si  $F_L < F_D$  – fort probable) après avoir brisé son contact avec P.**

Les phénomènes vibratoires sont une cause importante de la remise en suspension des particules. Différentes études portent sur l'effet des vibrations sur la remise en suspension des particules; celle réalisée par Tippayawong et Preechawuttipong (17) compare notamment l'influence de la force de traînée et de vibrations sur la mise en suspension de particules d'alumine déposées sur une plaque d'acier. Les calculs ont été réalisés avec des vitesses de frottement de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $10 \text{ m.s}^{-1}$  et  $50 \text{ m.s}^{-1}$ . Les vibrations imposées aux particules étaient de  $10 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $100 \text{ m.s}^{-2}$  et  $1000 \text{ m.s}^{-2}$ . Les résultats de cette étude montrent que, pour des particules d'alumine, les vibrations provoquent une remise en suspension uniquement pour les particules de diamètre supérieur à  $10 \mu\text{m}$ .

Le décollement des particules par un jet d'air est la méthode la plus usitée. La particule fixée à une surface se trouve dans la couche limite de l'écoulement aérodynamique, quelle que soit sa vitesse. Rappelons que près de la surface d'une paroi soumise à un flux gazeux, il existe deux couches limites : une couche limite de concentration et une couche limite de quantité de mouvements

(ou couche limite aérodynamique) (18). La Figure 12 décrit ces deux couches limites, avec  $\delta_M$  l'épaisseur de la couche limite de la concentration et  $\delta_D$  la couche limite aérodynamique.

La couche limite de concentration présente un gradient de concentration variant de 0 (sur la surface) à  $n_0$ , la concentration moyenne de particules dans l'aérosol. La couche limite aérodynamique présente un gradient de vitesse d'écoulement variant de 0 (sur la surface) à  $u_0$  au bord extérieur de la couche, avec  $u_0 = 0.99 u_\infty$ ,  $u_\infty$  étant la vitesse à l'extérieur de la couche. Il est établi que  $\delta_M$  est très supérieur à  $\delta_D$ ,  $\delta_D$  étant de l'ordre de quelques microns et  $\delta_M$  étant de l'ordre de plusieurs centaines de microns.



**Figure 12 : Définitions de la couche limite de concentration et de la couche limite de quantité de mouvement (ou couche limite aérodynamique) (18)**

Tel que le décrit le mouvement Rock'n Roll de Reeks et Hall, lors du détachement d'une particule par jet d'air, la particule est soumise à une force d'entraînement dont l'action s'oppose à celle d'adhésion. L'action de la force d'entraînement entraîne la particule, qui se met à glisser ou à rouler. La particule peut alors se loger à un endroit où la force d'adhésion est plus forte ou acquérir une certaine énergie cinétique lui permettant d'être arrachée. Il faut alors définir la notion de vitesse critique permettant le réentraînement de la particule. Cette vitesse critique dépend de la masse volumique de la particule et du diamètre de la particule. D'après l'étude réalisée par Guichard décrite dans l'ouvrage de Hidy (18) sur des particules de quartz déposées sur une plaque de verre, pour un jet d'air perpendiculaire à la plaque, les vitesses critiques varient de manière inversement proportionnelles au diamètre des particules. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 ci-dessous.

**Tableau 5 : Vitesse critique de réentraînement de particules de quartz déposées sur une plaque de verre**

<b>d (μm)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3,5</b>
<b>v critique (m/s)</b>	145	95	45

Les expériences menées par Corn et Stein (19) sur des particules sphériques de mica et de verre déposées sur des plaques de microscopie en verre confirment cette tendance. Il est donc admis que la vitesse critique de réentraînement augmente lorsque la taille des particules diminue. Par conséquent, plus la particule est fine, plus il est difficile de l'arracher par un courant d'air. D'autre part, la thèse d'Alloul-Marmor (20) démontre l'influence de l'épaisseur d'un dépôt de particules sur sa capacité à être remis en suspension par un écoulement d'air. En effet, une particule isolée aura plus de probabilité d'être remise en suspension dans l'air qu'une particule appartenant à un amas de plusieurs particules, de par les forces d'interaction interparticulaires et l'augmentation non-linéaire des forces d'adhérence avec la surface de contact. Un autre cas de remise en suspension des particules est la présence d'un opérateur en activité. Dans sa thèse, Mana explore en particulier l'influence de la marche d'un opérateur sur le phénomène de remise en suspension des dépôts de particules (21). L'auteur s'appuie sur le modèle du *rolling* développé par Reeks and Hall et propose notamment une corrélation entre le diamètre des particules et les forces d'adhésion grâce à des mesures par AFM<sup>4</sup> sur différents types d'interactions particules-surface. L'AFM permet d'obtenir une distribution des forces d'adhésion et démontre que celles-ci sont en réalité bien inférieures aux valeurs théoriques obtenues par le modèle développé par Johnson *et al* (22). La corrélation proposée montre que plus la taille des particules augmente, plus la moyenne des forces d'adhésion diminue. Elle améliore ainsi la corrélation proposée par Biasi *et al.* (23) en incluant d'avantage de conditions telles que la nature et la rugosité de la surface ainsi que la nature et la taille des particules. La Figure 13 trace l'évolution des probabilités d'occurrence des forces d'adhésion en fonction des valeurs de ces forces normalisées pour des particules d'alumine de différents diamètres. Mana attribue la diminution des forces d'adhésion à la diminution de surface de contact entre la particule et la surface, réduisant de fait les forces d'adhésion. Pour les particules de 5  $\mu\text{m}$ , une comparaison est réalisée avec la corrélation proposée par Biasi, montrant ainsi que les valeurs des forces d'adhésion sont plus élevées dans le calcul de Biasi.

---

<sup>4</sup> L'AFM ou Microscope par Force Atomique est un microscope à sonde locale permettant de visualiser la topographie de la surface d'un échantillon et de réaliser la cartographie locale des grandeurs physiques caractéristiques de l'objet sondé

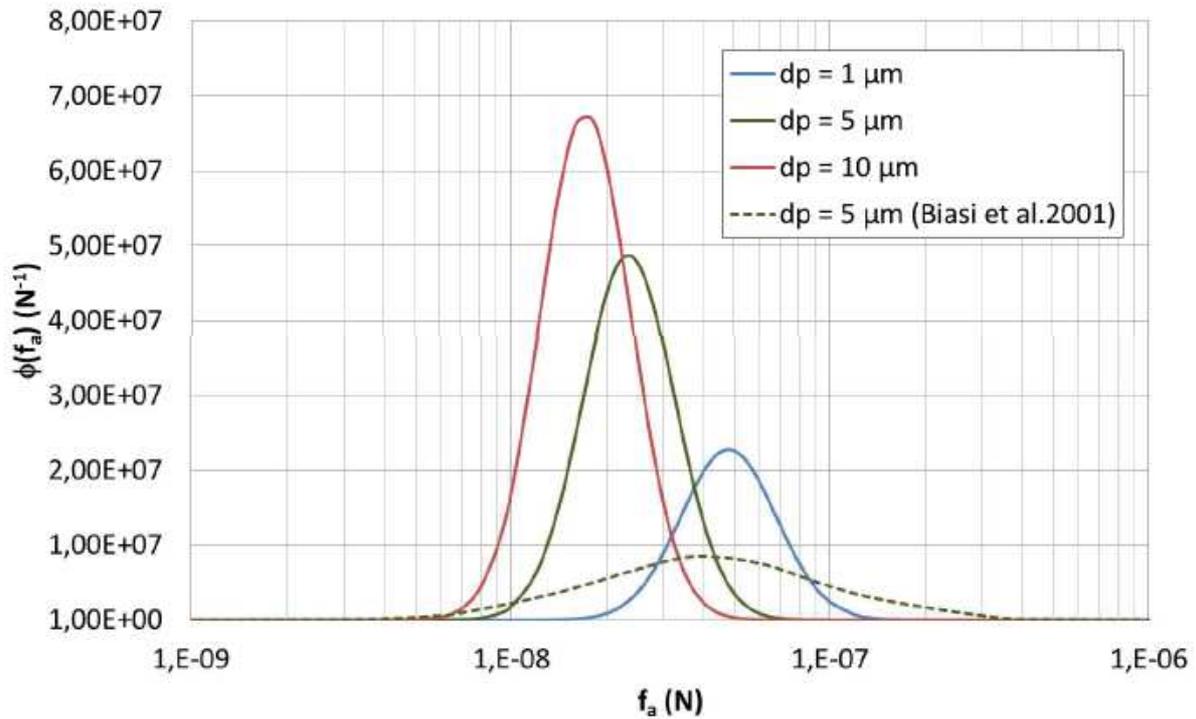


Figure 13 : Distributions log-normales des forces d'adhésion pour des particules d'alumine sur une surface époxy (21)

### I.3.6. Modélisation des aérosols

De nombreux modèles théoriques ou semi-empiriques ont été développés afin de pouvoir quantifier, anticiper et expliquer la sédimentation particulaire dans une enceinte. L'objectif de cette partie est de démontrer les limites de la modélisation des dépôts particulaires. Le but in fine est d'établir le besoin d'une instrumentation temps-réel pour la détection de la contamination surfacique.

La modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé a été étudiée par Philippe Nerisson dans le cadre de sa thèse (24). Les sous-parties 1 à 3 décrivent les trois modèles principaux. Le premier type de modélisation (sous-parties 1 et 2) décrit la turbulence de l'air à proximité des surfaces et le transport des particules dû à la gravitation, la diffusion et autres mécanismes de dépôt. Le point clé de cette approche est de comprendre le comportement de la particule dans le domaine de proche-paroi. Le second type de modélisation (sous-partie 3) applique l'analogie entre les transferts de masse et le taux de dépôt des particules sur une surface dû à la diffusion. Ces trois modèles voient leurs limites apparaître pour des particules supérieures au micron, lorsque les mécanismes de transport de la particule deviennent plus complexes notamment à cause de la dérive due à l'inertie de la particule en mouvement.

### I.3.6.1. Modèle de la turbulence homogène

La modélisation de la sédimentation particulaire dans un flux turbulent a été initiée dès les années 1950. Corner and Pendlebury ont développé le premier modèle théorique permettant de décrire la sédimentation de particules, dans un endroit clos où l'air est homogènement turbulent, sur des surfaces horizontales ou verticales (13). Leur modèle se base sur six hypothèses: (1) l'air est turbulent de manière homogène et la concentration en particules de l'aérosol est uniforme dans toute la pièce, exceptée dans la couche limite; (2) dans la couche limite d'épaisseur  $\delta$ , le fluide est turbulent avec des fluctuations aléatoires tout en considérant que le mouvement moyen du fluide est parallèle à la surface; (3) le gradient de vitesse du fluide est linéaire au sein de la couche limite; (4) seuls les mécanismes de transport par gravitation et diffusion brownienne/turbulente sont responsables du transport des particules jusqu'à la couche limite; (5) la diffusion turbulente prédomine sur la diffusion brownienne au bord de la couche limite; et (6) le transport de la particule est quasi-stable au sein de la couche limite. La concentration en particules de l'aérosol au sein de la couche limite est modélisée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ (\varepsilon_p + D) \frac{dC}{dy} \right] - v_{ts} k \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \text{Équation 31}$$

Où  $v_{ts}$  est la vitesse de sédimentation des particules,  $\varepsilon_p$  le coefficient de diffusion de la particule et  $k$  est le vecteur unité normal dans la direction verticale. Le premier terme représente le processus de diffusion brownienne/turbulente tandis que le second terme représente l'effet de la gravitation sur la sédimentation. Les conditions aux limites applicables à l'expression ci-dessus sont :

$$C = 0 \text{ à } y = 0$$

$$C = C_\infty \text{ à } y \geq \delta$$

Où  $C_\infty$  est la concentration en particules en dehors de la couche limite. La diffusivité de la particule peut être définie approximativement par la théorie de Prandtl :

$$\varepsilon_p = k_e y^2 \quad \text{Équation 32}$$

Où  $k_e$  est le paramètre définissant l'intensité de la turbulence dans l'enceinte. Ce paramètre est défini de manière empirique par rapprochement de données expérimentales et de la théorie donnée par Corner et Pendlebury :

$$k_e = K \frac{dU}{dy} \quad \text{Équation 33}$$

Où  $K$  est la constante de Von Kármán (usuellement égale à 0.4) et  $U$  est la composante de la vitesse moyenne du flux tangentielle à la surface.

Les conclusions de ce modèle indiquent que, dans une enceinte où les surfaces sont orientées uniquement verticalement ou horizontalement, les processus de transport des particules par gravitation ou par diffusion peuvent être traités indépendamment en sommant les vecteurs de vitesses dues à la force de gravitation d'une part, et à la force de diffusion d'autre part. Pour des surfaces inclinées les deux mécanismes sont intimement liés.

Crump et Seinfeld (25) étendent ce modèle afin d'obtenir la vitesse de sédimentation de la particule sur une surface orientée avec un angle  $\theta$  ( $n$  est un nombre obtenu en adaptant empiriquement les données expérimentales):

$$v_d(\theta) = \frac{v_{ts} \cos \theta}{\exp \left[ \frac{\pi v_{ts} \cos \theta}{\left( n \sin \frac{\pi}{n} \right)^n \sqrt{k_e \varepsilon_p^{n-1}}} \right] - 1} \quad \text{Équation 34}$$

Les limites de ce modèle apparaissent lorsqu'il existe une différence de température entre l'air et la surface, particulièrement lorsque la taille des particules devient supérieure à 1  $\mu\text{m}$ .

### 1.3.6.2. Modèle des trois couches

Le modèle proposé par Lai et Nazaroff (8) permet d'évaluer la sédimentation de particules dans une atmosphère uniformément turbulente. Le seul paramètre requis est la vitesse de friction  $u^*$  qui permet d'incorporer au modèle la diffusion turbulente au niveau de la proche-paroi. La vitesse de friction est définie par :

$$u^* = \left( \frac{\tau_w}{\rho_a} \right)^{1/2} = \left( \nu \frac{dU}{dy}_{y=0} \right)^{1/2} \quad \text{Équation 35}$$

Où  $\tau_w$  est la contrainte de cisaillement à la surface,  $\rho_a$  est la densité de l'air et  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'air. Le paramètre  $u^*$  représente les caractéristiques turbulentes du flux au voisinage de la surface.

La loi du mur (« *law of the wall* ») définit la couche limite turbulente en distinguant trois gammes de vitesse de friction en fonction de la distance à la surface. L'approche utilisée par Lai et Nazaroff est d'examiner la structure du flux turbulent zone par zone et de formuler les équations de transport pour chaque zone (8). Leurs hypothèses sont les suivantes: (1) les processus de sédimentation dépendent de la gravitation et de la diffusion Brownienne et turbulente; (2) la concentration en particules dans le flux au sein de la couche limite est constante; (3) la diffusivité turbulente de la particule est représentée par la viscosité turbulente du fluide; et (4) les effets de surface liés à la rugosité sont négligeables. La vitesse de sédimentation est ainsi évaluée zone par

zone, pour des surfaces orientées verticalement et horizontalement (vers le haut et vers le bas). Les équations et leurs corrélations avec les mesures expérimentales sont regroupées dans l'ouvrage de Kohli et Mittal (7). Des contradictions entre la théorie et les observations expérimentales sont relevées pour des particules de taille supérieure au micron. Les auteurs attribuent ces inadéquations à l'inertie de la particule et aux forces de cisaillement qui deviennent plus importantes pour des particules de grande taille.

### **1.3.6.3. Modèle du transfert de masse**

La vitesse de dépôt d'une particule peut être analogue à un transfert de masse. En suivant cette analogie, Pandian et Friedlander (26) proposent une expression semi-empirique du transfert de masse afin d'estimer le taux de sédimentation d'une particule due à la diffusion Brownienne et turbulente. La corrélation de Sherwood-Reynolds-Schmidt est utilisée afin d'obtenir l'expression suivante du taux de dépôt :

$$\beta = a \frac{D}{D_c} \frac{S}{V} Re^{2/3} Sc^{1/3} \quad \text{Équation 36}$$

Où  $a$  est une constante,  $D$  est la diffusivité de la particule ( $m^2.s^{-1}$ ),  $D_c$  est le diamètre de l'enceinte (en la supposant sphérique),  $S$  et  $V$  sont respectivement la surface intérieure et le volume de l'enceinte,  $Re$  est le nombre de Reynolds et  $Sc$  est le nombre de Schmidt de la particule égal à  $v/D$  ( $v$  étant la viscosité cinématique du fluide dans l'enceinte).

Des déviations entre la théorie et les mesures expérimentales sont également observées dans ce modèle, notamment pour des particules de taille supérieure à  $0.1 \mu m$  où dans le cas d'une forte turbulence du fluide.

## **1.3.7. Paramètres influençant le taux de sédimentation des particules**

### **1.3.7.1. Influence des caractéristiques des particules sur leur sédimentation**

La notion de diamètre aérodynamique décrite dans la partie 1.2.2.1 et appliquée dans la littérature implique la prise en compte de la forme et de la densité des particules. En effet, outre leur taille, deux autres paramètres principaux caractérisent une particule : son facteur de forme et sa composition. Les particules étant le plus souvent assimilées à des sphères, il existe peu d'études qui permettent d'étudier l'influence de la morphologie de la particule au contact d'une surface.

Corn (27) observe que la force d'adhérence de fibres à bouts sphérique est plus grande que celle de fibres à bouts différents. En effet, la surface de contact des fibres à bout sphérique étant plus grande, la force d'adhérence est plus importante. Zimon (28) compare les forces d'adhérence pour

des particules de différentes formes de diamètre compris entre 20 et 40  $\mu\text{m}$ . Il observe également que les particules sphériques adhèrent plus à la surface, ce qui semble appuyer le fait que le facteur de forme a une influence sur l'adhérence de la particule. L'influence de ces paramètres est rarement étudiée dans le domaine de la contamination particulaire.

Dans son étude, Okuyama et son équipe (29) réalisent une expérience qui leur permet d'affirmer que la composition de la particule n'affecte pas sa sédimentation. Cette affirmation est relayée dans l'ouvrage co-écrit par Kohli et Mittal (7).

### 1.3.7.2. Influence des caractéristiques de la surface sur la sédimentation de particules

Une surface est caractérisée par sa texture, ses propriétés mécaniques et ses propriétés physico-chimiques. L'annexe A de la norme ISO 14644-9 décrit les différentes caractéristiques d'une surface.

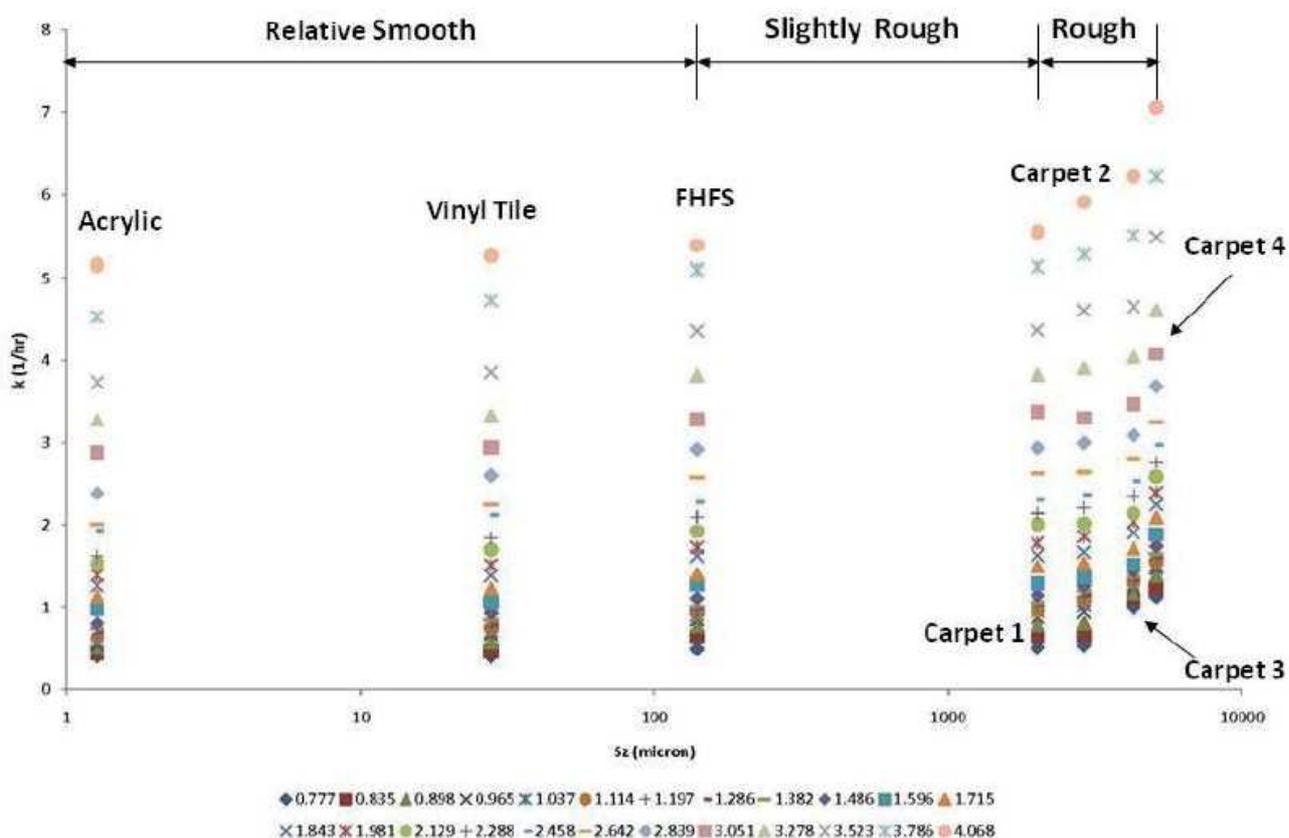


Figure 14 : Évolution de la constante  $k$  du taux de dépôt des particules en fonction de leur taille et du type de surface;  $S_z$  représente le coefficient de rugosité de la surface (30)

La texture d'une surface est définie par sa rugosité et sa porosité. La rugosité d'une surface n'est pas une propriété du matériau constitutif de la surface (elle dépend du traitement de la surface), contrairement à la porosité. Elle décrit les défauts micro-géométriques de la surface réelle. La porosité est une mesure des espaces vides du matériau constituant la surface. Elle s'exprime en

pourcentage (entre 0% et 100%). La texture d'une surface aura une influence sur l'efficacité de retrait des particules lors du nettoyage de la surface ou sur la remise en suspension des particules. L'effet de la rugosité d'une surface a été très largement étudié par Shaojie Wang (30) pour des particules de diamètre compris entre 0.723 et 5.048  $\mu\text{m}$  (avec 28 tailles différentes). Les différentes surfaces testées sont l'acrylique comme surface lisse de référence, un plancher en bois, des carreaux de vinyle et quatre tapis avec des textures différentes. La Figure 14 synthétise les résultats de Shaojie Wang. Deux résultats majeurs ressortent de cette figure. Tout d'abord, la constante  $k$  représentative du taux de dépôt augmente avec la taille des particules. Ensuite, en ce qui concerne l'influence de la rugosité de la surface, les résultats sont présentés en trois colonnes : les surfaces lisses, les surfaces relativement rugueuses et les surfaces rugueuses. Il est observé une légère augmentation du taux de dépôt avec l'augmentation du coefficient de rugosité  $S_z$ .

La propriété mécanique d'une surface qui influence la sédimentation des particules est la dureté. La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple une bille ou une pointe de diamant. Concernant la détection de particules sédimentées, il est important de remarquer que plus la porosité est élevée plus il sera difficile de différencier une particule d'un défaut de surface.

Enfin, les propriétés physico-chimiques d'une surface sont la charge électrostatique et la tension superficielle. La charge électrostatique d'une surface est due à un déséquilibre d'électrons. La décharge électrostatique est définie comme le transfert de charges entre des corps à des potentiels électriques différents. Les surfaces chargées peuvent attirer et retenir des contaminants particuliers. La tension superficielle est une énergie par unité de surface (exprimée en joules par mètres carrés) dont l'origine est la force de cohésion entre molécules identiques. L'état de tension superficielle influence l'attraction et le détachement des particules. Les propriétés hydrophiles ou hydrophobes de la surface influencent son état de tension superficielle.

### **1.3.7.3. Influence de l'orientation de la surface sur la sédimentation de particules**

L'orientation de la surface de sédimentation est une caractéristique influençant le dépôt de la particule. On distingue trois types d'orientation : la surface horizontale orientée vers le haut (sol, surfaces de travail), la surface horizontale orientée vers le bas et la surface verticale. La gravitation est responsable de la sédimentation sur les surfaces horizontales orientée vers le haut (plus le diamètre de la particule augmente, plus le taux de dépôt augmente) tandis que les diffusions Brownienne et turbulente sont prédominantes dans la sédimentation des particules sur les surfaces horizontales orientées vers le bas et les surfaces verticales (plus le diamètre de la particule diminue,

plus le taux de dépôt augmente). Le Tableau 6 montre les résultats d'une étude réalisée par Byrne et al. (31) en 1995. La technique NAA (Neutron Activation Analysis) a été utilisée pour mesurer la masse de particules déposée sur les surfaces horizontales (orientées vers le haut) ou verticales d'une enceinte cubique de 8 m<sup>3</sup>. Plus la taille des particules augmente, plus celles-ci ont tendance à se déposer sur les surfaces horizontales. L'étude réalisée par Thatcher et al. confirme ces résultats (32).

**Tableau 6 : Contributions relatives des flux de dépôt des particules en fonction de leurs diamètres, déterminées expérimentalement pour des surfaces horizontales et verticales (31)**

Taille des particules (µm)	Flux sur une surface horizontale orientée vers le haut	Flux sur une surface verticale	Vitesse moyenne de dépôt (m.s <sup>-1</sup> )
0,7	57%	9%	4,1 × 10 <sup>-5</sup>
2,5	68%	8%	6,2 × 10 <sup>-5</sup>
4,5	72%	7%	1,1 × 10 <sup>-4</sup>
5,4	80%	5%	2,0 × 10 <sup>-4</sup>

### I.3.7.1. Influence du milieu environnant

Les caractéristiques du milieu environnant jouent également un rôle dans la sédimentation des particules. Tout d'abord, l'humidité du flux influence les forces d'adhérence. Corn (27) observe expérimentalement que lorsque l'humidité relative est supérieure à 60%, la force d'adhérence entre des particules de verre de diamètre compris entre 20 et 60 µm et une surface de quartz augmente de manière notable. En effet, une forte humidité relative favorise l'apparition de forces de capillarité favorisant l'adhérence de la particule sur une surface. Corn observe également de façon expérimentale, que l'influence de l'humidité relative sur la force d'adhérence, est plus significative pour des grosses particules. Il explique ce phénomène par le fait que les petites particules retiennent l'humidité adsorbée à l'interface de contact et ne s'adaptent pas aussi rapidement que les grosses particules aux changements de conditions de l'air ambiant. Cet effet a également été mesuré par Wu *et al.* (33).

Ensuite, la température de la surface de dépôt peut influencer les forces d'adhérence en modifiant les tensions de surface du film liquide créé par le phénomène d'adsorption, ou les liaisons viscoélastiques entre les aspérités mettant les surfaces des solides (particules – surface) en contact.

## **I.4. La contamination particulière dans le domaine du spatial**

### **I.4.1. Intérêt de la compréhension des phénomènes de sédimentation des particules**

L'industrie spatiale rassemble de nombreux domaines d'expertise, où la contamination est un phénomène critique : optiques, composants électroniques, panneaux solaires, surfaces de contrôle thermique. La miniaturisation des composants et l'exigence de précision envers les éléments critiques nécessitent de réaliser des environnements propres pour les protéger de la contamination. Pour les composants micro-électroniques, la maîtrise de la contamination permet d'aboutir à un produit plus fiable. Pour les surfaces sensibles optiques, l'effet indésirable de la contamination est l'obscurcissement de surface engendrant une dégradation des performances. Le contrôle de la contamination est essentiel durant toutes les phases de la vie d'un satellite : conception, fabrication, assemblage, test, intégration, stockage, transport, lancement, opérations en orbite.

Nous avons vu précédemment que la contamination est décomposée en trois grands groupes : la contamination particulière, la contamination moléculaire et la contamination biologique. L'industrie spatiale décompose la contamination de la même manière, imposant de fortes contraintes dans le choix des matériaux, des procédés de fabrication et d'assemblage. En outre, la forte exigence liée à l'environnement agressif de l'espace rajoute de la complexité à l'ensemble du processus de contrôle de la contamination. La Figure 15 rassemble les différentes contraintes auxquelles est soumis un satellite en orbite. En effet, dans l'environnement spatial, de nombreuses contraintes sont à prendre en compte dans la conception de nouvelles technologies destinées à cet environnement. Il s'agit d'un environnement extrêmement sévère, en particulier pour les optiques, les composants électroniques, les matériaux, les mécanismes et leur lubrification.



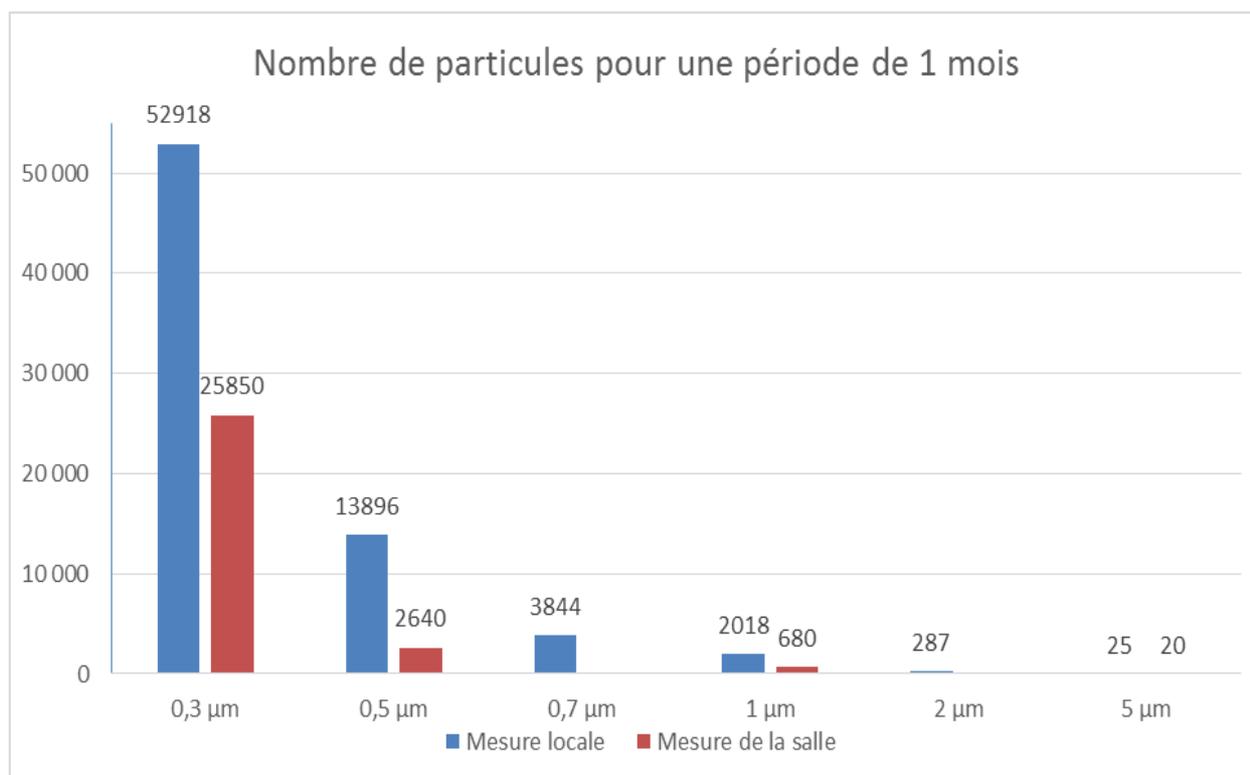
Figure 15 : Les différentes contraintes de l'environnement spatial (CNES©)

#### I.4.2. Les risques de contamination particulaire pendant les phases d'intégration au sol

Le cadre de ces travaux est fixé à la contamination des satellites pendant leur intégration au sol, en salle propre ou en containers propres pour le transport jusqu'à la base de lancement. Pendant cette phase au sol, la température et l'humidité sont régulés (température entre 20 et 25°C, humidité entre 40 et 55%). Par précaution, les satellites sont prévus pour résister à des températures jusqu'à 60°C. En revanche, il peut exister des effets locaux de gradients de température lors des tests réalisés sur le satellite. Ces effets peuvent provoquer des redistributions particulaires, de la même façon que les vibrations générées pendant les phases de transport. Il est donc extrêmement important de maîtriser la contamination particulaire de l'ensemble des sous-systèmes composant le satellite.

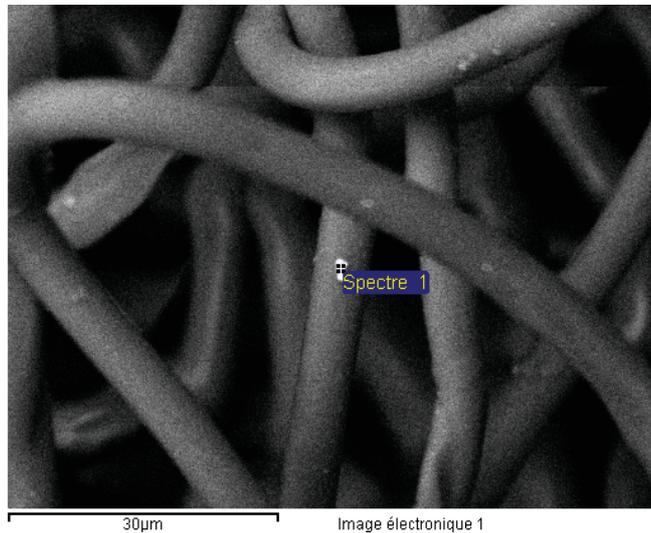
La Figure 16 ci-dessous représente une mesure cumulative du nombre de particules pendant un mois, réalisée avec deux compteurs volumique particulaire. Le fonctionnement de ce type de compteur sera décrit dans la partie II.2.6.2. Un des compteurs est placé au plus près des activités d'intégration (« mesure locale ») tandis que l'autre mesure est réalisée par le compteur volumique de la salle propre (« mesure de la salle »). L'intégration des satellites génère de nombreuses particules, de par les activités qui y sont menées et de par la présence d'opérateurs. Ce constat se traduit sur la figure 16 par un nombre de particules bien plus important localement qu'au niveau du compteur de la salle. D'autre part, ce graphique montre une décroissance du nombre de particules lorsque leur taille

augmente (il est à noter que le compteur de la salle ne mesurait pas les particules de diamètre de 0,7  $\mu\text{m}$  et de 2  $\mu\text{m}$ ).

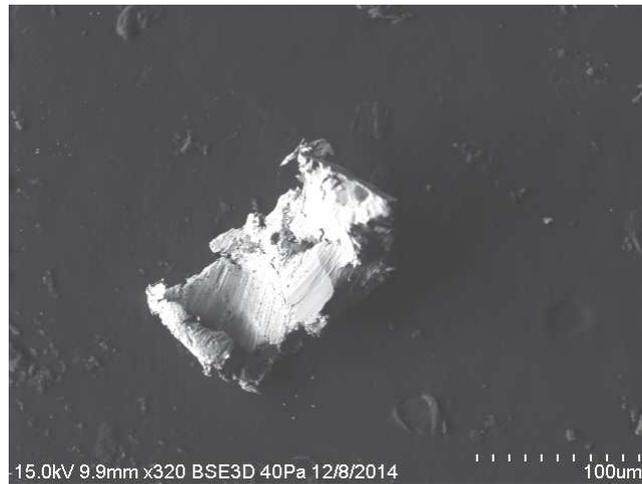


**Figure 16 Mesure cumulative du nombre de particules prélevées par des compteurs volumique particulaire pendant un mois, répartition en fonction du diamètre des particules (de 0,3 à 5  $\mu\text{m}$ )**

Vis-à-vis des particules présentes dans les salles d'intégration, leur nature est directement liée aux activités qui y sont menées. Des prélèvements effectués à proximité de zones critiques ont montré la présence de particules composée de chlorure de sodium (contamination liée à l'homme) tel que le montre l'analyse EDX réalisée sur la particule observée par MEB sur la Figure 17. Sont également retrouvées des particules métalliques (Figure 18) et des particules provenant de polymères, directement liées aux opérations réalisées sur le satellite (assemblage mécanique, sertissage, collage, etc.). L'étude des sources de contamination est approfondie dans la partie suivante.



**Figure 17 Analyse EDX de particules prélevées sur tissu fibreux montrant la présence de chlorure de sodium dans les salles d'intégration**



**Figure 18 Image MEB d'une particule métallique prélevée en salle d'intégration de satellites**

### **I.4.3. Effets de la contamination particulaire sur les surfaces sensibles**

#### **I.4.3.1. Étude des sources de contamination tout au long de la vie du satellite**

Les particules qui font l'objet de cette étude peuvent être de trois types. Celles d'origine humaine sont principalement composées de carbone, de sodium, de chlore et de fluor. Les particules métalliques sont essentiellement de l'aluminium, du fer et du cuivre. Enfin, les particules minérales sont généralement composées de silicium et d'oxygène ( $\text{Si}_x\text{O}_y$ ). Dans l'étude des sources de

contamination, on distingue trois périodes dans la vie du véhicule spatial : les sources au sol, les sources au lancement et les sources en orbite.

Au sol, il existe de nombreuses sources de contamination : les personnes, l'environnement, les équipements, les moyens de stockage, le transport. La plupart de ces contaminants peuvent être éliminés grâce à un système de filtration.

Au lancement, lors des opérations de propulsion ou de contrôle d'altitude, la contamination est due à une redistribution des particules. Les particules ayant sédimenté durant les différentes phases au sol de la vie du système spatial peuvent être redistribuées durant le lancement ou la vie en orbite. En effet, les forces mises en jeu sont très importantes : poussée du système de propulsion, accélération, vibrations, etc. Elles peuvent provoquer une remise en suspension des particules sédimentées. Actuellement, il n'existe pas de moyen de mesure en temps réel de la contamination particulaire surfacique intégré dans les systèmes spatiaux.

En orbite, la contamination est liée à l'environnement spatial : débris orbitaux, micrométéorites, redistribution de particules chargées, etc.

Au sein de ces différentes phases, la contamination particulaire est inhérente au milieu. Elle peut également être inhérente aux matériaux lorsque les particules proviennent des processus de fabrication et de manipulation de matériaux fragiles (comme les peintures), des produits de corrosion et des paillettes d'écaillage suite à des cycles thermiques, des produits de dégradation des liants suite à l'attaque par l'oxygène atomique ou à une transformation par les ultra-violet.

Ainsi que nous l'avons vu au début de ce chapitre, la contamination est définie en fonction de l'effet indésirable provoqué sur l'objet contaminé. Cette partie a donc pour objectif d'énumérer de manière non exhaustive les différentes conséquences que la contamination particulaire peut avoir en fonction de la surface touchée. Les différentes surfaces sensibles à la contamination d'un satellite sont les surfaces optiques, les surfaces de contrôle thermique, les panneaux solaires, les micro-capteurs et les micro-mécanismes. Il est très important d'identifier les sources de contaminants et de mesurer le taux de contamination afin de pouvoir en déduire les principaux effets sur l'équipement d'un véhicule spatial. Suivant l'élément du véhicule spatial qui est contaminé, les contaminants critiques sont différents et les effets indésirables plus ou moins critiques. De manière générique, une particule sur une surface dévie les rayons lumineux de leur chemin initial (tel que représenté sur la Figure 19) et modifie la fonctionnalité de la surface contaminée.

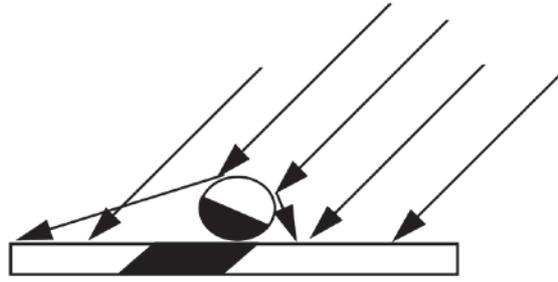


Figure 19 : Effet d'une particule sur une surface soumise à un rayonnement

#### 1.4.3.2. Effets des particules sur les surfaces réfléchissantes

Il existe trois types de surfaces réfléchissantes sur un véhicule spatial : les miroirs, les baffles et les surfaces de contrôle thermique.

Généralement, les particules ont une absorption relativement plus élevée que celle des miroirs. La présence de particules sur un miroir aura donc pour conséquence une diminution de l'intensité du signal renvoyé vers l'élément optique suivant. La proportion de perte d'intensité du signal est proportionnelle à la surface obscurcie par les particules (34).

Les baffles, ou déflecteurs coniques, sont des éléments sensibles présents à l'intérieur d'un instrument optique. Ils permettent d'éviter la diffusion de lumière parasite. La présence de particules sur la surface des baffles réduit leur performance car le rayonnement incident va être diffusé par les particules au lieu d'être complètement absorbé.

La présence de particules sur une surface de contrôle thermique altère ses propriétés d'absorption ou d'émission des rayons solaires (35). Comme pour les miroirs, les particules ont une capacité d'absorption des rayons solaires relativement plus élevée que celle des surfaces de contrôle thermique. Ceci a pour conséquence d'empêcher une fraction de la lumière d'atteindre le radiateur. Les rayons solaires absorbés par les particules provoquent une augmentation de leur température d'équilibre, qui sera alors plus élevée que celle de la surface. Les particules émettent alors des rayonnements qui conduisent une quantité de chaleur vers la surface supérieure à la quantité reçue. Par conséquent, la température d'équilibre de la surface de contrôle thermique augmente également. Le changement d'absorption solaire due à la présence de particules est donné par le calcul suivant :

$$\alpha_s^x = \alpha_s + \Delta\alpha_s = \alpha_{s,surf} (1 - PAC) + \alpha_{s,part} (PAC) \quad \text{Équation 37}$$

$$\text{Où } \Delta\alpha_s = PAC (\alpha_{s,part} - \alpha_{s,surf})$$

Avec  $\alpha_{s, surf}$  et  $\alpha_{s, part}$  le coefficient d'absorption de la surface et des particules respectivement et PAC le pourcentage de la surface qui est couverte par des particules. Un calcul identique peut être effectué pour le calcul du changement d'émissivité.

### I.4.3.3. Effets des particules sur les surfaces de transmission

Il existe deux grands types de surfaces de transmission : les panneaux solaires et les surfaces optiques de transmission.

L'obscurcissement de surface par des particules sédimentées sur des panneaux solaires a des conséquences importantes uniquement aux longueurs d'ondes concernées (approximativement entre 0.4 et 1.1  $\mu\text{m}$ ). La perte de puissance d'un panneau solaire n'est pas égale au PAC des particules, comme le montre la Figure 20 ci-dessous (36). La dégradation est inférieure à celle attendue en cas d'égalité. L'effet de particules sédimentées sur la surface d'un panneau solaire dépend de leur répartition surfacique : l'effet est moins important dans le cas où une seule cellule est touchée par la contamination que si plusieurs cellules sont partiellement touchées. Ceci est dû au fait que la présence de particules sur une surface impose une charge résistive à la cellule contaminée.

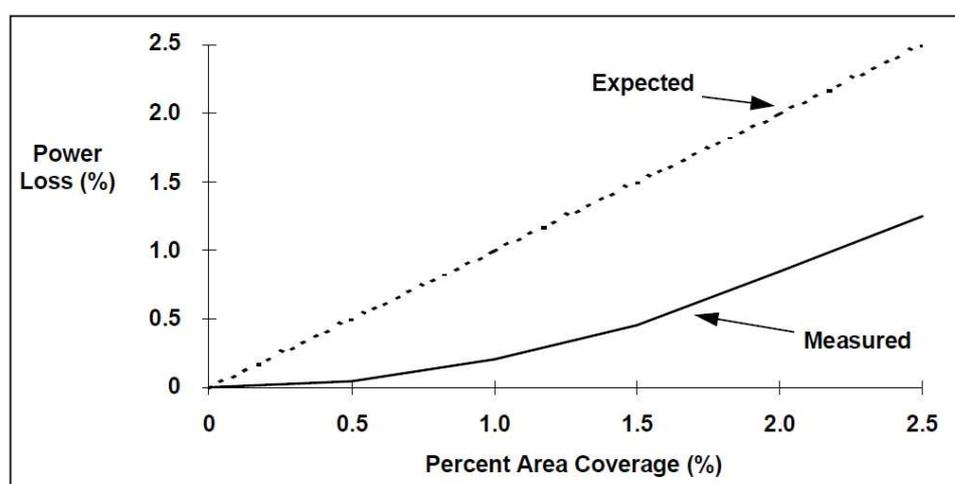


Figure 20 : Perte de puissance d'un panneau solaire due à l'obscurcissement par des particules sédimentées

Pour les éléments optiques de transmission, les effets de la contamination particulaire sont identiques à ceux sur les miroirs. L'intensité du signal est réduite proportionnellement au PAC des particules. La différence critique est que ces éléments optiques sont généralement placés après un miroir. Le signal collecté sur une grande surface (le miroir) est alors focalisé sur une bien plus petite surface. Ceci a deux conséquences majeures. Premièrement, la focalisation du signal entraîne une augmentation de son intensité. L'absorption des particules sera donc supérieure. Deuxièmement, la surface critique étant plus petite, même les particules inférieures à 5  $\mu\text{m}$  de diamètre porteront préjudice à la surface. D'autre part, les plus petites particules sont de taille comparable aux longueurs

d'onde reçues, ce qui provoque une diffusion de la lumière et peut venir endommager des pixels n'ayant pas été directement contaminés.

## I.5. Conclusion du chapitre I

Ce premier chapitre a abordé les notions d'aérosol, de particules et de sédimentation ainsi que les différents aspects de l'environnement spatial et les conséquences de la présence des particules sur les différentes surfaces d'un système spatial. L'ensemble des concepts décrits représente une base essentielle à la compréhension des enjeux de la métrologie des salles propres. La science des aérosols a débuté il y a plusieurs décennies, ouvrant ainsi la voie à la construction de salles propres de plus en plus performantes. Rappelons que l'objectif de ces salles propres est d'offrir aux technologies critiques un haut degré de maîtrise de l'environnement, principalement pour ce qui est de la propreté mais également pour la température, la pression et l'hygrométrie. Le but est de pouvoir garantir la fiabilité des produits sensibles à la contamination et aux caractéristiques de l'environnement durant leur construction. Dans le domaine du spatial, les enjeux sont d'autant plus critiques que les satellites ne sont plus accessibles après le lancement. Toute détérioration d'un ou plusieurs sous-systèmes du satellite a donc un caractère irréversible. Cette particularité exige une parfaite maîtrise de l'environnement d'assemblage, de test et de transport du satellite. D'autre part, il est important de souligner que les exigences de l'industrie sont de plus en plus fortes. Notamment, des particules de plus en plus petites sont considérées comme critiques, avec des concentrations ne permettant plus de se reposer sur un savoir-faire établi en matière de nettoyage et de filtration de l'air de l'environnement contrôlé. Les industries de la micro-électronique et de l'optique sont celles qui injectent des contraintes de plus en plus fortes dans la maîtrise de la contamination. Par conséquent, le besoin d'avoir des moyens de mesure et de contrôle de la contamination particulaire s'accroît. En effet, il est primordial de pouvoir garantir à tout moment que les technologies sensibles respectent le cahier des exigences quant à la propreté des surfaces.

Le chapitre suivant a pour objectif de présenter l'état actuel de la métrologie de la contamination particulaire. La distinction entre la contamination particulaire volumique et la contamination particulaire surfacique sera établie. En effet, alors que les technologies des salles propres se focalisaient essentiellement sur la quantité de particules dans l'air, les exigences grandissantes des industries imposent aujourd'hui de maîtriser la quantité de particules qui se déposent sur les surfaces critiques.



## II. ÉTAT DE L'ART DES MOYENS DE MESURE DE LA CONTAMINATION PARTICULAIRE

---



## II.1. Introduction

Les salles propres sont principalement contrôlées en termes de contamination particulaire aéroportée. Cela signifie que les mesures de propreté sont réalisées en fonction de la quantité de particules présentes dans l'air. Nous verrons dans ce chapitre le principe d'une telle mesure, appelée ici mesure de la contamination volumique. Cependant, se focaliser uniquement sur les particules aéroportées présente des limites. En effet, hormis dans le milieu de la santé où les particules peuvent être inhalées, uniquement les particules sédimentées sont critiques pour l'industrie.

Depuis quelques années, le besoin de mesurer la propreté des surfaces est de plus en plus important. Par exemple, l'étude des normes ISO 14644 (3) (4) dans le chapitre précédent a permis de montrer l'intérêt grandissant de la communauté pour mesurer non plus uniquement la contamination volumique, mais également la contamination surfacique. Il devient alors légitime de se demander s'il existe une corrélation entre ces deux types de contamination, ce point sera étudié au cours de ce chapitre. En outre, il est proposé une étude des différents moyens de mesure de la contamination particulaire surfacique qui, si elle n'est pas exhaustive, est pour le moins représentative de l'éventail des techniques disponibles aujourd'hui. Les différentes méthodes de mesure de la contamination particulaire surfacique seront scindées entre, d'une part, les moyens de mesure passifs et, d'autre part, les moyens de mesure actifs. Si les moyens de mesure passifs sont couramment utilisés, les moyens de mesure actifs en revanche sont en voie de développement et font à peine leur entrée dans les industries. Les avantages et limites de ces différentes méthodes ainsi que l'étude du contexte dans le premier chapitre permettront d'ouvrir la voie à l'établissement d'un cahier des charges dans le chapitre suivant. En effet, le contrôle de la contamination n'est possible que si une mesure en temps réel est réalisée.

Un monitoring de la contamination particulaire surfacique permettrait d'identifier les anomalies au cours des procédés d'assemblage, d'intégration et de test. L'identification de ces anomalies se ferait d'une part en quantifiant la quantité de contaminants et d'autre part en mesurant la taille des particules déposées. Ceci permettrait de déterminer la criticité d'un tel événement de contamination et également d'identifier les possibles sources de contamination.

## II.2. Moyens de mesure de la contamination particulaire volumique

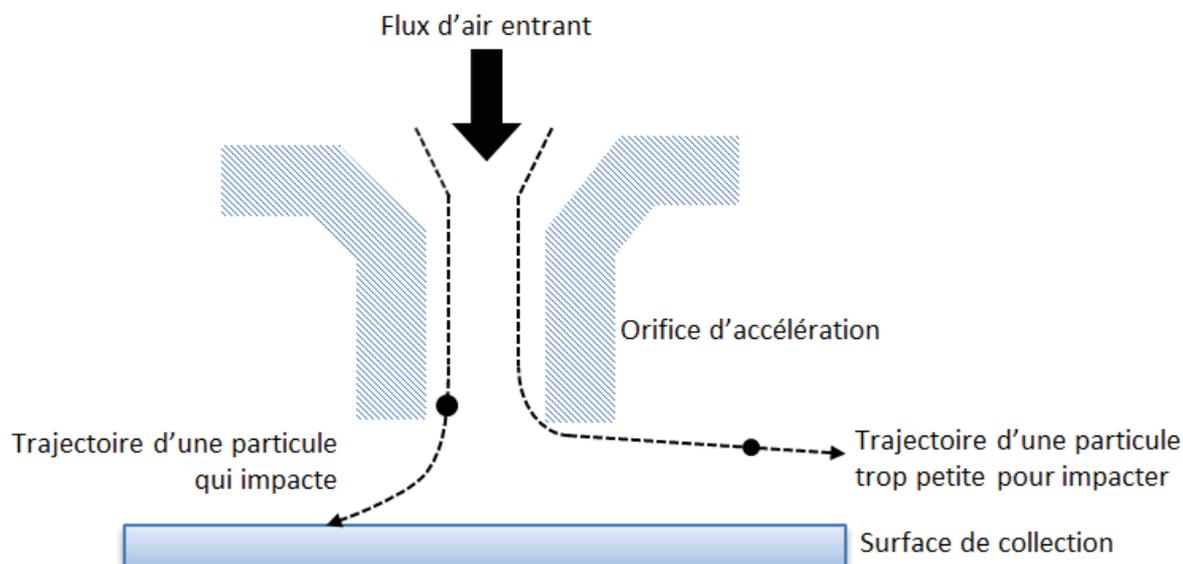
Les salles propres sont classifiées en fonction de la quantité de particules dans un volume d'air. Pour contrôler ce paramètre, la méthode usuelle consiste à placer un ou des capteurs au sein de la salle de manière à compter le nombre de particules en suspension dans l'air. Cette mesure permet d'obtenir l'état de contamination particulaire volumique de la salle propre considérée. En fonction des résultats obtenus, la salle pourra être classifiée suivant la norme ISO 14644-1 (3). Cette classification doit être réalisée en permanence afin de garantir un niveau de propreté correspondant aux exigences des activités réalisées en salle propre.

Il existe deux techniques majeures pour mesurer la contamination particulaire volumique : la mesure gravimétrique et la mesure optique. Ces deux techniques se font en trois phases : (i) l'aspiration d'un volume d'air, supposé représentatif de l'environnement à contrôler; (ii) la classification inertielle des particules grâce à un système d'impaction; (iii) la détection des particules. Le système d'impaction est optionnel mais permet de trier les particules en fonction de leur taille. La détection des particules peut permettre de remonter à diverses informations suivant la technique utilisée : le nombre de particules si la mesure est de type optique ou la masse totale des particules si la mesure est de type gravimétrique. L'ensemble des méthodes présentées ci-dessous sont rassemblées dans la catégorie des moyens de mesure de la contamination volumique car elles font appel à un système de pompe qui vient prélever une fraction d'aérosol en amont de la mesure.

### II.2.1. Le système d'impaction

Un impacteur dynamique permet une classification inertielle des particules. Grâce au système d'aspiration, le jet d'air contenant les particules est projeté à haute vitesse contre une surface solide. Les particules dont le diamètre est supérieur à un certain seuil appelé diamètre de coupure (dépendant du dimensionnement de l'impacteur, de la vitesse du flux et des conditions de température et de pression du milieu) sont récupérées sur la surface solide – appelée plaque de collection. Les particules récupérées sur la plaque peuvent être analysées. Les particules plus petites sont entraînées dans les lignes de courant du flux d'air porteur. Du flux entrant, deux flux sont obtenus : le flux majeur - représentant 90% du flux entrant – qui est dirigé à angle droit par rapport au canal d'entrée, et le flux mineur - représentant 10% du flux entrant – qui ne subit pas de changement de direction par rapport au canal d'entrée. Les plus grosses particules sont donc dans le flux mineur et les plus petites particules dans le flux majeur.

Il est possible de créer un impacteur en cascade avec plusieurs étages d'impaction (37). La Figure 21 représente un étage d'impaction. Ainsi, en disposant plusieurs étages d'impaction en série avec des diamètres de coupure de plus en plus petits et des vitesses de plus en plus grandes, il est possible de fractionner un aérosol en fonction de la taille des particules qu'il contient.

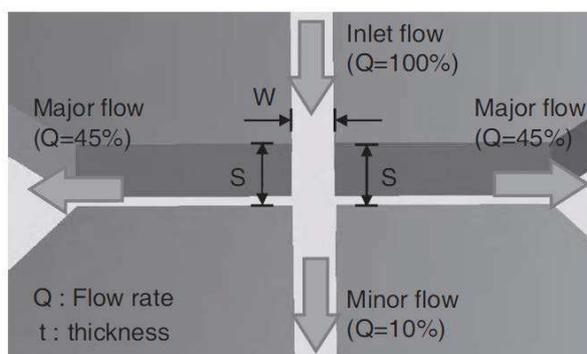


**Figure 21 : Schéma de principe d'un étage d'impaction**

Depuis le début des années 2000, le domaine de la contamination particulaire a vu naître de nombreux micro-impacteurs virtuels. Ainsi, l'équipe de Maeng (37) a conçu un dispositif constitué de deux parties : un impacteur virtuel en cascade pour trier les particules suivant leur inertie (et donc suivant leur taille) et un distributeur de flux pour maintenir le flux spécifique nécessaire à chacun des trois étages d'impaction. En effet, le système d'impaction (à un étage) doit normalement être composé de trois pompes : une pour le flux entrant, une pour le flux majeur et une pour le flux mineur. L'intérêt du distributeur de flux proposé par l'équipe de Maeng est de réduire le nombre de pompes (nombre multiplié par le nombre d'étages de l'impacteur en cascade) à l'aide d'un distributeur de débit et d'orifices multiples. La théorie montre ainsi que si le flux de fluide est suffisamment élevé et sa friction suffisamment petite, alors le fluide peut être supposé adiabatique<sup>5</sup>. D'autre part, l'analyse entropique du système telle que décrite dans la publication de Maeng permet de calculer le diamètre de l'orifice en fonction du débit volumique souhaité. Une revue très complète des différents types de micro-pompes existants a été réalisée par Laser et Santiago (38). Le système de l'impacteur virtuel est décrit dans la Figure 22. Le seuil de détection d'un impacteur (ou d'un étage d'un impacteur en cascade) est défini comme par le diamètre aérodynamique au-dessus duquel

<sup>5</sup> Le terme « adiabatique » signifie qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre le fluide et le système.

plus de 50% des particules sont collectées. Il dépend du nombre de Stokes et du nombre de Reynolds, du débit et de la vitesse du flux ainsi que de la largeur du bec d'injection. Ces notions ont été abordées dans le chapitre I (paragraphe I.2.2). Dans le système proposé par Maeng, les seuils de détection des particules sont successivement 135 nm, 1.9 µm et 4.8 µm. Les valeurs du débit des flux sont de 0.27 l.min<sup>-1</sup> pour le flux majeur et de 0.031.l.min<sup>-1</sup> pour le flux mineur. Ce micro-impacteur permet d'amener les particules de la taille sélectionnée vers un système de comptage particulaire volumique.



**Figure 22 : Schéma du micro-impacteur virtuel développé par Maeng (37). Seules les plus petites particules contenues dans le flux mineur (10%) ne sont pas évacuées**

Les résultats présentés sur la Figure 24 montrent les mesures de l'efficacité de collection pour chaque diamètre du système d'impaction à trois étages développé par Maeng. Le diamètre de coupure est déterminé pour une efficacité de collection supérieure à 50%. Les systèmes inertiels de tri des particules restent approximatifs, l'efficacité de collection étant égale à 30% pour des particules de diamètre inférieur de 10% au seuil considéré. Le seuil, appelé aussi diamètre de coupure, peut être approximé par la relation suivante :

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\eta W^2 D S_{tk50}}{\rho_p Q C_C}} \quad \text{Équation 38}$$

Où  $\eta$  est la viscosité dynamique de l'air, W et D représentent les dimensions du canal entrant,  $\rho_p$  est la densité de particules dans le flux d'air, Q est le débit du fluide entrant et  $S_{St50}$  est le nombre de Stokes (valeur fixée à 0,59 pour des impacteurs rectangulaires).  $C_C$  est le facteur de correction de Cunningham, défini par l'Équation 39 pour des particules supérieures à 1 µm (d étant le diamètre de la particule et  $\lambda$  le libre parcours moyen d'une molécule d'air) :

$$C_C = 1 + \frac{2,52 \lambda}{d} \quad \text{Équation 39}$$

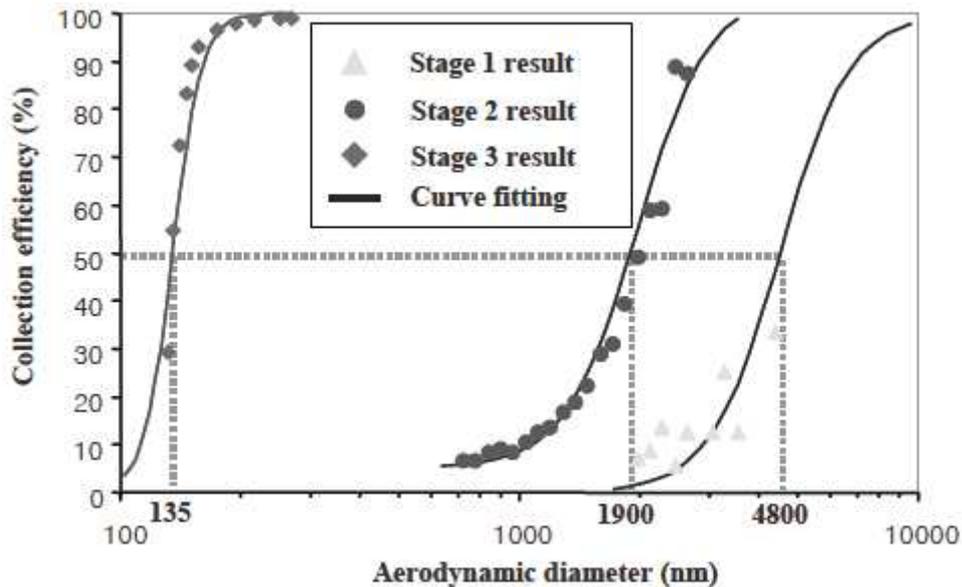


Figure 23 : Mesure de l'efficacité de collection de l'impacteur virtuel en cascade développé par Maeng (37). Les trois diamètres de coupure sont 135 nm, 1,9  $\mu\text{m}$  et 4,8  $\mu\text{m}$

## II.2.2. Mesure gravimétrique

La mesure gravimétrique est la méthode de mesure de la concentration particulaire la plus ancienne et la plus répandue. La précision d'une mesure gravimétrique dépend de la mesure de la balance. Cette méthode consiste à mesurer la masse de particules récoltées sur un filtre ou sur une plaque d'impaction, après un certain temps d'exposition ou après le prélèvement d'un échantillon. La méthode gravimétrique est une méthode de référence normalisée (NF 13284-1 et 2 (39), NF X44-052 (40)). Elle permet une analyse quantitative de la masse d'un échantillon, pour des particules de taille inférieure à 10  $\mu\text{m}$ . Au-delà de cette taille de particule, une surestimation de la masse des particules est généralement constatée.

Appliquée au domaine de la mesure de la contamination particulaire, il existe trois types de mesure gravimétrique : la pesée de filtre, les cristaux piézo-électriques ou la microbalance à éléments oscillants.

## II.2.3. La pesée de filtre

Dans le cas de la méthode par pesée de filtre, les poussières présentes dans le fluide prélevé sont piégées sur un filtre. La pesée du filtre préalablement taré permet de connaître la masse des particules. Les filtres doivent être changés régulièrement mais actuellement des systèmes automatisés

existent. La taille critique des particules récoltées dépend du type de filtre choisi. Les filtres disponibles sur le marché permettent de récolter des particules ultrafines avec des taux d'efficacité proches de 100%. Les avantages d'une telle méthode sont son faible coût et sa précision. La simplicité d'utilisation dépend du protocole mis en place (durée et lieu d'exposition, fréquence de relevés des filtres, etc.).

#### II.2.4. Les cristaux de quartz

Les cristaux de quartz ont des propriétés piézo-électriques et par conséquent leur fréquence de résonance est modifiée lorsque leur masse augmente. Supposons un cristal piézoélectrique qui oscille à une fréquence stable (5 à 10 MHz). Lors de son exposition aux particules de l'environnement à contrôler, sa fréquence de résonance décroît linéairement avec la masse de particules qui se déposent sur la surface du cristal. En termes de conditions d'utilisation, la fréquence de résonance est stable avec la température et est peu modifiée au cours du temps (on estime une diminution de la fréquence de l'ordre de 0.5 ppm par an) (46). En revanche, l'humidité relative de l'air influence la mesure. La variation de la fréquence  $\Delta f$  est donnée par la relation suivante :

$$\Delta f = K_{\alpha} f_0^2 \frac{\Delta m}{A} \quad \text{Équation 40}$$

Où  $K_{\alpha}$  représente une constante,  $f_0$  la fréquence de la vibration et  $(\Delta m/A)$  la variation de masse par unité de surface (avec  $A$  la surface du cristal exposée à l'environnement à contrôler). Pour une fréquence de 10 MHz, un cristal de quartz a une sensibilité de  $10^9$  Hz/g avec une stabilité de l'ordre de quelques Hertz. Les instruments de mesure possédant un cristal de quartz comme élément sensible sont appelés « Microbalances à Cristaux de Quartz » (QCM). Une analyse des applications des capteurs piézo-électriques est détaillée par Ward et Buttry (42). Le diamètre du cristal est de l'ordre de 1 cm et son épaisseur de 1 mm, il est revêtu de métal. En général, un cristal identique soumis aux mêmes conditions environnementales (température, humidité relative, stimulation électrique) mais non exposé aux particules sert de référence. La collection des particules sur le cristal de quartz peut se faire par précipitation électrostatique ou par impaction inertielle. L'efficacité de collection varie en fonction de la méthode de précipitation choisie. Dans le cas de la collecte par impaction, les grosses particules auront tendance à rebondir ou à être réentraînées. Cet effet tend à limiter l'application de cette technique à des particules de taille supérieure à 10  $\mu\text{m}$ . Les dispositifs de mesure de masse grâce à un cristal de quartz ont d'autres limites. Par exemple, la détection des particules collectées sur la surface du cristal nécessite que celles-ci adhèrent correctement afin que le couplage soit efficace. Un mauvais couplage est susceptible d'apparaître lorsque le dépôt devient épais ou lorsque les particules sont trop grosses. Un autre problème est la saturation du cristal

lorsqu'une masse trop importante de particules est collectée. La manifestation de ce problème est une relation non linéaire entre la variation de fréquence d'oscillation du cristal et la masse déposée. La saturation peut provoquer, à son état extrême, un total arrêt de la vibration du cristal sous excitation électrique.

## II.2.5. Les microbalances à élément oscillant

Une mesure gravimétrique par microbalance à élément oscillant permet une mesure en temps-réel, grâce à une instrumentation portable et qui ne nécessite pas d'intervention pour réaliser la mesure. Un type particulier de microbalance est la TEOM® (Tapered Element Oscillating Microbalance), dont le brevet a été déposé par Rupprecht & Patashnick Cp., Inc. (Alabany, NY, USA). Le principe de mesure est semblable à celui des microbalances à cristaux de quartz. Dans ce cas, les particules ne sont plus collectées sur la surface du cristal mais sur un substrat vibrant. Il s'agit d'un pot vibrant en verre de 100 à 150 mm de longueur tel que décrit dans la Figure 25. Les particules s'accumulent sur un filtre disposé à l'extrémité la plus fine de l'élément vibrant tandis que l'extrémité la plus large du pot est liée à une plaque massive. Le pot vibre transversalement à quelques centaines de Hertz. La masse des particules collectées modifie la fréquence de résonance. L'augmentation de la masse  $\Delta m$  est liée aux fréquences de résonance initiale et finale  $f_i$  et  $f_f$  par l'équation suivante (où  $K_0$  est une constante de calibration) :

$$\Delta m = K_0 \left( \frac{1}{f_f^2} - \frac{1}{f_i^2} \right) \quad \text{Équation 41}$$

Cette relation, qui décrit le comportement des TEOM, provient de l'équation du mouvement d'un simple oscillateur harmonique. Un dispositif électronique initie et entretient les oscillations du tube (48). L'efficacité de collection dépend principalement du média filtrant. Si celui-ci est de bonne qualité et correctement choisi, l'efficacité de collection ne dépend pas ou peu des dimensions des particules et la proportion de particules non collectées est extrêmement faible. Dans le cas des microbalances à élément vibrant tels que les TEOM, il n'y a pas de problème de couplage dû à une mauvaise adhésion des particules comme pour le cristal de quartz. En effet, l'élément oscillant de la microbalance vibre à quelques centaines de Hertz et, dans ces conditions, le couplage entre les particules déposées et l'élément oscillant est bon. Enfin, le problème de saturation des microbalances à élément oscillant est en réalité le problème de colmatage des filtres.

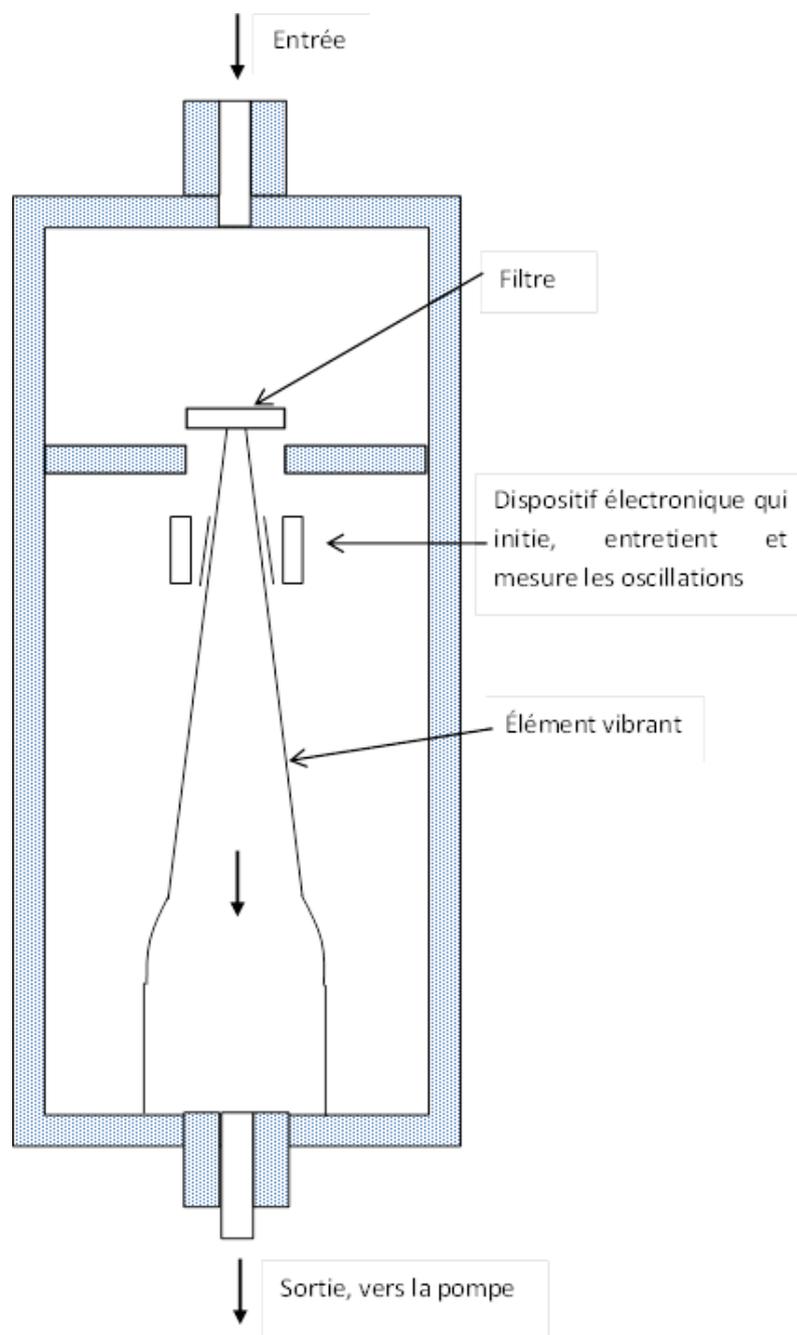


Figure 24 : Schéma d'une microbalance à élément oscillant de type TEOM

## II.2.6. Mesure optique

### II.2.6.1. Principe de mesure

La mesure de la concentration particulaire volumique d'un aérosol et de son étendue granulométrique via un principe de détection optique existe depuis plus de cinquante ans, ce qui correspond à la construction des premières salles propres (paragraphe I.1.2). Le premier compteur optique de particules a été commercialisé en 1960 aux États-Unis par la firme Royco Instruments. Cet appareil se basait sur le principe de la lumière diffusée par les particules, avec un détecteur placé à 90° de la source lumineuse. Le débit d'air était de 0.28 L/min et il pesait environ 200 kg. Depuis, la technique n'a eu de cesse d'être améliorée. À cette époque, la source de lumière utilisée était de la lumière blanche. L'introduction des lasers - et donc d'une source de lumière cohérente et monochromatique - a contribué à améliorer les capacités de mesure des compteurs optiques de particules (44). L'encombrement du capteur est également un point-clé dans l'évolution des compteurs optiques. L'action des particules contenues dans un aérosol sur la lumière peut se traduire par plusieurs effets tels que représentés sur la Figure 25 : absorption d'une partie de la lumière, réflexion ou diffraction du faisceau. Les propriétés optiques des particules feront l'objet d'une étude approfondie dans le chapitre III.

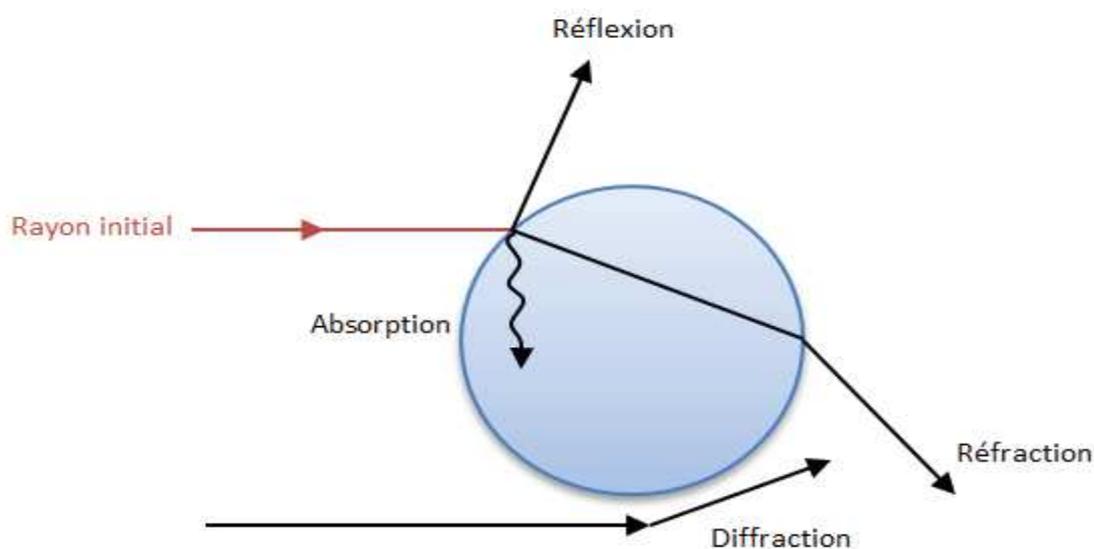
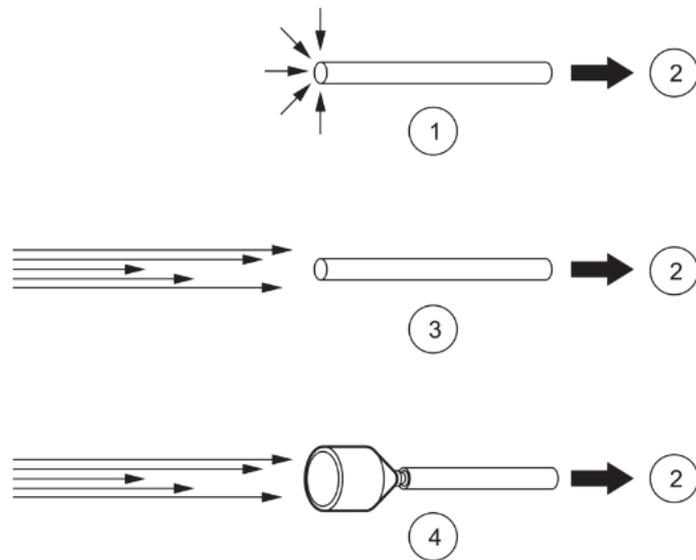


Figure 25 : Action d'une particule contenue dans un aérosol sur une onde lumineuse

Il existe deux types de mesure optique : la mesure optique par transmission et la mesure optique par diffusion. En effet, si un faisceau lumineux traverse un milieu gazeux avec des particules en suspension, ces dernières l'atténuent par absorption et diffusion. La mesure de la lumière transmise ou diffusée par des petites particules en suspension dans un gaz permet donc d'obtenir des

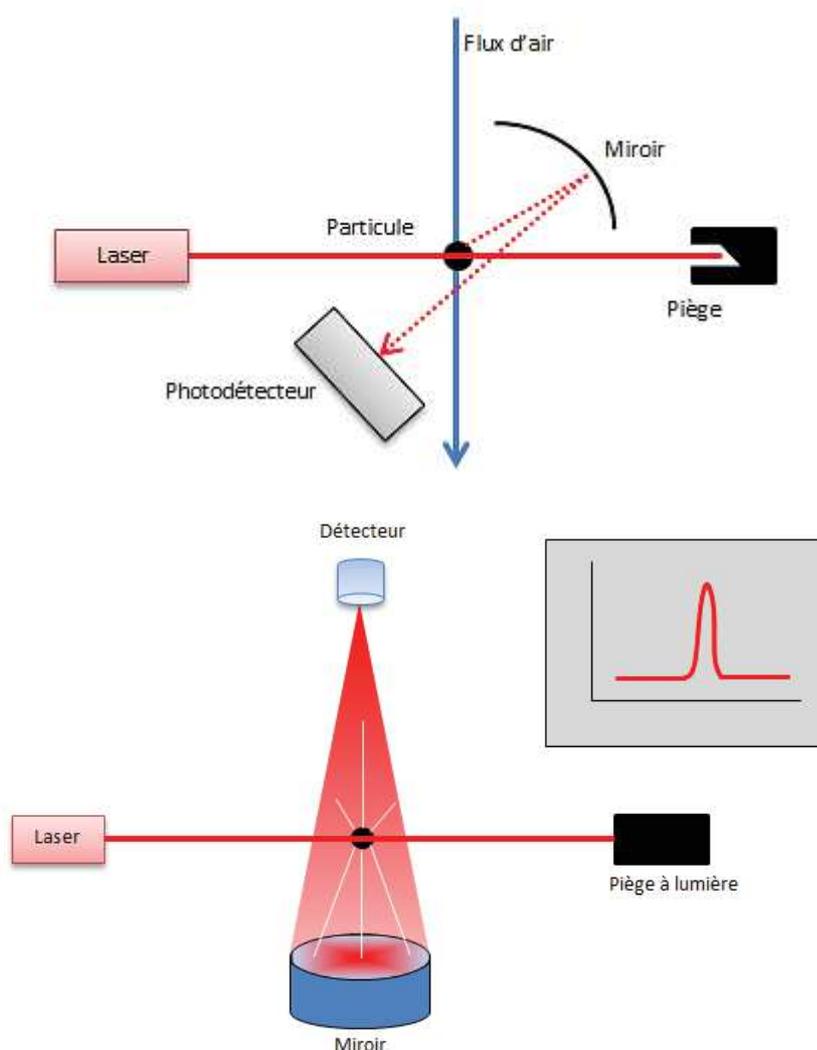
informations sur la concentration et la distribution granulométrique des particules. La mesure optique permet de mesurer des particules de diamètre compris entre 70 nm et plus de 100  $\mu\text{m}$  ; les concentrations de particules dans l'air pouvant varier de  $10^3$  particules/ $\text{m}^3$  (monitoring des salles propres) à  $10^9$  particules/ $\text{m}^3$  (recherche en science environnementale). Ce type de mesure est réalisé par des compteurs optiques de particules qui donnent des informations dans la gamme de 0.05  $\mu\text{m}$  à 25  $\mu\text{m}$ .

Le principe de mesure est simple : l'aérosol prélevé dans le milieu ambiant par une pompe est amené dans le volume sensible du capteur par l'intermédiaire d'un bec de canard afin de limiter les flux turbulents à l'entrée du canal et de capter un maximum de particules (Figure 26). Le système pneumatique a pour but de délivrer un jet d'air focalisé dans le volume sensible. Le débit le plus largement employé est le pied cube par minute (CFM ou  $\text{ft}^3/\text{min}$ ) soit 28.3 L/min ou un sous-multiple du pied cube. Cet échantillon passe à travers un faisceau lumineux monochromatique. On suppose que les particules traversent le faisceau lumineux de manière individuelle. Chaque particule crée un flash lumineux par extinction ou diffusion qui est détecté par un photodétecteur. La concentration de particules dans l'aérosol est déduite du taux d'impulsions photoélectriques et la taille des particules est estimée grâce à l'amplitude de l'impulsion. L'amplitude de l'impulsion dépend de la quantité de lumière diffusée par la particule, paramètre qui dépend de sa taille mais aussi de son indice de réfraction et de sa forme. L'aérosol mesuré est ensuite rejeté dans le milieu ambiant (généralement après avoir passé un filtre qui permet de retenir les particules présentes dans le gaz).



**Figure 26 : Fonctionnement d'une sonde isocinétique. 1 : l'écoulement est non laminaire, peu de particules sont captées; 2 : vers la cavité sensible du compteur de particules; 3 : l'écoulement est laminaire, certaines particules ne sont pas captées; 4 : sonde isocinétique**

La diffusion du faisceau lumineux par les particules en suspension est mesurée par un photodétecteur. Suivant la position du photodétecteur par rapport à la source lumineuse il y a deux méthodes de mesure : par rétro diffusion ou par diffusion directe. La comparaison avec une mesure de référence établit la relation avec la concentration en particules. L'avantage de ce type de mesure par rapport à la mesure optique par transmission est qu'il n'y a pas de problème d'alignement de la source lumineuse et du photodétecteur. Le système optique se compose plus précisément d'un faisceau laser focalisé puis collimaté pour former un faisceau parallèle. Les particules interagissent avec le faisceau lumineux, par diffusion ou extinction. Le faisceau laser est ensuite focalisé à nouveau sur la photodiode qui se charge de convertir le signal lumineux en signal électrique. La Figure 27 schématise le principe d'un capteur optique.



**Figure 27 : Schéma de principe d'un capteur optique. Aujourd'hui les capteurs optiques utilisent quasi-exclusivement des diodes laser comme source lumineuse. L'intensité du signal est proportionnelle à la taille d'une particule (et fonction du matériau de la particule)**

La linéarité de l'intensité de la mesure en fonction du diamètre des particules est limitée pour des concentrations particulaires trop élevées ou trop faibles. Dans le cas des concentrations particulaires élevées, la perte de linéarité provient notamment des diffusions multiples dues à un trop grand nombre de particules dans le volume sensible du capteur. Elle peut également provenir des formes très diverses des grosses particules (qui sont généralement des fibres). Dans le cas des concentrations particulaires faibles, la perte de linéarité peut provenir du fond de lumière parasite présent dans le volume sensible. Le niveau de sensibilité aux bruits des compteurs optiques de particules est déterminé par le critère de Rayleigh des molécules d'air.

### II.2.6.2. Caractéristiques d'un compteur optique de particules

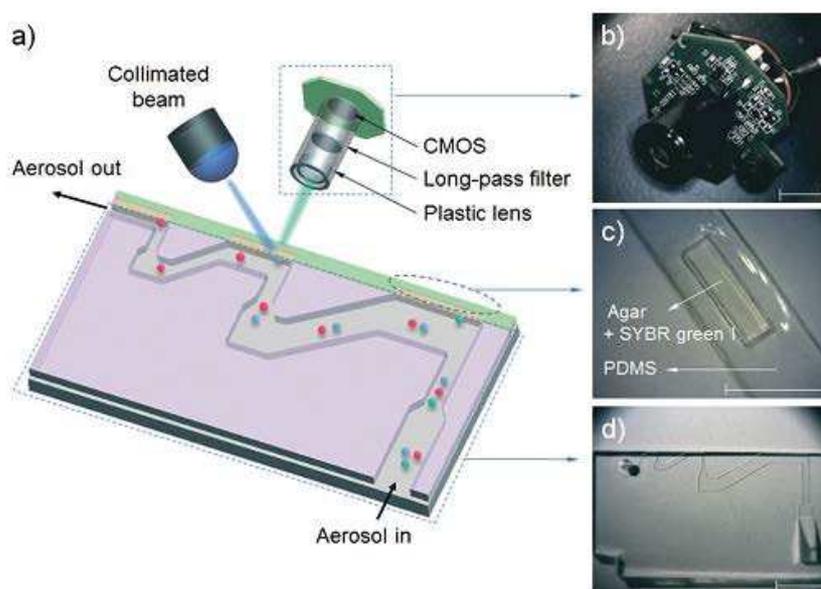
Les caractéristiques importantes d'un compteur optique de particules sont la gamme des concentrations particulaires autorisées, le débit d'échantillonnage, la sensibilité (la limite basse de détection en termes de taille de particules) et la fiabilité (en termes de taille de particules également). Le Tableau 8 ci-dessous présente les caractéristiques de quelques compteurs optiques de particules utilisés couramment en salle propre. La plupart de ces capteurs peuvent fournir directement la classification ISO des salles dans lesquelles ils sont installés par extension de leurs mesures. L'étendue granulométrique est présentée en termes de « canal ». Par exemple, le *Fluke 985*, possède 6 canaux. Cela signifie que les résultats sont présentés de la manière suivante : « X particules mesurent entre 0.3 et 0.5  $\mu\text{m}$  (1<sup>er</sup> canal), Y particules mesurent entre 0.5 et 1  $\mu\text{m}$  (2<sup>ème</sup> canal), etc. ». La précision de la mesure de la taille des particules est donc implicitement donnée par la largeur de ces canaux. Ainsi, nous observons que la précision est plus grande pour les particules les plus petites. Ceci s'explique par les problèmes de linéarité de l'intensité de la mesure évoqués dans le paragraphe précédent.

**Tableau 7 : Comparaison de quelques Compteurs Optiques de Particules (COP)**

Modèle de COP	Étendue granulométrique	Débit d'échantillonnage	Limite de concentration	Encombrement
<b>Fluke 985</b>	0,3 - 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 $\mu\text{m}$	0,1 pcm (2.83 l/min)	10% pour $4.10^6$ part/m <sup>3</sup>	27.2x10x5.3 cm 0.68 kg
<b>LightHouse 3013</b>	0,3 - 0,5 - 0,7 - 1 - 2,5 - 5 - 10 $\mu\text{m}$	0,1 pcm (2.83 l/min)	5% pour $140.10^6$ part/m <sup>3</sup>	16x10x4 cm, 0.7 kg
<b>LightHouse 3016</b>	0,3 - 0,5 - 0,7 - 1 - 2,5 - 5 - 10 - 25 $\mu\text{m}$	0,1 pcm (2.83 l/min)	5% pour $140.10^6$ part/m <sup>3</sup>	22x12x6.3 cm, 1 kg
<b>PMS Handilaz mini</b>	0,3 - 0,5 - 5 $\mu\text{m}$	0,1 pcm (2.83 l/min)	$2.10^6$ part/ft <sup>3</sup>	11x20x7 cm, 1 kg

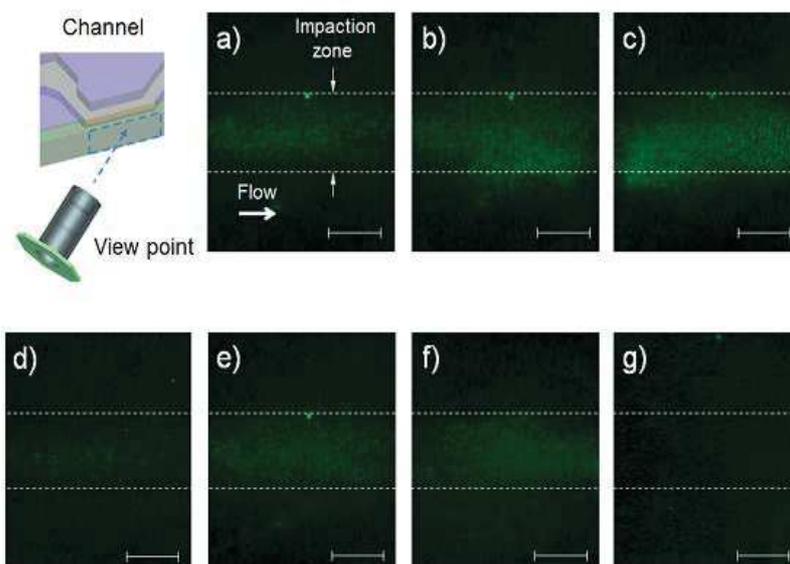
### II.2.6.3. Conception d'un mini-microscope pour la détection des particules

La conception d'un mini-microscope pour détecter les particules a été envisagée par certains laboratoires. L'équipe de Kang du California Institute Technology propose de coupler un système de classification inertielle à un mini-microscope par fluorescence. Le système de classification inertielle est un système d'impaction à trois niveaux, de diamètre de coupure de 2.24  $\mu\text{m}$ , 0.91  $\mu\text{m}$  et 0.49  $\mu\text{m}$ . Le mini-microscope mesure la fluorescence des particules collectées sur les plaques d'impaction. L'information récoltée est donc l'intensité lumineuse émise par les particules fluorescentes en réaction à l'exposition d'un faisceau collimaté de longueur d'onde 470 nm. Le mini-microscope est constitué d'une lentille de grandissement 20, d'un filtre passe-haut d'une longueur d'onde de coupure de 500 nm et d'un module CMOS (45). Le système développé est représenté sur la Figure 28. Le module CMOS et la lentille proviennent d'une webcam commerciale ; la lentille ayant été inversée de sens pour avoir un grandissement. Le système du mini-microscope mesure 3 x 3.5 x 2  $\text{cm}^3$ .



**Figure 28 : Schéma de la puce de détection de microbes aéroportés; b) Photo du mini-microscope par fluorescence; c) Surface d'impaction en PDMS ; d) micro canal avec trois étages d'impaction (toutes les barres d'échelles représentent 1 cm) (50)**

Les expériences ont été menées avec des particules biologiques et non-biologiques. Concernant le système d'impaction inertielle, les déviations entre les calculs théoriques et les résultats expérimentaux sont de 11 %. La mesure de l'intensité de la lumière fluorescente émise par les particules permet de discriminer les particules biologiques des particules non biologiques, l'expérience ayant été réalisée avec des particules en latex polystyrène ou PSL (Figure 29). En effet, la fluorescence des particules en PSL est très inférieure à celle des microbes.



**Figure 29 : Images de la fluorescence émise par les particules à différents temps d'échantillonnage et étages d'impaction. Le schéma indique le point de vue du mini-microscope. Les photos a), b) et c) représentent le second étage d'impaction avec des temps d'échantillonnage respectifs de 20 s, 40 s et 60s. ; Les photos d), e) et f) représentent respectivement le premier, le second et le troisième étage d'impaction pour un temps d'échantillonnage de 30 s; la photo g) représente une image des particules PSL de diamètre 1  $\mu\text{m}$  dans la seconde zone d'impaction pour un temps d'échantillonnage de 30s. (Toutes les barres d'échelles représentent 100  $\mu\text{m}$ )**

## II.2.7. Utilisation de MEMS pour la mesure de masse des particules déposées

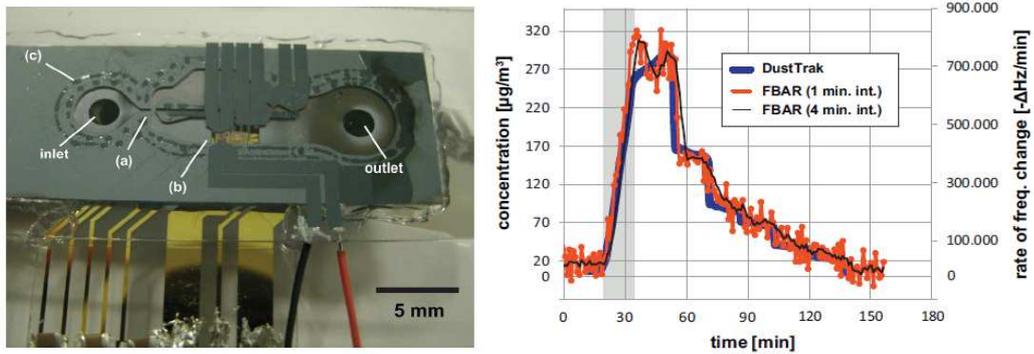
Les microsystèmes électromécaniques, communément appelés MEMS, ont vu le jour au début des années 1970. Le principe est de fabriquer des systèmes contenant des éléments électromécaniques grâce à des procédés dérivés de la micro-électronique (tels que le « micro-usinage »). Par extension, ces systèmes de taille microscopique associent des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques et fluidiques à de l'électronique sur des substrats semi-conducteurs. Ils assurent des fonctions de capteurs pouvant identifier des paramètres physiques de leur environnement (pression, accélération, etc.) et/ou d'actionneurs pouvant agir sur cet environnement. Leurs avantages sont multiples : optimiser les coûts de fabrication, miniaturiser des fonctions et améliorer la consommation électrique et la fiabilité des produits. On distingue deux types de MEMS : les capteurs et les actionneurs. Les principales applications de capteurs MEMS sont la mesure de déformation (force, accélération, pression, etc.), de température, de champ magnétique, etc. En tant qu'actionneur, les MEMS peuvent assurer par exemple les fonctions de tête d'impression à jet d'encre, de micromoteurs ou de micro miroirs dans les projecteurs vidéo.

De nombreuses études récentes développent des solutions à base de MEMS pour mesurer la masse de particules sédimentées. Le système de mesure est en général composé d'un circuit d'air

micro fluïdique couplé à système de classification inertielle et d'un résonateur acoustique FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator). Les particules triées se déposent sur le capteur de masse, ce qui engendre un changement de fréquence de résonance. Le système de classification inertielle est toujours couplé à une pompe, ce qui revient à mesurer la concentration particulaire volumique du milieu environnant.

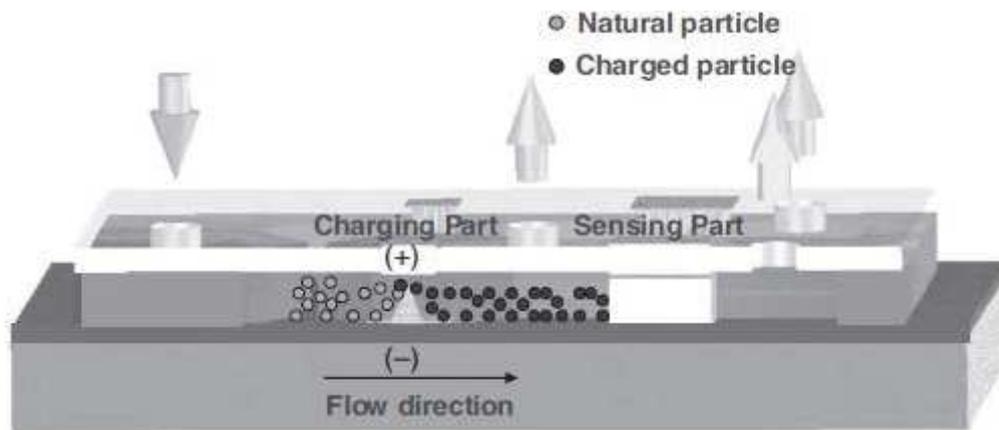
Au Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), les recherches sur l'application des MEMS à la détection des particules ont débuté au début des années 2000. Les solutions développées visent le contrôle de la qualité de l'air ambiant en mesurant notamment la concentration en particules de tabac ou de vapeurs d'essence aéroportées dans l'air. Les Drs. Gundel et Apte ont développé un système miniaturisé pour contrôler la quantité de particules, appelé *Miniaturized System for Particle Exposure Assessment* (MSPEA) (51). Ce système a été largement étudié et amélioré, notamment avec les recherches menées par le Dr. White dans le cadre de l'*Innovative Clean Air Technologies Grant Program* (52) ainsi que dans le cadre de la thèse de J.P. Black (53). Le MSPEA est constitué de cinq composants majeurs : (1) un système de classification inertielle des particules, (2) une microbalance à quartz pour la détection des particules, (3) un mécanisme de collection des particules sur la surface de la microbalance par thermophorèse, (4) une unité optique de type spectrophotomètre pour mesurer la réflectance de la surface de collecte et (5) une pompe à air.

Afin de miniaturiser ce système, des améliorations ont été apportées. Une équipe de l'université de Berkeley (54) a ainsi développé un système de mesure avec un résonateur acoustique FBAR commercialisé par Avago Technologies. Les dimensions du système complet sont 25 mm x 21 mm x 2 mm. La taille critique des particules mesurées est 2,5  $\mu\text{m}$  et la concentration limite inférieure de détection est le  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . La Figure 32 représente le prototype du capteur fabriqué par l'équipe du Dr. Paprotny : (a) représente l'impacteur virtuel, (b) représente la région de dépôt par thermophorèse. Le label (c) montre les traces d'époxy suite à la fabrication du MEMS. Ce système fait l'objet d'un brevet (20). D'autre part, en poursuivant l'objectif de mesurer les particules présentes dans les gaz d'échappement diesel et les particules sombres d'une taille de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres, J.P. Black décrit dans sa thèse un système similaire couplé à une discrimination optique des particules sombres. En effet, le principe du spectrophotomètre est appliqué aux particules qui se sont déposées sur le résonateur acoustique. La réflectance des particules dans l'UV et le proche IR est mesurée, permettant ainsi de distinguer les particules sombres dont la nature implique des absorptions différentes à ces longueurs d'onde.



**Figure 31 : A gauche : photographie du prototype du microcapteur de particules réalisé par Paprotny et al. À droite : réponse expérimentale du capteur à une exposition à des particules provenant d'un moteur diesel**

L'équipe du Dr. Hajjam de l'université de Denver (50) a également développé ce type de capteur. Leurs recherches précisent que les résonateurs sont actionnés thermiquement. Les dimensions du MEMS sont de 280 µm par 280 µm. La sensibilité du capteur est de l'ordre du KiloHertz par picogramme tandis que la gamme des particules détectées va de 0.5 à 5 µm.



**Figure 30 : Procédé schématique de la charge et de la mesure des particules par effet corona**

En 2006, l'équipe du Dr. Lim de l'université de a publié un article sur le développement d'un MEMS intégré dans une puce de détection des particules pour le monitoring de l'environnement (51). Ce système est composé d'un micro-impacteur virtuel (présenté sur la Figure 22) dont le diamètre de coupure est de 550 nm et un micro-chargeur par effet corona pour mesurer la concentration de particules. Le micro-chargeur par effet corona est basé sur le principe de la décharge corona existant lorsque qu'une haute tension est appliquée entre deux électrodes, créant ainsi un environnement ionisé. La Figure 30 montre le procédé schématique de ce système.

Lorsque les particules passent à travers la région de décharge corona, elles se chargent. Les particules chargées sont ensuite filtrées à l'aide d'un filtre à haute efficacité type HEPA (*High*

*Efficiency Particulate Air*). Le courant porté par les particules chargées est mesuré grâce à un électromètre. Ce courant est proportionnel à la concentration de particules chargées. L'équipe du Dr. Chua de l'université de Berkeley propose un système similaire (52).

## II.2.8. Autres types de mesures volumiques

Le comptage volumique de particules peut également être opéré par d'autres techniques, néanmoins celles-ci sont utilisées pour des utilisations très spécifiques. En effet, ces techniques supposent un état particulier des particules et ne s'appliquent donc pas à l'ensemble des particules quelconques pouvant être contenues dans un volume d'air.

### II.2.8.1. Méthodes électriques

Une grande partie des particules contenues dans les aérosols porte une charge électrostatique. Cette charge électrostatique peut être naturelle ou induite suivant leur nature. Le marquage des particules avec une charge électrique consiste à leur conférer une mobilité électrique afin de pouvoir opérer la séparation et la sélection des particules en se reposant sur cette propriété. La technique utilisée pour charger des particules consiste à créer un environnement ionisé. La collision entre les particules et les petits ions induit un niveau de charge qui dépend de la mobilité dynamique des particules et donc de leur dimension. Différentes techniques de charge des particules par collision sont décrites dans l'ouvrage de A. Renoux et D. Boulaud (1). La mobilité électrique des particules chargées dépend du type de gaz porteur et de ses propriétés dynamiques (sa viscosité dynamique  $\eta$  et le libre parcours moyen). Elle se définit par la relation suivante :

$$Z = qe \frac{C_u}{3\pi\eta D_p} \quad \text{Équation 42}$$

Où  $C_u$  représente le coefficient de correction de Cunningham (cf. I.3.1.1).

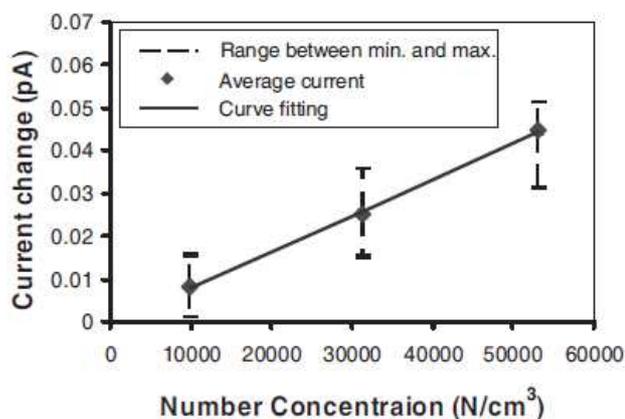


Figure 32 : A gauche : image MEB de la pointe de silicone utilisée pour la décharge corona ; à droite : résultat expérimental montrant la variation de courant en fonction de la concentration particulaire

Un cas particulier des méthodes électriques est la technique de la tribo-électricité, méthode empirique qui permet de mesurer la concentration en particules chargées d'un aérosol. L'effet triboélectrique est associé à l'apparition de charges électriques suite au frottement de deux matériaux. Lorsque deux matériaux différents et électriquement neutres entrent en contact, un transfert de charges s'opère de manière à obtenir un matériau chargé positivement et l'autre chargé négativement. La charge transférée augmente avec la surface de contact, la pression entre les deux matériaux en contact et la vitesse de frottement. Elle diminue avec la rugosité des surfaces (11). La technique de mesure de la concentration particulaire consiste à placer une sonde – un barreau métallique - au sein de l'aérosol. Lorsque les particules chargées en électricité statique frappent la sonde ou passent à sa portée, elles créent un effet de champ et modifient la charge électrique du barreau. Le signal est directement proportionnel à la concentration en particules (Figure 32). La plage de mesure de cette technique varie de  $0.1 \text{ mg.m}^{-3}$  à  $100 \text{ mg.m}^{-3}$ .

### II.2.8.2. Mesure par jauge bêta

La technique de mesure par jauge bêta permet d'obtenir la masse de particules présentes dans un volume d'air. Cette technique nécessite un prélèvement sur filtre qui est exposé à un rayonnement bêta (source radioactive) pour une durée prédéfinie. La quantité de rayonnement bêta absorbée est directement proportionnelle à la masse. La réduction de l'intensité du faisceau incident est connue sous le nom d'atténuation du rayonnement bêta. Cette atténuation dépend de l'énergie de la particule bêta, de la concentration massique de la matière qui intercepte le faisceau incident et du rapport entre le numéro atomique (nombre d'électrons par molécule) et la masse atomique du corps soumis au rayonnement bêta. Ce rapport est considéré comme constant pour la plupart des éléments (entre 0.45 et 0.5), à l'exception des éléments très lourds. Par conséquent, la mesure de l'atténuation du rayonnement bêta par les particules peut être considérée comme une mesure directe de la masse, telle qu'exprimée dans la relation suivante :

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x) \quad \text{Équation 43}$$

Où  $I$  représente l'intensité transmise,  $I_0$  l'intensité incidente,  $\mu$  le coefficient d'absorption massique pour le rayonnement bêta (exprimé en  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) et  $x$  la masse par unité de surface de l'échantillon ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). Cette technique de mesure suit la norme NF X43-017 (53). La plage de mesure de cette technique varie de  $1 \text{ }\mu\text{g.m}^{-3}$  à plusieurs  $\text{mg.m}^{-3}$ . Un des problèmes majeurs de cette technique est que la mesure de l'atténuation du rayonnement bêta représente une moyenne de l'absorption par un amas de particules déposées sur le substrat. Ainsi, la mesure est représentative uniquement si le dépôt est constitué d'une couche homogène de petites particules homogènes et uniformes de taille inférieure à l'épaisseur de l'amas. L'hypothèse d'une absorption exponentielle par le dépôt en

couche mince (telle que décrite dans  $I/I_0 = \exp(-\mu x)$ ) est alors respectée. Cooper et Jaklevic et al. (54) ont abordé ce problème dans leur publication en recommandant de limiter les mesures par jauge bêta à des particules de diamètres inférieurs à 10  $\mu\text{m}$ . D'autre part, l'effet dû à des inhomogénéités du substrat de collection (généralement un filtre) est du même ordre. Les conséquences sont particulièrement observables lorsque la masse déposée par unité de surface est largement inférieure à la masse par unité de surface du filtre. Enfin, un artefact de mesure peut apparaître si les numéros atomiques des étalons choisis sont trop éloignés de ceux des éléments constituant les particules à mesurer. On considère que les jauges bêta peuvent permettre des mesures de la masse d'un amas de particules avec une précision de l'ordre de 25  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Cette précision peut être abaissée à 5  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pour des applications particulières.

## **II.3. Les moyens de mesure passifs de la contamination des surfaces**

Les moyens de mesure dits « passifs » ont été les premiers développés pour surveiller la contamination des surfaces. Le terme « passif » signifie qu'un opérateur doit intervenir pour réaliser la mesure. Encore aujourd'hui, ces méthodes ont l'exclusivité pour le contrôle des salles propres. En effet, ces moyens de mesure passifs sont ceux préconisés dans les normes imposées aux environnements contrôlés. Ces méthodes de mesure peuvent être divisées en deux familles : les méthodes de collection directement sur la surface critique et les méthodes de collection sur une surface témoin placée à proximité des surfaces critiques.

### **II.3.1. Caractérisation des dépôts particuliers**

Les particules contenues dans un aérosol peuvent être caractérisées à travers leur composition chimique et leurs caractéristiques morphologiques. Ces données influent sur leurs mécanismes de transport et de dépôt, tel qu'évoqué dans le chapitre I de ce mémoire. Posséder ces informations permet de remonter à la source de la contamination et de tracer les événements qui sont venus perturber la qualité des opérations. Si un seul type de particule compose le dépôt, une analyse globale peut être effectuée. En revanche, dans le cas d'un dépôt contenant de multiples types de particules polydispersées – ce qui représente la majorité des applications – une analyse particule par particule doit être menée. Ces analyses peuvent être très laborieuses si elles ne sont pas automatisées. Deux stratégies existent pour caractériser un dépôt particulier : soit la mesure se réalise sur le substrat de collecte des particules (témoin exposé ou filtre) soit les particules collectées sont détachées via un substrat de transfert et analysées *a posteriori*. Il est évident que la mesure directe sur le substrat de collecte génère moins d'erreur puisque moins d'opérations sont à mener. Cependant, les méthodes indirectes constituent souvent la méthode la plus complète, étant donné l'état d'avancement des développements des instrumentations *in situ*. De plus, dans certains cas précis, les méthodes indirectes sont les seules réalisables : par exemple lorsque la surface est rugueuse ou lorsque le composant a une forme complexe.

### **II.3.2. Les méthodes directes de caractérisation sur la surface exposée**

Afin de pouvoir rechercher les sources de contamination particulière et appliquer des mesures correctives, il est essentiel de procéder à une identification morphologique des contaminants. L'identification morphologique consiste à mesurer la dimension d'une particule, reconnaître sa forme et identifier sa composition. Dans le cas des méthodes de mesure directe, les particules

sédimentées sont analysées directement sur la surface d'essai (qui peut être la surface à contrôler ou une surface témoin placée à côté). Les particules ne doivent pas être affectées par la mesure ou par le transport de la surface d'essai vers le moyen de mesure. Il est donc considéré que le transport ne cause pas de contamination supplémentaire du substrat, au risque de fausser les résultats de la mesure. L'annexe D de la norme ISO 14644-9 (4) précise les méthodes de mesure pour la détermination de la propreté des surfaces par la concentration particulaire. Le Tableau 9 ci-dessous compare les différentes méthodes de mesure sur des critères tels que les capacités de détection, les conditions de l'essai ou encore les informations apportées par la mesure. L'inspection visuelle est réalisée à l'œil nu, ce qui implique une limite de détection qui est celle de la vision humaine. Elle peut être réalisée à la lumière naturelle, ou à l'aide d'une source de lumière monochromatique (par exemple les lampes UV sont très utilisées pour relever la présence de particule fluorescentes). Les microscopes optiques actuellement disponibles sur le marché permettent de prendre des photos des substrats et, grâce à un logiciel de traitement d'images, de remonter aux informations géométriques des particules. Ces mesures peuvent être automatisées. Un microscope optique à lumière rasante latérale permet d'obtenir une meilleure résolution grâce au découplage de la source de lumière et du système de détection.

Un Microscope Electronique à Balayage (MEB) repose sur le principe d'interaction entre un faisceau d'électrons incident et la matière de l'échantillon à analyser. Le faisceau d'électrons accélérés est très focalisé produisant ainsi, après impact avec la surface, des électrons rétrodiffusés, des électrons secondaires, des électrons Auger, des rayons X et de la cathodoluminescence. Différents détecteurs permettent d'analyser ces données et, grâce à un balayage du faisceau, de reconstituer l'image de la surface. En général, cette méthode implique que la surface soit métallisée ce qui, dans le cas d'une étude d'un dépôt particulaire, implique à la fois le dépôt d'une couche ultrafine qui ne doit pas dépasser l'épaisseur des particules (afin de préserver le relief) et la mise en place d'une procédure afin de ne pas déplacer les particules. L'inconvénient majeur de cette technique très complète est sa difficulté d'utilisation : à la fois à travers son coût et le temps de mise en œuvre. Pour la caractérisation de dépôts particuliers, le MEB est couramment couplé à une microanalyse X en dispersion d'énergie (EDX). L'analyse des rayons X résultant de l'interaction entre le faisceau d'électrons incidents et la matière des particules permet l'analyse de leur composition chimique (Figure 33 et 34).

**Tableau 8 : Comparaison des méthodes de mesure pour la détection directe de particules sur les surfaces.  
Extrait de la norme ISO 14644-9 (4)**

Méthode	Limites de détection	Détermination de la granulométrie	Distribution granulométrique	Analyse du matériau	Analyse de la forme	Détermination de la position	Transportable	Indépendant de la surface	Accessibilité	Rapidité de l'essai	Flexibilité	Influence sur la surface
<b>Inspection visuelle</b>	> 25 µm	+	+	+	+	+	++	+	+	++	++	++
<b>Microscope optique</b> (avec traitement d'images)	> 1.0 µm	++	++	+	++	++	+	+	+	++	++	++
<b>Système à lumière rasante latérale</b> (avec traitement d'images)	> 0.5 µm	++	++	+	+	++	++	+	+	++	++	++
<b>Dispositif de balayage à lumière diffusée</b>	> 0.07 µm	++	++	/	++	++	/	/	/	++	/	++
<b>MEB</b>	> 0.01 µm	+	+	++	++	++	/	/	/	/	+	+
<b>AFM</b>	> 0.01 µm	+	+	++	+	++	+	+	+	/	+	+

*Légende : ++ convient parfaitement, + convient en partie, / inapproprié*

Le champ granulométrique balayé par les méthodes directes est très large : de la dizaine de nanomètres à plus de 100 micromètres. L'avantage principal de ces différentes méthodes est la multitude d'informations qu'elles peuvent apporter. En effet, au-delà d'une mesure très précise de la taille des particules, ces méthodes sont appropriées pour déterminer la forme des particules, leur position (ce qui sous-tend l'établissement d'une cartographie du dépôt particulaire) et leur matériau. En revanche, ces méthodes sont encore limitées car – hormis l'inspection visuelle – elles ne peuvent pas être réalisées *in situ*. D'autre part, la qualité des résultats (voir la possibilité d'effectuer la mesure) dépend fortement de l'état de surface du substrat.

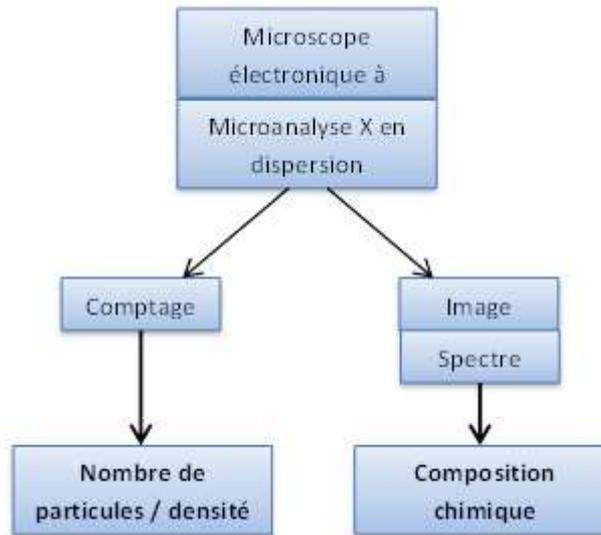


Figure 33 : Démarche expérimentale pour la caractérisation de contaminants particulaires

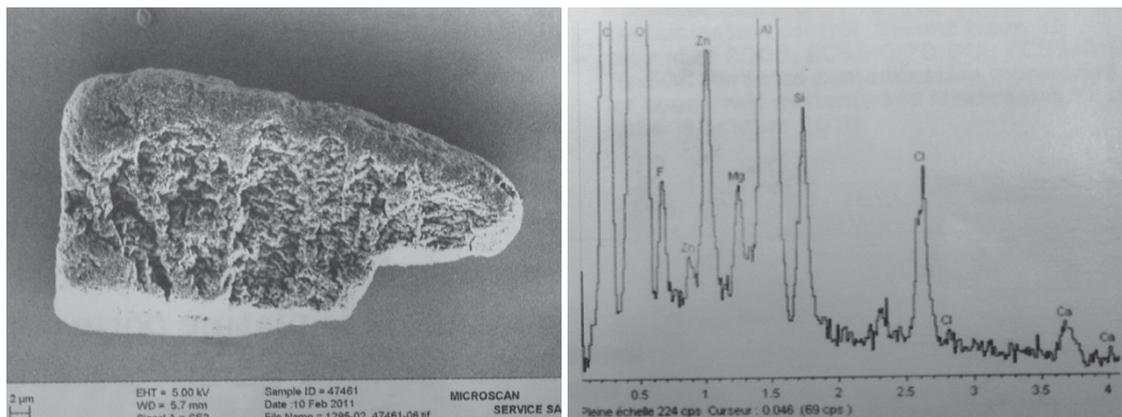


Figure 34 : Particule complexe fluorée provenant d'un joint défectueux. À gauche : image MEB ; à droite : analyse EDX de la composition chimique (CNES©)

### II.3.3. Les méthodes indirectes de caractérisation de particules après détachement de la surface de collecte

Les méthodes de caractérisation du dépôt particulaire directement sur la surface d'intérêt n'étant pas toujours réalisables, des méthodes dites « indirectes » peuvent être utilisées. La procédure consiste à détacher les particules de la surface d'essai grâce à un substrat (ou un milieu) de transfert. Les particules sont ensuite caractérisées en utilisant une technique adaptée au substrat de transfert concerné. La norme IEST-STD-CC1246D décrit en détail les moyens de mesure à disposition (55). L'efficacité des méthodes indirectes dépend, outre de celle de la mesure, de la capacité de détachement des particules sédimentées. Par exemple, l'efficacité est réduite si la procédure

appliquée ne permet pas de retirer toutes les particules de la surface d'essai. En effet, les forces d'adhésion qui retiennent les particules sur la surface peuvent être telles que la technique de détachement se révèle inefficace. Pour ce type de méthode indirecte, il est donc important de connaître le type de particules présentes dans le milieu. En général, plus les particules sont petites, plus il est difficile de les détacher. L'efficacité de la méthode de détachement dépend également de la forme et de la nature chimique des particules.

### **II.3.3.1. Le détachement des particules sédimentées**

Il existe deux types de techniques de détachement normalisées. Les particules peuvent être décollées au moyen d'un adhésif, appelé « substrat de transfert », ou par rinçage au moyen d'un fluide propre (gaz ou liquide). Dans le cas de l'utilisation d'un fluide, la méthode d'analyse peut être directe avec une détection optique ou indirecte avec préalablement une collection des particules sur un substrat de transfert. Dans les deux cas, il est important d'éviter que les particules sédimentent lorsqu'elles sont stockées dans le fluide. Pour être transférées depuis le fluide vers le substrat de transfert, il est possible d'utiliser un système de filtration ou un impacteur. Une fois les particules collectées sur un substrat de transfert, la mesure peut se faire par analyse gravimétrique ou microscopique.

Trois points importants sont à souligner pour le choix de la méthode de détachement des particules. Premièrement, celle-ci ne doit pas agresser la surface analysée afin d'éviter la création de particules lors du prélèvement. Deuxièmement, le matériel utilisé ne doit pas devenir une source de contamination. Enfin, il est primordial de connaître la contamination particulaire de fond du milieu de transfert.

**Tableau 9 : Comparaison des méthodes de mesure pour la détection indirecte de particules sur les surfaces. Extrait de la norme ISO 14644-9**

Méthode	Limite du mode détachement	Estimation des limites de la méthode	Détermination de la concentration	Distribution granulométrique	Analyse du matériau	Analyse de la forme	Détermination de la position	Transportable	Indépendant de la surface	Accessibilité	Rapidité de l'essai	Flexibilité	Influence sur la surface
Examen du fluide de rinçage (liquide/gaz) au moyen de compteurs de particules à extinction	0.2 µm	> 1 µm	++	++	/	/	/	++	++	++	+	++	/
Filtration ou impaction du fluide de rinçage et analyse microscopique	0.2 µm	> 1 µm	++	++	+	++	/	+	++	++	/	++	/
Examen du liquide de rinçage au moyen d'un COP*	0.2 µm	> 0.2 µm	++	++	/	/	/	++	++	++	+	++	/
Examen du gaz de rinçage au moyen d'un COP	0.3 µm	> 0.3 µm	++	++	/	/	/	++	++	++	+	++	/
Filtration du fluide de rinçage et analyse gravimétrique			++	/	/	/	/	++	++	++	/	++	/
<i>Légende : ++ convient parfaitement, + convient en partie, / inapproprié            *COP : Compteur Optique de Particules</i>													

Une technique récemment développée et non incluse dans les référentiels normatifs est le détachement des particules grâce à une sonde de surface. D'après la Figure 36, le principe d'une sonde de surface consiste à créer une circulation d'air permettant d'arracher les particules de la surface puis à analyser le taux de contamination du flux d'air. Une équipe de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) a décrit une méthode d'évaluation des sondes de surfaces permettant d'extraire les particules avant de les analyser optiquement (9). De nombreuses sondes de surfaces sont présentes dans le commerce, leur gamme de mesure en termes de taille des particules pouvant varier de 0.1 à 100 µm. Le diamètre de la sonde peut varier de 20 à 65 mm.

La capacité de la sonde à détacher les particules de la surface dépend de la taille des particules et des caractéristiques de la surface. Les travaux de Toven-Pecault (Figure 35) indiquent que plus les particules sont petites ou la surface est rugueuse plus il est difficile de les détacher. D'autre part, l'expérience montre que la mesure de contamination particulaire surfacique par une sonde de surface est une mesure efficace en relatif, par exemple pour vérifier l'efficacité d'un mode de nettoyage, mais pas en absolu.

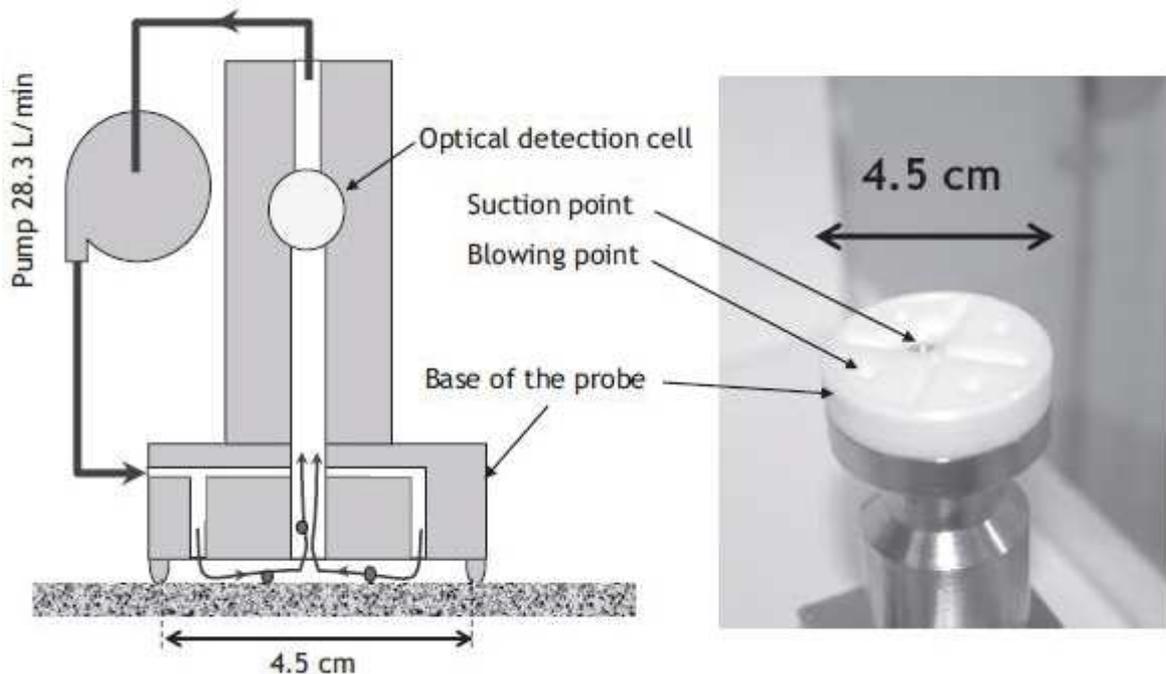


Figure 35 : (A gauche) Schéma du principe de mesure des particules sédimentées par détachement à l'aide d'une sonde de surface ; (à droite) Photo de la base de la sonde de surface (56)

### II.3.3.2. La caractérisation d'un dépôt particulaire

Le détachement des particules effectué, celles-ci se retrouvent dans un milieu de transfert liquide, gazeux ou solide. La caractérisation des particules peut alors s'effectuer soit via des compteurs optiques de particules par voie liquide ou gazeuse, soit à l'aide d'une analyse microscopique ou gravimétrique. On retrouve alors les méthodes de caractérisation décrites précédemment dans la partie II.2.2.

### II.3.4. Le PFO-photomètre : analyse de l'obscurcissement sur une surface témoin

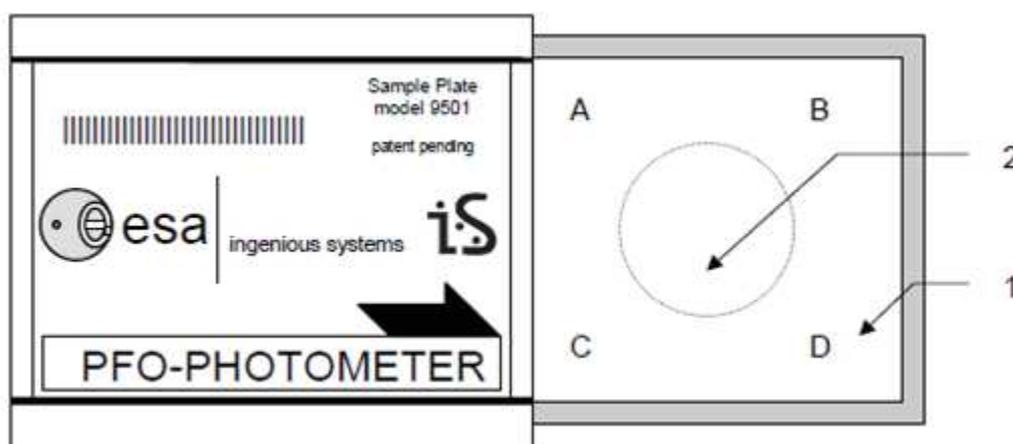
Dans le domaine du spatial, la norme ECSS-Q-ST-70-50C propose un appareil appelé PFO-photomètre pour réaliser le suivi de la contamination surfacique pendant l'intégration des satellites. Cette technique est celle préconisée par l'ESA, l'Agence Spatiale Européenne, et est commercialisée en exclusivité par Ingenious Systems B.V. Le sigle PFO signifie *Particle Fall Out*. Il s'agit d'une mesure optique par diffusion. Le témoin, présenté sur la Figure 36, est breveté. Les particules se déposent sur la surface 1, qui est mobile et peut être protégée par la partie de gauche (pour éviter la contamination lors des transports par exemple). Le témoin est inséré dans la plate-forme de l'appareil de manière identique à chaque mesure de telle sorte que la zone de mesure 2 soit toujours exactement la même. À l'intérieur de l'appareil, la surface de collecte des particules est éclairée par un laser, et

la lumière diffusée par les particules présentes sur la surface du témoin est mesurée par une caméra CCD. Le paramètre indiqué par l'appareil est l'obscurcissement (en ppm, soit en  $\text{mm}^2.\text{m}^{-2}$ ) qui est le rapport entre l'aire couverte par les particules et l'aire totale de la surface de mesure. Elle est calculée grâce à la formule suivante :

$$C = \frac{n \times 0.25 \times \pi \times d^2}{0.25 \times \pi \times D^2} = n \times \frac{d^2}{D^2} \quad \text{Équation 44}$$

Où  $n$  est le nombre de particules comptées,  $d$  est le diamètre de la particule ( $\mu\text{m}$ ) et  $D$  est le diamètre de la zone sensible de mesure (mm). La norme ECSS-Q-ST-70-50C (6) définit le facteur d'obscurcissement d'une surface (OF qui s'exprime en  $\text{mm}^2.\text{m}^{-2}$ ) par la relation suivante :

$$OF = \frac{\sum \text{aire des particules}}{\text{Aire de la surface échantillon}} \cdot 10^6 \quad \text{Équation 45}$$



**Figure 36 : Schéma d'un témoin PFO, breveté par Ingenious Systems B.V. 1 : Surface en verre non réfléchissant. 2 : Surface de mesure (appelée zone sensible), égale à la surface d'un cercle de 15 mm de diamètre**

Cette méthode de mesure ne permet pas de connaître le nombre de particules ni leur taille. La longueur d'onde de la source de lumière est toujours la même. Une photo du témoin peut être acquise par un logiciel dédié, cependant la mesure de l'obscurcissement ne se fait pas par analyse de la photo mais par analyse directe du signal lumineux. Le résultat de la mesure est analysé de manière différentielle, en mesurant l'obscurcissement lié à la contamination particulaire de fond préalablement à celui lié au dépôt de particules. Pour un facteur d'obscurcissement inférieur à  $300 \text{ mm}^2.\text{m}^{-2}$ , la vision de l'œil humain considère la surface comme propre. Pour une salle propre de classe ISO 5, la contamination particulaire surfacique est considérée comme tolérable lorsque le facteur d'obscurcissement ne subit pas d'incrément supérieur à 2 ppm par jour.

La norme ECSS-Q-ST-70-01C indique une relation empirique entre la quantité de particules déposées (*PFO*) exprimée en taux de contamination surfacique (mm<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> par 24 heures) et la quantité de particules dans l'air (*N* étant le numéro de la classe ISO) : La Figure 37 présente les photos à titre indicatif prise par le PFO-photomètre de deux témoins ayant des taux de contamination très différents.

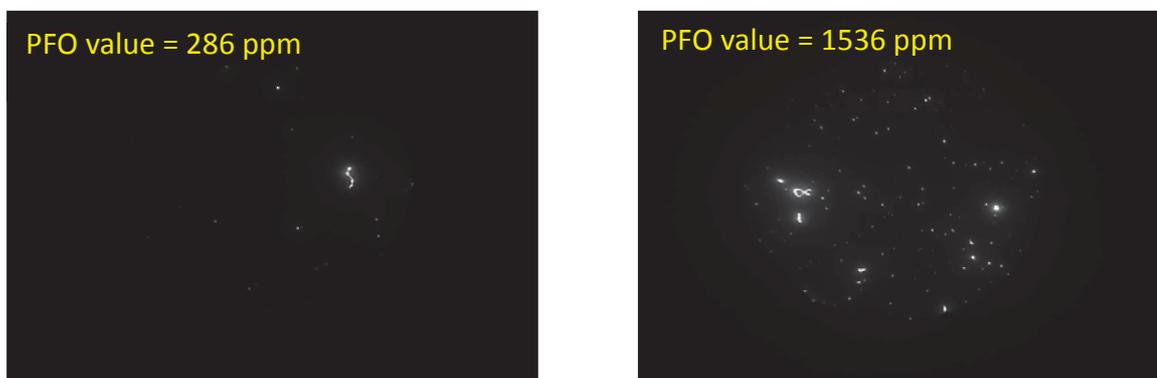


Figure 37 : Comparaison de deux photos de témoins particulaire prises avec un PFO-photomètre

$$PFO = 0.069 * 10^{(0.72N-2.16)} \quad \text{Équation 46}$$

Les taux de dépôt par jour acceptables suivant cette classification sont présentés dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 10 : Présentation des taux d'obscurcissement acceptables sur des PFO exposés dans des salles propres suivant leur classification (5)

Classe ISO (N)	Taux d'obscurcissement toléré (ppm/jour/m <sup>2</sup> )
3	0.069
4	0.36
5	2.0
6	10
7	52
8	275

Il est possible de trouver dans la littérature d'autres types de relation. En 1982, Otto Hamberg (30) a établi la relation empirique suivante :

$$\frac{dN(d_p,t)}{dt} = c * p * N_c^{0.773} \quad \text{Équation 47}$$

Où  $\frac{dN(d_p,t)}{dt}$  représente le nombre de particules de taille supérieure à  $d_p$  ( $\mu\text{m}$ ) déposées sur une surface horizontale en 24 heures par unité de surface ( $\text{ft}^2$ ) et  $N_c$  est le nombre de particules par unité de volume ( $\text{ft}^3$ ) de diamètre supérieur à  $d_p$  présentes dans l'air :

$$N_c = \left(\frac{0.5}{d_p}\right)^{2.2} * A \quad \text{Équation 48}$$

Où  $d_p$  représente le diamètre de la particule en  $\mu\text{m}$  et A la classe de la propreté de l'air selon la norme appliquée en 1982 FED-STD-209<sup>E</sup>. La constante c est égale à 1 si  $dN/dt$  est exprimé en particule/ $\text{ft}^2/24\text{h}$  et égale à 1.076 si  $dN/dt$  est exprimé en particule/ $\text{m}^2/24\text{h}$ .  $p$  est une constante, fonction du renouvellement de l'air dans l'enceinte. La prise en compte du taux de renouvellement d'air inscrit une différence majeure avec la relation indiquée par la norme ECSS. Dans l'étude de Hamberg, la constante  $p$  est définie par le tableau de valeurs suivant (Tableau 12) :

**Tableau 11 : Valeur de la constante p en fonction des caractéristiques de renouvellement d'air de l'enceinte**

Caractéristique de l'air	Critère	p
Air à faible vitesse	< 15 changements d'air/h	28510
Salle propre classique	15 à 20 changements d'air/h	2851
Flux d'air laminaire	Vitesse de l'air > 0.46 m/min	578

## **II.4. Intérêt d'une mesure de la contamination particulaire surfacique locale en temps réel**

### **II.4.1. Mise en perspective des objectifs**

Nous avons vu jusqu'à présent deux grands types de mesure : la mesure de la contamination particulaire volumique et la mesure de la contamination particulaire surfacique. La contamination particulaire volumique représente la quantité de particules contenue dans le volume d'air de la salle propre alors que la contamination particulaire surfacique représente la quantité de particules présentes sur les surfaces de la salle propre. La contamination particulaire volumique est contrôlée de manière systématique dans les salles propres dont la classification en termes de propreté dépend de cette concentration. Nous avons présenté dans la partie II.2 les moyens de mesure de la contamination particulaire volumique. Rappelons que, parmi ces différents moyens de mesure, le plus usité est le compteur optique de particules qui consiste à aspirer un volume d'air et à compter le nombre de particules présentes dans ce volume grâce à l'analyse de la lumière diffusée par les particules éclairées par une source laser.

L'objectif de cette partie est de montrer l'intérêt de développer des moyens de mesure de la contamination particulaire surfacique qui permettraient une mesure locale et en temps-réel. Par mesure locale, il est entendu que l'instrumentation développée pourra être placée au plus près des zones critiques afin d'être représentative de la contamination particulaire réelle des surfaces à contrôler. Le terme de mesure en temps-réel signifie d'une part que la mesure ne doit pas nécessiter l'intervention d'un opérateur, et d'autre part qu'elle pourra être réalisée en autonomie à des intervalles réguliers. Le but de ces contraintes est de pouvoir donner un signal d'alerte lorsqu'un événement de contamination survient. Par conséquent, ce capteur pourra également classifier les surfaces selon la norme ISO 14644-9 présentée dans le chapitre 1 (cf. I.2.2.3.b).

### **II.4.2. Différence entre les contaminations particulaires volumique et surfacique**

L'état de l'art ne permet pas d'établir une corrélation entre la contamination particulaire volumique et la contamination particulaire surfacique. L'étude des mécanismes de transport et de dépôt dans le chapitre I a permis de montrer que de nombreux facteurs entrent en jeu dans le phénomène de contamination des surfaces. Ainsi, le type de particules contenu dans l'aérosol considéré est très important, de par leur taille tout d'abord mais également de par leur forme et leur matériau. Les aspects de la surface de dépôt sont également critiques : sa rugosité, sa porosité, etc.

Enfin n'oublions pas tous les paramètres environnementaux influents : l'humidité relative, les écarts de température, le type de flux d'air, etc. La contamination particulaire surfacique est donc un phénomène complexe particulièrement difficile à prédire. Les différentes approches de modélisation décrites par l'état de l'art (cf. I.3.6) montrent que s'il est possible de prédire le dépôt des particules dans des cas très précis et simplifiés, il est beaucoup plus compliqué de prédire la contamination surfacique dans le cas d'un environnement complexe. Par environnement complexe, est considéré un environnement avec des flux non-systématiquement laminaires (notamment dus à la présence de surfaces multiples et d'opérateurs) contenant un aérosol polydisperse de particules non identifiées. Les enceintes fermées considérées dans notre cas sont des salles propres pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres carrés avec des grandes hauteurs sous plafond pour accueillir des satellites.

### II.4.3. Expériences menées

Les expériences présentées ci-dessous ont été réalisées dans les salles d'intégration du CNES, pendant des opérations menées sur des instruments. Deux objectifs étaient recherchés : premièrement, démontrer l'intérêt d'une mesure locale de la contamination particulaire par rapport à une mesure globale de la propreté de la salle et deuxièmement, établir la nécessité d'une mesure en temps-réel de la contamination particulaire surfacique.

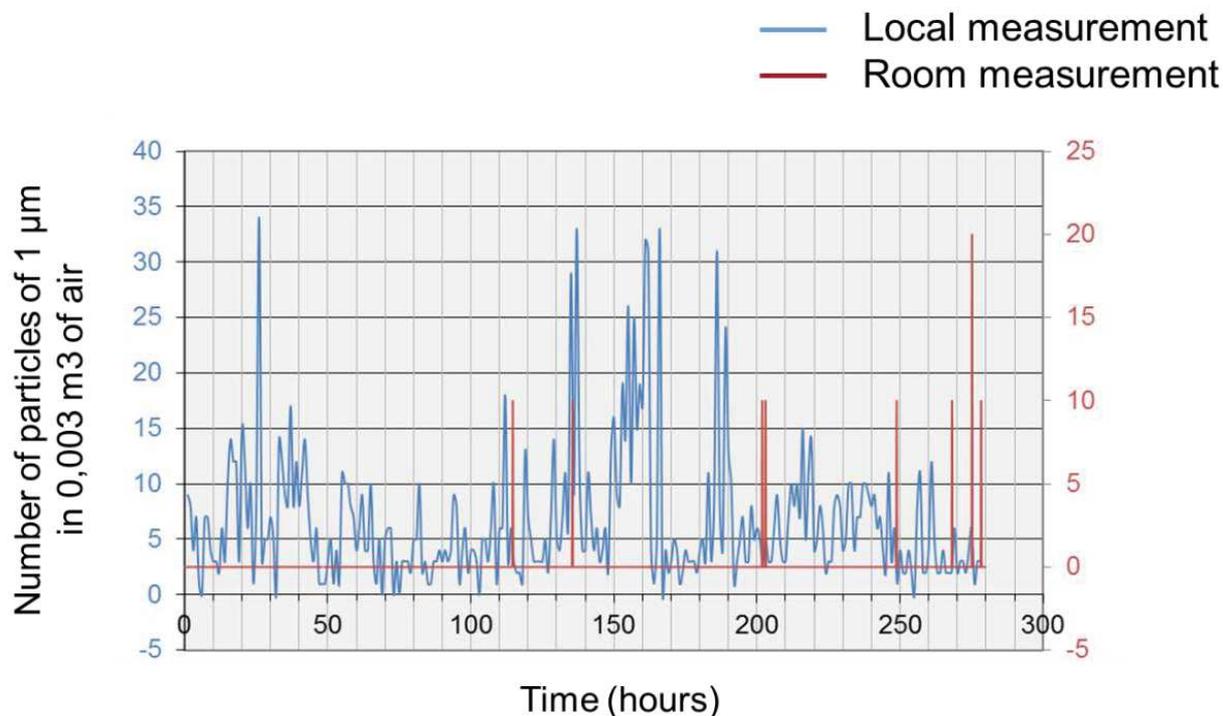
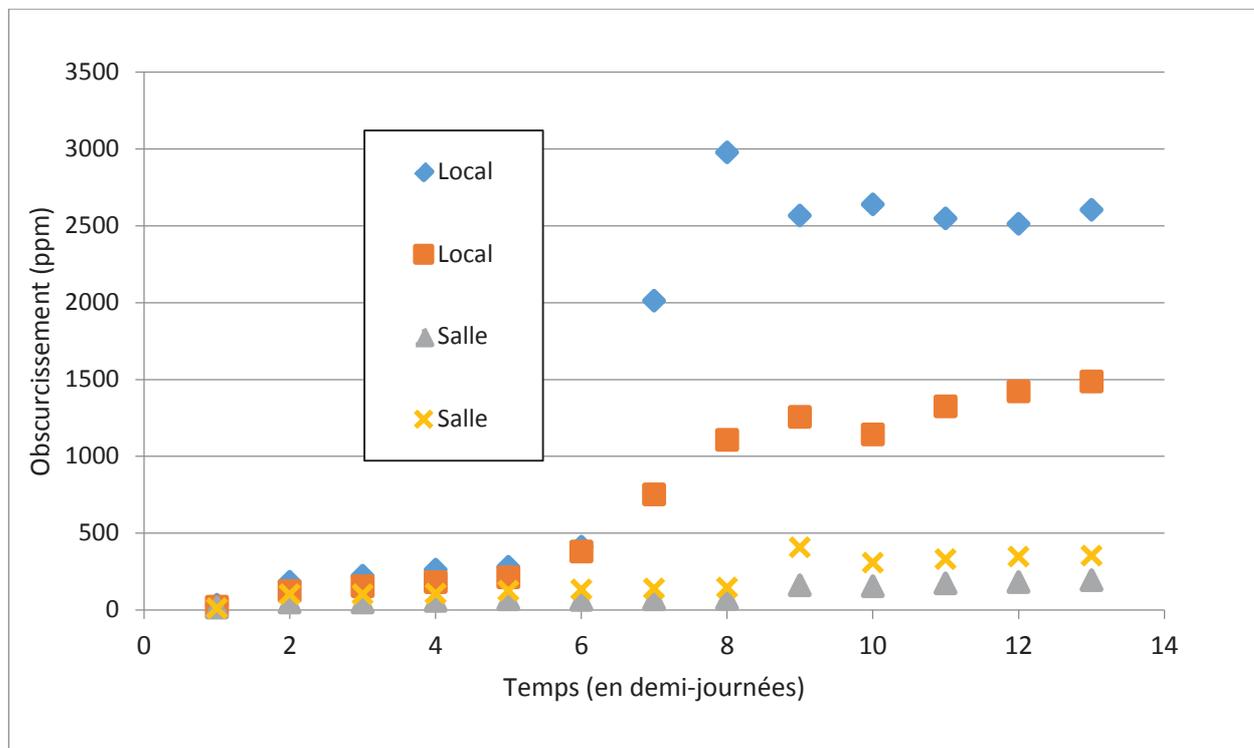


Figure 38 : Comparaison entre une mesure de la contamination particulaire volumique "globale" et la contamination particulaire volumique "locale" dans une salle d'intégration du CNES

Le premier objectif est de démontrer l'intérêt d'une mesure locale de la contamination particulaire par rapport à une mesure globale de la propreté de la salle. Pour atteindre cet objectif, les résultats de deux compteurs optiques de particules sont comparés, c'est-à-dire la concentration particulaire volumique de l'air de la salle. Le premier compteur est celui de la salle d'intégration. Il s'agit d'un compteur fixe, placé contre un mur de la salle à environ deux mètres de hauteur. Le second est un compteur portable, placé à proximité de l'instrument et des opérations, à environ 1,5 m de hauteur. Les deux compteurs fonctionnent de manière rigoureusement identique. Ils aspirent tous les deux  $0.003 \text{ m}^3$  d'air dans un intervalle de 10 minutes. Les cinq canaux de mesure sont :  $0.3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $1 \text{ }\mu\text{m}$  et  $5 \text{ }\mu\text{m}$ . Les résultats du canal «  $1 \text{ }\mu\text{m}$  » (c'est-à-dire le nombre de particules comprises entre  $1 \text{ }\mu\text{m}$  et  $5 \text{ }\mu\text{m}$ ) sont représentés sur la Figure 38. Les mesures présentées ci-dessous ont été réalisées pendant 270 heures dans une salle propre ISO 8 alors que des opérations avaient lieu autour des instruments présents dans la salle d'intégration. Les résultats montrent que les événements de contamination sont beaucoup plus fréquents à proximité des activités. De forts pics de contamination sont observés alors que l'enceinte est considérée propre par le compteur volumique de la salle.

Pour atteindre le second objectif, des témoins passifs de contamination particulaire type « PFO » ont été placés dans une salle d'intégration du CNES. La Figure 39 présente les résultats de mesure de quatre de ces témoins, placés à des endroits différents dans la salle propre. Les témoins avec la dénomination « local » ont été placés à proximité de l'instrument sur lequel des opérateurs travaillaient tandis que les témoins avec la dénomination « salle » ont été placés à proximité du compteur particulaire volumique de la salle. Si une tendance générale est observée avec une hausse de l'obscurcissement pour les deux témoins, les résultats montrent une nette différence en faveur du témoin placé à proximité des opérations. La contamination particulaire surfacique est donc plus importante localement.



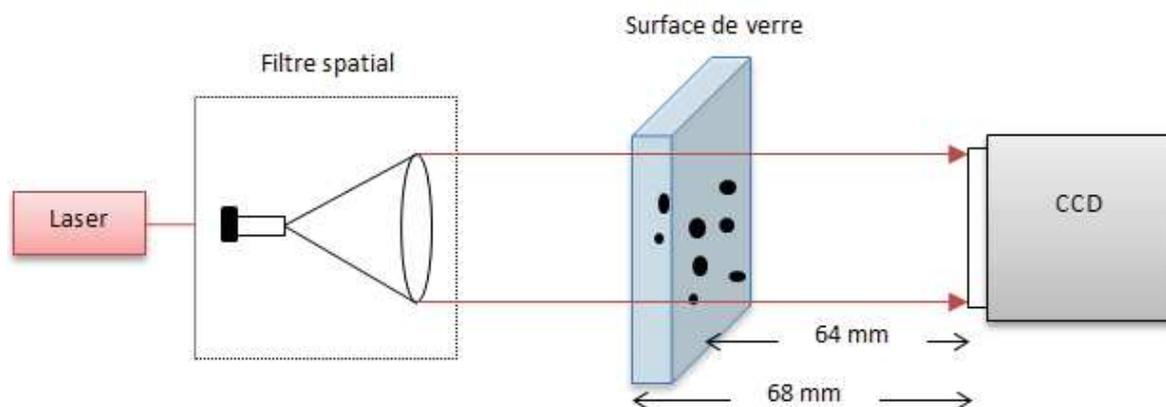
**Figure 39 : Mesures des obscurcissements de quatre témoins réalisées avec un PFO-photomètre après exposition en salle AIT du CNES du 18 avril au 24 mai 2013**

#### **II.4.4. Mesure de la contamination particulaire surfacique en temps-réel par détection optique**

Le début de ce chapitre nous a permis de démontrer les limites de la mesure de la contamination particulaire volumique pour contrôler la qualité d'une salle propre. Le retour d'expérience des intégrations de satellites montre que, malgré un respect de plus en plus strict des spécifications de propreté recommandées par les standards spatiaux pour la réalisation des divers équipements de vol, il existe encore des anomalies consécutives à la contamination particulaire. Ces problèmes peuvent affecter différents niveaux des sous-systèmes et sont dus à une contamination par des particules, qu'elles proviennent de l'environnement ou soient liées aux étapes de fabrication. Dans le domaine du spatial, seule une détection passive est réalisée à l'aide de témoins particuliers dont l'obscurcissement de surface est mesuré avant et après exposition, de type PFO-photomètre. Or, l'utilisation de moyens de détection actifs permettrait de mieux comprendre les phénomènes de sédimentation des aérosols et leur remise en suspension, de mieux détecter les événements de contamination et donc de mieux appréhender le contrôle de la contamination. De nouveaux développements technologiques ont été réalisés ces dernières années afin de proposer des instrumentations actives qui permettraient de détecter la sédimentation des particules en salle propre. L'ensemble des développements réalisés sont basés sur la détection optique des particules.

## II.4.1. L'holographie appliquée à la détection de particules sédimentées

Le mot « holographie » vient du grec « holos » (« en entier ») et « graphein » (« écrire »). Holographie signifie donc « tout représenter ». L'holographie est un processus d'enregistrement et de

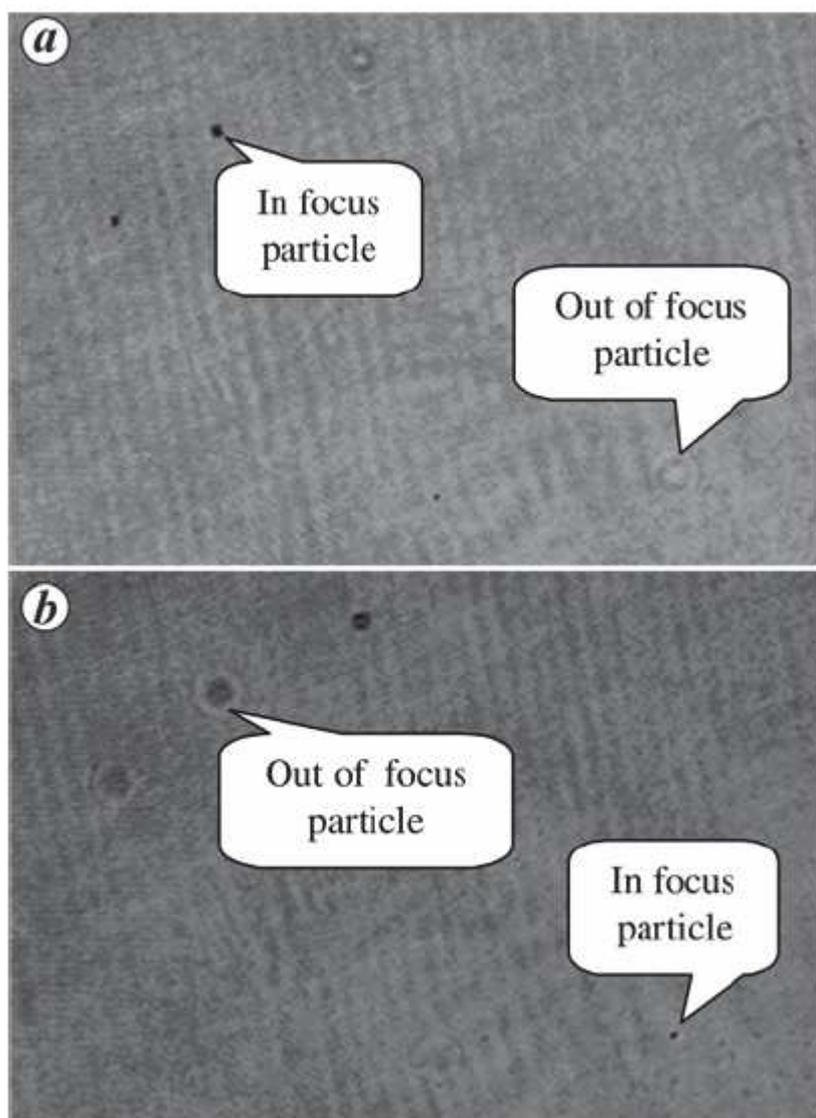


**Figure 40 : Schéma du montage expérimental pour le système d'imagerie des particules par holographie digitale développé par Singh et al. (57)**

restitution de l'onde lumineuse provenant d'un objet. Il est considéré ici uniquement des objets solides tridimensionnels diffusant la lumière reçue. L'holographie correspond à l'enregistrement du relief d'un objet grâce à la phase de l'onde lumineuse qui a rencontré l'objet. L'enregistrement de la phase d'une onde se fait par interférométrie, c'est-à-dire en superposant à l'onde venant de l'objet, une onde lumineuse de référence. Dans le cas de l'holographie, les interférences ne sont possibles que si les deux ondes objet et référence proviennent d'une même source unique d'éclairage. L'holographie consiste donc à enregistrer par interférométrie, sur un support photosensible, l'onde lumineuse diffusée, diffractée par un objet convenablement éclairé. La restitution de cette onde lumineuse à partir de l'enregistrement est appelée hologramme.

Vijay Ray Singh et Gopalkrishna Hegde ont développé un système d'imagerie des particules par holographie digitale (57) schématisé sur la Figure 40. Des hologrammes de particules de taille supérieure à  $10\ \mu\text{m}$  ont été réalisés, en utilisant un détecteur CCD ayant  $1280 \times 1960$  pixels de  $6\ \mu\text{m}^2$ . Le laser utilisé est Nd-Yag (d'une longueur d'onde de  $532\ \text{nm}$ ) focalisé sur une surface de verre où sont déposées les particules, sur chaque face. Deux types d'algorithmes sont couramment utilisés pour la reconstruction numérique des hologrammes : la méthode par transformée de Fourier et la méthode par convolution. Les différences entre les deux méthodes sont présentées dans la publication de Singh citée ci-dessus. Dans le système développé par Singh, une reconstruction par convolution a été choisie, notamment parce que la taille des pixels de l'image reconstruite est la

même qu'avec le capteur CCD et qu'elle ne varie pas avec la distance de reconstruction. La Figure 41 ci-dessous représente les hologrammes de la face avant et de la face arrière.



**Figure 41 : Images reconstruites numériquement par holographie digitale a) des particules sur la face avant de la surface de dépôt en verre; b) des particules sur la face arrière (57)**

Un second système a été développé en remplaçant la surface de verre par une cuvette contenant de l'eau. Les particules à mesurer sont en suspension dans l'eau, il s'agit donc d'une reconstruction dynamique. Ce type de système permet d'améliorer la résolution et la sensibilité à la profondeur de champ mais, le milieu d'analyse étant liquide, il ne correspond pas au besoin d'analyse de la contamination des surfaces des salles propres.

Depuis 2013, l'entreprise néerlandaise Technology of Sense a développé un appareil de mesure de la sédimentation de particules par holographie (Figure 42). Le système de détection optique se base sur une imagerie holographique qui permet de mesurer les particules dont le diamètre est compris entre 25 et 1000  $\mu\text{m}$ . Les particules se déposent sur un support transparent en PMMA<sup>6</sup> qui peut être changé. Le support se compose de trois cavités, les surfaces de dépôt étant orientées à 45° (Figure 43). La mesure est en temps réel avec l'envoi d'un faisceau laser (diode laser 406 nm à 5 mW) toutes les 10 minutes. Le système de détection optique exploite le signal holographique afin de restituer une image du relief des particules. Ce capteur sans fil et sans pompe est peu encombrant (15 x 39 x 80 cm, 5 kg), sans être miniaturisé.



**Figure 42 : Image de synthèse de l'APMON développé par Technology of Sense**

---

<sup>6</sup> Le PMMA est l'abréviation du poly(méthacrylate de méthyle) qui est un polymère thermoplastique transparent plus connu sous son premier nom commercial de Plexiglas (nom déposé)

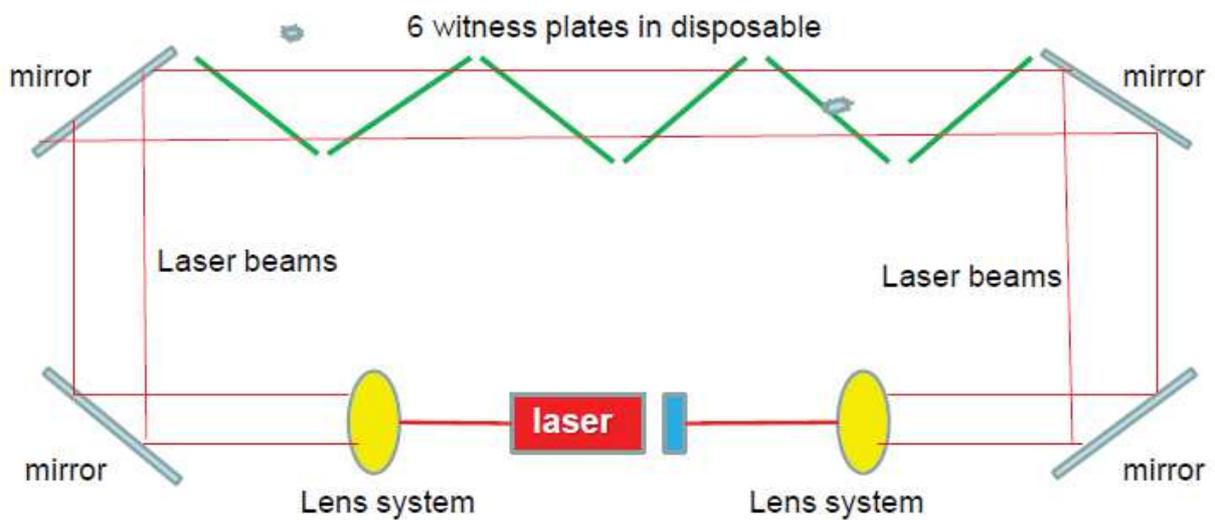


Figure 43 : Schéma du principe de fonctionnement de l'APMON

## II.4.2. Mesure des particules par analyse d'images

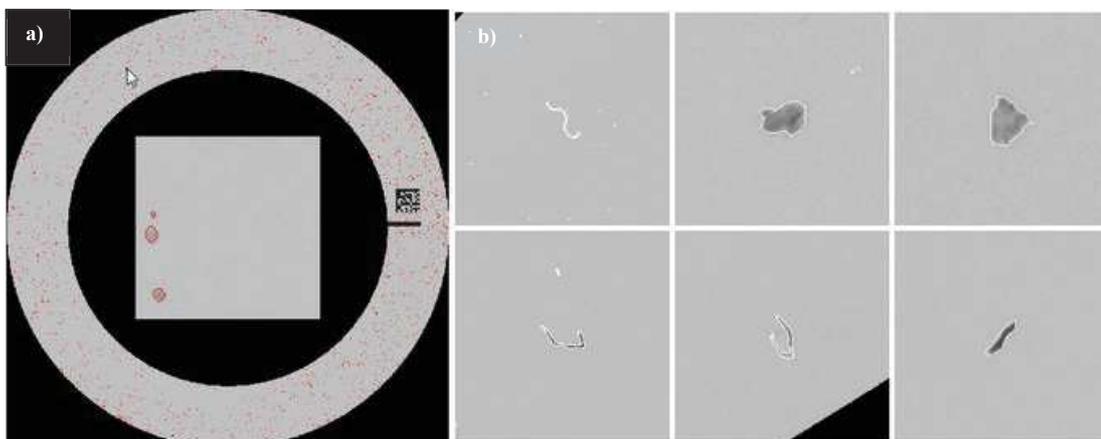
L'entreprise néerlandaise SAC-Netherlands commercialise un compteur de particules surfaciques en temps réel. Cet instrument, appelé PDM pour *Particle Deposition Monitoring*, permet un suivi de la contamination particulaire surfacique sur une surface témoin en verre de près de 50 cm<sup>2</sup> (Figure 44). La mesure peut se faire de manière différée après exposition du témoin ou en temps réel en laissant le témoin en place sur l'instrument. Le comptage et la mesure de la taille des particules s'effectuent par analyse d'image. Des photos de 96 mégapixels sont obtenues par imagerie de contraste. Une première image est réalisée avant la première exposition afin de pouvoir déduire les éventuels défauts de surface et la contamination restante après nettoyage du témoin. Cette instrumentation permet de mesurer des particules supérieures à 10 µm, avec une précision de plus ou moins 3.5 µm pour une particule de 20 µm (soit une marge d'erreur de 17.5%). La taille de l'instrument est de 26 x 20 x 55 cm avec une masse de 15.3 kg.



**Figure 44 : Photos et schéma de l'instrumentation développée par SAC Netherlands : le PDM (Particle Deposition Monitoring); les photos de droite représentent la surface de dépôt en verre**

Les résultats sont présentés sous différentes formes. La Figure 45a montre une cartographie des particules sur la surface de dépôt (représentées en rouge, l'image au centre de l'anneau représente un zoom sur deux particules). La Figure 45b montre des particules détournées afin de mesurer la longueur et l'aire des particules.

Entre le temps  $T_0$  et le temps  $T$ , pour un diamètre de particules  $D$  et une classe SCP (ayant un numéro de classification  $N$ ), la concentration particulaire surfacique augmente suivant la loi suivante :



**Figure 45 : a) Particules cartographiées sur la surface de mesure; b) Particules détournées pour la mesure de la taille et de l'air**

$$C_{D,PDC} = \frac{(C_{D,SCP,T} - C_{D,SCP,T_0})}{(T - T_0)} = \frac{(10^{NT} - 10^{NT_0})}{D(T - T_0)} \quad \text{Équation 49}$$

Cette équation peut être simplifiée en introduisant PDC comme la classe de dépôt de particules supérieures au diamètre D, par m<sup>2</sup> :

$$C_{D,PDC} = \frac{10^{PDC}}{D} \quad \text{Équation 50}$$

$$\text{Avec PDC} = \log_{10}(D * C_{D,PDC}) = \log_{10}(PDR)$$

Où PDR est le taux de dépôt des particules (*Particle Deposition Rate*) supérieures au diamètre D, par dm<sup>2</sup> et par heure:

$$PDR = \frac{C_{D,PDC} * D}{100} \quad \text{Équation 51}$$

### II.4.3. Détection optique des particules sédimentées par rétrodiffusion

L'entreprise française Winlight System s'est associée au CEA et à l'université d'Aix-Marseille pour développer une instrumentation temps-réel de mesure de la contamination surfacique. Le Cleapart-100, dont le brevet a été déposé en 2015, permet de mesurer des particules de diamètre supérieur à 5 µm (Figure 47). La surface de dépôt est en verre et mesure 91 cm<sup>2</sup>. La détection optique est basée sur un éclairage avec des LED vertes placées de part et d'autre d'une optique de focalisation. La lumière rétrodiffusée par les particules est recueillie dans l'optique de focalisation et enregistrée par un capteur CCD. Les résultats sont présentés sous la forme d'une densité surfacique de particules classées par taille à partir de 5 µm. Le nombre de particules est donné par intervalle : entre 5 et 15 µm, entre 15 et 25 µm, entre 25 et 50 µm, entre 50 et 100 µm, supérieures à 100 µm. Le système optique est couplé à un système de scan qui permet de mesurer les 91 cm<sup>2</sup> de surface de dépôt en environ 15 minutes par déplacement du bloc optique dans deux dimensions. La sensibilité aux variations de lumière ambiante est gérée grâce à une calibration de départ (un scan initial sur le lieu d'exposition). Un scan représente 1970 Mégapixels ce qui équivaut à une résolution théorique de 2.1 µm pour une surface totale de 91 cm<sup>2</sup>. En pratique, la meilleure résolution obtenue est de 5 µm avec une incertitude importante (impossibilité de départager des particules de 5 µm de particules de 15 µm). La taille de l'instrument est de 21x21x20 cm avec une masse de 6 kg.



**Figure 46 : Le Cleapart-100, commercialisé par Winlight System. La surface de dépôt peut être placée horizontalement ou verticalement**

## II.5. Comparaison et limites

Un tableau comparatif des différents moyens de mesure de la contamination particulaire est proposé dans l'annexe A. Ainsi sont d'abord présentés les moyens de mesure de la contamination particulaire volumique puis les moyens de mesure de la contamination particulaire surfacique.

Dans le cas de la contamination particulaire volumique, les méthodes disponibles sur le marché permettent d'accéder à une étendue granulométrique très vaste. En effet, des particules d'une centaine de microns peuvent être détectées par la plupart des méthodes. Si certaines de ces méthodes présentent de très bonnes sensibilités en termes de comptage et de mesure de la taille des particules, elles sont en revanche bridées par le système de collection des particules qui leur est systématiquement associé. En effet, les différentes méthodes de mesure sont couplées à un système de pompage qui aspire une fraction de l'aérosol à analyser dans la salle propre. L'air prélevé est ensuite transféré dans un système de tri inertiel des particules qui permet d'obtenir des canaux de particules comprises entre deux tailles. La collection des particules de manière indirecte augmente l'incertitude de mesure à cause des pertes de particules sur les parois et à cause du manque de précision du tri inertiel (tel que présenté dans la Figure 23). En termes d'encombrement, tous les systèmes ne sont pas au même niveau. De nombreuses recherches ont été réalisées pour miniaturiser le système de pompage et le système d'impaction notamment grâce aux travaux en micro-fluidique. En revanche, si les systèmes de type MEMS ou mini-microscope sont miniaturisés, les systèmes les plus courants tels que les compteurs optiques de particules sont relativement de grandes dimensions. Enfin, il est important de souligner que la contamination particulaire volumique se mesure naturellement en temps-réel grâce à un pompage par intermittence à des fréquences variables. La valeur typique de pompage pour un compteur optique de particule placé dans une salle propre pour en contrôler la classification est de 2.83 litres d'air aspirés pendant une minute toutes les dix minutes.

Dans le cas de la mesure de la contamination particulaire surfacique, on distingue la méthode indirecte via un PFO-photomètre des méthodes directes. Le PFO-photomètre est un instrument couramment utilisé dans les salles propres du spatial. L'avantage principal de cette méthode réside dans le fait que les témoins peuvent se placer à proximité d'une zone critique de par leur faible taille (un témoin mesure environ 32 cm<sup>2</sup> pour une zone d'exposition de 16 cm<sup>2</sup> et une zone de mesure de 1.2 cm<sup>2</sup>). En revanche, s'agissant d'une instrumentation dite passive, l'intervention d'un opérateur pour récupérer le témoin exposé et réaliser la mesure grâce au PFO-photomètre est indispensable. Afin de remédier à ces inconvénients, un certain nombre d'instrumentations actives sont actuellement développées. Ces instrumentations sont autonomes pour réaliser les mesures et sont conçues de telle manière que les surfaces exposées peuvent être directement mesurées. D'autre part,

ces instrumentations peuvent répondre aux objectifs fixés par la norme ISO 14644-9 qui vise à classer les salles propres non plus uniquement en fonction de la quantité de particules dans l'air mais également en fonction de la quantité de particules sur les surfaces. Afin de répondre à cette norme, une mesure quantitative telle que proposée par le PFO-photomètre avec l'indication de l'obscurcissement des particules sur la surface n'est plus suffisante. Les récents développements cherchent à compter le nombre de particules tout en les classifiant en fonction de leur taille, voir en fonction de leur forme. Ces informations supplémentaires, exigées par la norme ISO 14644-9 permettront de remonter à la source de contamination afin de mieux tracer les événements de contamination et par conséquent d'en éliminer les causes. La comparaison de trois instruments permettant une mesure en temps-réel de la contamination particulaire surfacique montre que le principe de mesure est systématiquement basé sur de la détection optique dont la résolution est limitée à 5  $\mu\text{m}$ . Il convient donc de supposer que ce type de détection ne permet pas d'obtenir des résolutions comparables à celle du PFO-photomètre qui est de 1  $\mu\text{m}$ . Enfin, une autre limite de ces instruments est leur encombrement puisque le plus petit des capteurs actuellement disponible sur le marché mesure 8.82 dm<sup>3</sup>.

## II.6. Conclusion du chapitre II

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux moyens utilisés pour contrôler les salles propres en termes de contamination particulaire aéroportée. Ainsi, les différentes techniques présentées effectuent des mesures de propreté par rapport à une quantité de particules présentes dans l'air. Cette quantité de particules en suspension dans un aérosol, couramment appelée contamination particulaire volumique, représente uniquement la qualité de l'air ambiant dans la salle propre. Ces techniques, mises en place depuis la création des salles propres sont très fiables et permettent de mesurer une très large gamme de particules. Toutefois, ces techniques ne permettent pas le contrôle de la propreté des surfaces dans les salles propres. En effet, il n'existe pas de corrélation directe entre la quantité de particules présentes dans un volume d'air et la quantité de particules ayant sédimentées sur une surface critique.

Depuis quelques années, le besoin de contrôler la propreté des surfaces dans les salles propres est devenu de plus en plus critique afin de lutter contre les effets des particules sédimentées.

Une étude des différents moyens de mesure de la contamination particulaire surfacique a été effectuée afin de comparer les techniques disponibles aujourd'hui. Si la mesure avec un PFO-photomètre d'un taux d'obscurcissement sur une surface témoin est couramment utilisée, les moyens de mesure actifs et temps-réels sont en revanche en cours de développement ou d'industrialisation.

Les deux premiers chapitres nous ont permis de faire un point complet sur les mécanismes de contamination particulaire des surfaces et sur les moyens de détection existants. Ils ont donné lieu à une publication et vont nous servir à établir le cahier des charges du système de détection idéal.



### III. ETUDE DES SOLUTIONS DE DETECTION DES PARTICULES SEDIMENTEES SUR UNE SURFACE

---



### III.1. Introduction

Les chapitres précédents ont permis d'aborder d'une part les phénomènes physiques à l'origine de la contamination particulaire et d'autre part les moyens techniques disponibles actuellement pour contrôler cette contamination. La contamination particulaire est un phénomène bien connu dans les salles propres puisque la présence d'opérateurs et le déroulement de tous types d'activités amènent une quantité de particules non négligeable pouvant conduire à la contamination des éléments sensibles présents dans la salle. De nos jours, en termes de contamination, les salles propres sont uniquement contrôlées en mesurant la quantité de particules présentes dans l'air ambiant. Or, ces moyens de mesure de la contamination particulaire aéroportée ne sont pas complètement représentatifs de l'état de propreté d'une salle propre. En effet, la quantité de particules en suspension dans un aérosol permet de connaître la qualité de l'air ambiant dans la salle propre mais n'apporte pas d'informations directes sur la propreté des surfaces. La problématique de la contamination des surfaces préoccupe de plus en plus les industries.

Dans le domaine du spatial, le dépôt de particules sur les surfaces critiques des instruments ou des différents sous-systèmes des satellites est d'autant plus probable que chaque satellite est unique et assemblé intégralement par des opérateurs (en comparaison avec des chaînes d'assemblage entièrement automatisées en micro-électronique par exemple). En outre, les acteurs du spatial doivent affronter la problématique de ne plus pouvoir intervenir sur les satellites dès leur installation dans le lanceur. Cette contrainte implique la possibilité que de nouveaux contaminants se déposent sur les surfaces (les forces de remise en suspension des particules évoquées dans le chapitre 1 sont particulièrement déterminantes lors du lancement d'une fusée). Ainsi, des surfaces critiques considérées propres au sol peuvent être contaminées par le dépôt de particules initialement présentes sur des parties moins critiques et donc moins contrôlées. La présence de particules peut conduire à des pertes de performances voire à des anomalies qui peuvent se révéler particulièrement coûteuses. Afin de répondre à ce besoin, des recherches sont menées afin de proposer une instrumentation temps-réel pour détecter les particules sédimentées.

Le chapitre II a présenté divers capteurs récemment développés. Ces instruments sont prometteurs et ouvrent la voie à une nouvelle façon de considérer la propreté des salles à environnement contrôlé. Tous basés sur une détection optique, ils sont cependant limités dans leur capacité à détecter les petites particules (de taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$ ). En effet, les principes de détection utilisés ne permettent pas de mesurer des très petits éléments sans utiliser des éléments optiques coûteux en énergie et en encombrement. Par conséquent, le cahier des charges établi dans

notre étude vise spécifiquement à apporter une solution pour mesurer des particules de l'ordre du micron, tout en conservant un équipement de taille raisonnable pouvant être placé à proximité des zones critiques. Le besoin exprimé par le CNES est la constitution d'un réseau de capteurs dans les salles d'intégration des satellites afin d'effectuer une cartographie de la contamination particulaire des surfaces en temps-réel. Le but *in fine* est de réaliser un suivi du taux de contamination des satellites et de tous les éléments le constituant et ce depuis son assemblage jusqu'à son installation dans le lanceur.

Ce chapitre a pour objectif de décrire les différents développements possibles pour détecter la contamination particulaire surfacique en temps-réel. Dans ce but, les contraintes de détection seront tout d'abord analysées afin de construire un cahier des charges en lien avec le besoin exprimé dans le paragraphe précédent. Les critères ainsi spécifiés permettront par la suite une première étude des solutions envisageables. Enfin, la dernière partie de ce chapitre décrira plus précisément les différents types de développement possible en basant le capteur sur un principe de détection optique. Les choix technologiques effectués serviront de base au chapitre suivant qui se focalisera sur le développement de la cellule de mesure du capteur.

## III.2. Les contraintes de détection

Afin d'établir des spécifications précises du capteur, la première partie de ce chapitre aborde les différentes contraintes de détection liées à l'application visée : la détection en temps-réel de la contamination particulaire surfacique dans les salles d'intégration des satellites. Ces salles d'intégration sont des salles propres soumises à la classification ISO. Afin de mieux connaître les *entités* à mesurer, une étude du milieu de mesure et des particules susceptibles d'être détectées a été réalisée au sein du CNES. Ces données, couplées aux études préalablement réalisées dans les deux premiers chapitres de ce mémoire, vont permettre de définir les spécifications du capteur. Ces spécifications seront clairement divisées en différentes catégories : mécaniques, fonctionnelles, environnementales et enfin, liées à l'utilisation même du capteur. Un cahier des charges du capteur est présenté en annexe B, il rassemble les différentes exigences évoquées au cours de cette partie.

### III.2.1. Etude du milieu « salle propre »

La norme de référence pour la classification des salles propres a été présentée dans les chapitres précédents. Il s'agit de la norme ISO-14644, intitulée « Salles propres et environnements maîtrisés apparentés », qui se découpe en neuf sous-parties. Nous nous focaliserons sur la partie 1 « Classification de la propreté de l'air » et sur la partie 9 « Classification de la propreté des surfaces par la concentration de particules ».

Selon la norme ISO 14644-1, les particules nécessairement détectées mesurent entre 0.1 et 5  $\mu\text{m}$  de diamètre. Au-delà de la classe ISO 6, uniquement les particules entre 0.5 et 5  $\mu\text{m}$  sont comptabilisées. Le Tableau 2 présente les quantités de particules admissibles dans 1  $\text{m}^3$  de l'aérosol à contrôler. Dans le cas d'une salle propre, l'aérosol est l'air ambiant. Les quantités de particules peuvent varier de quelques particules dans 1  $\text{m}^3$  d'air à plusieurs centaines de milliers. Plus les particules sont petites, plus leur probabilité de présence augmente. La quantité maximale de particules indiquée dans le tableau est 3 520 000 pour les particules supérieures à 5  $\mu\text{m}$  dans le cas d'une salle de classe ISO 8<sup>7</sup>.

Selon la norme ISO 14644-9, les particules susceptibles de sédimenter mesurent entre 0.1 et 500  $\mu\text{m}$  (la quantité de particules de l'ordre de 0.05  $\mu\text{m}$  est précisée dans le Tableau 3 de manière

---

<sup>7</sup> Il est important de noter que les tableaux de la norme ISO 14644 parties 1 et 9 cités dans le chapitre 1 et répertoriant les concentrations maximales admises donnent un nombre de particules de taille supérieure à la taille considérée et incluant par conséquent le nombre de particules donné pour des tailles supérieures.

indicative). L'étendue granulométrique est donc beaucoup plus grande dans le cas de la contamination particulaire surfacique que dans le cas de la contamination particulaire volumique.

La norme ISO 14644 envisage la possibilité que n'importe quel type de particules puisse contaminer la salle propre. Ainsi, peu importe le matériau composant les particules ou leurs facteurs de forme, les moyens de contrôle de la contamination doivent pouvoir les détecter. Les particules couramment retrouvées dans les salles propres sont de trois types : les particules organiques provenant directement des opérateurs (particules de peau ou cheveux par exemple), les particules métalliques provenant de la manipulation d'outils et les particules polymères correspondant la majorité du temps à des fibres textiles. La génération de ces trois types de particules est due à la présence d'opérateurs dans la salle propre, ceux-ci étant une source de particules d'autant plus importante lorsqu'ils sont en mouvement.

## **III.2.2. Spécifications du capteur**

### **III.2.2.1. Spécifications fonctionnelles**

Les spécifications fonctionnelles du capteur sont directement liées à l'analyse du milieu et des contaminants. La norme ISO 14644-9 impose une classification de la propreté des surfaces d'une salle propre par le nombre et la taille des particules. Le capteur développé doit donc être en mesure de donner à l'utilisateur ces deux données. Un autre paramètre est important, bien qu'il ne soit pas préconisé dans la norme : le facteur de forme (cf. I.2.2.1). En effet, le facteur de forme peut notamment permettre de discriminer des fibres de particules rondes et ainsi fournir des indications sur la source des contaminants.

Dans l'objectif de développer un capteur permettant une détection en temps-réel, l'étendue granulométrique visée est de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Actuellement, la limite de détection des moyens de mesure en temps-réel (cf. II.5) est de 5  $\mu\text{m}$  avec une incertitude de plusieurs microns. L'objectif du développement proposé dans ce mémoire est donc d'atteindre la résolution de 1  $\mu\text{m}$  avec une précision relative minimale de 10 % (soit une mesure à 0.1  $\mu\text{m}$  de précision pour la limite inférieure). La norme ISO 14644-9 indique une étendue granulométrique entre 0.1 et 100  $\mu\text{m}$ . Atteindre une résolution de 0.1  $\mu\text{m}$  doit rester une perspective dans le développement du capteur, bien qu'un minimum de dépôt est observé pour les particules entre 0.1 et 1  $\mu\text{m}$  (cf. I.3.3). En revanche la mesure de très grosses particules n'est pas envisagée dans notre application. En effet, au-delà de 20  $\mu\text{m}$  les particules doivent être éliminées par le système de filtration de la salle propre. Dans le cas où une particule de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  viendrait se déposer sur la surface témoin du capteur, cela saturerait

immédiatement le système qui donnerait une alerte exceptionnelle. Le capteur entrerait alors dans une procédure particulière pour être remis en fonctionnement.

Les concentrations de particules mentionnées dans la norme ISO 14644-9 sont données pour une surface 1 m<sup>2</sup>. Le Tableau 13 ci-dessous présente les mêmes concentrations rapportées à une surface de 1 cm<sup>2</sup>.

**Tableau 12 : Classification des salles propres suivant la norme ISO 14644-9. La concentration particulaire surfacique maximale admissible est exprimée en nombre de particules par cm<sup>2</sup>**

SCP Classe	Taille des particules (µm)							
	≥ 0.1	≥ 0.5	≥ 1	≥ 5	≥ 10	≥ 50	≥ 100	≥ 500
<b>1</b>	0.01	0.002	(0.001)					
<b>2</b>	0.1	0.02	0.01	(0.002)	(0.001)			
<b>3</b>	1	0.2	0.1	(0.02)	(0.01)			
<b>4</b>	10	2	1	0.2	0.1	(0.02)	(0.01)	
<b>5</b>	100	20	10	2	1	0.2	0.1	(0.02)
<b>6</b>	(1000)	200	100	20	10	2	1	0.2
<b>7</b>			1000	200	100	20	10	2
<b>8</b>					1000	200	100	20

### III.2.2.2. Spécifications dimensionnelles

Les spécifications dimensionnelles sont imposées par les contraintes d'utilisation du capteur. Il est possible de les diviser en deux catégories : la spécification dimensionnelle de la surface de mesure et les spécifications dimensionnelles du capteur dans son intégralité.

#### a. Dimension de la surface de mesure

En préambule, rappelons le cadre d'utilisation du capteur développé dans cette thèse : la mesure de la contamination particulaire surfacique des surfaces critiques des satellites assemblés et testés dans les salles d'intégration. L'intérêt de développer un capteur pour la détection en temps-réel de la contamination particulaire surfacique va au-delà de la simple classification des surfaces. En effet, il est crucial de pouvoir surveiller la propreté des surfaces critiques afin de pouvoir procéder soit à une intervention directement sur la surface de mesure soit à la prise de mesure de correction d'utilisation de la salle propre. Dans le cas des salles d'intégration des satellites, les surfaces critiques peuvent être de différentes natures et dimensions, et avoir des fonctionnalités différentes. Il est inconcevable de développer des moyens de mesure directement sur ces surfaces. L'utilisation d'une surface dite « témoin » est alors indispensable.

La norme ISO 14644-9 indique qu'« il convient que la surface d'essai minimale soit, d'un point de vue statistique, représentative de la surface considérée ». Dès lors, deux stratégies peuvent être adoptées. La première stratégie consiste à placer une surface témoin suffisamment grande pour être représentative. Il s'agit de la solution adoptée dans les récents développements de monitoring de la contamination particulaire surfacique (cf. II.4.4). La seconde stratégie – celle que nous avons adoptée dans notre développement – consiste à placer une série de surfaces témoins telles que la somme des surfaces soit représentative de la surface à surveiller. L'accumulation des données peut alors permettre non seulement de classer la salle propre mais également d'établir une cartographie des zones de contamination. En outre, une faible dimension de la surface témoin, si elle est couplée à de faibles dimensions du capteur dans son intégralité, permettra une mesure au plus près des surfaces critiques sans gêner les processus d'assemblage et de test des satellites. Le but *in fine* est donc de proposer un réseau de capteurs de faibles dimensions pour une mesure en temps-réel et multipoints de la contamination particulaire surfacique.

Le PFO-photomètre, moyen de mesure actuellement préconisé par l'Agence Spatiale Européenne et présenté dans le chapitre 2, est un moyen passif de mesure de la contamination particulaire surfacique *via* une mesure de l'obscurcissement de surface par les particules. Ce moyen utilise une surface témoin de 16 cm<sup>2</sup> (cf. II.3.4). Néanmoins la surface réellement mesurée correspond à un disque de 15 mm de diamètre soit une surface de 1.77 cm<sup>2</sup>. Nous considérons donc une surface de mesure de 1 à 2 cm<sup>2</sup> même si la surface exposée pourra être plus grande.

### **b. Dimensions du capteur**

Nous nous intéressons maintenant aux dimensions globales du capteur. Il a été montré dans le chapitre deux que les événements de contamination étaient très localisés au sein d'une salle blanche. Ainsi, il est préférable dans le cadre de notre utilisation de préconiser des choix technologiques pouvant mener à une miniaturisation du capteur. Le système complet comprendra, outre la cellule de mesure, une batterie et un moyen de connectivité sans fil. En effet, le réseau de capteurs devra être autonome en énergie pendant une durée suffisamment grande pour l'utilisateur et communiquera avec une cellule de base qui traitera les données et les transmettra à l'utilisateur. Nous estimons que l'encombrement maximum du système complet devra s'inscrire dans un cube de 10 cm de côté.

### **III.2.2.3. Spécifications environnementales**

Afin que les choix soient en accord avec l'utilisation du capteur, il est indispensable de considérer les facteurs pouvant influencer sur la mesure.

La température et l'hygrométrie d'une salle propre sont régulées. Ainsi, la température est communément comprise entre 20 et 24 °C et l'humidité relative entre 45 et 55 %. Néanmoins, ces paramètres peuvent varier localement de la même manière que le taux de contamination particulaire. En effet, les opérateurs constituent une source de chaleur et génèrent, par leur respiration, de l'humidité. D'autre part, certains appareils peuvent également générer de la chaleur.

Nous avons vu dans le chapitre deux que les différentes solutions actuellement développées pour la mesure en temps-réel de la contamination particulaire surfacique étaient basées sur des principes de détection optique. Or, une salle propre est éclairée, ce qui peut induire de la lumière parasite pour la cellule de mesure. De plus, la luminosité peut varier suivant les zones ou suivant la hauteur de travail. Enfin, les lumières des salles sont la majorité du temps éteintes lorsqu'il n'y a pas d'activité ou la nuit. En revanche, les capteurs doivent être capables de mesurer le taux de contamination surfacique en continu peu importe le moment de la journée.

#### **III.2.2.4. Spécification d'utilisation**

Nous abordons maintenant les spécifications directement liées à l'utilisation du capteur sans fil pour la détection en temps-réel de la contamination particulaire surfacique selon deux angles d'approche : les spécifications imposées par le critère « temps-réel » et les spécifications imposées par le critère « autonome ».

#### **III.2.2.5. Une détection en « temps-réel »**

Le capteur développé répond au besoin de mesurer en temps-réel l'état de propreté des surfaces dans les salles propres. La notion de temps-réel doit être explicitée grâce à deux paramètres : la durée d'une mesure et le délai entre deux mesures.

Durant la mesure, deux possibilités sont envisageables : (1) le capteur est toujours exposé à l'environnement et il est donc susceptible de recevoir de nouveaux contaminants ; (2) le capteur n'est plus exposé à l'environnement et aucune information n'est récoltée pendant le laps de temps où la mesure est effectuée. Si la surface de dépôt des particules est exposée en continu à l'aérosol à contrôler, aucune perte d'information n'est enregistrée. En revanche, il est possible que les particules se déposant sur la surface interfèrent avec la mesure. Si la surface de dépôt n'est plus exposée à l'aérosol à contrôler pendant la mesure, une perte d'information peut avoir lieu. Dans les deux cas, plus la durée d'une mesure est courte, moins la conséquence sera importante sur la qualité de la mesure.

La contrainte « temps-réel » - dans le cadre de notre application - n'implique pas nécessairement une mesure en continu. En effet, la surface peut être exposée en continu à l'aérosol à

contrôler sans pour autant être mesurée en continu. Le délai entre deux mesures peut dépendre de l'utilisation de la salle. Ainsi, pendant les activités, les mesures pourront être rapprochées à 10 minutes d'intervalle par exemple tandis que pendant la nuit les mesures pourront être éloignées de 30 minutes à 1 heure.

### III.2.2.6. Un capteur autonome et sans-fil

Le moyen de mesure développé dans le cadre de la détection en temps-réel des particules dans les salles d'intégration doit répondre aux contraintes de l'utilisateur. Ainsi, il est obligatoire que le capteur n'ait pas de connexion filaire afin de ne pas gêner les activités et de pouvoir être placé au plus près des zones critiques et des surfaces à surveiller. Dans ce but, le capteur doit être autonome en énergie et doit communiquer ses données via un réseau sans fil. Le capteur devra donc fonctionner à l'aide d'une batterie. Par conséquent, l'énergie consommée par le capteur doit être la plus faible possible et les choix technologiques devront être faits suivant ce critère.

En outre, un capteur autonome équivaut à une instrumentation active ne nécessitant pas l'intervention d'un opérateur. Ainsi la question de la saturation de la surface témoin est cruciale afin de minimiser le nombre d'interventions d'un opérateur durant l'exposition du capteur à l'aérosol à contrôler. En effet, la mesure étant cumulative, la concentration particulaire surfacique sur la surface témoin peut augmenter jusqu'à interférer sur la mesure. Un dépôt avec une épaisseur de plusieurs particules ne peut autoriser une mesure de la taille et du nombre de contaminants. Cependant, l'étude de la norme ISO 14644-9 – notamment à travers le Tableau 3 – permet de calculer la surface maximale couverte par des particules pour chaque classe SCP considérée. Le Tableau 14 ci-dessous présente ce calcul pour les classes SCP 5 à 8 (pour les classes inférieures la surface est négligeable), correspondant donc à la somme des surfaces des particules de chaque taille (surface d'une particule multipliée par le nombre de particules maximal autorisées). Les résultats présentés prennent en compte les particules de taille supérieure à 20 µm alors que l'étendue granulométrique fixée au début de ce chapitre ne les inclut pas. Le risque de saturation va donc évoluer au cours du temps dépendamment de la qualité de la propreté de la salle mais reste faible comparé à la surface de dépôt définie précédemment (de l'ordre de 1 à 2 cm<sup>2</sup>).

**Tableau 13 : Calcul de la surface maximale pouvant être couverte par des particules sphériques suivant la classification SCP donnée par la norme ISO 14644-9 (en mm<sup>2</sup>)**

Classe SCP	Surface maximale couverte par des particules sphériques suivant la norme ISO 14644-9
5	1,31.10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup>
6	0,16 mm <sup>2</sup>
7	0,52 mm <sup>2</sup>
8	5,89 mm <sup>2</sup>

### **III.3. Etude des modes de détection envisageables**

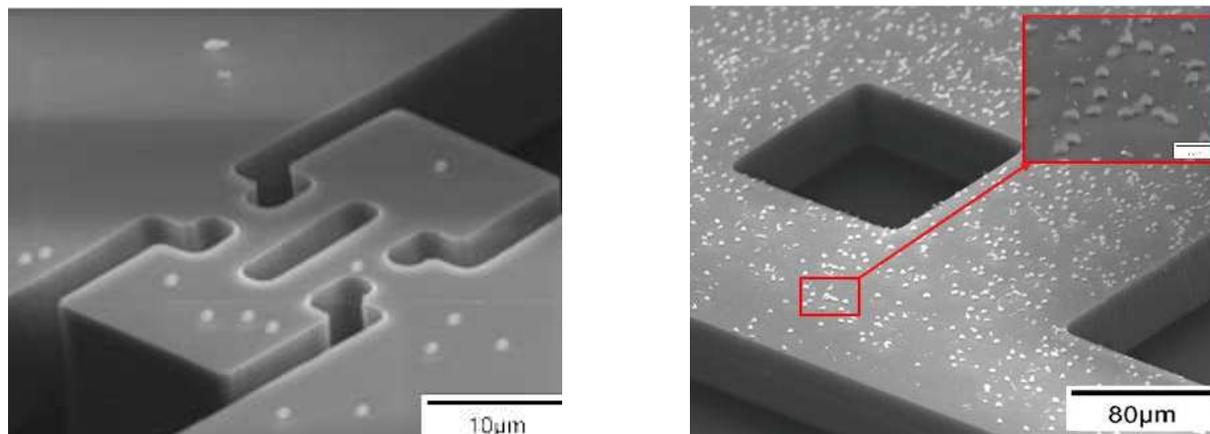
Le cahier des charges étant défini, une première étude a été réalisée afin d'identifier les principes de mesure candidats. En s'inspirant de la recherche technologique réalisée dans le chapitre II, trois principes de mesure ont été retenus : (1) la détection de la masse des particules déposées sur la surface d'un système électromécanique; (2) l'utilisation d'un capteur photographique et (3) l'usage d'un laser focalisé sur les particules sédimentées. Ces trois principes de mesure sont étudiés indépendamment dans un premier temps avant d'être comparés dans un second temps pour apporter une argumentation au choix du principe de mesure.

#### **III.3.1. Etude de différents principes de mesure**

##### **III.3.1.1. Détection de masse grâce à un microsysteme électromécanique**

Au cours du chapitre II, différents travaux utilisant des microsystemes électromécaniques ont été présentés. Ces systemes détectent la masse des particules sédimentées sur la surface du capteur grâce à la variation de fréquence de résonance induite par la variation de la masse de la surface. Cette technologie offre une très bonne sensibilité (jusqu'au kHz/pg) mais des concentrations limites de détection de l'ordre du  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . L'utilisation de capteurs MEMS pour la détection de particules sédimentées présente de nombreux inconvénients vis-à-vis du cahier des charges établi pour notre application. Tout d'abord, l'aire de la surface exposée d'un MEMS est communément inférieure à  $0.1 \text{ mm}^2$  ce qui est peu représentatif d'une surface critique à contrôler. En lien avec ce paramètre, il est important de considérer que cette surface pourrait être rapidement saturée, notamment dans le cas des grosses particules. Les travaux présentés dans le chapitre II exposent notamment les capteurs développés à des particules de tailles inférieures à  $5 \mu\text{m}$ . La Figure 47 ci-dessous illustre ce problème avec des images réalisées au MEB par une équipe de Université de Denver (58). Leurs travaux ont permis de développer des microbalances de type MEMS pour la détection de particules de taille comprises entre  $130 \text{ nm}$  et  $1 \mu\text{m}$ . Exposés à des aérosols dont la concentration massique en particule s'élève à  $0.02 - 0.4 \mu\text{g.m}^{-3}$ , ces microbalances sont rapidement saturées. Néanmoins, des systemes de nettoyage pourraient être imaginés (par soufflage par exemple ou par remise en suspension des particules suite à une mise en vibration maximale du capteur). Ensuite, tous les systemes actuellement développés sont couplés à un systeme de pompage et à un systeme de tri inertiel des particules. La présence d'une pompe signifie que le capteur MEMS n'est pas directement exposé à l'aérosol à contrôler mais à une fraction de cet aérosol aspiré et injecté dans la cellule de mesure. Ceci pose un problème de représentativité de la mesure puisque les particules ne se déposent pas

naturellement sur la surface, comme c'est le cas sur les surfaces critiques. L'utilisation de MEMS pour la détection des particules se rapproche donc d'une mesure de la contamination particulaire volumique.



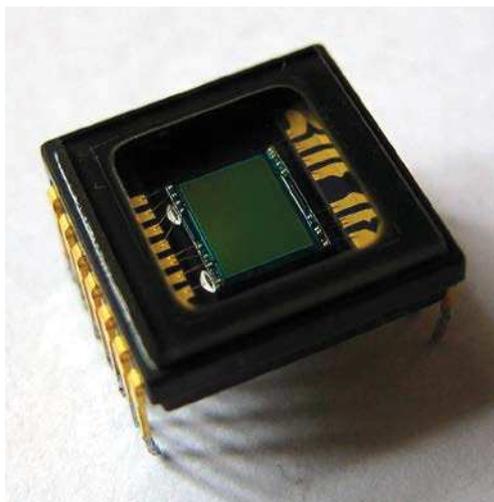
**Figure 47 : Images MEB de capteur MEMS développé par Mehdizadeh, E. du Dept. of Electr. & Comput. Eng., de l'Université de Denver. Des particules de 130 nm à 1 µm sont déposées sur les surfaces (65)**

Bien qu'il soit envisageable d'exposer directement la surface des MEMS à l'aérosol à mesurer, le problème de la fonctionnalité des capteurs MEMS reste limitante pour notre application. En effet, la seule information récoltée par ce type de capteur est la masse totale des particules sédimentées. Dans le cas d'une application où un seul type de particule est présent dans l'aérosol, la connaissance de la masse volumique des particules pourrait permettre de remonter au nombre de particules. Cela suppose de connaître parfaitement l'aérosol à contrôler et que celui-ci soit mono-disperse (i.e. contenant des particules de tailles uniques), ce qui n'est pas le cas dans l'application considérée.

### **III.3.1.2. Utilisation d'un capteur photographique**

Les capteurs photographiques sont de plus en plus présents dans de nombreuses applications. Issus de l'industrie de la micro-électronique, ce capteur est un composant optoélectronique permettant de convertir un flux de photons en un signal électrique. Il est constitué d'une matrice de pixels dont la taille et le nombre varient suivant le capteur sélectionné. Il existe deux types de capteurs photographiques : les capteurs CCD (Coupled Charged Device) et les capteurs CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Les capteurs CCD sont constitués de cellules photosensibles qui transfèrent la charge vers un collecteur qui transfère à son tour l'ensemble des charges vers un convertisseur analogique-numérique. Les capteurs CMOS sont composés d'une matrice de cellules photosensibles qui conservent leur charge et la transfèrent elles-mêmes au convertisseur. Les capteurs CCD produisent des images de haute qualité avec un faible bruit et leur

production est plus mature car ils existent depuis plus longtemps (ils ont été inventés dans les laboratoires Bell en 1969). Cependant, ce sont des composants qui consomment beaucoup plus d'énergie qu'un capteur CMOS (environ 100 fois plus). Les capteurs CMOS (inventés dans les années 1990) ont une sensibilité à la lumière plus faible qu'un capteur CCD car chaque pixel d'un CMOS possède ses propres transistors. Si des photons atteignent la zone du pixel où sont placés les transistors et non les photodiodes, l'information est perdue.



**Figure 48 : Capteur CCD (provenant d'une caméra Sony)**

Les capteurs photographiques présentent des caractéristiques prometteuses en termes de résolution de mesure pour notre application. En effet, avec un traitement des données adapté, l'utilisation de pixels de  $4\ \mu\text{m}$  de côté (ce qui constitue l'état de l'art actuel) couplée à un bon rapport signal sur bruit (de l'ordre de 100) pourraient permettre de discriminer toutes les tailles de particules (de  $1$  à  $20\ \mu\text{m}$ ) même les plus petites. Pour cela, il faut préférer l'utilisation d'une puce nue (les puces sont quasi-exclusivement vendues protégées par une vitre) qui permettraient aux particules de se déposer directement sur les cellules sensibles sans engendrer de problème de diffraction de la lumière et par conséquent, une perte de résolution. Ceci implique nécessairement la question du nettoyage des capteurs. Le coût d'un capteur possédant des caractéristiques permettant d'atteindre les résolutions exigées par notre application est tel qu'il est inimaginable de considérer le capteur lui-même comme un composant jetable et interchangeable à volonté. La seule solution de nettoyage de la surface du capteur réalisable sans détériorer le capteur est un nettoyage par soufflage et aspiration des particules (par exemple grâce à une sonde de surface).

L'utilisation de capteurs photographiques pour la détection en temps-réel des particules en salle propre pose le problème de la source de lumière nécessaire pour effectuer une mesure. Les

conditions d'éclairage d'une salle propre ont été évoquées au cours de la partie III.2.2.3. Il faut considérer que la source de lumière provenant de la salle elle-même va varier au cours de la journée ou en fonction de l'emplacement du capteur. En outre, il est possible que les capteurs développés soient placés dans des caissons ou un endroit confiné et complètement sombre. Le capteur doit donc posséder sa propre source de lumière en considérant qu'une source de lumière parasite (celle de la salle) puisse interférer avec la mesure et varier au cours du temps. Cependant, si l'utilisation d'une source de lumière propre au capteur est envisageable il ne faut pas que la source lumineuse puisse protéger la surface et empêcher la sédimentation des particules. L'encombrement au-dessus de la surface doit ainsi rester minime (la surface exposée doit rester significative) ou ponctuelle (la source de lumière bouge au-dessus du capteur). Enfin, la présence de particules transparentes implique un problème de contraste sur le capteur photographique.

### **III.3.1.3. Recherche d'application utilisant un laser focalisé**

En préambule, rappelons que les récents développements d'instrumentation active pour la détection des particules sédimentées basent leurs mesures sur des principes de détection optique. Parmi les moyens de détection optique des particules sédimentées présentés au cours du chapitre II, l'holographie est utilisée par l'APMON, l'analyse d'images photographiques est utilisée par le PDM et la détection de la lumière rétrodiffusée par des particules est utilisée par le CLEAPART. Ce dernier possède la meilleure résolution granulométrique qui est de 5  $\mu\text{m}$ , avec néanmoins une grande incertitude de mesure (aucune différence n'est établie entre des particules de 5 et 15  $\mu\text{m}$ ). Afin de proposer une solution permettant d'atteindre une résolution de 1  $\mu\text{m}$ , nos recherches se sont orientées vers l'utilisation d'un laser focalisé avec une taille de spot de l'ordre du micromètre. En effet, la limite atteinte par le CLEAPART semble due à l'utilisation d'une source de lumière diffuse (lumière monochromatique émise par quatre diodes laser) qui rend la mesure très sensible à la lumière ambiante (actuellement cet instrument ne peut pas fonctionner dans le noir par exemple). D'autre part, la mesure de la lumière rétrodiffusée via une caméra semble également limitante en termes de résolution spatiale. Le CLEAPART doit être conçu avec un système optique d'une quinzaine de centimètres de longueur pour focaliser les photons rétrodiffusés sur le capteur photographique. Les systèmes actuellement développés sont donc limités technologiquement.

La détection optique permet d'accéder aux deux informations exigées par notre application : le nombre de particules et la mesure de leur taille. La mesure est réalisée sur une surface témoin de collecte dont la taille peut être plus ou moins grande (jusqu'à 100  $\text{cm}^2$ ). Le temps de mesure de la surface sera directement en lien avec la taille de celle-ci. Afin de détecter des particules de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$ , le spot focalisé doit être également de cet ordre de grandeur.

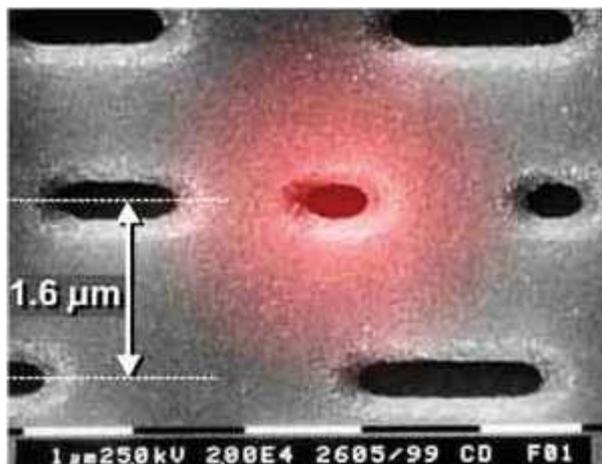


Figure 49 : Spot laser focalisé sur la surface d'un CD

Une utilisation grand public d'un laser focalisé dans un système miniaturisé est le stockage optique. Un CD (Compact Disk) permet de stocker une grande quantité de données qui sont lues par un lecteur possédant une source laser focalisée sur la surface du CD. Les données sont stockées via un système de bosses et de creux à la surface du CD. La taille d'un bit est normalisée, et les données binaires sont résolues de la manière suivante : les « zéros » sont codés à l'aide d'un creux alors que les « uns » sont codés à l'aide d'une bosse. La lecture des données numériques se fait grâce à un spot de 1.6  $\mu\text{m}$  de diamètre, émis par une source de lumière monochromatique (Figure 49). La source de lumière est une diode laser émettant dans une longueur d'onde spécifique à l'application (dans l'infrarouge pour les lecteurs CD et DVD, dans le bleu pour les lecteurs BLU-RAY). Le faisceau émis par la diode laser est focalisé grâce à un système de lentilles. La Figure 50 représente deux photos d'un lecteur CD analysé au sein du laboratoire du CNES.

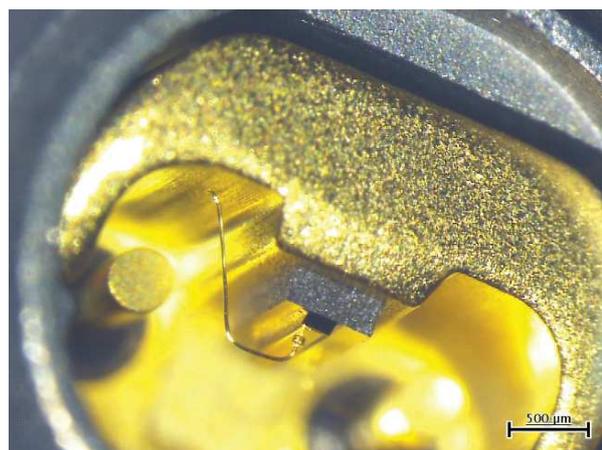
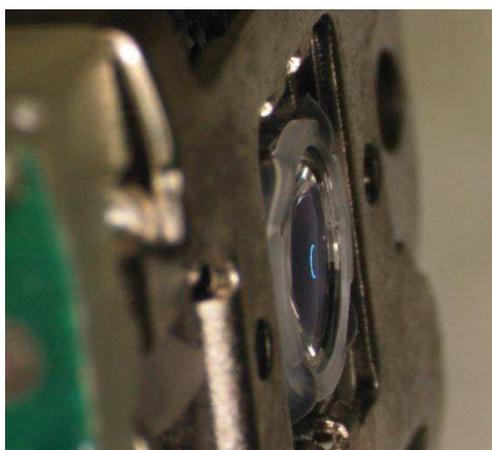


Figure 50 : Photos prises avec une binoculaire. A gauche : lentille extérieure du système de focalisation, placée à quelques millimètres de la surface du CD ; à droite : la diode laser qui émet le faisceau lumineux

### III.3.2. Choix du principe de mesure

Nous avons choisi dans la partie précédente de présenter trois grands principes de détection pouvant être appliqués à la mesure en temps-réel de la sédimentation des particules. Ces principes ont été étudiés et mis en perspective avec la veille technologique réalisée dans le chapitre deux. Les différents avantages et inconvénients de ces différents principes ont été présentés, notamment en faisant le lien avec les contraintes de détection évoquées dans la première partie de ce chapitre.

Le développement de MEMS a été tout d'abord envisagé pour répondre au besoin de développer des « micro-capteurs ». En effet, il est possible de miniaturiser ces capteurs, d'autant plus qu'ils consomment très peu d'énergie et feraient donc preuve d'une grande autonomie en énergie. Cependant, il a été évoqué dans leurs études trois inconvénients majeurs : l'impossibilité de remonter au nombre de particules et de mesurer leur taille, le manque de représentativité de la surface exposée par rapport aux surfaces critiques à mesurer, et la saturation de cette surface miniaturisée avec, en conséquence, l'impossibilité de mesurer des concentrations élevées de particules dans les aérosols et l'impossibilité de détecter des particules de taille supérieure à 2,5  $\mu\text{m}$ . Le problème de la saturation de la surface de collecte et de mesure des particules est inévitable si le capteur est directement exposé à l'aérosol. Les récents développements dans cette voie montrent que le capteur MEMS est toujours couplé à un système d'aspiration et de tri inertiel des particules. Cependant, cette stratégie ne permet pas d'obtenir des données concernant la sédimentation « réelle » des particules.

L'utilisation d'un capteur photographique a ensuite été considérée. Il existe actuellement des capteurs de très faibles dimensions présentant des caractéristiques techniques qui permettraient de détecter des particules de diamètre inférieur à 5  $\mu\text{m}$ . Ces capteurs, outre le fait qu'ils soient onéreux, devraient être utilisés « nus » (sans vitre de protection) pour atteindre les performances souhaitées dans notre application. Les deux problèmes majeurs de cette solution sont la saturation et le nettoyage de la surface d'une part, et le besoin d'ajouter une source de lumière propre au capteur. En effet, les contraintes des salles propres imposent de devoir considérer un éclairage parasite, pas nécessairement constant dans l'espace et dans le temps.

La détection optique s'est donc imposée car elle permet de remonter à toutes les informations nécessaires pour classer les salles propres suivant la norme ISO 14644-9. Cependant, une solution de rupture doit être développée afin d'atteindre la résolution fixée par notre application : la détection de particules de 1  $\mu\text{m}$ . En effet, les limites de détection actuellement atteintes sont de l'ordre de 5 à 10  $\mu\text{m}$ . Afin de permettre cette rupture technologique, nous avons imaginé le développement d'une solution utilisant une source laser focalisée. La qualité de focalisation détermine directement la résolution pouvant être atteinte. L'étude du fonctionnement du stockage optique sur les CD et de leur

mode de lecture grâce à un faisceau laser focalisé en un spot de diamètre inférieur à 2  $\mu\text{m}$  laisse envisager la possibilité technique de développer une telle source de lumière.

### III.4. Etude du principe de détection optique

Pour aborder le problème de la détection optique, il est nécessaire d'étudier et de comprendre les différentes interactions entre les particules et une source de lumière. Par ailleurs, les données recherchées (nombre et taille des particules) imposent des facteurs limitants. L'étude réalisée ci-dessous s'appuie sur le cahier des charges construit dans la première partie de ce chapitre.

#### III.4.1. Les différentes interactions particules-lumière

Cette partie introduit différentes notions sur les propriétés des ondes électromagnétiques, en particulier sur les modèles d'interactions de la lumière avec des petites particules. Ces bases théoriques sont indispensables pour aborder les techniques de granulométrie optique qui seront le fondement du développement de notre capteur pour la détection en temps-réel des particules. Dans le domaine de la granulométrie optique, l'ouvrage d'Alain Boutier est une référence (59) tandis que la théorie pure de l'interaction entre la lumière et les petites particules est très bien abordée dans l'ouvrage de Bohren et Huffman (60).

Les particules considérées dans notre étude sont des particules solides, de divers matériaux, pouvant être contenues dans un aérosol à température et pression ambiantes. Leur granulométrie s'étend de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Les sources de lumières considérées sont des sources monochromatiques dont la longueur d'onde peut varier du proche infra-rouge aux proches ultra-violet. La théorie présentée ci-dessous se base sur ces données.

L'onde lumineuse, en traversant une particule, va subir un changement d'indice du milieu (passage de l'air d'indice 1 au matériau de la particule d'indice  $n$ ). L'indice optique d'un milieu est une caractéristique physique qui est fonction de la longueur d'onde ; la variation est de quelques centièmes dans le spectre visible. L'indice optique des solides et des liquides varie avec la température. La vitesse de propagation d'une onde lumineuse dans un matériau dépend de l'indice optique du milieu.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda} > 1 \text{ où } \lambda_0 = c.T \text{ et } \lambda = v.T \quad \text{Équation 52}$$

Où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde d'une radiation dans le vide et  $\lambda$  est la longueur d'onde de cette même radiation dans un milieu homogène<sup>8</sup> et isotrope. Lorsque la longueur d'onde augmente, l'indice du milieu diminue. Cette propriété explique le phénomène de dispersion optique lorsqu'un

---

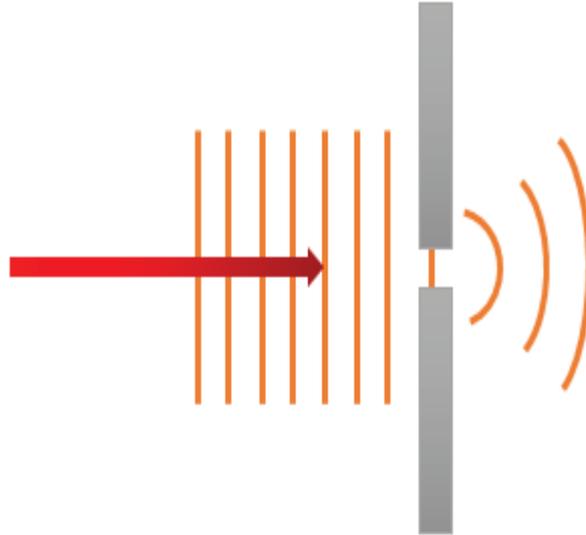
<sup>8</sup> Un milieu homogène est un milieu où l'indice est identique en tout point.

matériau est éclairé par une lumière polychromatique : les fréquences composant la lumière sont séparées et forment un spectre multicolore.

Etant données ces propriétés, nous pouvons à présent aborder le problème de l'impact de la lumière sur la matière. Quand les propriétés optiques du milieu changent (c'est le cas lorsqu'un faisceau lumineux pénètre une particule), la propagation de la lumière ne se fait plus de manière rectiligne. En effet, le faisceau lumineux incident va subir trois phénomènes à l'interface entre deux milieux d'indices optiques différents :

- La réflexion : l'onde lumineuse est renvoyée vers le milieu d'où elle vient,
- La réfraction : l'onde lumineuse change brusquement de direction dans le second milieu,
- La diffusion : une fraction de la quantité de lumière est renvoyée dans toutes les directions.

Ces phénomènes ont été présentés au cours du chapitre I (Figure 25). En général, les trois phénomènes sont simultanés. Un quatrième phénomène peut avoir lieu lorsque l'onde lumineuse rencontre un objet ou une ouverture dont la taille est proche de sa longueur d'onde : la diffraction optique, dont la Figure 55 illustre le principe. Dans le cadre de nos mesures, l'objet le plus petit avec lequel peut interférer l'onde lumineuse est une particule de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre. Les longueurs d'onde des sources lumineuses seront inférieures à 1  $\mu\text{m}$  mais il est néanmoins possible de s'approcher de phénomènes de diffraction. De plus, des particules de tailles inférieures peuvent se déposer et provoquer la création d'ondes lumineuses diffractées.



**Figure 51 : Illustration du phénomène de diffraction par une fente dont la largeur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde**

La diffusion de la lumière est le phénomène principal sur lequel sont basés les compteurs optiques de particules (dans le cadre de la mesure de la concentration particulaire volumique d'un aérosol) et certaines instrumentations pour la mesure de la concentration particulaire surfacique (cf. II.4.4). Deux théories décrivent le phénomène de diffusion de la lumière. La première est la théorie de Mie, ou de Lorentz-Mie, qui aborde le problème de la diffusion de la lumière par une sphère homogène et isotrope placée dans un milieu non absorbant. Cette théorie a été développée à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle par Ludvig Lorentz puis étayée par Gustav Mie au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Elle concerne la diffusion de la lumière pour des particules dont la dimension est inférieure à la longueur d'onde du faisceau incident. La seconde théorie est la théorie de Rayleigh qui décrit la diffusion d'une onde lumineuse par des particules dont les dimensions sont du même ordre de grandeur ou supérieures à la longueur d'onde. Dans notre application, les plus petits éléments à détecter sont des particules de 1  $\mu\text{m}$ , avec la possibilité que des particules de taille inférieure (de l'ordre de quelques centaines de nanomètres) se déposent sur le capteur. Nous nous plaçons donc dans le cadre de la théorie de Rayleigh, à la frontière avec la théorie de Mie.

Une autre caractéristique importante d'une source lumineuse est son intensité. Or, le flux lumineux porté par une onde lumineuse va être modifié par l'interaction avec le matériau de la particule. En effet, une partie de l'intensité lumineuse peut être absorbée par le milieu dans lequel

elle se propage. La partie de l'intensité lumineuse qui va traverser le milieu sans être absorbée est dite transmise. La lumière transmise peut être diffusée, réfléchiée ou réfractée. La Figure 53 ci-dessous représente l'évolution de l'intensité de la lumière diffusée en fonction de l'angle formé par la direction de la lumière incidente et l'angle de détection du capteur (61). Ces courbes ont été tracées en fonction de la taille des particules considérées (entre 0,2 et 3,0  $\mu\text{m}$  de diamètre). Ainsi, nous observons que la diffusion de la lumière dépend du diamètre de la particule mais également de l'angle entre la source lumineuse et le détecteur. Dans le cadre de notre application, l'aire de la surface qui collecte les particules doit être représentative des surfaces critiques à contrôler. Or, les spécifications du capteur fixées au début de ce chapitre imposent une surface de 1 à 2  $\text{cm}^2$ . L'utilisation d'une source de lumière focalisée implique donc un système de scan pour mesurer l'intégralité de la surface. Ce système de scan sera étudié dans la partie suivante mais devra prendre en compte l'importance de l'angle formé par le faisceau lumineux incident et la surface de dépôt.

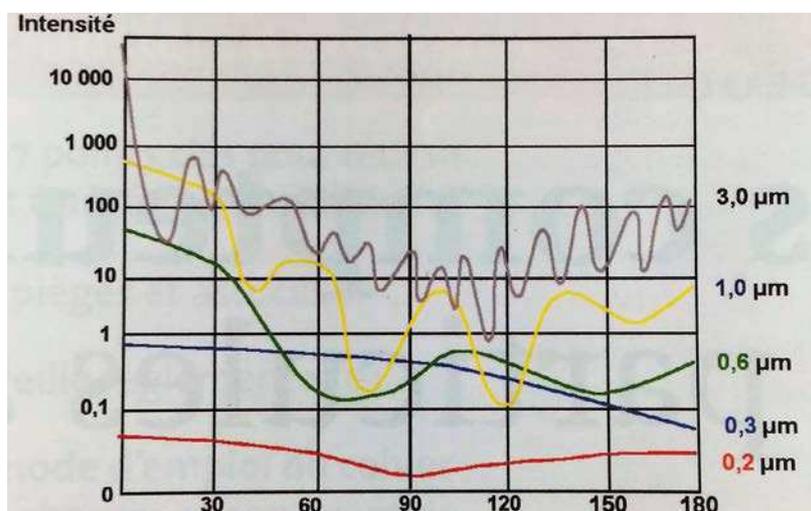


Figure 52 : Evolution de l'intensité de la lumière diffusée par les particules en fonction de l'angle formé par la lumière incidente et l'angle de détection du capteur – pour différents diamètres de particules

## III.4.2. Les composants de la cellule de mesure

### III.4.2.1. Le système optique

Le système optique va permettre de focaliser la source de lumière sur les particules. La source de lumière est une source LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), choisie pour sa capacité à produire un rayonnement spatialement et temporellement cohérent. En effet, une source laser est composée d'une cavité (généralement constituée de deux miroirs dont un des deux est partiellement réfléchissant et par lequel le faisceau est émis) et d'un amplificateur optique. Une

source d'énergie est nécessaire afin de stimuler l'émission d'une radiation qui sera ensuite amplifiée dans la cavité. Les dimensions géométriques de la cavité influent sur la directionnalité de la lumière laser. Une particularité du faisceau laser est sa distribution en intensité qui est de forme gaussienne (Figure 53) (10). Les lasers sont des sources de lumière monochromatique très intenses. Dans certains cas, le faisceau laser a une telle densité de puissance qu'il peut endommager les composants ou matériaux qu'il rencontre. Les lasers sont ainsi classés en fonction de leur degré de dangerosité. Ce paramètre peut être déterminant dans le développement d'un capteur destiné à être exposé dans des salles propres où travaillent des opérateurs. En effet, selon la puissance et la longueur d'onde d'émission du laser, celui-ci peut représenter un réel danger pour la vue et provoquer des brûlures irréparables de la rétine. Le rayonnement laser ne doit donc pas être susceptible d'atteindre, même après réflexion, une autre cible que les particules à mesurer. En outre, les particules peuvent absorber une quantité suffisante d'énergie pour dégrader la surface sur laquelle elles se sont déposées.

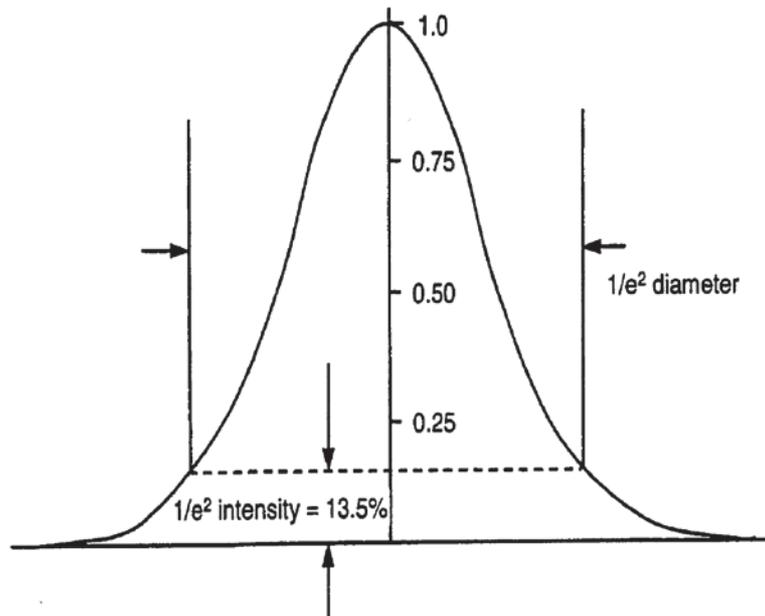


Figure 53 : Distribution gaussienne d'un faisceau laser (10)

Les diodes laser sont des composants optoélectroniques issus de l'industrie des semi-conducteurs qui émettent de la lumière monochromatique cohérente. Si les caractéristiques des diodes laser sont proches des lasers conventionnels, elles présentent néanmoins des différences notables. Contrairement aux cavités des lasers qui mesurent quelques dizaines de centimètres, les cavités des diodes lasers ne mesurent que quelques centaines de micromètres. Ceci en fait des composants plus petits et qui consomment beaucoup moins d'énergie. En revanche, ces avantages s'accompagnent d'une perte de puissance et d'une plus grande divergence de faisceau. Le rendement d'une diode laser est de l'ordre de 30 % (contre 3 % environ pour les lasers traditionnels). Les diodes lasers sont utilisées dans de très nombreux domaines et touchent un grand nombre d'applications de la vie courante. Ainsi, dans les lecteurs optiques décrits dans la partie III.3.1.3, la source de lumière est une diode laser.

Les contraintes dimensionnelles et de consommation d'énergie imposées par le cahier des charges développé en début de ce chapitre orientent le choix de la source de lumière vers une diode laser. La longueur d'onde est une variable qui pourra être ajustée en fonction des composants optiques. Un montage optique sera développé dans le chapitre suivant afin de focaliser le rayonnement émis par la diode laser.

#### III.4.2.2. Le détecteur

Le gain en résolution par rapport aux récentes instrumentations développées se fait essentiellement grâce à l'utilisation d'une source laser focalisée. Le détecteur doit être adapté à la

longueur d'onde de la source lumineuse et être suffisamment sensible pour détecter le signal lumineux provenant des particules.

### **III.4.2.3. Le système de scan**

Nous avons fait le choix d'une source de lumière focalisée pour mesurer les particules se déposant sur une surface de 1 à 2 cm<sup>2</sup>. Ceci implique d'utiliser un système de scan afin de balayer l'intégralité de la surface. En supposant que le spot couvre au minimum une surface de 1 μm<sup>2</sup> (ce qui correspond à la surface d'un pixel), pour une surface de 1 cm<sup>2</sup> cela équivaut à 10<sup>4</sup> pixels par ligne soient 10<sup>8</sup> pixels pour l'intégralité de la surface. Le temps nécessaire pour scanner l'intégralité de la surface est un paramètre important de la mesure, ainsi que le volume de données.

Afin de réaliser le balayage de la surface, deux options sont envisageables : la source de lumière est mobile ou la surface est mobile. La source de lumière peut réaliser le balayage en faisant varier son angle ou en faisant varier sa position.

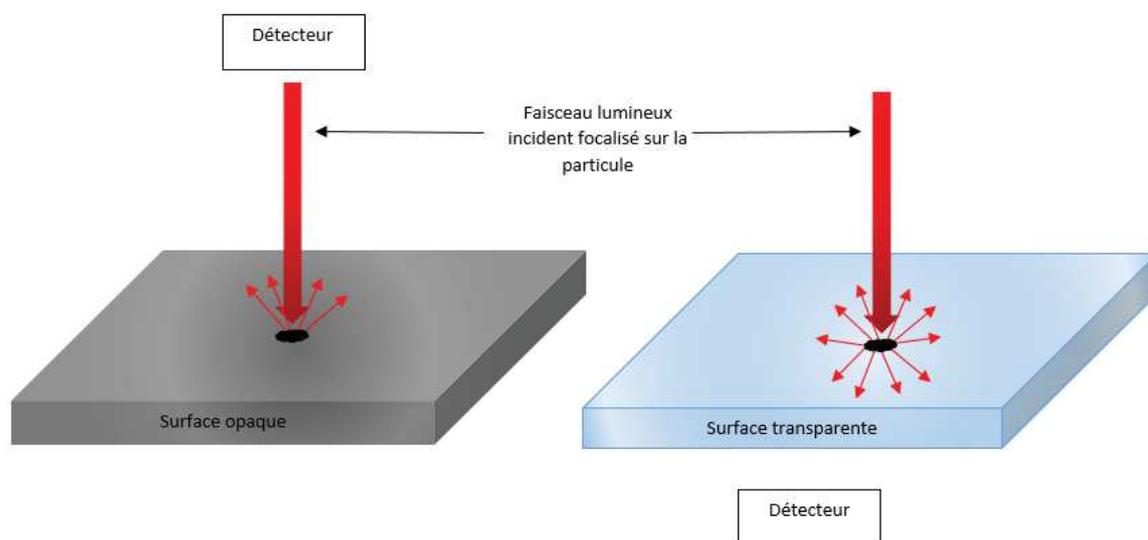
### **III.4.3. Description et analyse des différents systèmes**

Nous avons vu au début de la partie III.4.1 de ce chapitre les différentes interactions possibles entre une onde lumineuse et une particule solide. Les différents systèmes ci-dessous ont été étudiés en fonction de ces interactions. L'objectif de cette étude est de déterminer quel phénomène sera à la base du capteur développé dans le cadre de notre application. La comparaison et le choix du principe de détection optique sera réalisé en fin de ce chapitre tandis que le chapitre suivant abordera le développement de la solution retenue.

#### **III.4.3.1. Mesure de la lumière diffusée et/ou réfléchi par les particules**

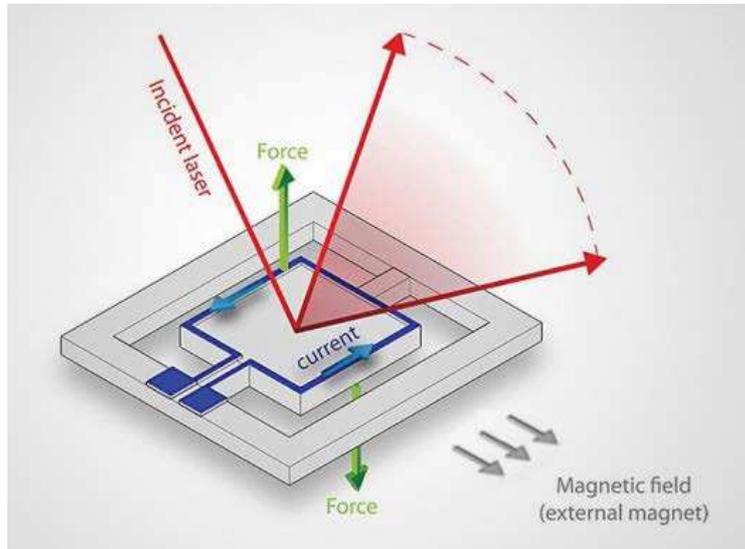
Le premier type de mesure envisageable est la mesure de la lumière diffusée ou réfléchi par les particules. Les caractéristiques de la mesure seront semblables pour les deux types d'interactions rayonnement-particule. La seule différence est que la lumière est diffusée dans toutes les directions mais elle est réfléchi dans une seule direction. Il sera donc plus probable de mesurer la lumière diffusée, la lumière réfléchi pouvant se superposer à la lumière diffusée. Lorsqu'une particule est déposée sur une surface, la lumière diffusée dans la direction du faisceau lumineux incident ne dépend pas de la nature de la surface de dépôt. En revanche, la lumière diffusée en direction de la surface dépôt dépend des caractéristiques optiques de la surface de dépôt. La position du détecteur dépendra du type de surface. La Figure 58 illustre cette problématique. Si la surface de dépôt est opaque au rayonnement lumineux (c'est-à-dire que le matériau de la surface de dépôt absorbe la lumière diffusée), alors le détecteur devra être placé du même côté que la source de lumière pour

capter les rayons diffusés par la particule. Si la surface de dépôt est transparente au rayonnement lumineux, alors le détecteur pourra être placé n'importe où pour capter les rayons diffusés par la particule, notamment sous la surface de dépôt.



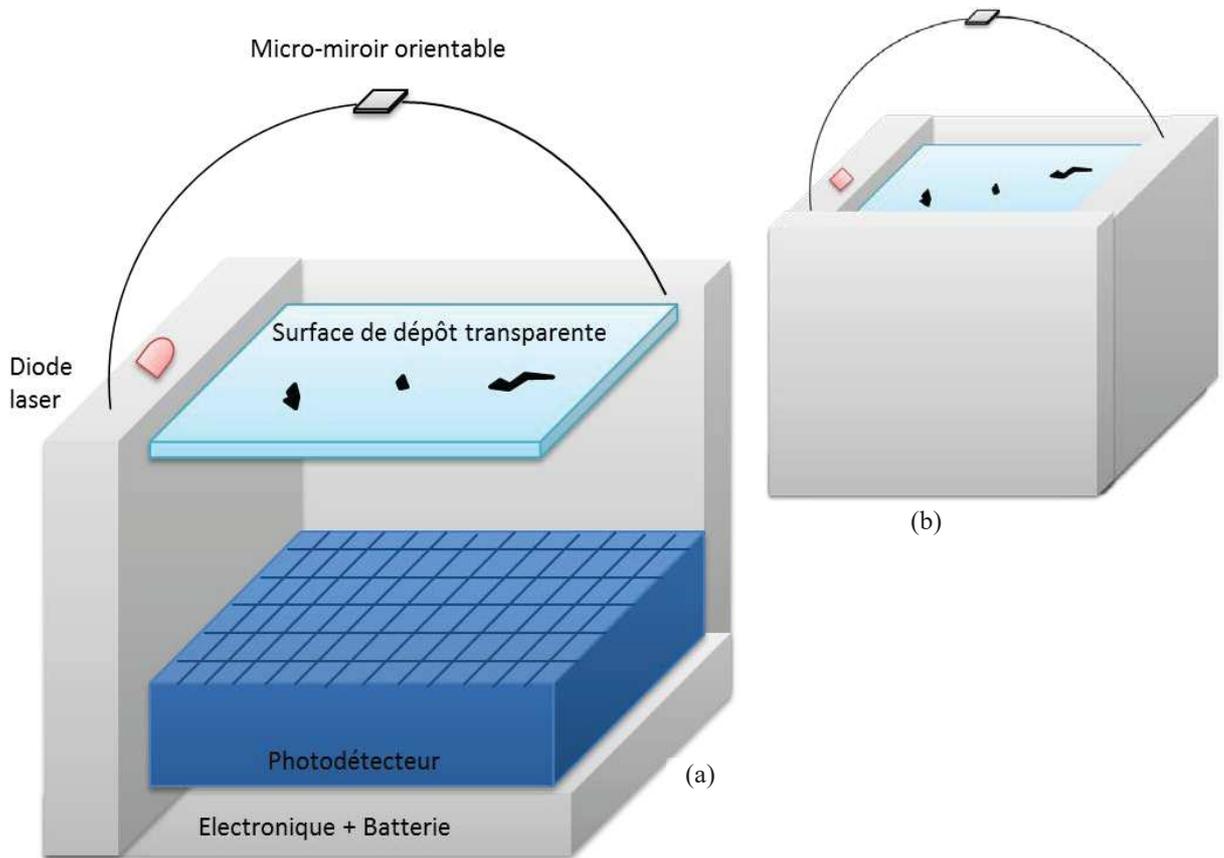
**Figure 54 : Dans le cas de la mesure de la lumière diffusée par une particule, les caractéristiques optiques de la surface de dépôt influent sur la position du détecteur**

Pour mettre en œuvre une mesure de la lumière diffusée par les particules, il est donc essentiel de déterminer la position du détecteur dans le système du capteur. Si le détecteur est placé du même côté que la source de lumière, le problème de l'obscurcissement de la surface de dépôt va se poser. En effet, la surface doit collecter des particules qui sédimentent naturellement, ce qui implique donc un minimum d'objets pouvant empêcher cette sédimentation. La stratégie consiste alors à utiliser une surface transparente afin de placer le détecteur sous la surface.



**Figure 55 : Schéma d'un micro-miroir orientable développé et commercialisé par Hamamatsu Photonics**

Afin de pouvoir mettre en œuvre une solution utilisant une source de lumière focalisée, une solution a été imaginée afin de déporter la source lumineuse. La source lumineuse, matérialisée sur le schéma par une diode laser, est placée hors du champ de la surface de collecte des particules. Le faisceau lumineux émis par la diode laser ne vise pas directement la surface de dépôt mais un micro-miroir orientable placé à  $90^\circ$  de la surface. Il existe dans le commerce des micro-miroirs possédant des caractéristiques d'orientation permettant de scanner une surface de  $1 \text{ cm}^2$ . La Figure 59 représente le schéma d'un micro-miroir 2D développé et commercialisé par Hamamatsu Photonics. Le micro-miroir, en réalité de forme ovale, mesure  $0.9 \times 1.0 \text{ mm}$  tandis que le système complet mesure  $3 \times 10 \times 3.1 \text{ mm}$ . Le miroir peut être orienté dans deux dimensions, avec un axe rapide et un axe lent. Les angles optiques d'orientabilité sont de  $\pm 15^\circ$  pour l'axe rapide et  $\pm 10^\circ$  pour l'axe lent. L'actionnement est électromagnétique ce qui garantit un fonctionnement linéaire sans hystérésis avec une consommation inférieure à quelques  $\mu\text{W}$ . Le matériau du miroir est l'aluminium, avec une réflectivité de plus de 85 % pour des longueurs d'onde dans le visible, et supérieure à 95 % dans l'infrarouge.



**Figure 56 : Schéma de positionnement des différents éléments de la cellule de mesure par rapport à la surface de dépôt des particules. (a) Vision de l'intérieur de la cellule de mesure ; (b) le capteur est encapsulé**

La Figure 56 est un exemple de solution envisagée pour la disposition des différents éléments constituant le capteur. Il est à noter que le montage optique de focalisation de la diode laser n'est pas représenté sur le schéma. Une étude approfondie de ce montage sera réalisée dans le chapitre suivant afin de définir précisément l'architecture du capteur. Le schéma de la Figure 56 est uniquement représentatif des problématiques rencontrées pour développer le capteur et déterminer le principe de détection des particules. Sur ce schéma, quatre étapes sont à distinguer dans la mesure :

- (1) Un faisceau lumineux émis par une diode laser est dirigé vers un micro-miroir orientable,
- (2) Le micro-miroir orientable suivant deux axes permet de scanner la surface de dépôt,
- (3) Les particules viennent se sédimenter sur la surface de dépôt qui est transparente à la longueur d'onde de la diode laser,
- (4) La lumière diffusée est mesurée par un photodétecteur situé sous la surface de dépôt.

### **III.4.3.2. Mesure de l'obscurcissement de surface par les particules**

Le problème est à présent abordé différemment. Dans cette partie, il n'est plus question de modifier la trajectoire de l'onde lumineuse par interaction avec une particule. Nous nous intéressons ici à l'influence de la particule sur l'intensité du flux lumineux. En effet, une onde lumineuse ne

traverse jamais un milieu d'indice optique différent sans être partiellement absorbée ou réfléchi. Ainsi, la mesure du flux lumineux sur une trajectoire identique à celle de l'onde incidente montrera une diminution de l'intensité du flux. L'amplitude de cette baisse d'intensité sera fonction du matériau de la particule et de la manière dont celle-ci a interagi avec l'onde lumineuse. Cependant, nous nous affranchissons ici de la résolution des problèmes d'interactions particules-onde lumineuse pour nous intéresser uniquement à l'obscurcissement de l'onde lumineuse par la particule. Si le faisceau lumineux incident est suffisamment focalisé, même une particule de 1  $\mu\text{m}$  provoquera une diminution de l'intensité du flux lumineux en aval de la particule. Nous reviendrons plus en détail sur ce principe de mesure dans le chapitre suivant.

L'idée à la base du développement reste identique : obtenir une meilleure résolution grâce au pointage laser. L'avantage de l'imagerie par transmission (par rapport à l'imagerie par mesure de la lumière diffusée) est que les matériaux des particules n'ont pas d'influence sur la probabilité de leur détection.

#### **III.4.4. Choix technologiques réalisés**

Les choix technologiques réalisés suite aux réflexions précédentes sont récapitulés ci-dessous. Une étude approfondie de l'architecture du capteur sera proposée dans le chapitre suivant.

La détection des particules déposées sur une surface témoin sera une détection optique. La surface de dépôt est transparente et le détecteur est positionné sous la surface. La lumière mesurée sera la lumière transmise par les particules, ce qui revient à mesurer l'obscurcissement du capteur par les particules. L'utilisation d'un faisceau laser très focalisé augmentera la résolution du capteur pour détecter des particules entre 1 et 20  $\mu\text{m}$ . La mesure d'une baisse de flux lumineux correspondra à la détection de la présence d'une particule sur la surface. Couplé à un système de balayage qui permettra de couvrir l'intégralité de la surface de dépôt, ce principe de détection permettra de remonter au nombre de particules et à leur taille. En effet, l'analyse du signal fournira deux données lorsque le faisceau lumineux sera intercepté par une particule sédimentée : une baisse du flux lumineux indiquera la présence d'une particule tandis que la durée de la baisse du flux lumineux sera rapportée à la vitesse de balayage, permettant ainsi de connaître la taille de la particule.

### III.5. Conclusion

Les études réalisées au cours de ce chapitre ont permis d'établir un cahier des charges en concordance avec l'application visée. Les principales spécifications définies impliquent une mesure de particules de 1 à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre avec une sensibilité de 10%, sur une surface de dépôt de 1 à 2  $\text{cm}^2$ . Le capteur fournira des informations sur la granulométrie des particules et sur leur concentration surfacique afin de répondre aux exigences de la norme ISO 14644-9. De plus, le capteur devra répondre à des exigences en termes d'autonomie (en maintenance et en énergie), de mesure en temps-réel et de communication sans fil. Enfin, le capteur devra être miniaturisé afin de pouvoir réaliser une mesure locale, au plus près des zones critiques, sans gêner la réalisation des opérations en salle propre.

L'objectif final est de réaliser un suivi du taux de contamination des satellites et de tous les éléments le constituant. La démarche prônée vise la gestion des anomalies en fournissant un système d'alerte lorsque des événements de contamination ont lieu. En fournissant une cartographie de la sédimentation réelle des particules dans les zones critiques des salles propres, le capteur développé permettra une meilleure compréhension des actions et des paramètres environnementaux donnant lieu à une contamination des surfaces.

Le capteur sera composé d'une cellule de mesure couplée à un système composé d'une source lumineuse focalisée, d'un système de balayage permettant au faisceau de couvrir l'intégralité de la surface de dépôt transparente et d'un détecteur multi-pixels située sous celle-ci. La source de lumière est une diode laser pour répondre aux exigences de compacité du capteur et d'autonomie en énergie. Le faisceau lumineux émis par la diode laser doit être focalisé par un système optique lui-même compact permettant d'obtenir un spot de l'ordre du micromètre.

## IV. DEVELOPPEMENT DE LA CELLULE DE MESURE

---



## IV.1. Introduction

Après avoir construit au chapitre précédent le cahier des charges d'un système de détection des particules sédimentées à faible encombrement, autonome en énergie et fonctionnant en temps-réel (Annexe B), nous avons ensuite proposé une architecture de la cellule de mesure.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons essentiellement sur la résolution des problèmes concernant l'optique de focalisation. Pour cela, nous aborderons des notions d'optique afin de mieux appréhender les enjeux de ce développement. Nous définirons par la suite les spécifications précises du système optique afin d'identifier les limites et contraintes. Le développement du système de focalisation se base sur un modèle numérique qui sera défini à la fin de la première partie de ce chapitre. La seconde partie résumera les simulations effectuées afin de déterminer la solution la plus appropriée. Ces simulations sont divisées en deux axes : l'étude de solutions basées sur l'utilisation d'une à plusieurs lentilles simples d'une part, et l'étude de solutions basées sur l'utilisation d'une à plusieurs lentilles asphériques. Les choix technologiques qui découlent de ces simulations seront effectués à la fin de la seconde partie. La troisième partie de ce chapitre se concentrera sur la conception opto-mécanique de la cellule de mesure en s'appuyant sur les simulations numériques effectuées précédemment.

## IV.2. Définition du système optique de focalisation

### IV.2.1. Les bases de l'optique géométrique

Nous nous intéressons ici aux bases de l'optique géométrique, discipline rassemblant toutes les connaissances nécessaires à l'élaboration d'un système optique de focalisation. L'optique géométrique considère que l'énergie lumineuse est véhiculée suivant des trajets lumineux formés par une succession de rayons lumineux. Plus précisément, nous traiterons de l'optique paraxiale qui repose sur le caractère linéaire de l'approximation de Gauss. L'approximation de Gauss permet de considérer que tous les rayons optiques sont peu inclinés par rapport à l'axe optique. Ces rayons sont appelés « rayons paraxiaux ». Ainsi, l'optique paraxiale est utilisée pour définir des systèmes optiques centrés quelconques. L'axe optique est défini comme l'axe contenant tous les centres de courbures des surfaces du système (il est généralement orienté de gauche à droite, son sens indiquant la direction de propagation de la lumière<sup>9</sup>). Il est représenté sur la Figure 61 qui schématise un des élément optique les plus simples : la lentille convergente. Un système optique est un ensemble de surfaces qui réfléchissent (miroirs) ou réfractent (dioptries<sup>10</sup>) les rayons lumineux.

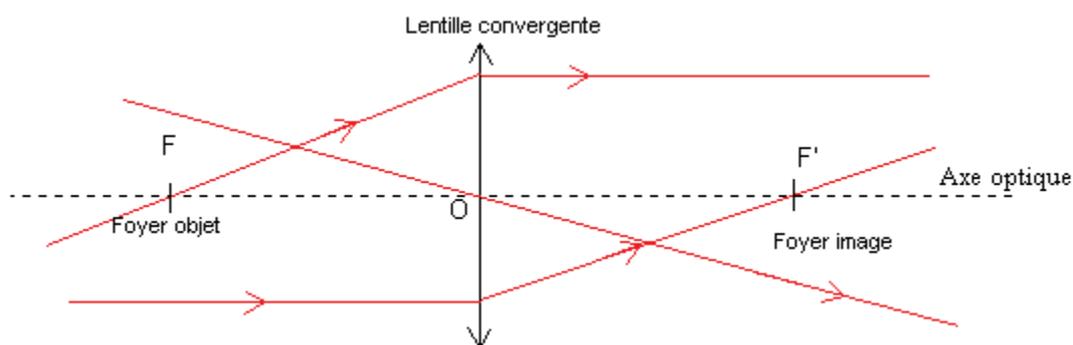


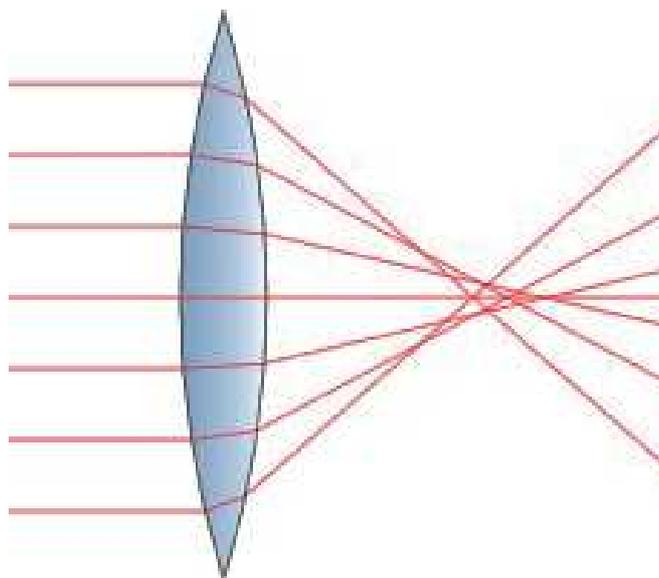
Figure 57 : Schéma optique d'une lentille convergente; l'axe optique est tracé en pointillés

<sup>9</sup> L'axe optique représente en réalité le rayon lumineux passant par le centre du système et qui n'est pas dévié.

<sup>10</sup> Un dioptrie est une surface séparant deux milieux d'indices différents.

## IV.2.2. Les différents types d'aberrations

Les aberrations représentent l'incapacité d'un système optique à produire un point image parfaitement nette à partir du point objet. Plus clairement, cela signifie que tous les rayons lumineux ne convergent pas en un point unique (Figure 62). La géométrie des surfaces optiques (telles que les lentilles ou les miroirs) n'est pas parfaite. Leurs défauts engendrent différents types de conséquences appelées les aberrations. Tous les systèmes optiques présentent des limites dues à leurs aberrations.



**Figure 58 : Illustration d'un défaut de focus : tous les rayons lumineux ne convergent pas en un point unique**

Il existe cinq types d'aberrations d'un système optique : l'aberration sphérique, l'aberration de coma, l'astigmatisme, la distorsion et les aberrations liées aux longueurs d'onde. Les définitions données ci-dessous sont synthétiques mais permettront de mieux appréhender les limites des systèmes optiques étudiés au cours de ce chapitre. Dans le cas d'une aberration sphérique, les rayons provenant du bord et du centre de la lentille ne se focalisent plus au même point (c'est le cas sur l'illustration de la Figure 58). L'image observée est alors une caustique de focalisation, ce qui signifie que le point image attendu est remplacé par une surface plus ou moins floue. L'aberration sphérique est courante avec des lentilles simples, sphériques possédant une épaisseur non négligeable. En effet, les rayons lumineux passant par les bords de la lentille traversent une épaisseur de lentille moindre par rapport aux rayons lumineux centrés. Pour rectifier ce problème, il est possible d'utiliser des lentilles asphériques (ce type de lentille sera défini au cours de la partie IV.2.3.2) ou un diaphragme (qui élimine ainsi les rayons passant sur les bords de la lentille). L'aberration de coma est illustrée sur la Figure 59 et la Figure 60. Cette aberration est dite « hors-champ » car elle n'existe pas sur l'axe optique du système. L'effet de cette aberration est de produire une tâche image en forme de comète dans le plan d'observation. De la même manière que pour les

aberrations sphériques, l'utilisation de lentilles asphériques permettra de réduire l'aberration de coma. Le troisième type d'aberration est l'astigmatisme. L'astigmatisme est dû à des problèmes de symétrie des lentilles (idéalement une lentille présente une symétrie axiale). La correction des aberrations dues à l'astigmatisme est réalisée en alignant plusieurs lentilles dont les défauts se compensent les uns les autres. La distorsion optique est une aberration géométrique de champ, l'unique type d'aberration qui ne donne pas lieu à un effet de flou. L'effet de distorsion va dépendre de l'épaisseur des lentilles et de leur position par rapport au diaphragme d'ouverture. Enfin, les aberrations liées aux longueurs d'onde apparaissent lorsque la lumière est polychromatique. Elles sont dues à la dépendance de l'indice du milieu avec la longueur d'onde (cf. III.4.1). Ainsi certaines longueurs d'onde seront plus réfractées que d'autres, produisant un halo autour du spot dont la couleur varie radialement.

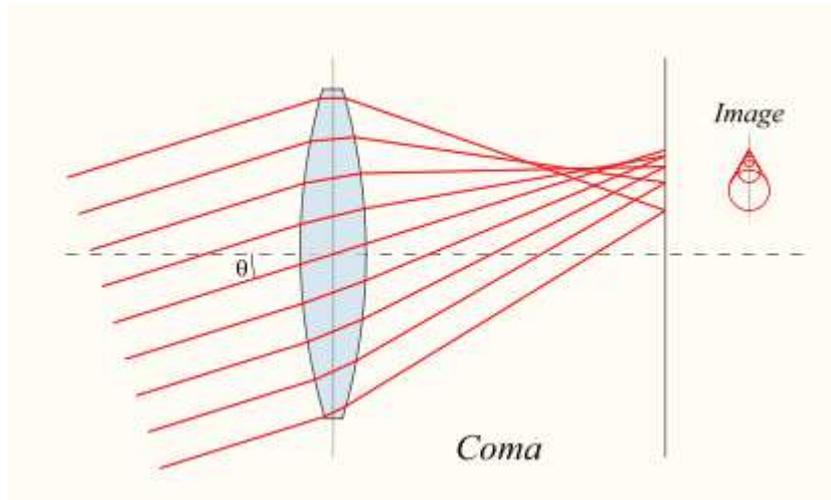


Figure 59 : Illustration de l'effet de coma d'une lentille

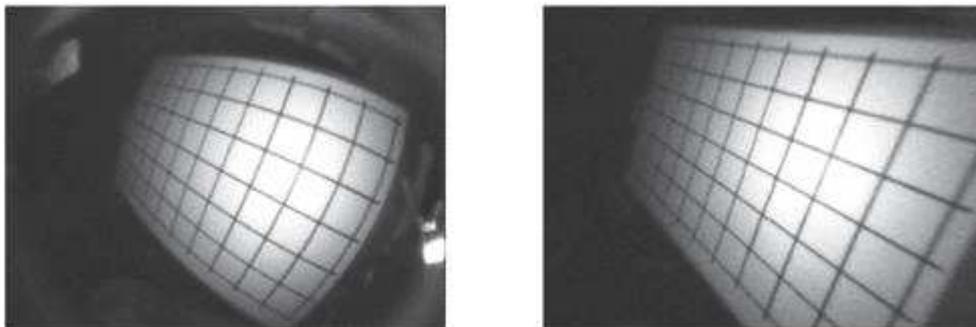


Figure 60 : Comparaison entre une image distordue (à gauche) et une image corrigée (à droite)

## IV.2.3. Les différents types de lentilles

### IV.2.3.1. Les lentilles simples ou lentilles sphériques

Les lentilles sphériques, appelées couramment lentilles simples, sont définies par un seul paramètre : le rayon de courbure de leur surface. L'utilisation des lentilles simples est limitée par les aberrations sphériques qu'elles engendrent. En revanche, ce sont des lentilles dont la fabrication est simple et peu onéreuse. Il existe différents types de lentilles sphériques suivant si celles-ci possèdent une ou deux surfaces sphériques et suivant le sens de leur rayon de courbure (Figure 61).

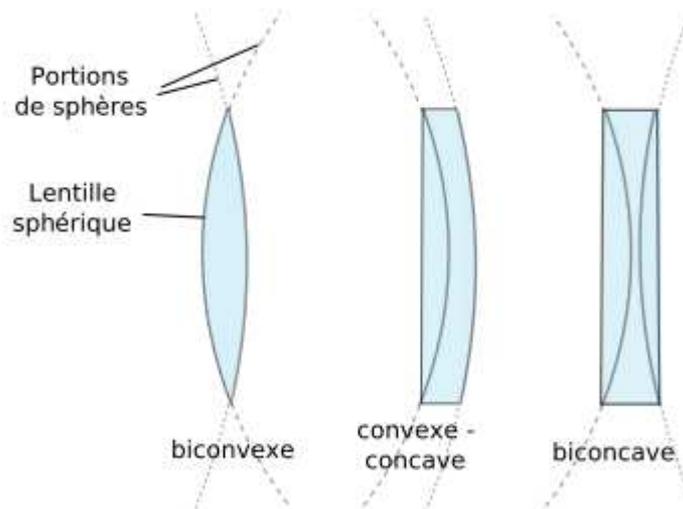


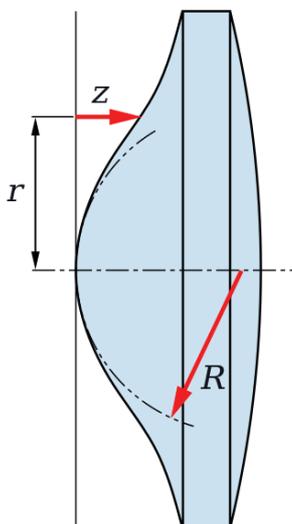
Figure 61 : Schémas de lentilles sphériques présentant des géométries différentes

### IV.2.3.2. Les lentilles asphériques

Les surfaces asphériques permettent d'améliorer les performances d'un système optique en limitant le nombre de lentilles utilisées. Elles permettent également de limiter l'aberration sphérique. Dans une lentille sphérique, l'aberration sphérique provoque la focalisation des rayons de la lumière incidente à différents points, ce qui crée un flou. Dans une lentille asphérique, la lumière se focalise à un même point, ce qui ne crée pratiquement aucun effet de flou et améliore la qualité d'image. Les surfaces asphériques sont généralement basées sur une surface sphérique, avec des coefficients supplémentaires permettant de déformer cette surface. Il est donc considéré que la courbure locale de la lentille change à travers la surface. La lentille biconvexe représentée sur la Figure 62 est un exemple de lentille asphérique. Les surfaces asphériques sont décrites à l'aide d'un coefficient de fléchissement  $z$ . La forme la plus commune pour une surface asphérique est une surface à symétrie de révolution avec un coefficient de fléchissement défini par :

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum a_i r^{2i} \quad \text{Équation 53}$$

Où  $c$  représente la courbure de base au sommet de la lentille,  $k$  est une constante de conicité,  $r$  est la coordonnée radiale mesurée perpendiculairement à l'axe optique et  $a_i r^{2i}$  sont les termes d'asphéricité d'ordre supérieur. Si le terme d'ordre supérieur d'asphéricité est égal à zéro, la surface asphérique prend la forme d'une surface à symétrie de révolution conique. Le Tableau 15 montre comment la surface conique, dépend de la valeur et du symbole de la constante conique  $k$ .



**Figure 62 : Schéma d'une lentille asphérique biconvexe**

**Tableau 14 : Type de surface conique en fonction de la valeur de la constante de conicité (62)**

Valeur de la constante de conicité	Type de surface
$k = 0$	Sphère
$k > -1$	Ellipse
$k = -1$	Parabole
$k < -1$	Hyperbole

Les lentilles asphériques permettent de corriger les aberrations avec un système offrant plus de compacité. En effet, ce type de lentille apporte une correction des aberrations de même qualité ou de qualité supérieure par rapport à l'utilisation de plusieurs surfaces optiques sphériques. Un système optique comportant plus d'éléments est susceptible d'affecter défavorablement les paramètres optiques et mécaniques du système, et de contribuer à des tolérances mécaniques moins fortes, à des procédures d'alignement supplémentaires, et à des besoins de traitements antireflets. Tous ces éléments peuvent au final diminuer l'intérêt du système. Par conséquent, l'intégration des lentilles asphériques est susceptible de réduire les coûts de conception du système.

Il existe différentes techniques de fabrication des lentilles asphériques : le moulage de verre de précision, le polissage de précision, le moulage hybride et le moulage plastique. Le moulage de verre de précision est une technique de fabrication qui consiste à chauffer le cœur du verre à très forte température, jusqu'à ce que la surface devienne suffisamment malléable pour être pressée dans un moule asphérique. La lentille garde la forme du moule en refroidissant. L'essentiel du coût de fabrication provient de la création du moule. En effet, celui-ci doit être précis et fabriqué dans un matériau très résistant, capable de garder une surface lisse pour obtenir les lentilles asphériques souhaitées. Cette technique est essentiellement utilisée pour des gros volumes de fabrication. Le polissage de précision est contrôlé par ordinateur et permet de corriger automatiquement les paramètres de l'outil afin de polir des zones larges. Cette technique est principalement utilisée pour le prototypage et la production en faible quantité. Le moulage hybride est une technique de fabrication qui utilise une surface sphérique standard. La surface sphérique est pressée sur une couche mince de polymère dans un moule asphérique. Cette technique utilise un moule asphérique rectifié au diamant. Les deux surfaces sont compressées et durcies aux rayons ultra-violet à température ambiante. Le moulage hybride est utilisé pour des applications de gros volume pour lesquelles une performance supplémentaire est nécessaire. Enfin, le moulage plastique consiste en l'injection de plastique fondu dans un moule asphérique. L'utilisation du plastique apporte beaucoup d'avantages en termes de poids et de coût de fabrication. Cette technique est principalement utilisée pour des grandes quantités de production à faible coût.

#### **IV.2.4. Spécifications du système optique**

Cette partie va permettre de définir les paramètres principaux du système optique de focalisation à développer. Nous nous servirons notamment de la valeur de  $1\ \mu\text{m}$  donnée au cours du chapitre III pour définir le diamètre du spot du faisceau laser focalisé. Le choix de la source lumineuse est un prérequis pour le calcul de ces paramètres.

##### **IV.2.4.1. Choix de la source laser**

L'objectif étant de focaliser la source laser en un spot de diamètre de  $1\ \mu\text{m}$ , le choix de la source de lumière est extrêmement déterminant. Différents critères sont importants pour établir ce choix: la longueur d'onde, le diamètre du faisceau en sortie de la source, l'ouverture numérique, l'intensité lumineuse et la puissance électrique. Il existe bien évidemment différentes références de produits commerciaux qui répondent à nos critères. Nous présenterons ici les résultats des simulations effectuées avec la source laser présentant les meilleurs critères.

La référence choisie est la diode laser commercialisée par Thorlabs LPS-635-FC, accompagnée de la fibre optique SM600. Cette diode laser présente les caractéristiques rassemblées dans le Tableau 16. Le choix d'une source laser monochromatique de longueur d'onde visible a été réalisé pour des raisons de réalisation technique (les réglages de focalisation en sont simplifiés). Néanmoins, une étude comparative entre deux longueurs d'onde est proposée à la fin de ce chapitre. La diode laser LPS-635-FC est une diode monomode (ayant une seule raie d'émission).

**Tableau 15 : Critères principaux de la diode laser fibrée retenue**

<b>Critères principaux de la diode laser LPS-635-FC (Thorlabs)</b>			
<b>Longueur d'onde</b>	<b>Courant de seuil <math>I_{th}</math></b>	<b>Puissance Optique de sortie</b>	<b>Température de fonctionnement</b>
633 nm	50 mA	2.5 mW	0 – 50 °C
<b>Critères principaux de la fibre SM 600 (Thorlabs)</b>			
<b>Ouverture Numérique</b>	<b>Mode field Diameter</b>	<b>Atténuation</b>	
0.10	4.3 $\mu\text{m}$	<15 dB/km	

Le choix d'une diode laser fibrée a été effectué afin d'obtenir un faisceau de sortie le plus fin possible. D'autre part, le faisceau sortant diverge moins que pour les diodes laser non fibrées. Enfin, ce choix apporte une souplesse dans la conception de l'architecture du capteur. Concernant la diode laser retenue, outre la longueur d'onde de 633 nm, les paramètres importants sont le courant de seuil qui définit à partir de quel courant la diode émet de la lumière, la puissance optique de sortie qui impacte l'intensité du faisceau lumineux et la consommation d'énergie de la diode et, enfin, la température de fonctionnement dont l'étendue couvre ici les besoins de l'application. La puissance optique de sortie est de 2.5 mW, ce qui représente un compromis entre, d'une part, le besoin d'une intensité lumineuse suffisante pour détecter une atténuation de l'intensité par la présence d'une particule et, d'autre part, la nécessité de réduire la consommation d'énergie des composants du capteur afin de lui garantir une autonomie satisfaisante au regard du cahier des charges élaboré précédemment.

Concernant la fibre optique retenue, trois paramètres sont importants : l'ouverture numérique qui définit la divergence du faisceau en sortie de fibre, le *mode field diameter* qui définit le diamètre effectif du faisceau en sortie de fibre et l'atténuation qui impacte l'intensité du faisceau lumineux lors de sa propagation dans la fibre. L'atténuation reste négligeable dans notre application étant données les faibles longueurs de fibre optique qui seront nécessaires (en liaison avec le caractère compact du capteur). L'ouverture numérique dépend de l'indice de réfraction du milieu dans lequel les rayons lumineux se propagent et de l'angle d'ouverture. La valeur de 0.10 indiquée dans le Tableau 16 est donnée pour l'indice de réfraction de l'air, qui est le milieu de l'espace image. Dans

ce cas, l'ouverture numérique image est égale au demi-angle d'ouverture de la fibre optique, tel qu'indiqué sur la Figure 63. Le *mode field diameter* est lié au caractère gaussien du faisceau. Sur la Figure 53, il correspond au diamètre pour une énergie de  $1/e^2$ , soit dans un cas réel à  $1/e^2$  de l'intensité maximale.

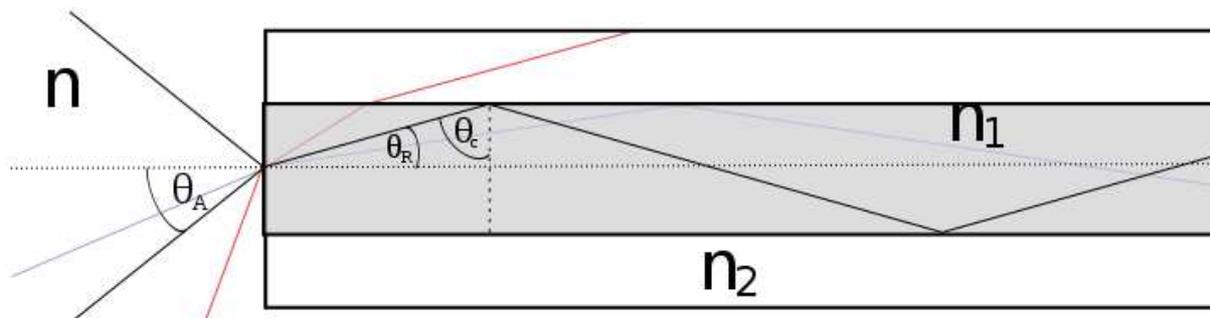


Figure 63 : Ouverture numérique d'une fibre optique ;  $\theta_A$  est le demi-angle d'ouverture

#### IV.2.4.2. Grandissement transversal

Nous allons à présent calculer le grandissement transversal de notre système optique. Considérons un objet AB situé à une distance  $z$  du dioptré de rayon  $R$  dans un plan perpendiculaire à l'axe. Son image est A'B' à la distance  $z'$ , perpendiculaire à l'axe optique (Figure 64). L'angle  $\theta$  est l'angle de champ objet. L'angle  $\theta$  étant petit, il est possible d'appliquer l'approximation de Gauss ; il en est de même pour l'angle de champ image  $\theta'$  :

$$\tan \theta \cong \theta = y/z, \tan \theta' \cong \theta' = y'/z'$$

Le grandissement transversal  $g_y$  est défini par le rapport entre la taille de l'image et la taille de l'objet :

$$g_y = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{y'}{y} = \frac{nz'}{n/z} \quad \text{Équation 54}$$

Dans notre application, la taille de l'objet correspond au *mode field diameter* de la fibre optique soit  $4.3 \mu\text{m}$ . La taille de l'image correspond au diamètre du spot que l'on souhaite obtenir, soit  $1 \mu\text{m}$ . Le grandissement transversal de notre système optique est par conséquent de 0.2325 :

$$G_y = \frac{1}{4.3} = 0.2325$$

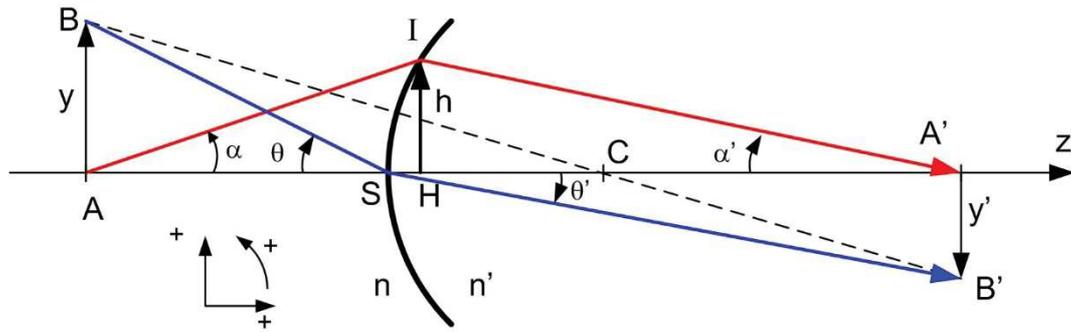


Figure 64 : Schéma paraxial permettant le calcul du grandissement du système

#### IV.2.4.3. Angle d'ouverture image

Nous cherchons à déterminer l'ouverture numérique image nécessaire pour obtenir le grandissement souhaité (soit pour transformer un objet de  $4.3 \mu\text{m}$  de diamètre en une image de  $1 \mu\text{m}$  de diamètre). L'ouverture numérique image se calcule de la manière suivante,  $n$  valant l'unité (l'indice du milieu image est l'air) et  $\theta_{\text{image}}$  étant le demi-angle d'ouverture image tel que défini ci-dessus :

$$ON_{\text{image}} = n \cdot \sin(\theta_{\text{image}}) \quad \text{Équation 55}$$

Il faut déterminer le demi-angle d'ouverture image, en utilisant le grandissement angulaire tel que défini ci-dessous :

$$G_{\theta} = \frac{\theta_{\text{image}}}{\theta_{\text{objet}}} = \frac{1}{G_y} \quad \text{Soit} \quad \theta_{\text{image}} = \frac{1}{G_y} \theta_{\text{objet}} \quad \text{Équation 56}$$

$G_y$  est le grandissement transversal du système défini précédemment. Le demi-angle d'ouverture objet est donné par l'ouverture numérique de la fibre optique suivant l'équation ci-dessus et vaut  $0.1001667$  radians. Ainsi, le demi-angle d'ouverture image vaut  $0.430566$  radians.

#### IV.2.4.4. Ouverture Numérique Image

Nous pouvons à présent déterminer l'ouverture numérique image nécessaire afin d'obtenir un spot de  $1 \mu\text{m}$  de diamètre. L'ouverture numérique image est égale au sinus du demi-angle d'ouverture image, et vaut par conséquent  $0.4174$ .

#### IV.2.4.5. Limitations d'un système optique

##### a. Faisceau laser gaussien

Au cours du chapitre III, nous avons évoqué le fait que les lasers monomodes étaient des sources de lumière dont la distribution en intensité avait une forme gaussienne. La Figure 53 représente la forme d'un faisceau gaussien. L'intensité est maximale au niveau de l'axe central du

système et diminue en s'éloignant de l'axe. Un faisceau gaussien dans l'espace de la pupille est transformé en faisceau gaussien dans l'espace image si la pupille du système n'entrave pas le faisceau. Un faisceau laser converge en un point appelé le *waist* du faisceau laser. Le faisceau émis par le laser est plan au niveau du *waist* mais son profil d'éclairement transverse est gaussien. En effet, l'intensité du faisceau varie de manière radiale depuis l'axe. On peut exprimer l'intensité de l'éclairement axial du faisceau en fonction du rayon  $r$  d'un point particulier du faisceau :

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2 * \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad \text{Équation 57}$$

Où  $I_0$  est l'intensité du faisceau sur l'axe du système et  $r_0$  est le rayon du faisceau où l'éclairement vaut  $\left(\frac{1}{e^2}\right) I_0$  soit 13,5% de son intensité maximale sur l'axe (ce rayon correspond au *mode field diameter* donné dans les paramètres de la fibre optique choisie). Le faisceau diverge à partir du *waist* avec un angle de divergence  $\theta$ , qui est identique à l'angle de convergence.

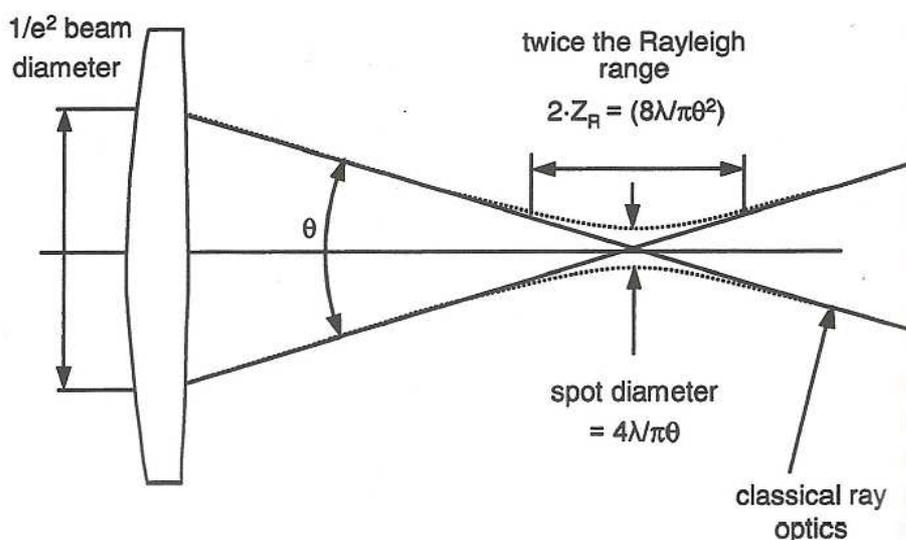


Figure 65 : Divergence d'un Faisceau Laser (62)

L'angle de divergence  $\theta$ , est l'angle sous-tendu par les points du diamètre  $(1/e^2)$  dans le champ lointain (rayons entrants parallèles); où la surface gaussienne éclairée approche asymptotiquement l'angle total de divergence (Figure 65). A la position du *waist*, le front d'onde du faisceau laser est plat, et il acquiert une courbure de chaque côté du *waist*. Le diamètre du *waist*  $d_0$  dépend de l'angle de divergence de la manière suivante :

$$d_0 = \frac{4\lambda}{\pi\theta} \quad \text{Équation 58}$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde du faisceau laser et l'angle  $\theta$  est en radians.

Dans l'espace objet, le diamètre du *waist* vaut 3.372  $\mu\text{m}$  et dans l'espace image, il vaut 0.9608  $\mu\text{m}$ . Le diamètre du faisceau s'élargit avec la distance  $z$  depuis le *waist* selon la loi suivante:

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda z}{\pi d_0^2}\right)^2} \quad \text{Équation 59}$$

Le rayon du front d'onde du faisceau laser s'exprime de la manière suivante :

$$R(z) = z \cdot \left[ 1 + \left(\frac{\pi d_0^2}{4\lambda z}\right)^2 \right] \quad \text{Équation 60}$$

La valeur minimale du rayon du front d'onde, apparaît à la limite de Rayleigh, où le diamètre du faisceau vaut  $\sqrt{2d_0}$ . La limite de Rayleigh mesurée au *waist* est :

$$z_R = \frac{d_0}{\theta} = \frac{4\lambda}{\pi\theta^2} \quad \text{Équation 61}$$

Pour résumer, le faisceau laser est caractérisé par les quatre paramètres suivants : sa longueur d'onde, son diamètre en sortie de fibre, son angle de divergence et la distance de Rayleigh. La forme du faisceau laser devra être prise en compte dans les différentes optimisations. Si le système optique focalisant le faisceau est limité par la diffraction, le diamètre du spot à  $(1/e^2)$  du pic d'éclairement est donné par :

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi d_0} \quad \text{Équation 62}$$

Si on définit une augmentation admissible du diamètre du spot de focalisation, la profondeur de focus peut être calculée en utilisant la formule du diamètre du spot comme fonction de la distance du *waist* :

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda z}{\pi d_0^2}\right)^2} \quad \text{Équation 63}$$

### b. Système limité par la diffraction

Une qualité d'image parfaite n'est pas atteignable en optique. En effet, l'image est toujours dégradée par les aberrations géométriques et/ou la diffraction. Si l'on considère une image parfaite, c'est-à-dire sans aberrations géométriques d'aucun type, l'image d'un point source venant de l'infini est appelé tâche d'Airy. Le diamètre de la tâche d'Airy est calculé de la manière suivante :

$$D_{Airy} = 2.44 \lambda \frac{f}{\text{number}} \quad \text{Équation 64}$$

Où  $(f/\text{number}) = f/D$  ;  $f$  étant la focale du système et  $D$  le diamètre d'ouverture. Le diamètre de la tâche d'Airy augmente avec la valeur de la focale. Pour une ouverture circulaire, le motif de diffraction est une fonction de Bessel (dont le tracé est représenté sur la Figure 66). Le diamètre de la

tâche d'Airy est le diamètre du premier anneau sombre du motif de diffraction. Par rapport à la tâche d'Airy définie dans un cas idéal, il existe deux cas de limitations du système et un cas intermédiaire:

1. Si les aberrations géométriques du système optique sont bien plus importantes que la limite de diffraction théorique, alors l'image sera dominée par les effets des aberrations géométriques.
2. Si les aberrations géométriques du système optique sont moins importantes que la limite de diffraction théorique alors l'image obtenue sera dominée par les effets de la tâche d'Airy.
3. Dans le cas intermédiaire où les aberrations géométriques sont du même ordre que la tâche d'Airy, l'image obtenue sera dégradée par un motif de diffraction.

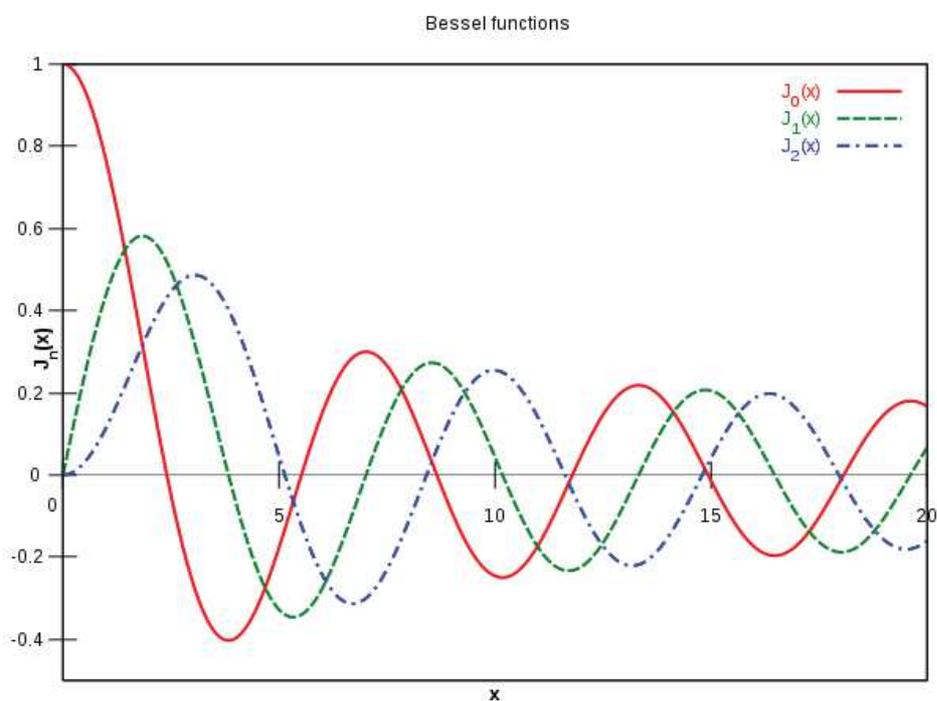


Figure 66 : Tracé des trois premières fonctions de Bessel

### IV.3. Définitions d'un modèle numérique

Les simulations numériques du système optique de focalisation ont été réalisées avec le logiciel Zemax. L'objectif est d'étudier la propagation lumineuse du faisceau laser Gaussien émis par la diode laser fibrée choisie. Pour cela, nous allons définir un modèle et préciser le mode d'analyse des résultats retenus pour notre application.

### IV.3.1. Bases du modèle numérique

Afin de décrire le modèle numérique utilisé dans le logiciel Zemax, il faut premièrement définir les paramètres généraux du système. Ces paramètres ne changeront pas pour les différentes solutions, ils seront identiques que l'on ait une, deux, trois lentilles ou plus, et quel que soit le type de lentille (simple ou asphérique). Les paramètres sont rassemblés dans le Tableau 17 et définissent le type de faisceau utilisé et la taille de l'objet.

**Tableau 16 : Paramètres Utilisés pour les Modèles Zemax**

<b>Aperture type</b>	Object Space NA
<b>Aperture value</b>	0.10
<b>Apodization type</b>	Gaussian
<b>Apodization factor</b>	1
<b>Field Type</b>	Object height
<b>Champ 1</b>	0°
<b>Champ 2</b>	0,00215°
<b>Champ 3</b>	-0,00215°
<b>Wavelength</b>	0.630 μm

L'ouverture du système (*aperture type*) définit la taille du faisceau à travers le système. Pour définir l'ouverture du système il faut préciser le type d'ouverture utilisé et la valeur de cette ouverture (*aperture value*). Le type d'ouverture choisie, *object space NA*, correspond à l'ouverture numérique du rayon marginal dans l'espace objet. Les spécifications de la fibre optique choisie donnent une ouverture de 0,10. Le type d'apodisation (*apodization type*) définit une variation d'amplitude dans la pupille. En effet, la pupille n'est pas illuminée de manière uniforme. Dans notre cas on utilise un laser, donc le type d'apodisation est gaussien. Le facteur d'apodisation (*apodization factor*) renvoie un taux de décroissance de l'amplitude du faisceau comme une fonction des coordonnées radiales de la pupille. L'amplitude du faisceau est normalisée à l'unité au centre de la pupille. L'amplitude des autres points dans la pupille d'entrée est donnée par la loi suivante :

$$A(\rho) = \exp(-G\rho^2) \quad \text{Équation 65}$$

Où  $G$  est le facteur de normalisation et  $\rho$  les coordonnées normalisées de la pupille. Si le facteur d'apodisation est égal à l'unité alors l'intensité du faisceau est de  $(1/e^2)$  aux bords de la pupille d'entrée.

Après avoir défini les paramètres généraux qui seront utilisés, il faut définir le système lui-même dans Zemax. Pour cela on utilise la fenêtre d'édition *Lens Data Editor* du logiciel Zemax. Cette fenêtre d'édition permet de définir les types de surface, les rayons de courbures, les épaisseurs, les diamètres des lentilles, et les types de verre utilisés. Les lentilles sont définies à l'aide de deux surfaces : la surface avant (*front surface*) et la surface arrière (*back surface*). Les surfaces « Objet » et « Image » sont également définies dans cette fenêtre d'édition. Pour chaque système il faut insérer le nombre de faces correspondant au nombre de lentilles souhaité. Pour chaque face il faut définir le type de surface (*surface type*). Pour les différents systèmes, nous utiliserons des surfaces standards qui sont des surfaces sphériques, centrées sur l'axe optique.

### IV.3.2. Optimisation du modèle

Une fois le modèle Zemax défini, il faut optimiser le système afin de trouver la meilleure solution possible correspondant le mieux aux spécifications techniques. L'optimisation est un outil qui permet d'améliorer les performances du système optique. L'optimisation requiert trois étapes : la définition d'un système de départ correct, la spécification de variables et l'utilisation d'une fonction de mérite. Le concepteur définit des variables qui seront modifiées durant l'optimisation. Les variables les plus courantes dans le design des lentilles sont les rayons de courbure, les épaisseurs, les types de matériaux, etc. Le logiciel calcule la valeur d'une fonction d'erreur qui dépend des aberrations présentes mais aussi des contraintes spécifiées dans la fonction de mérite. La fonction d'erreur sera d'autant plus basse que les aberrations seront limitées (bonnes performances) et que le système répondra aux contraintes (respect des spécifications). Lors de l'optimisation le logiciel calcule par itérations le gradient local de la fonction de mérite, et modifie les variables pour diminuer la valeur de la fonction. Le logiciel calcule après chaque itération la valeur de la fonction d'erreur : si elle a suffisamment changé, le calcul continue et, si la variation de la valeur est inférieure à un certain seuil, le calcul est arrêté.

Le logiciel ne peut pas trouver la solution automatiquement. Le système de départ doit être proche des spécifications désirées. L'optimisation consiste à lancer un cycle, regarder le résultat, relancer l'optimisation si le logiciel semble converger vers une solution correcte, relâcher des contraintes si besoin, et cela jusqu'à ce que la fonction d'erreur soit suffisamment basse. Si le logiciel ne converge pas ou s'il se dirige vers une solution insuffisante (ne respectant pas assez les spécifications techniques), il faut reprendre la définition du système de départ, et régulièrement relâcher certaines contraintes. Il existe deux types d'optimisation : l'optimisation simple et l'optimisation globale. L'optimisation simple permet de trouver un minimum local de la fonction de mérite, donc d'optimiser le système sur ce minimum local. L'optimisation globale permet de sortir

de ce minimum local et de trouver le minimum global de la fonction de mérite (définie ci-dessous). Le minimum global est la plus petite valeur de la fonction de mérite définie. Les deux types d'optimisation sont utilisés afin de trouver la meilleure solution possible.

### IV.3.3. Définition de la fonction de mérite

Pour réaliser l'optimisation du système, il faut définir une fonction de mérite. La fonction de mérite permet de spécifier les contraintes appliquées au système afin que l'algorithme utilisé pour l'optimisation aille dans la bonne direction. La fonction de mérite est constituée de différents paramètres (des contraintes ou des objectifs) qui doivent être pondérés pour être correctement pris en compte par l'optimisation. De manière plus générale, la fonction de mérite est une représentation mathématique de la façon dont un système optique atteint un ensemble de buts spécifiés. La fonction de mérite  $\phi$  est définie comme suit :

$$\phi^2 = \frac{\sum w_i (e_i - t_i)^2}{\sum w_i} \quad \text{Équation 66}$$

La valeur idéale de la fonction de mérite est la valeur nulle. L'algorithme d'optimisation fait en sorte de minimiser cette valeur et, de ce fait, la fonction de mérite est une représentation du système idéal. Pour construire la fonction de mérite du système, il est possible d'utiliser la fonction de mérite par défaut de Zemax, ou de construire une fonction de mérite personnalisée. Il est également envisageable d'utiliser à la fois la fonction de mérite par défaut et des opérandes supplémentaires en fonction de ce qui est nécessaire pour atteindre les spécifications souhaitées. La fonction de mérite utilisée est la même pour tous les systèmes optimisés avec des lentilles simples. Nous utilisons tout d'abord la fonction de mérite par défaut de Zemax à laquelle nous ajouterons des contraintes supplémentaires.

La fonction de mérite par défaut est construite en utilisant quatre choix possibles : le type d'optimisation, le type de donnée, le point de référence et la méthode d'intégration. Le type d'optimisation choisie est RMS (*Root Mean Square*), qui est la définition de base de la fonction de mérite donnée dans l'Équation 66, c'est-à-dire la racine carrée de la valeur moyenne des carrés de toutes les erreurs individuelles. Le type de donnée est le rayon du spot, qui correspond à l'étendue radiale des rayons concernant l'aberration transverse dans l'espace image. D'autres options sont également fixées dans la fonction de mérite par défaut : la fonction de mérite par défaut exploite la symétrie droite-gauche et la symétrie de rotation de la lentille quand le logiciel construit et évalue la fonction de mérite. Cette option permet d'accélérer, sans perte de précision, l'optimisation car moins de rayons sont tracés. En outre, la fonction de mérite par défaut permet de définir les caractéristiques

des lentilles grâce à différentes variables. Celles que nous avons fixées dans notre modèle sont les rayons de courbures des surfaces, l'épaisseur d'air et de verre et le type de matériau.

Afin d'obtenir les spécifications souhaitées, nous avons ajouté des contraintes à la fonction de mérite par défaut. Premièrement, nous définissons la taille totale du système avec une valeur minimale et une valeur maximale. Deuxièmement, nous contraignons l'ouverture numérique image afin qu'elle soit supérieure à la valeur calculée dans les spécifications du système optique. Pour chaque opérande, une valeur cible et un poids sont fixés. Si le poids est égal à zéro l'opérande n'est pas pris en compte. Si le poids est supérieur à zéro l'opérande est considéré comme une « aberration » qu'il faut minimiser. La contribution de chaque opérande à la fonction de mérite est fournie sous forme de pourcentage. En outre, il doit y avoir une certaine homogénéisation des opérandes pour que l'optimisation soit réaliste.

#### IV.3.4. Analyse des résultats

Le résultat attendu pour notre application est une solution fournissant un spot de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre contenant le maximum d'énergie possible. Pour analyser les solutions trouvées, nous nous intéresserons à deux type de résultats : le *spot diagram* et l'énergie encerclée (62).

Le *spot diagram* donne la tâche image obtenue avec la formule optique conçue. Il affiche la tâche image pour les différents champs sélectionnés et ceci pour différents focus. Il nous indique ainsi la tâche d'Airy du système optique, le rayon du spot RMS et le rayon du spot GEO. Suivant la limitation du système, il faudra comparer soit le rayon du RMS au rayon de la tâche d'Airy, soit le rayon du spot GEO au rayon de la tâche d'Airy. Le rayon de la tâche d'Airy pour le spot diagram correspond à :

$$R_{Airy} = 1.22 \lambda F/number \quad \text{Équation 67}$$

Il s'agit du rayon du premier anneau sombre de la tâche d'Airy pour une pupille d'entrée circulaire illuminée uniformément. Le rayon du spot GEO, qui est listé sur le graphe pour chaque point du champ, est la distance du point de référence au rayon qui est le plus éloigné du point de référence. Donc le spot GEO est le rayon du cercle centré sur le point de référence qui encercle tous les rayons. Le rayon du spot RMS, est la racine carrée de la taille radiale moyennée. La distance entre chaque rayon et le point de référence est élevée au carré, puis moyennée sur tous les rayons. Le rayon du spot RMS donne une idée grossière de l'étalement des rayons puisqu'il dépend de tous les rayons.

L'énergie encerclée est le pourcentage d'énergie tracée comme une fonction du diamètre image, donc de la distance au rayon principal centrée sur l'axe optique. L'énergie encerclée est couramment utilisée pour évaluer le diamètre de la tâche image. Il existe deux manières de la calculer: de manière géométrique ou en prenant en compte la diffraction. On utilise de préférence celle tenant en compte de la diffraction. La courbe d'énergie encerclée se lit de la manière suivante : l'abscisse du graphique est le diamètre du cercle "englobant" l'énergie, et l'ordonnée représente le pourcentage d'énergie contenue dans le cercle.

Dans le cas idéal où il n'y a aucune aberration sphérique, l'image d'un point source à l'infini est la tâche d'Airy. Dans le cas où les aberrations sphériques sont plus importantes que la limite de la diffraction, l'image est dominée par les aberrations sphériques. Dans le cas où les aberrations sphériques sont moins importantes que la limite de diffraction, l'image est dominée par la tâche d'Airy et le système est dit « limité par la diffraction », c'est ce type de système qui est recherché dans notre application.

## IV.4. Simulations du système optique

### IV.4.1. Etudes de solutions avec des lentilles simples

#### IV.4.1.1. Système à deux lentilles

##### a. Système à deux lentilles simples

Le système le plus simple est un système avec deux lentilles simples. Le système final a une ouverture numérique image de 0.125, ce qui est éloigné de notre objectif de 0.4174. Sur le *spot diagram*, nous observons que les tâches images obtenues pour chaque champ sont beaucoup trop importantes : en effet les spots ont des rayons d'environ 300  $\mu\text{m}$  (Figure 67). Les différents résultats montrent également qu'il y a de fortes aberrations sphériques. S'il est impossible de diminuer l'aberration sphérique, le système ne pourra jamais être limité par la diffraction et atteindre un spot de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre. Le système sera toujours limité par les aberrations. Les distances entre les différents éléments sont les suivantes :

- d1 : distance entre la fibre et la première lentille
- d2 : distance entre les deux lentilles
- d3 : distance entre la deuxième lentille et la plaque échantillon

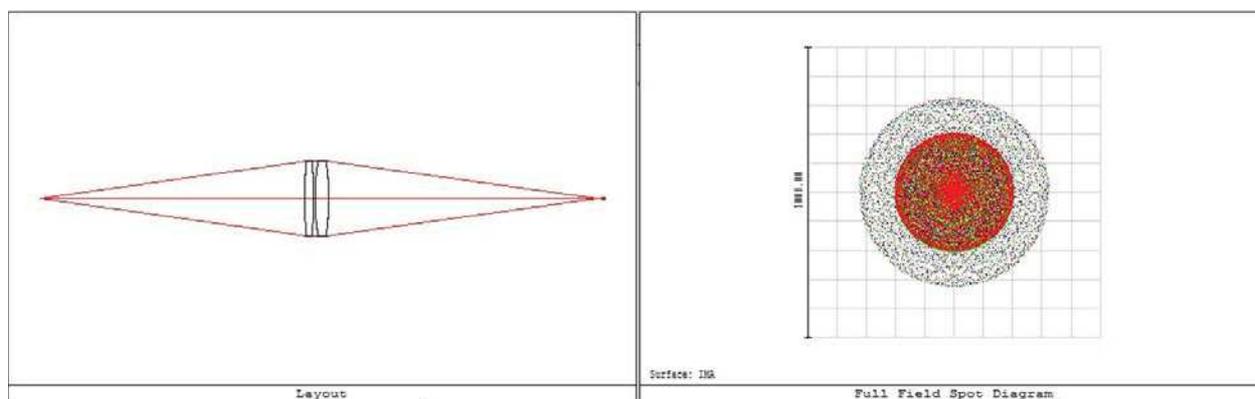


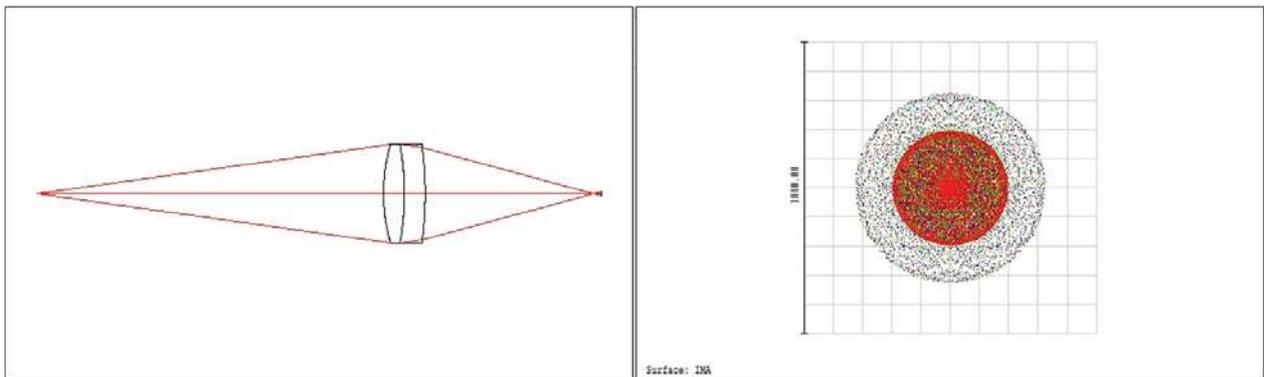
Figure 67 : Simulations numériques avec deux lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : *spot diagram*

**Tableau 17 : Caractéristiques du système avec deux lentilles simples**

$\Phi$ tâche d’Airy	5.94 $\mu\text{m}$
Distance d1	100 mm
$\Phi$ spot GEO	656.806 $\mu\text{m}$
Distance d2	0.5 mm
Énergie encerclée	2%
ON image	0.125
Taille totale du système	213.62 mm

### **b. Système avec un doublet achromatique**

L’utilisation d’un doublet permet de réduire l’aberration sphérique. L’aberration sphérique de la première lentille est corrigée par la deuxième lentille. L’ouverture numérique image obtenue est de 0.228, ce qui ne permettra pas d’obtenir une tâche image de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre. Sur le *layout* et le *spot diagram* (Figure 68), nous observons toujours de l’aberration sphérique. L’utilisation d’un doublet pour corriger l’aberration sphérique ne suffit pas dans notre cas à atteindre les performances recherchées. En outre, ce système présente un problème d’encombrement : le système fait 81,43 mm de longueur totale ce qui est trop important pour proposer un capteur avec une architecture compacte. Enfin, le diamètre de la tâche image obtenue reste trop important.



**Figure 68 : Simulations numériques avec un doublet achromatique ; à gauche : schéma paraxial, à droite : spot diagram**

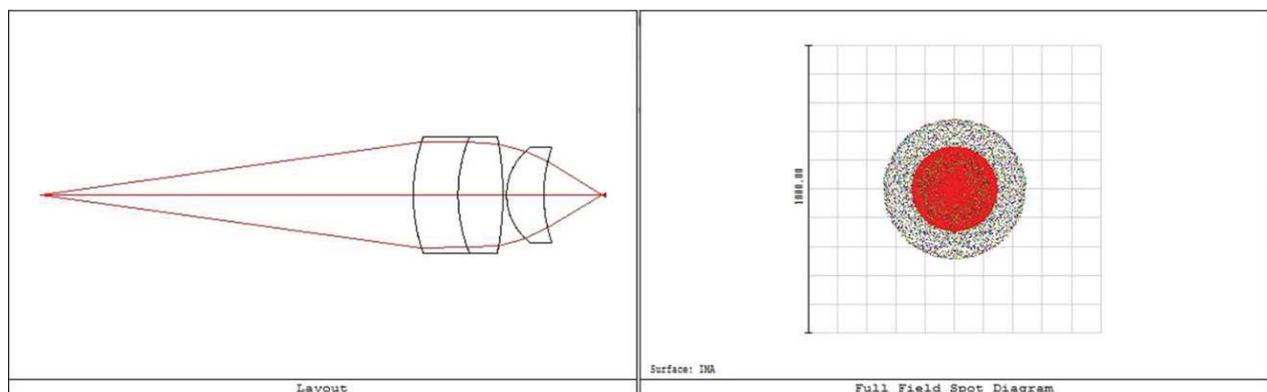
**Tableau 18 : Caractéristiques du système avec un doublet achromatique**

<b>Φ tâche d’Airy</b>	3.12 μm
<b>Distance d1</b>	50 mm
<b>Φ spot GEO</b>	654.606 μm
<b>Distance d2</b>	0 mm
<b>Distance d3</b>	25.43 mm
<b>Énergie encerclée</b>	2%
<b>ON image</b>	0.228
<b>Taille totale du système</b>	81.43 mm

#### IV.4.1.2. Système à trois lentilles

Afin de relâcher certaines contraintes et de permettre d’avoir plus de jeu et plus de variables sur l’optimisation, nous ajoutons une troisième lentille simple au système optique (Figure 69). Avec cette solution, l’ouverture numérique image se rapproche de l’objectif fixé à 0.4174 sans l’atteindre puisqu’elle vaut 0.448. Cependant, ce système à trois lentilles présente également de l’aberration sphérique assez importante. Ce système n’est donc pas limité par la diffraction, ce sont les aberrations qui sont prédominantes dans la tâche image. Enfin, il y a encore un problème d’encombrement : les lentilles font environ 2 cm de diamètre et le système fait 75 mm de longueur. Les distances entre les différents éléments sont les suivantes :

- d1 : distance entre la fibre et la première lentille (la distance entre la première et la deuxième lentille est nulle)
- d2 : distance entre la deuxième lentille et la troisième lentille
- d3 : distance entre la troisième lentille et la plaque échantillon



**Figure 69 : Simulations numériques avec trois lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : spot diagram**

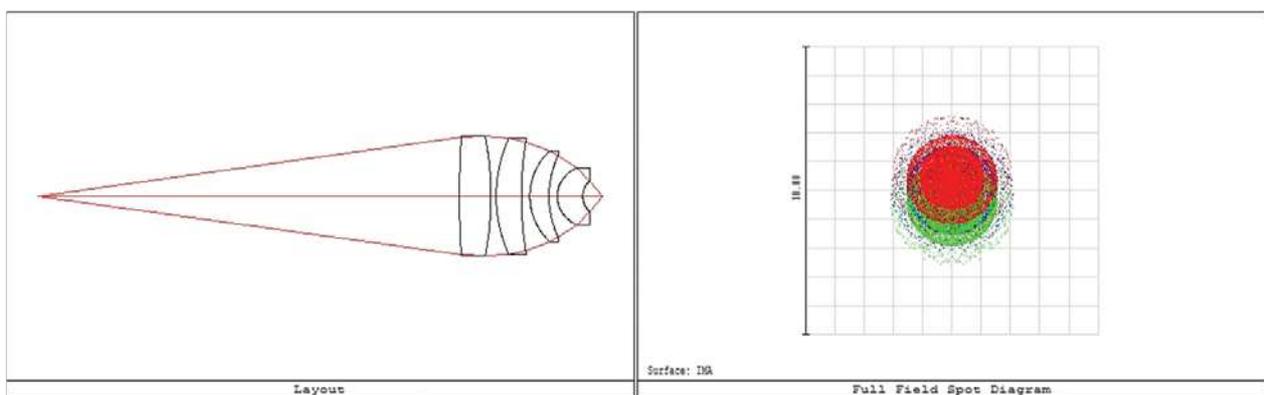
**Tableau 19 : Caractéristiques d'un système à trois lentilles simples**

<b>Φ tâche d'Airy</b>	1.55 μm
<b>Distance d1</b>	50 mm
<b>Φ spot GEO</b>	489.56 μm
<b>Distance d2</b>	0.5 mm
<b>Distance d3</b>	8.28 mm
<b>Énergie encerclée</b>	3%
<b>ON image</b>	0.448
<b>Taille totale du système</b>	75.78 mm

#### IV.4.1.3. Système à quatre lentilles et plus

Nous allons maintenant regarder le nombre de lentilles nécessaire pour obtenir des résultats corrects qui correspondent aux spécifications. Nous proposons tout d'abord un système avec quatre lentilles simples qui permet d'obtenir une ouverture numérique de 0.63 ce qui se rapproche de notre objectif (Figure 70). Le rayon de la tâche d'Airy est de 0.54 μm, ce qui est proche d'une tâche image de diamètre de 1 μm. Cependant, ce système n'est pas limité par la diffraction, le rayon de la tâche image est donc en réalité d'environ 2 μm pour chaque champ. Cette limitation vient de l'aberration sphérique engendrée par les lentilles. En outre, la dernière lentille de ce système a une forte déviation. Il faut diminuer cette déviation, et pour cela il est nécessaire de séparer la lentille en deux autres lentilles. Les distances entre les différents éléments sont les suivantes :

- d1 : distance entre la fibre et la première lentille
- d2, d3 et d4 : distance entre les lentilles successives
- d5 : distance entre la dernière lentille et la plaque échantillon

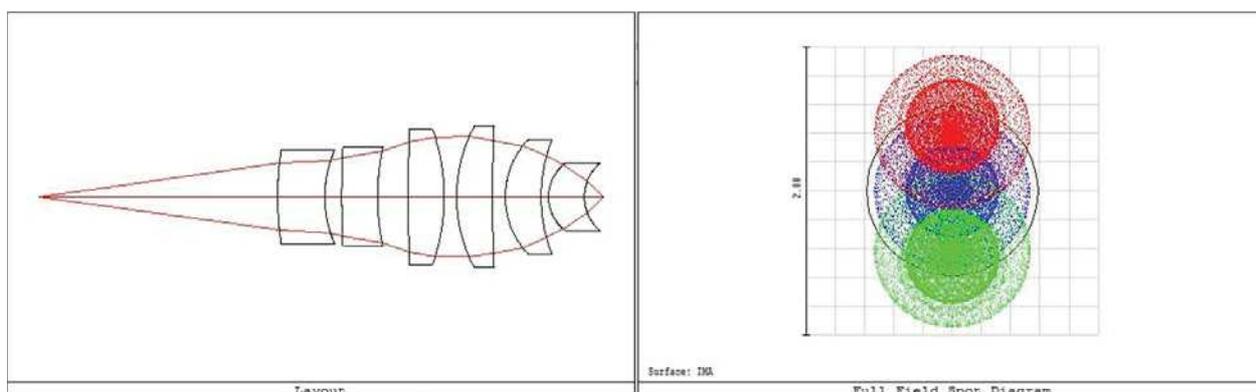


**Figure 70 : Simulations numériques avec quatre lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : spot diagram**

**Tableau 20 : Caractéristiques d'un système à quatre lentilles simples**

$\Phi$ tâche d'Airy	1.08 $\mu\text{m}$
Distance d1	50 mm
$\Phi$ spot GEO	5.19 $\mu\text{m}$
Distance d2	0,6 mm
Distance d3	0,99 mm
Distance d4	1 mm
Distance d5	2.4 mm
Énergie encerclée	30%
ON image	0.63
Taille totale du système	67.0 mm

La solution à six lentilles présentée ci-dessous permet d'obtenir les résultats souhaités avec des lentilles simples (Figure 71). Le système se rapprochant d'une limitation par la diffraction. De ce fait, les aberrations du système ne sont plus le seul facteur entrant en compte dans la qualité d'image. Le rayon de la tâche d'Airy est de 0.5872  $\mu\text{m}$ , ce qui est très proche de notre objectif. De plus, l'ouverture numérique image est de 0.6. Cependant, un tel système présente une longueur totale de 47 mm avec des lentilles de diamètre 8 mm. En outre, utiliser six lentilles est non seulement coûteux à la fabrication mais très contraignant pour les réglages opto-mécanique. Nous souhaitons uniquement montrer avec ce résultat qu'il est nécessaire de travailler avec au moins six lentilles simples pour s'approcher des spécifications techniques fixées. Pour notre application une autre solution plus compacte et permettant d'obtenir des résultats équivalents est possible en utilisant des lentilles asphériques.



**Figure 71 : Simulations numériques avec six lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : spot diagram**

**Tableau 21 : Caractéristiques d'un système à six lentilles simples**

$\Phi$ tâche d'Airy	1.174 $\mu\text{m}$
Distance d1	20 mm
$\Phi$ spot GEO	1.892 $\mu\text{m}$
Distance d3	1.60 mm
Énergie encerclée	75%
ON image	0.59
Taille totale du système	47.27 mm

## IV.4.2. Etude de solutions avec des lentilles asphériques

### IV.4.2.1. Définition du modèle Zemax pour des lentilles asphériques

Afin de proposer une solution utilisant des lentilles asphériques il est nécessaire d'améliorer le modèle Zemax précédemment défini pour des lentilles simples. Le modèle Zemax utilisé pour définir des surfaces asphériques est « *Even Asphere* ». La géométrie des lentilles asphériques est décrite par une expansion polynomiale à partir d'une sphère. Le modèle des surfaces *Even Asphere* n'utilise que les puissances paires de la coordonnée radiale pour décrire l'asphéricité. Le modèle utilise un rayon de courbure de base  $r$  et une constante de conicité  $\alpha$ , suivant la formule suivante :

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+d)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16} \quad \text{Équation 68}$$

La fonction de mérite utilisée est la fonction de mérite par défaut à laquelle sont ajoutées des contraintes supplémentaires, de manière similaire à ce qui avait été effectué pour le modèle des lentilles simples. Nous contraignons l'ouverture numérique image de la même manière. En ce qui concerne la géométrie des lentilles asphériques, nous ajoutons des contraintes sur les constantes de conicité des surfaces asphériques et sur la distance de focalisation afin qu'elle ne soit pas inférieure à 0.5 mm. Cette valeur est contrainte pour plus de simplicité dans le montage technique. Cette distance correspond à la distance entre la dernière lentille et la surface où se déposent les particules. La distance minimale de 0.5 mm paraît faible mais est néanmoins réaliste en terme de sensibilité de réglages optiques (par rapport à d'autres applications tel que le lecteur optique de CD). Il est évident qu'une distance légèrement plus élevée (de l'ordre de quelques millimètres) pourrait idéalement relâcher les difficultés techniques de conception du capteur. D'autre part, une distance inférieure à

0.5 mm pourrait créer des turbulences lors du mouvement du capteur et déplacer les particules déposées sur la surface.

#### IV.4.2.2. Système à une lentille asphérique

Nous présentons ici la meilleure solution obtenue avec une seule lentille asphérique (Figure 72). La lentille est asphérisée sur les deux faces. Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux des systèmes avec des lentilles simples. En effet, une seule lentille asphérique est nécessaire pour obtenir une tâche d’Airy d’un diamètre de l’ordre de 1.6  $\mu\text{m}$ , soit proche de l’objectif fixé. Cependant le *spot diagram* montre que le système est limité par la diffraction pour les trois champs séparés. Ainsi, le diamètre du spot total (regroupant les trois champs) mesure 3  $\mu\text{m}$  de diamètre, ce qui est trop élevé. De plus, une aberration de coma apparaît, dégradant les résultats. Ce système ne dispose pas d’assez de paramètres variables pour descendre à 1  $\mu\text{m}$  de tâche image, avec cette représentation d’asphérique. Par conséquent, une solution avec une seule lentille asphérique ne sera pas suffisante pour obtenir un spot de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre limité par la diffraction, en fournissant un système avec l’encombrement voulu.

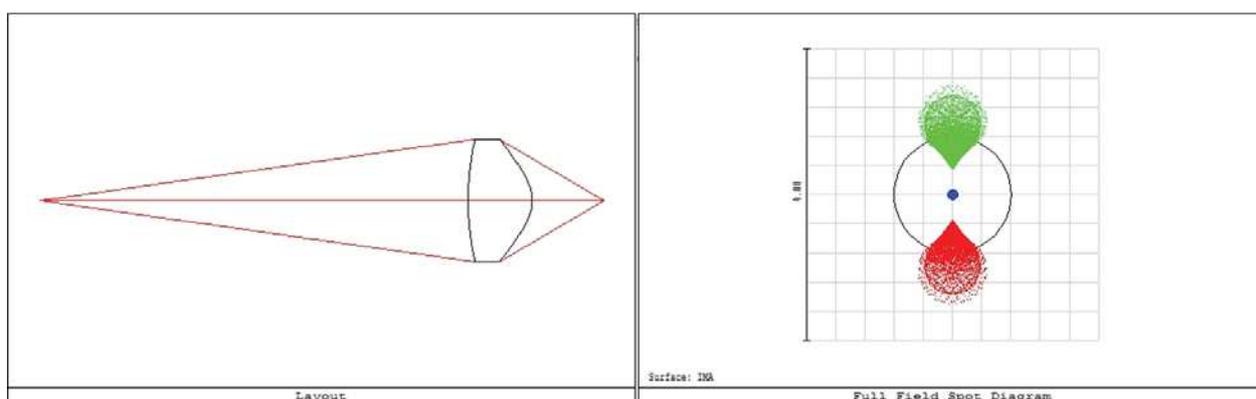


Figure 72 : Simulations numériques avec une lentille asphérique ; à gauche : schéma paraxial, à droite : *spot diagram*

Tableau 22 : Caractéristiques d’un système avec une lentille asphérique

$\Phi$ tâche d’Airy	1.61 $\mu\text{m}$
Distance d1	100 mm
$\Phi$ spot GEO	3.016 $\mu\text{m}$
Distance d3	16.75 mm
Énergie encerclée	80%
ON image	0.65
Taille totale du système	131.75 mm

### IV.4.2.3. Système à deux lentilles asphériques

Nous étudions à présent un système comportant deux lentilles asphériques. L'ajout d'une deuxième lentille asphérique permet d'avoir la possibilité de séparer le système en deux : la première lentille a un objectif de collimation et la deuxième lentille a un objectif de focalisation. De cette manière les deux lentilles ne dépendent pas l'une de l'autre, et elles peuvent être optimisées séparément dans un premier temps, puis ensemble après montage du système. Ces deux lentilles sont optimisées en infini-foyer, puis réintégré ensemble sur le même système. Le faisceau en sortie de la première lentille est collimaté. De cette manière, la distance entre les deux lentilles ne posera pas de problème, elle pourra être fixée en fonction des besoins du montage expérimental. Nous présentons ci-dessous deux systèmes : le premier système donne la solution présentant le meilleur compromis avec deux lentilles asphériques tandis que le second système permet d'obtenir la tâche de diffraction souhaitée. La comparaison de ces deux solutions permet de mettre en évidence les problématiques rencontrées pour obtenir une tâche d'Airy de  $1 \mu\text{m}$  de diamètre. La fonction de mérite est identique pour les deux solutions.

Nous voyons sur les résultats des figures 73 et 74 ci-dessous l'une des contraintes que nous avons : lorsque le système est limité par la diffraction, le diamètre de la tâche d'Airy est supérieur à  $0.6 \mu\text{m}$  ( $1.92 \mu\text{m}$ ); à l'inverse, lorsque le diamètre de la tâche d'Airy est de l'ordre du micron ( $0.94 \mu\text{m}$ ), le système n'est plus limité par la diffraction et la tâche image mesure  $14.72 \mu\text{m}$ .

Ce résultat est la conséquence de la contrainte imposée sur le grandissement, qui doit être de l'ordre de 4, ce qui impose une ouverture numérique image supérieure à 0.6 pour obtenir une tâche image de  $1 \mu\text{m}$ . La solution limitée par la diffraction a une ouverture numérique de 0.41, tandis que la solution non limitée par la diffraction a une ouverture numérique image de 0.65. Il faut trouver un compromis entre le grandissement souhaité et le fait d'être limité ou non par la diffraction. Si le système n'est pas limité par la diffraction les effets des aberrations présentes devront être pris en considération (aberration sphérique et coma principalement).

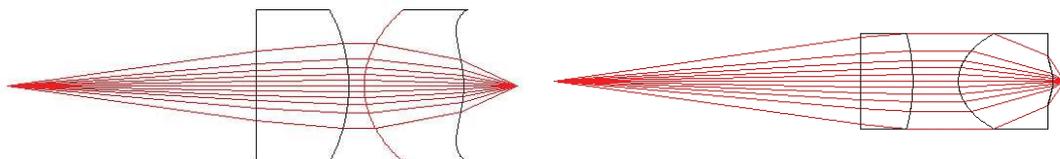
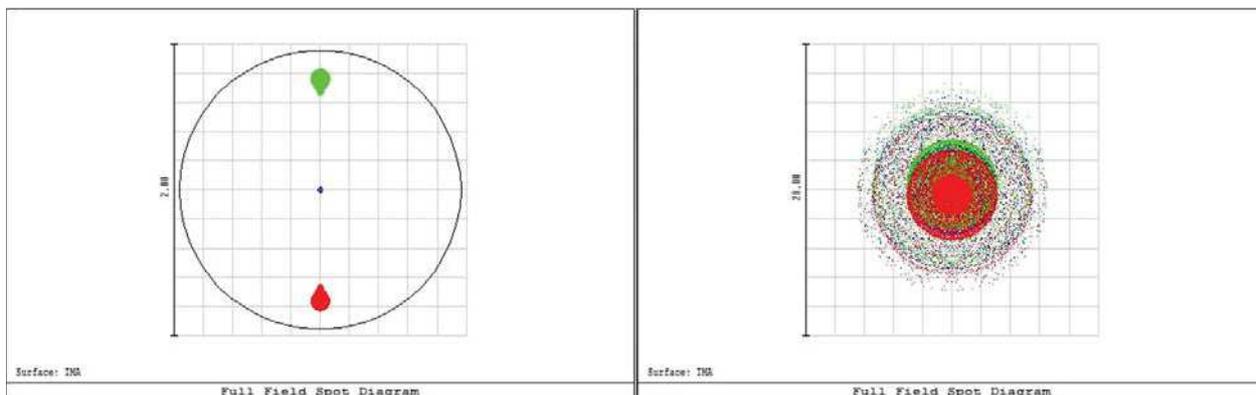


Figure 73 : *Layout* des systèmes avec deux lentilles asphériques ; à gauche : système limité par la diffraction ayant une tâche d'Airy de  $1.92 \mu\text{m}$ , à droite : système non limité par la diffraction ayant une tâche d'Airy de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$

Le système est également très contraint et excessivement sensible. A chaque légère modification d'un paramètre, les performances sont perdues. En revanche, c'est un système compact. Pour le design limité par la diffraction, la longueur totale du système est d'environ 16.5 mm et, pour le design non limité par la diffraction, la longueur totale du système est d'environ 22.5 mm. Pour relâcher les contraintes du système, nous allons rechercher une solution avec trois lentilles asphériques.



**Figure 74 : Spot diagram des systèmes avec deux lentilles asphériques ; à gauche : système limité par la diffraction ayant une tâche d’Airy de 1.92  $\mu\text{m}$ , à droite : système non limité par la diffraction ayant une tâche d’Airy de l’ordre de 1  $\mu\text{m}$**

**Tableau 23 : Paramètres principaux des deux systèmes avec deux lentilles asphériques**

	Système limité par la diffraction	Système ayant une tâche d’Airy de l’ordre du micron
$\Phi$ tâche d’Airy	1.925 $\mu\text{m}$	0.94 $\mu\text{m}$
$\Phi$ spot GEO	1.66 $\mu\text{m}$	14.72 $\mu\text{m}$
Énergie encerclée	65 %	10 %
ON image	0.417	0.65

#### IV.4.2.4. Système à trois lentilles

Le système à trois lentilles asphériques se compose de la manière suivante : un objectif de collimation avec une seule lentille et un objectif de focalisation avec deux lentilles. Les deux objectifs sont optimisés séparément en infini-foyer, et recombinaés ensuite afin d’améliorer l’optimisation totale du système. Le premier objectif est relativement simple à obtenir, le deuxième objectif, permettant la focalisation sur 1  $\mu\text{m}$  est plus compliqué et plus sensible. Ce système permet d’atteindre une tâche image de 1.14  $\mu\text{m}$  (Figure 75). Il est limité par la diffraction, et l’ouverture numérique image vaut 0.6. Le grandissement du système est donc très proche du grandissement souhaité. La fraction d’énergie encerclée est de 92%. Les matériaux utilisés pour ces lentilles sont

des polymères et des plastiques. Cependant, ce type de système reste sensible ; les performances sont diminuées dès qu'un des paramètres varie légèrement. Lors de la fabrication et du montage d'un tel système, les alignements et le centrage des lentilles seront des étapes particulièrement critiques. Cela impose également que le système soit très stable et qu'il n'y ait pas de perturbations extérieures qui puisse impacter sur le positionnement des lentilles.

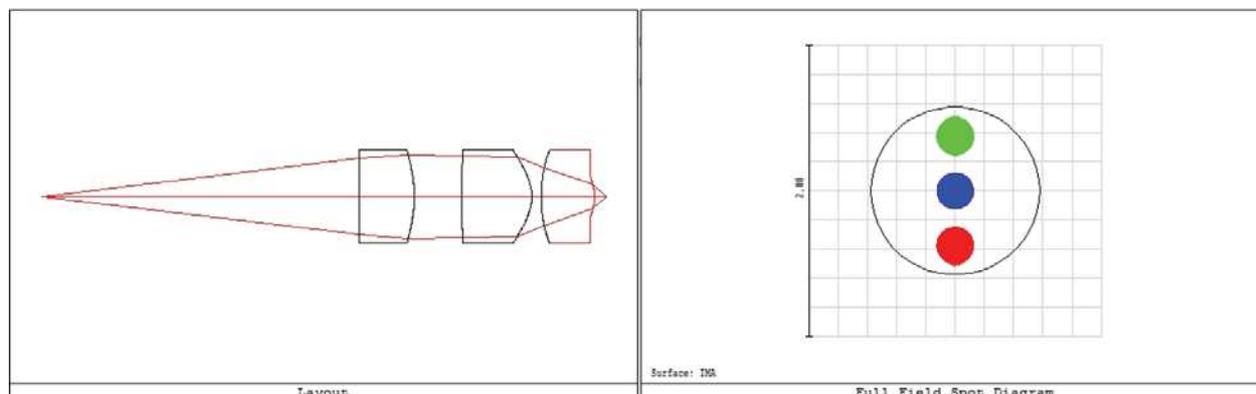


Figure 75 : Simulations numériques avec trois lentilles asphériques ; à gauche : schéma paraxial, à droite : spot diagram

Tableau 24 : Caractéristiques d'un système avec trois lentilles asphériques

<b>Φ tâche d'Airy</b>	1.156 μm
<b>Distance d1</b>	13.510 mm
<b>Φ spot GEO</b>	1.032 μm
<b>Distance d3</b>	0.502 mm
<b>Énergie encerclée</b>	92%
<b>ON image</b>	0.60
<b>Taille totale du système</b>	24.05 mm

#### IV.4.3. Choix technologiques

Nous avons présenté les principaux résultats des simulations numériques effectuées pour développer un système optique respectant les spécifications fixées. Ce système optique doit permettre de focaliser le faisceau lumineux émis par une diode laser fibrée choisie pour le compromis de ses performances. Le faisceau lumineux doit être focalisé en un spot de diamètre de 1 μm, tout en conservant la majeure partie de son intensité. D'un point de vue de la conception opto-mécanique, le système optique doit s'adapter aux contraintes du capteur. Ainsi, le système doit être suffisamment compact sans être trop onéreux ni fragile.

Les résultats de l'étude proposée au cours de cette partie ont montré la difficulté d'atteindre les objectifs fixés avec des lentilles simples. En effet, pour atteindre les performances de focalisation souhaitées, un grand nombre de lentilles sphériques est nécessaire ce qui présente divers inconvénients. Tout d'abord, le coût du système augmente avec la taille des lentilles. Ensuite, la géométrie des lentilles nécessaires est assez contraignante avec des rayons de courbure forts qui rendent difficile l'utilisation de lentilles commerciales et qui rendent les réglages du système très sensibles à des écarts d'alignement ou de centrage des lentilles sur l'axe optique du système. Enfin, l'utilisation d'un grand nombre de lentilles augmente la longueur totale du système ce qui ne va pas dans le sens de la compacité recherchée dans l'architecture finale du capteur.

Nos recherches se sont orientées vers une solution utilisant des lentilles asphériques. Ces lentilles présentent l'avantage de réduire les aberrations sphériques, elles sont cependant plus complexes à définir et à fabriquer. Un système composé d'une unique lentille asphérique ne permet pas d'atteindre les performances souhaitées. En revanche, un système à deux ou trois lentilles sphériques s'approche de l'objectif visé. Au cours de la prochaine partie, nous rechercherons une solution sur étagère (c'est-à-dire utilisant des composants disponibles sur le marché) qui sera composé de deux lentilles asphériques. La solution sur étagère proposée représente un compromis entre les performances et la rapidité de mise en place d'un banc de test. L'intérêt d'une telle étape est la démonstration du principe de mesure avant d'établir une solution idéale et industrialisable.

#### IV.4.4. Conception d'une solution sur étagère avec deux lentilles asphériques

Fabriquer un système optique avec des lentilles asphériques sur mesure représente un prix non négligeable dans le cadre du développement d'une solution innovante. Pour réduire le coût de fabrication il faut utiliser des matériaux plastiques et, surtout, faire fabriquer les optiques en très grande quantité. La solution la plus simple pour la fabrication est d'utiliser des lentilles moulées. Le moule pourra être utilisé pour toutes les lentilles, mais la fabrication du moule coûte cher. C'est pourquoi nous avons recherché des solutions sur étagères nous permettant d'approcher les performances visées. Nous avons choisi un système à deux lentilles dont les références sont données ci-dessous et qui est représenté sur les figures 76 et 77. L'étude détaillée avec l'influence de différents réglages est présentée ci-dessous, en utilisant les composants suivants, commercialisés par Thorlabs:

- Lentille L1 : APL0609-A
- Lentille L2 : 354330-A (version non montée) / C330TMD-A (version montée)

Les résultats présentés dans cette partie font l'état de différentes « configurations » dans chaque figure permettant d'étudier l'influence de différents paramètres sur le diamètre de faisceau obtenu en sortie du système. La configuration initiale est la configuration 1, la plus à gauche, et le pas défini l'incrément entre chaque configuration.

##### IV.4.4.1. Premiers résultats

Le faisceau est collimaté en sortie de la lentille L1, ce qui signifie que la distance entre les deux lentilles peut varier sans influencer les performances du système. Le système est à la limite de diffraction. Le diamètre de la tâche d'Airy est de  $2.2 \mu\text{m}$  et celui du spot de  $2.6 \mu\text{m}$ . Le pourcentage d'énergie encerclée est de 95% dans la tâche de diffraction. L'ouverture numérique image est de 0.33 ; c'est pourquoi nous obtenons une tâche de diffraction plus grande que le micron. Cette solution ne permet pas d'atteindre le grandissement recherché. Cependant cette solution est la meilleure solution obtenue avec des composants sur étagère et elle permettra de valider le principe de mesure pour la détection des particules, une fois montée sur le banc de validation. Le système optique permet de se rapprocher d'une tâche image de  $1 \mu\text{m}$ , ce qui est déjà une avancée pour la validation du principe de mesure. Les distances entre les différents éléments sont les suivantes :

- D1 : distance entre la fibre et la première lentille : 6.225 mm
- D2 : distance entre les deux lentilles : 2 mm (variable)
- D3 : distance entre la deuxième lentille et la plaque échantillon : 1.737 mm

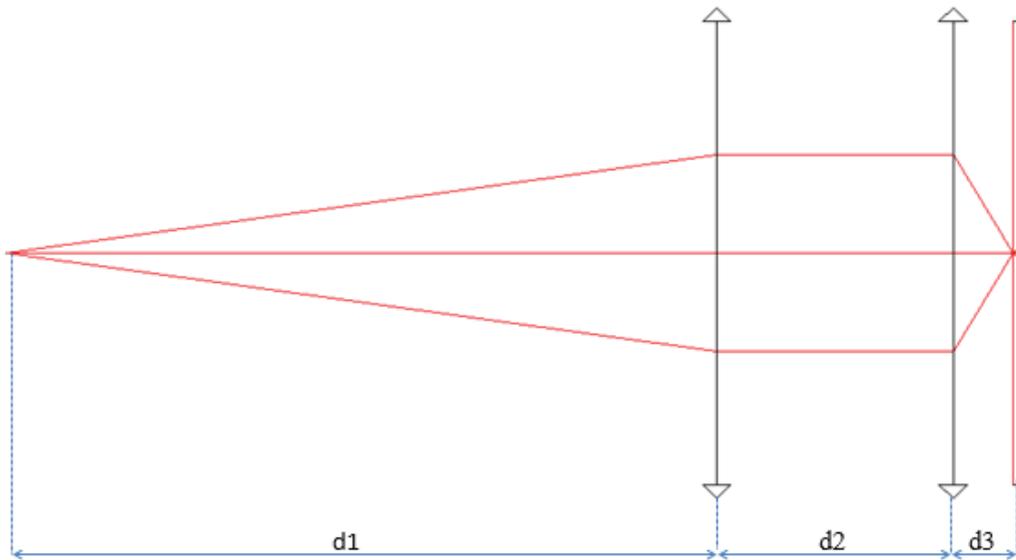


Figure 76 : Schéma de la solution avec focalisation sur les particules

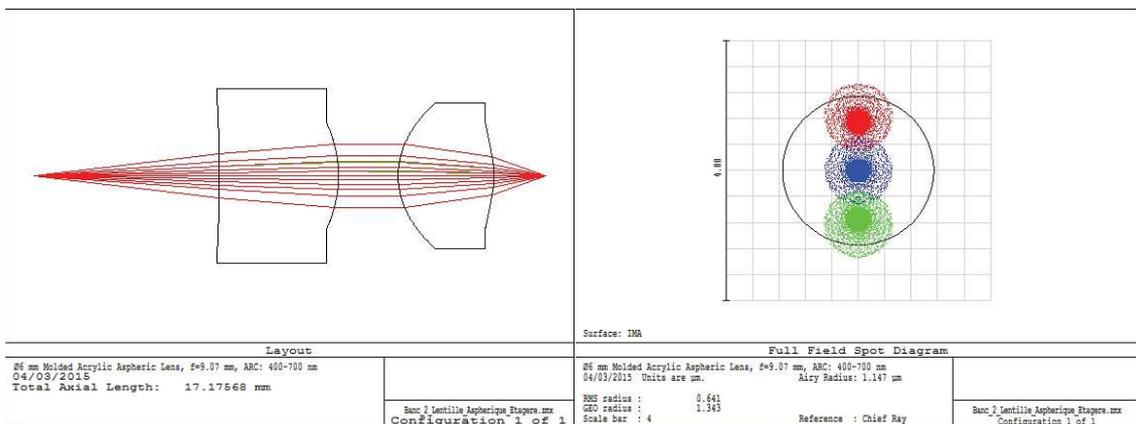


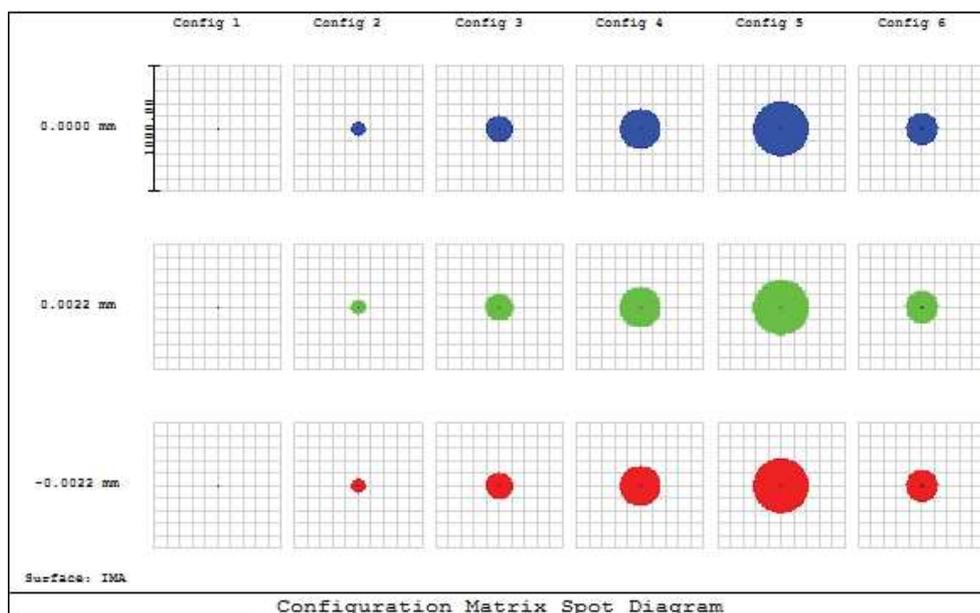
Figure 77 : Système sur étagère composé de deux lentilles asphériques

Nous allons maintenant regarder l'influence de différents paramètres sur la qualité d'imagerie de la solution trouvée sur étagère.

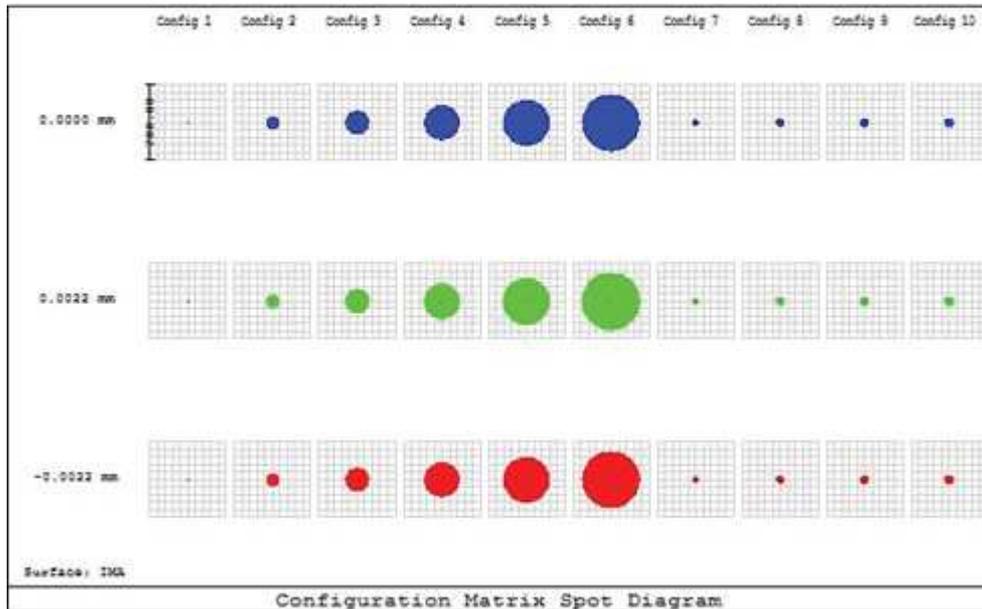
#### IV.4.4.2. Influence de la distance objet sur les performances du système optique

L'objectif de cette partie est de relâcher une contrainte de mise en œuvre en augmentant la distance entre la source lumineuse et la première lentille. Nous étudions donc à présent l'influence de la position de la source lumineuse par rapport à la lentille L1 (distance  $d1$ ), ce qui aura pour conséquence de modifier l'ouverture numérique objet. Le but est d'atteindre une configuration où le système optique est limité par la diffraction. En faisant cela, le faisceau n'est plus collimaté en sortie de L1, donc la distance entre L1 et L2 a de l'importance. Pour le moment nous gardons cette distance,  $d2$ , fixe. Le système est étudié en multi-configuration avec Zemax pour observer l'impact de l'augmentation de  $d1$  qui entraînera une diminution de l'ouverture numérique objet.

Nous commençons par augmenter la distance  $d_1$  avec un pas de 1 mm, nous obtenons six configurations. Sur le graphique de la Figure 78, lorsque la distance  $d_1$  entre la lentille et l'objet augmente, le diamètre de la tâche image augmente ce qui représente donc une dégradation des résultats. Ceci s'explique par le fait que le faisceau est plus petit lorsque la distance augmente et ne bénéficie plus de l'impact des coefficients d'asphéricité. A présent, nous augmentons la distance  $d_1$  avec un pas de 0.3 mm (à partir de la même configuration 1 que précédemment), nous obtenons dix configurations. Nous pouvons voir sur la Figure 79 qu'après la configuration n°6, le spot recommence à diminuer. Cela vient du fait que les lentilles asphériques utilisées ont une courbure qui varie en fonction de la distance par rapport à l'axe optique, donc le point de focalisation dépend aussi de cette distance. En effet, en variant la distance  $d_1$ , le diamètre du faisceau laser varie également. L'effet de focalisation est alors dégradé.



**Figure 78 : Spot diagram montrant l'influence de la distance  $d_1$  avec un pas de 1 mm entre chaque configuration**



**Figure 79 : Spot diagram montrant l'influence de la distance  $d_1$  avec un pas de 0.3 mm entre chaque configuration**

La meilleure configuration est obtenue pour la configuration n°7 de la Figure 79, avec une distance  $d_1$  augmentée de 1.8 mm. Pour la configuration initiale et la meilleure configuration obtenue en augmentant  $d_1$ , le diamètre de la tâche d'Airy est identique et égal à  $2.2 \mu\text{m}$ . En revanche, la tâche image est de  $2.6 \mu\text{m}$  pour la configuration initiale et de  $2.8 \mu\text{m}$  en augmentant  $d_1$  de 1.8 mm. L'augmentation de la distance  $d_1$  ne nous permet pas d'obtenir de meilleurs résultats. Pour ne pas dégrader les résultats, la distance objet doit rester proche de la distance définie pour la solution sur étagère sans modification.

La configuration n°1 de la Figure 79 reste la configuration de référence. En modifiant la distance objet nous n'arrivons pas à trouver une autre distance de travail pour le système. La modification de ce paramètre n'est pas suffisante car le faisceau n'est plus collimaté en sortie de la lentille L1. En plus de modifier la distance objet, il faut donc modifier la distance  $d_2$  entre les deux lentilles.

### IV.4.4.3. Influence de la distance objet et de la distance entre les deux lentilles

Nous allons ici présenter les résultats obtenus pour une modification des distances  $d_1$  et  $d_2$ , à partir de la solution sur étagère sans modification. Nous étudions tout d'abord différentes configurations avec un pas de 1 mm pour la distance  $d_1$  et une distance  $d_2$  en variable, nous obtenons onze configurations différentes.

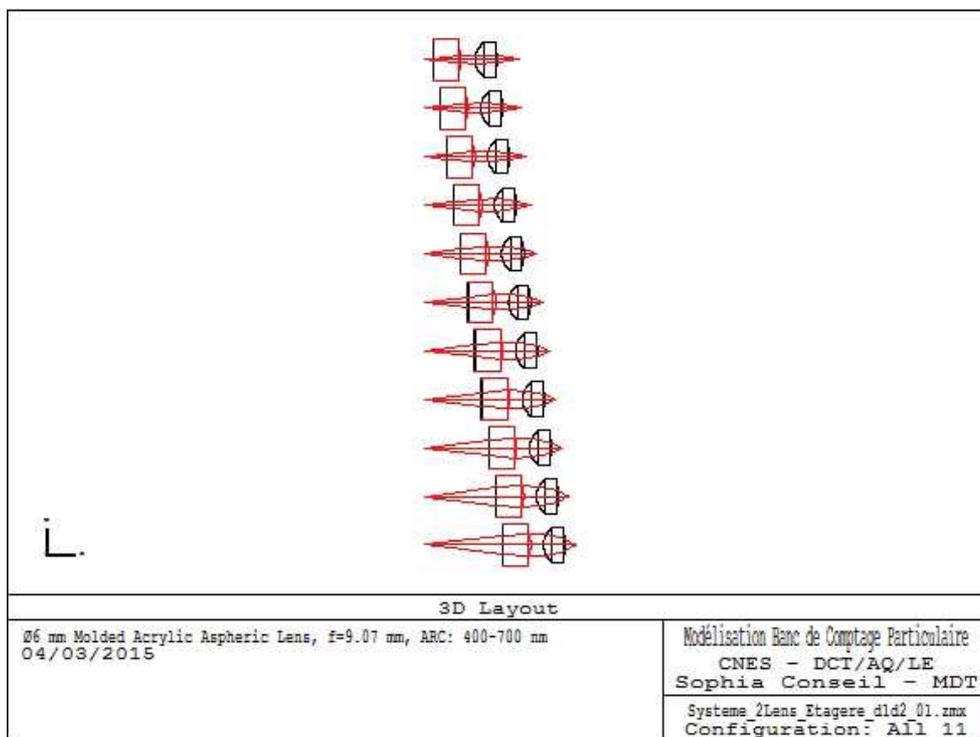


Figure 80 Schéma des 11 configurations simulées par modification des distances  $d_1$  et  $d_2$ , à partir de la solution sur étagère

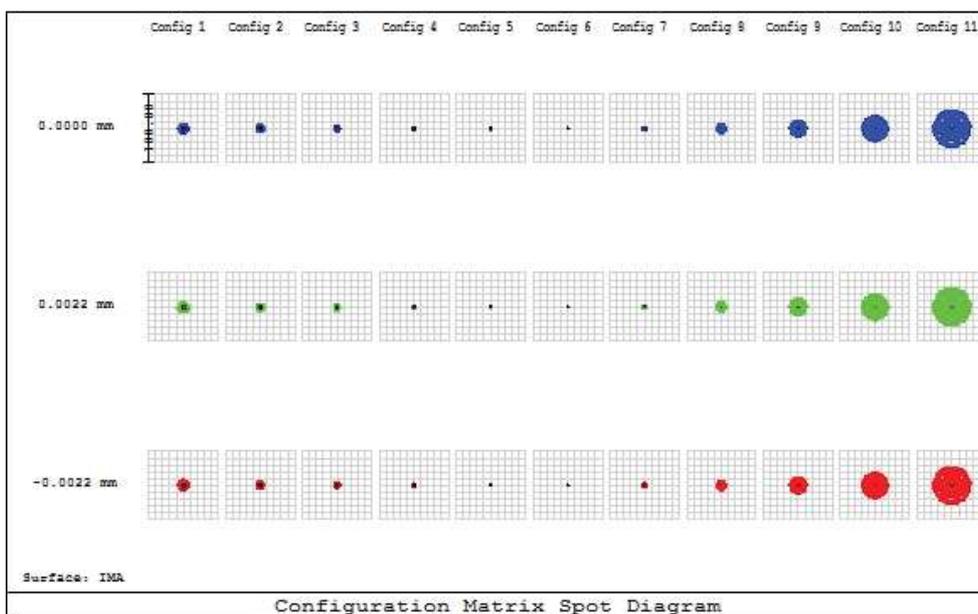
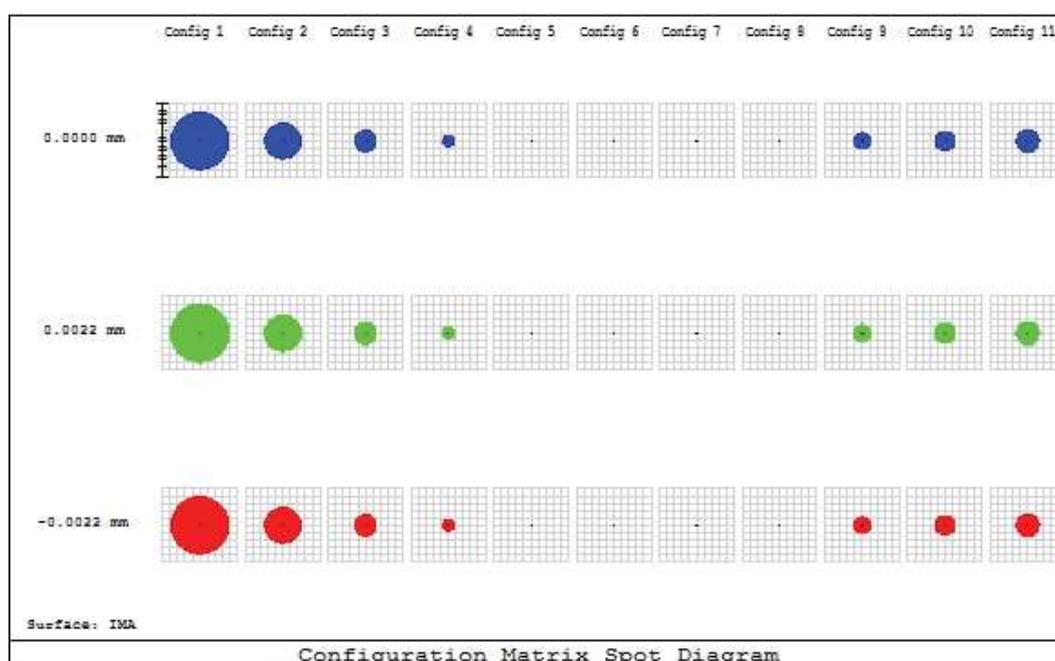


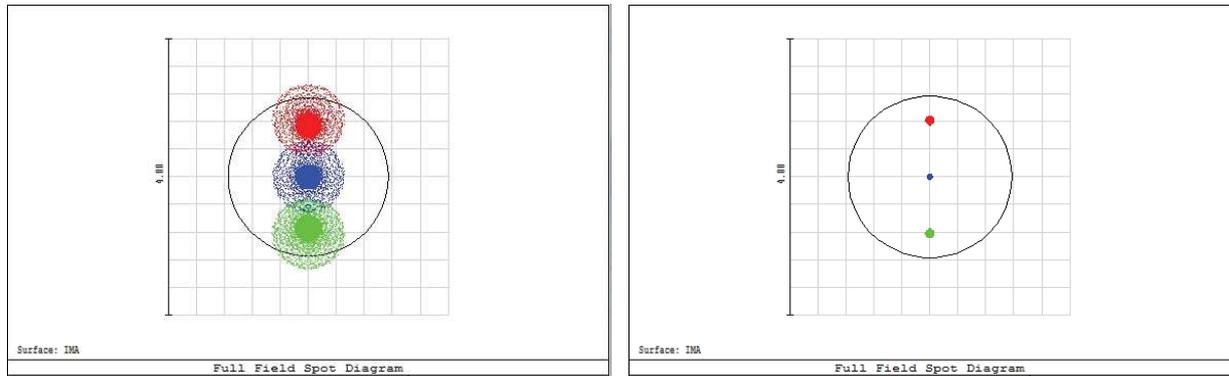
Figure 81 : Spot Diagram Multi-Configuration, modification de  $d_1$  et  $d_2$ , pas 1 mm

Sur la Figure 81, nous constatons que de part et d'autre de la configuration initiale (n°6) le diamètre de la tâche image augmente. Afin d'affiner les résultats, la Figure 82 présente les résultats obtenus à partir de la configuration n°6 avec un pas plus fin.

Nous étudions le *Full Field Spot Diagram* des différentes configurations afin de trouver la meilleure, qui s'avère être la configuration n°9. Nous comparons les résultats obtenus pour la configuration n°9 et la solution sur étagère sans modification avec les *full field spot diagram* présentés sur la Figure 83. Les performances du système sont améliorées. Le diamètre de la tâche d'Airy est de 2.2  $\mu\text{m}$  pour la configuration initiale et de 2.3  $\mu\text{m}$  pour la configuration n°9. Cependant, le système optique de la configuration n°9 est limité par la diffraction. La distance entre les deux lentilles est de 1.745 mm. La distance d1 est de 6.025 mm et la distance de focalisation d3 est de 1.762 mm. Ce système est réalisable au niveau du montage du banc.

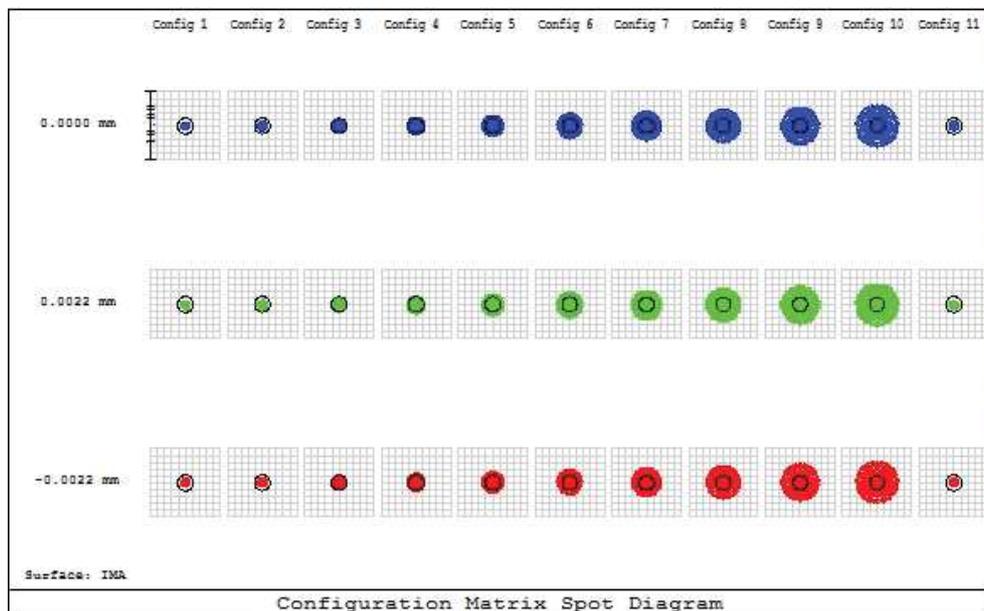


**Figure 82 : Spot Diagram Multi-Configuration, modification de d1 et d2, entre les configurations 5 et 6**



**Figure 83 : Full Field Spot Diagram Multi-Configuration, modification de  $d_1$  et  $d_2$  ; à gauche : configuration n°9, à droite : configuration sur étagère de départ**

Nous affinons maintenant les résultats obtenus entre les configurations n°6 et 7 pour voir si, en augmentant la distance  $d_1$  et en modifiant  $d_2$ , les résultats sont meilleurs.



**Figure 84 : Spot Diagram Multi-Configuration, modification de  $d_1$  et  $d_2$  configurations 6 et 7 de la figure 85**

La configuration n°11 de la Figure 84 correspond à la configuration de référence. Le diagramme montre que les diamètres des tâches images augmentent progressivement en s'éloignant de la position de référence. Les valeurs des diamètres des tâches d'Airy pour les différentes configurations sont améliorées, mais nous constatons que la tâche image est plus importante que pour la configuration de référence.

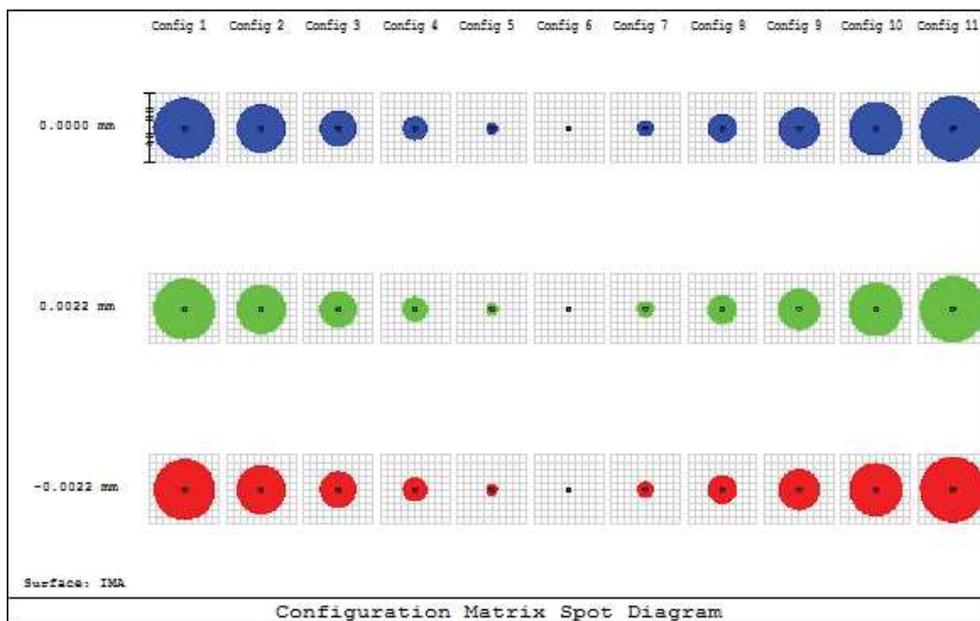
Concernant la modification des distances  $d_1$  et  $d_2$ , la solution trouvée est limitée par la diffraction. En utilisant des lentilles sur étagères et en jouant sur les distances entre ces lentilles, nous pouvons obtenir une solution se rapprochant des spécifications techniques souhaitées. Pour le banc de mesure, nous pourrions premièrement faire le montage avec un faisceau collimaté en sortie de L1, puis affiner les réglages pour obtenir la solution limitée par la diffraction. Cela nous permettra

d'avoir un réglage plus facile sur le premier montage et de se rendre compte des problèmes éventuels. Il faudra choisir un système de montage sur le banc avec séparation des deux lentilles. Ceci implique que chaque lentille ait sa propre monture et son propre réglage en distance.

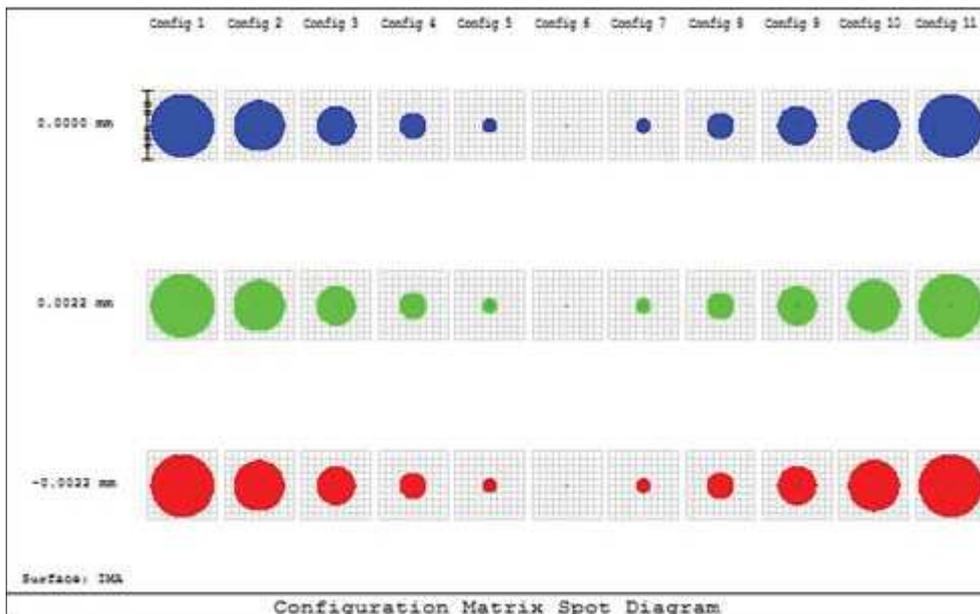
#### **IV.4.4.4. Influence du défocus**

Nous regardons ici l'évolution du système en fonction du défocus pour la solution de référence sur étagère. Nous observons sur la Figure 86 qu'un déplacement de 0.1 mm du plan focal dégrade considérablement les résultats obtenus avec cette solution. Cela signifie que la plage où la focalisation est correcte est très courte. L'étude des *full field spot diagram* des configurations 5 et 7 (les plus proches de la solution sur étagère) confirme cette observation. Le diamètre de la tâche image passe de 2.2  $\mu\text{m}$  à 72  $\mu\text{m}$  pour un défocus de 0.1 mm. Le diamètre de la tâche image est 32 fois supérieur à celui de référence.

Nous étudions à présent le système en diminuant le pas de défocus à 10  $\mu\text{m}$  (Figure 85). Nous constatons, comme précédemment, qu'un défocus de 10  $\mu\text{m}$  dégrade déjà les résultats obtenus. Pour la configuration n°5, le diamètre de la tâche image est de 7.518  $\mu\text{m}$  et pour la configuration n°7 il est de 10.184  $\mu\text{m}$ . Pour obtenir une qualité d'image correcte avec cette solution il faudra que les réglages du banc soient extrêmement précis au niveau de la focalisation, car la plage de focalisation est très courte.



**Figure 86 : *Spot Diagram* Multi-Configuration, influence du défocus sur la solution de référence sur étagère, en faisant varier la distance au plan focal avec un pas de 10  $\mu\text{m}$**



**Figure 85 : *Spot Diagram* Multi-Configuration, influence du défocus sur la solution de référence sur étagère, en faisant varier la distance au plan focal avec un pas de 0,1 mm**

La même étude a été réalisée pour la solution limitée par la diffraction. Les résultats sont présentés en annexe C. Pour un défocus de 0.01mm, les performances du système sont également dégradées. Le diamètre de la tâche image est de 8.538  $\mu\text{m}$  ce qui est quatre fois plus important que celui de la limite de diffraction. De la même façon que pour la solution de référence, avec un faisceau collimaté en sortie de L1, les réglages de ce montage devront être extrêmement précis. La plage de focalisation est également très courte pour ce système. Cela signifie que le système est très sensible aux désalignements, à cause de l'utilisation de lentilles asphériques.

#### IV.4.4.5. Influence de la longueur d'onde

Nous allons étudier ici, l'influence de la longueur d'onde sur les résultats obtenus. Le système optique a jusqu'à présent été conçu pour une longueur d'onde rouge. Nous étudions les deux solutions trouvées : celle de référence avec le faisceau collimaté en sortie de L1 et celle limitée par la diffraction.

Dans un premier temps, nous commençons l'étude de la solution de référence. La Figure 87 ci-dessous présente les résultats de l'influence de la longueur d'onde sur le diamètre de la tâche d'Airy. Pour les longueurs d'onde bleues, nous constatons que le rayon de la tâche d'Airy diminue de plus en plus quand la longueur d'onde diminue. Cependant, le système n'est toujours pas limité par la diffraction, puisque le diamètre de la tâche image fait  $4.8 \mu\text{m}$ . Plus la longueur d'onde augmente et plus le diamètre de la tâche d'Airy est grand ce qui est normal vu que son diamètre dépend de la longueur d'onde (cf. Équation 64). Cependant, même si le diamètre augmente jusqu'à  $3 \mu\text{m}$ , le système reste limité par la diffraction. Or, comme la distance de focalisation est plus grande, le montage sera plus facile à régler.

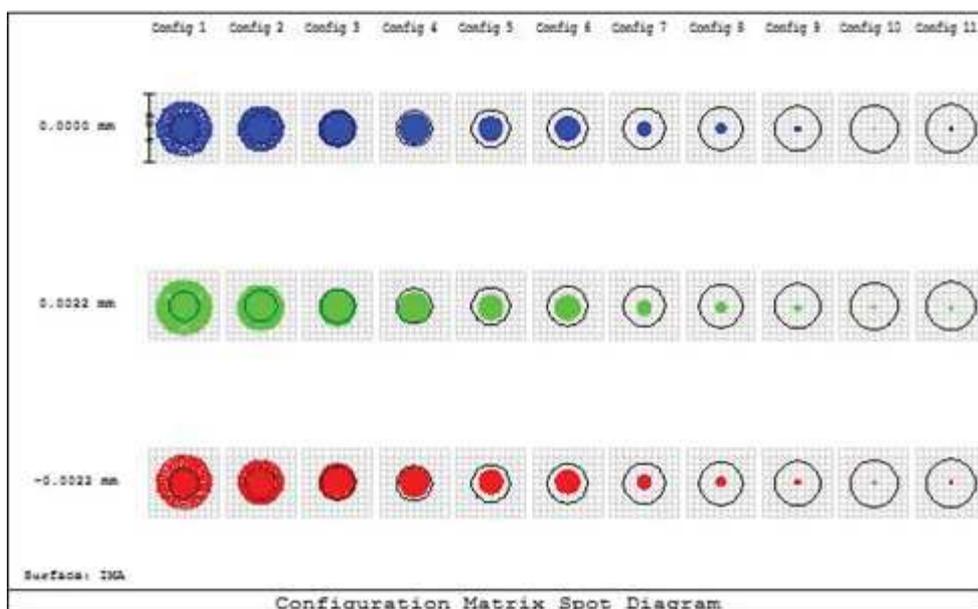
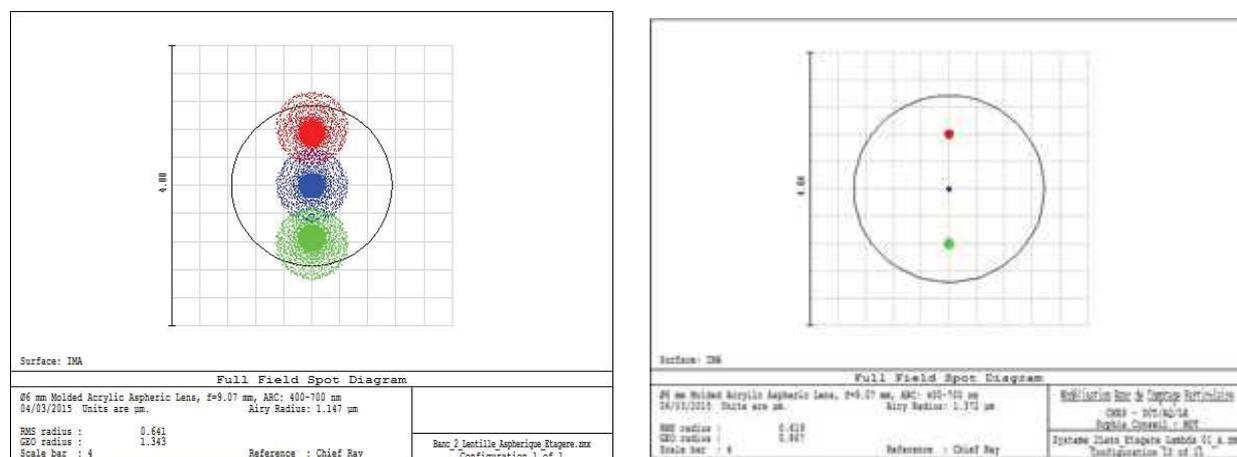


Figure 87 : *Spot Diagram* Multi-Configuration, influence de la longueur d'onde sur la solution de référence sur étagère, pour des longueurs d'onde bleues, vertes et rouges

La Figure 88 ci-dessous montre le *full field spot diagram* pour la configuration n°10. Le diamètre de la tâche d’Airy est de 2.7  $\mu\text{m}$  et le système est limité par la diffraction, ce qui est un avantage par rapport à la solution de référence. La longueur d’onde utilisée pour cette solution est 757 nm.



**Figure 88 : Comparaison des *Full Field Spot Diagram* des configurations 6 et 10**

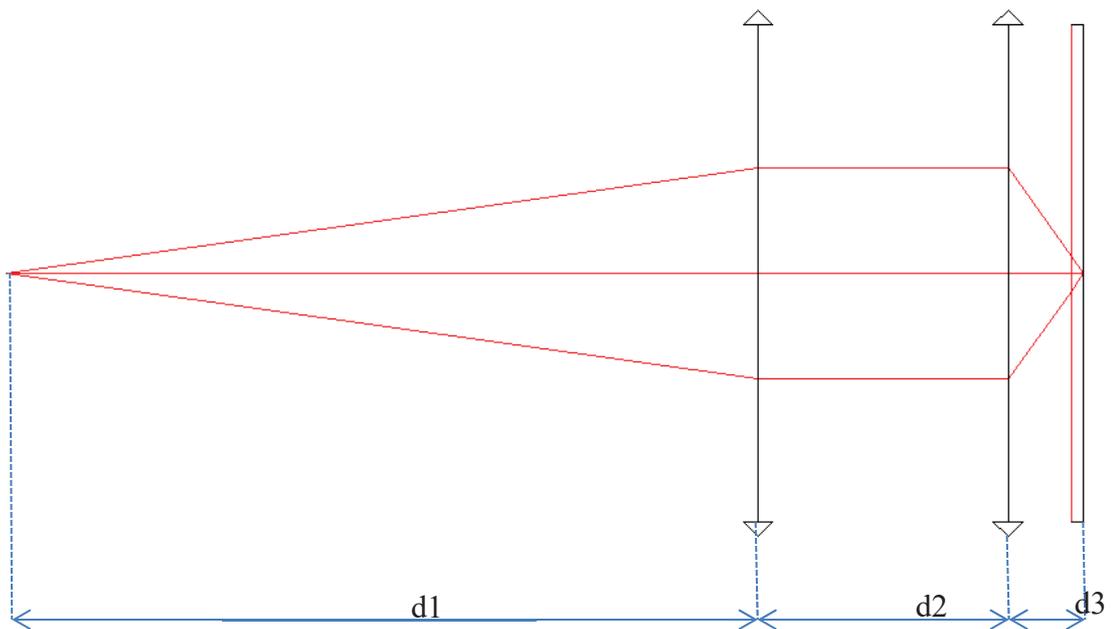
Nous regardons maintenant les résultats obtenus en faisant varier toutes les distances entre les lentilles, pour différentes valeurs de longueur d’onde. Cela peut donner au système plus de liberté pour trouver la meilleure solution possible. Nous obtenons un diamètre de la tâche d’Airy de 2.7  $\mu\text{m}$  et un diamètre de tâche image de 1.72  $\mu\text{m}$ . Le système est limité par la diffraction. La distance entre les deux lentilles est de 0.5 mm, ce qui est faible pour permettre des réglages faciles, mais la distance de focalisation est de 1.761 mm, ce qui est facile à régler.

Dans un second temps, nous étudions la solution limitée par la diffraction. De la même manière, plus la longueur d’onde diminue, plus le diamètre de la tâche d’Airy diminue. Par contre, nous n’arrivons pas à obtenir de meilleurs résultats. En effet, les performances ne sont plus limitées par la diffraction. Le diamètre du spot augmente de plus en plus pour atteindre par exemple 3.8  $\mu\text{m}$  pour une longueur d’onde de 487 nm. Plus la longueur d’onde augmente et plus le diamètre de la tâche de diffraction augmente. Le système est toujours limité par la diffraction mais le diamètre de la tâche d’Airy est trop important. En conclusion, modifier la longueur d’onde n’améliore pas considérablement les résultats pour cette configuration.

#### **IV.4.4.6. Influence de la présence de la lame de verre sur la focalisation**

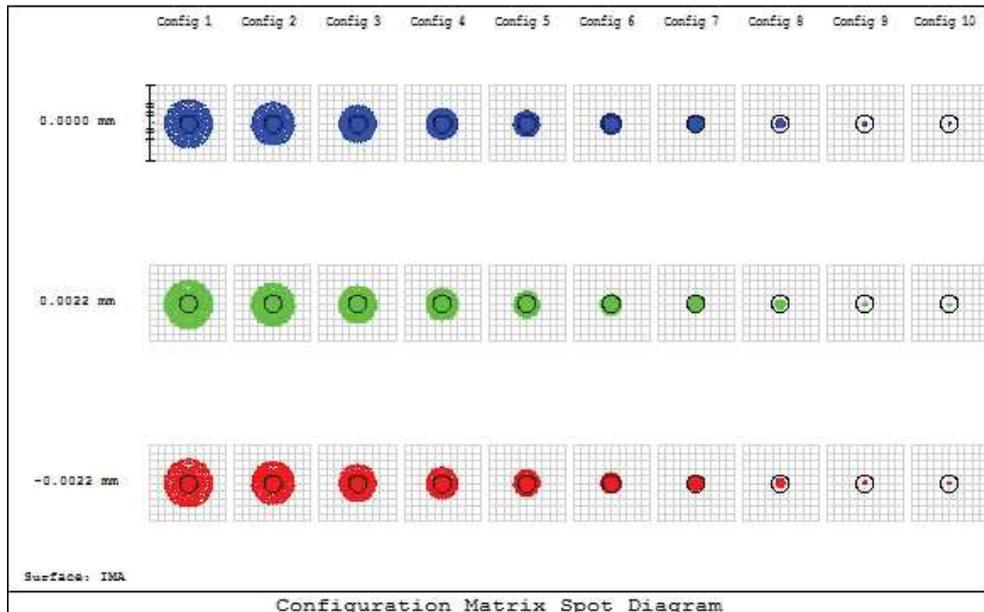
Nous avons également étudié deux configurations possibles de la plaque échantillon : la première configuration est celle jusqu’à présent utilisée (le faisceau lumineux est focalisé directement sur la particule tel que présenté sur le schéma de la Figure 76). Dans la seconde configuration envisageable, la lame de verre est intégrée au système optique : la particule se retrouve

sur la face arrière de la lame de verre (Figure 90). L'objectif de cette étude est de savoir si la lame de verre peut présenter un avantage dans la conception du système de focalisation.



**Figure 89 : Schéma du montage avec la lame de verre incluse dans le montage de focalisation**

L'épaisseur de la lame influence les résultats. Nos simulations ont été réalisées avec des épaisseurs de la lame de verre variant de 1 mm à 0.1 mm par pas de 0.1 mm. La distance de focalisation  $d_3$  est utilisée comme variable.



**Figure 90 : Spot Multi-Configuration pour une configuration où la lame de verre est incluse dans le montage de focalisation, influence de l'épaisseur de la lame de verre variant de 1 mm à 0.1 mm par pas de 0.1 mm**

Nous constatons sur la Figure 91 que les meilleurs résultats sont obtenus pour une lame de verre de petite épaisseur (inférieure à 0.2 mm). En effet, pour une lame de verre de 1 mm d'épaisseur le diamètre de la tâche d'Airy obtenue est de 2.296  $\mu\text{m}$  et le diamètre de la tâche image est de 7.97  $\mu\text{m}$ . L'ouverture numérique image est de 0.33, ce qui signifie que le grandissement souhaité n'est pas respecté. De plus, le système n'est pas limité par la diffraction.

Pour la solution sans la lame de verre, nous avons obtenu un diamètre de tâche d'Airy de 2.294  $\mu\text{m}$  ce qui correspond au diamètre obtenu pour la configuration n°1, par contre on obtient un spot de diamètre 2.686  $\mu\text{m}$ . Pour obtenir un spot de 2.686  $\mu\text{m}$  de diamètre il faut que l'épaisseur de la lame soit de 0.2 mm. Pour la configuration n°9 on obtient un diamètre de tâche d'Airy de 2.296  $\mu\text{m}$  et un diamètre de tâche image de 2.01  $\mu\text{m}$ , et le système est limité par la diffraction.

En conclusion, ajouter une lame de verre sans modifier la configuration du montage (donc sans toucher aux distances) ne permettra pas d'améliorer les résultats, à moins d'avoir une épaisseur de lame inférieure à 0.2 mm. Les lames de verre standards font 1 mm d'épaisseur.

## IV.5. Conclusion du chapitre IV

Le chapitre IV avait pour objectif de proposer un système optique adapté aux contraintes de la cellule de mesure. La principale difficulté concernait le développement d'une architecture compacte permettant de focaliser un signal monochromatique provenant d'une diode laser fibrée en un spot de  $1\ \mu\text{m}$ . Afin de pouvoir détecter des particules dans un champ granulométrique de  $1$  à  $20\ \mu\text{m}$ , il est essentiel que le spot soit de l'ordre de grandeur des plus petites particules à détecter.

Les simulations numériques présentées ont mené à diverses conclusions. Dans un premier temps, la conception d'un système optique composé de lentilles simples ne permet pas d'atteindre la limite de diffraction avec les contraintes imposées par les spécifications de départ. Il est nécessaire de définir un système composé de six lentilles simples pour atteindre un spot de  $1.17\ \mu\text{m}$  en gardant un système compact ( $47\ \text{mm}$  de longueur totale). Outre le fait qu'un système composé de six lentilles soit très onéreux, les réglages opto-mécaniques sont particulièrement sensibles et complexes. Par conséquent, nos recherches se sont orientées dans un second temps vers un système composé de lentilles asphériques afin de limiter les aberrations. L'objectif était d'améliorer les performances tout en limitant le nombre de lentilles nécessaire. Les simulations ont été réalisées avec une, deux et trois lentilles. A partir de deux lentilles asphériques, les résultats s'approchent de l'objectif fixé puisque nous sommes capables d'obtenir un système limité par la diffraction qui fournit un spot de diamètre  $1.92\ \mu\text{m}$ . Bien que ce type de configuration soit suffisamment compact pour notre application, il présente le désavantage d'être extrêmement sensible au positionnement des lentilles. Afin de relâcher les contraintes opto-mécaniques, un système à trois lentilles asphériques apparaît comme un bon compromis. Nous avons ainsi défini une solution composée de lentilles asphériques sur-mesure permettant d'obtenir un spot de  $1.16\ \mu\text{m}$  dans un système limité par la diffraction et mesurant  $24.05\ \text{mm}$ .

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la recherche d'une solution avec des composants optiques existants dans le commerce. Nous avons sélectionné deux lentilles asphériques présentant des caractéristiques intéressantes vis-à-vis de notre application. L'étude de l'influence de différents réglages ainsi que de l'influence de la longueur d'onde a permis d'optimiser le système.

## V. REFLEXIONS AUTOUR DE L'ARCHITECTURE DU CAPTEUR

---



## V.1. Introduction

Les premiers chapitres ont établi les limites et les contraintes de l'application visée : la mesure de la contamination particulaire surfacique à proximité des satellites durant les phases d'assemblage, d'intégration et de test réalisés en salle propre. Le besoin de développer une instrumentation temps-réel, autonome et compacte a permis de définir un cahier de charges. Une analyse des solutions envisageables basée sur l'état de l'art a été menée. La résolution de mesure attendue devrait permettre au capteur de mesurer des particules sédimentées d'une taille de l'ordre du micron. Cette résolution n'a jamais été atteinte en raison des limites des principes de mesure appliqués jusqu'alors. Les trois premiers chapitres de ce mémoire ont permis de dégager une solution permettant de respecter l'ensemble des critères établis en proposant une voie innovante : la mesure de l'obscurcissement de surface par des particules balayée par une source laser focalisée.

Le chapitre IV a été l'occasion de mieux appréhender les enjeux et contraintes de la cellule de mesure, en particulier au niveau du système optique devant permettre de focaliser le faisceau en un spot de 1  $\mu\text{m}$ . Nous nous sommes donc essentiellement concentrés sur la résolution des problèmes concernant l'optique de focalisation. Les simulations effectuées ont déterminé la solution la plus appropriée : l'utilisation d'un système à trois lentilles asphériques permettant d'obtenir un spot de 1.16  $\mu\text{m}$  dans un système limité par la diffraction et mesurant 24 mm. Les lentilles composant ce système doivent être réalisées sur mesure. En utilisant des composants sur étagère, nous avons proposé une solution avec deux lentilles asphériques présentant des caractéristiques intéressantes bien qu'inférieures aux performances du système sur-mesure. Cette solution a néanmoins été retenue afin de procéder aux premiers tests.

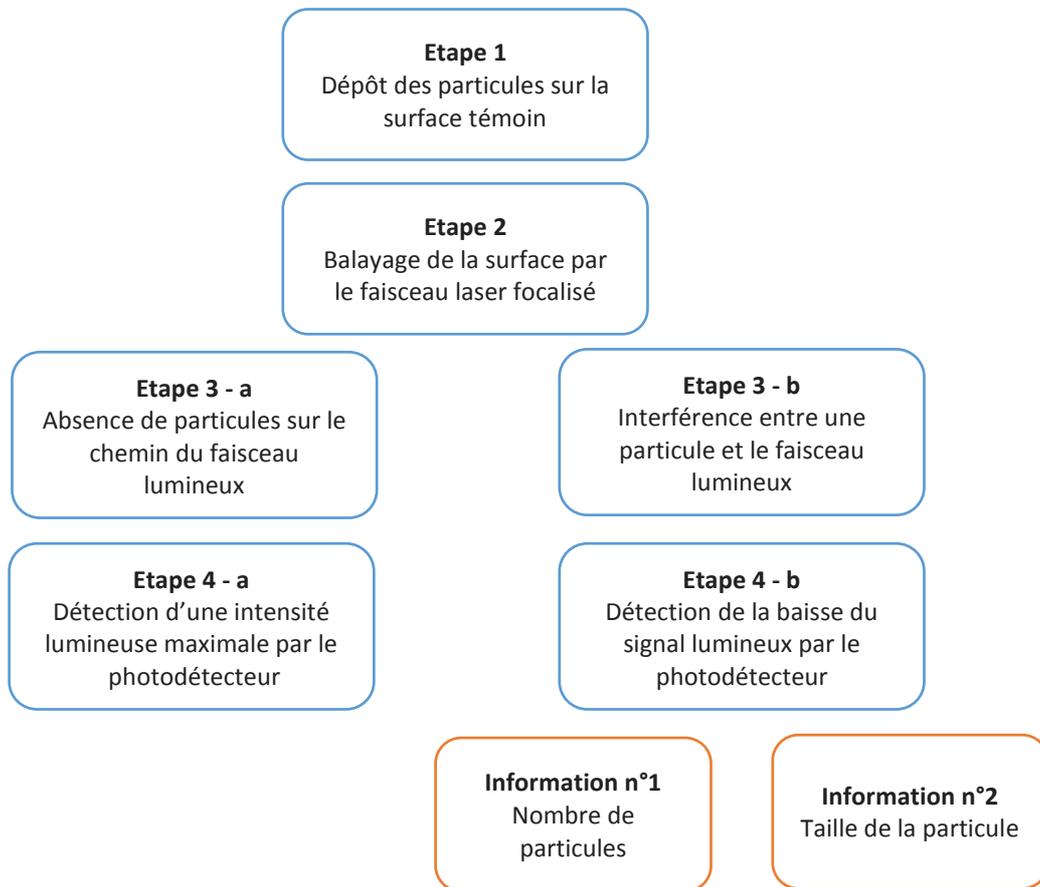
Ce dernier chapitre présente un certain nombre de réflexions sur l'architecture complète du capteur ainsi que les perspectives de ce travail.

## **V.2. Description du principe de mesure**

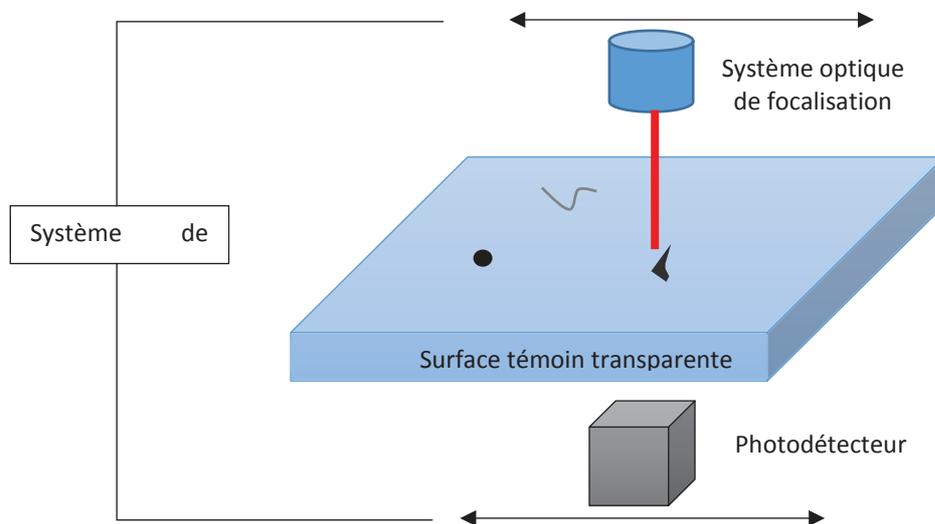
Le banc de test décrit ci-dessous a été imaginé et développé afin de pouvoir tester le système optique de focalisation, tel que simulé dans le chapitre IV. Nous présenterons tout d'abord la séquence de détection ainsi que les différents événements singuliers à prendre en considération. Par la suite nous proposerons deux stratégies de conception avec leur design de capteurs avec leurs avantages et inconvénients. Enfin, des perspectives à ce travail préliminaire seront présentées, en regard des spécifications établies au cours du chapitre III.

### **V.2.1. Séquencement du principe de détection**

L'objectif fixé par les spécifications est de focaliser un faisceau laser en un spot de 1  $\mu\text{m}$  et de détecter l'atténuation du signal lumineux par les particules disposées en travers du chemin du faisceau. Nous décrivons ci-dessous le principe de détection des particules sédimentées. Rappelons que l'environnement de mesure est une salle propre, par conséquent il s'agit d'une enceinte fermée à environnement contrôlé. La Figure 91 représente les différentes séquences de la détection des particules tandis que la Figure 92 représente le principe de mesure schématique.



**Figure 91 : Séquence de mesure de la solution développée**



**Figure 92 : Schéma de principe de la solution développée**

Le capteur est disposé à un endroit stratégique de la salle, à proximité des surfaces critiques susceptibles d'être contaminées. Nous cherchons, pour une meilleure représentativité de la

contamination réelle des surfaces, à mesurer la sédimentation *naturelle* des particules ce qui signifie que le capteur ne doit pas induire une modification de son environnement (par élévation de température, flux d'air ou par électrisation de l'aérosol – ces différentes influences étant décrites dans le chapitre I). Le capteur est composé d'une surface témoin, simplement exposée à l'aérosol à contrôler, où les particules vont venir se déposer (étape 1). A chaque intervalle de temps donné (par exemple 10 minutes lorsque la salle est en activité ou 1h pendant la nuit), une mesure va être réalisée. La surface va être balayée par le faisceau laser (étape 2). Lorsque le faisceau laser focalisé sur la surface ne rencontre pas de particules (étape 3 – cas a), l'intensité lumineuse est entièrement transmise à travers la surface transparente. Le photodétecteur récolte donc un signal maximum (étape 4 – cas a). Dans le cas où une particule sédimentée interfère avec le faisceau lumineux (étape 3 – cas b), uniquement une partie de l'intensité lumineuse est transmise à travers la surface transparente puisque la particule absorbe, réfléchit ou diffuse une fraction de l'intensité lumineuse. Le photodétecteur détecte donc une baisse du signal lumineux par rapport à la valeur de référence qui est celle où le signal est maximum (étape 4 – cas b). Une valeur seuil est fixée par les spécifications afin de discriminer une particule d'un simple défaut de surface par exemple. Si la baisse du signal lumineux est inférieure à cette valeur seuil, cela signifie qu'une particule est détectée et comptée (information n°1). L'intensité lumineuse mesurée par le photodétecteur est enregistrée en fonction du temps. Par conséquent, la vitesse de balayage couplée à la durée de la baisse du signal lumineux permet de remonter à la taille de la particule (information n°2).

### V.2.2. Cas particuliers

Des cas particuliers sont à considérer. Le premier cas est la possibilité qu'une particule soit en suspension dans l'espace entre la sortie du faisceau lumineux et la surface de détection. Cette possibilité a une occurrence très faible étant donnée la distance entre la dernière lentille de focalisation du système optique et la surface de détection (inférieure à 2 mm). Par conséquent, il est admis que cet événement induirait une erreur de mesure acceptable.

Le second cas particulier est la possibilité que deux particules soient en contact sur la surface de dépôt. Dans ce cas-là, si la quantité de lumière transmise par les deux particules est suffisamment différente, le capteur sera capable de discriminer les deux particules. En revanche si les particules sont de matériaux identiques ou que leur interaction avec la lumière du faisceau laser est similaire, le capteur ne sera pas capable de discriminer les deux particules et mesurera une seule particule de la taille des deux particules jointes. Cela pourra amener l'utilisateur à des conclusions erronées, notamment si la taille des deux particules est très nettement supérieure aux particules attendues dans l'environnement propre considéré. Une observation par microscopie simple de la surface devrait

permettre de comprendre un tel résultat. Cependant, une observation de la surface témoin à l'aide d'un microscope ne pourra être réalisée qu'en soustrayant le témoin à son espace de mesure.

Le troisième cas particulier est la possibilité qu'une particule de taille inférieure à  $1\ \mu\text{m}$  soit détectée. Ce cas particulier est relié à la valeur du seuil de détection. En effet, l'atténuation du signal lumineux peut être identique entre une particule de  $1\ \mu\text{m}$  qui transmet une grande partie du signal lumineux et une particule plus petite mais dont le matériau ne permet pas une bonne transmission du signal lumineux. Afin d'ajuster au mieux le seuil de détection, une calibration fine du capteur devra être réalisée à l'aide de particules calibrées et de différents matériaux.

## **V.3. Perspectives**

### **V.3.1. Tests complémentaires**

#### **V.3.1.1. Tests de fiabilité**

Différents tests de fiabilité devront être réalisés. Dans un premier temps, la résistance à des perturbations de l'environnement de mesure devra être éprouvée. En effet, bien que le capteur soit développé dans le cadre d'une utilisation en salle propre dont l'environnement est contrôlé (notamment en température et en humidité), des modifications locales de l'environnement peuvent être observées. Ces modifications peuvent être liées par exemple à des échauffements d'appareils électriques ou à une augmentation de l'humidité relative liée à la présence de nombreux opérateurs dans un espace confiné. La mesure réalisée devra qualifier le capteur pour des gammes de température, d'humidité relative et de pression. Il est à noter que l'étude de l'influence des paramètres environnementaux effectuée au cours du chapitre I donne d'ores et déjà des indications quant aux limites de ces gammes. En effet, il a été montré qu'une surface froide attirait d'avantage les particules par le phénomène de thermophorèse (cf. I.3.1.5). D'autre part, l'humidité relative et la température de la surface de dépôt peuvent influencer les forces d'adhérence (cf. I.3.7.1) des particules sur la surface. Enfin, la présence d'humidité sur la surface peut impacter directement la qualité de mesure en modifiant l'indice de réfraction du milieu de mesure et en diffusant ou absorbant une partie du faisceau lumineux incident.

#### **V.3.1.2. Prise en compte des artefacts**

Afin de remédier à des artefacts de mesure liés à la présence d'impuretés dans le verre de la surface de dépôt, ou à des défauts de surface, la procédure de mesure devra impliquer une mesure avant exposition du capteur. Cela sous-entend que, lorsque la surface de dépôt est nettoyée et prête à être mise en service, le capteur devra scanner intégralement la surface. Les mesures suivantes seront alors des mesures différentielles par rapport au signal mesuré initialement.

#### **V.3.1.3. Auto-calibration du capteur**

Pour procéder à une calibration régulière et simple du capteur, une solution simple est d'imprimer un motif de lignes en deux dimensions de différentes largeurs connues. Ainsi, il sera possible par analyse du signal de connaître exactement la sensibilité du capteur. En revanche, le capteur est conçu pour être insensible aux variations de la lumière ambiante.

#### **V.3.1.4. Réaction aux vibrations**

Il est envisageable que le capteur soit placé dans les caissons de transport des satellites afin de tracer la contamination particulaire surfacique jusqu'au lancement. Le transport induit inévitablement des vibrations. Les vibrations peuvent représenter un problème si elles provoquent un mouvement des particules déposées. De plus, les fonctions de scan et l'alignement du faisceau avec le photodétecteur devront être éprouvés en fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations

Le capteur devra être testé sous différents environnements vibratoires afin d'envisager une mesure de la contamination particulaire surfacique dans les caissons de transport des instruments et des satellites. La compréhension et l'analyse des résultats de mesures effectuées lors d'un transport devront donc être ajustées. Dans le cas de particules remises en suspension, les mesures montreront une diminution de la quantité de particules déposées. Un capteur placé à côté d'une surface sensible lors de son transport devra être impérativement propre afin de ne pas apporter de particules susceptibles d'être remises en suspension et de se déposer sur la surface sensible.

#### **V.3.2. Conception du capteur**

Deux architectures du capteur ont été imaginées afin de répondre aux exigences de notre application. Les deux architectures répondent à deux stratégies différentes. Leur différence se situe dans la continuité de la mesure. Dans le premier système, la surface est exposée durant un temps X puis ramenée dans la cellule de mesure où elle est analysée pendant un temps Y. Le temps d'analyse Y doit valoir maximum 10% du temps d'exposition X. Par exemple, la surface est exposée pendant 30 minutes et la mesure dure 3 minutes. Dans le second système, la surface est exposée en continu à l'environnement mais le système de balayage obstrue régulièrement mais momentanément la surface. Des propositions pour ces deux systèmes sont schématisées ci-dessous.

##### **V.3.2.1. Système 1**

Dans le premier système présenté sur les figures 93 et 95, la surface de collecte des particules est exposée à l'environnement à mesurer pendant un temps déterminé, dont la durée définit la fréquence de mesure. La surface exposée va récolter les particules contenues dans l'aérosol à contrôler. Il s'agit d'une surface transparente en verre, de forme rectangulaire. Sa forme lui permet d'être montée aisément sur un système de rails automatisés. Lorsque la durée d'exposition est écoulée, la surface est ramenée à l'intérieur de l'enceinte du capteur grâce aux rails. Une trappe permet alors de fermer complètement la structure de l'enceinte afin que la mesure puisse être réalisée dans le noir. Cette solution est donc parfaitement adaptée si le système de mesure est sensible à la

lumière parasite. La mesure est effectuée grâce à un balayage à deux dimensions et au système de détection de la lumière transmise tel que décrit précédemment.

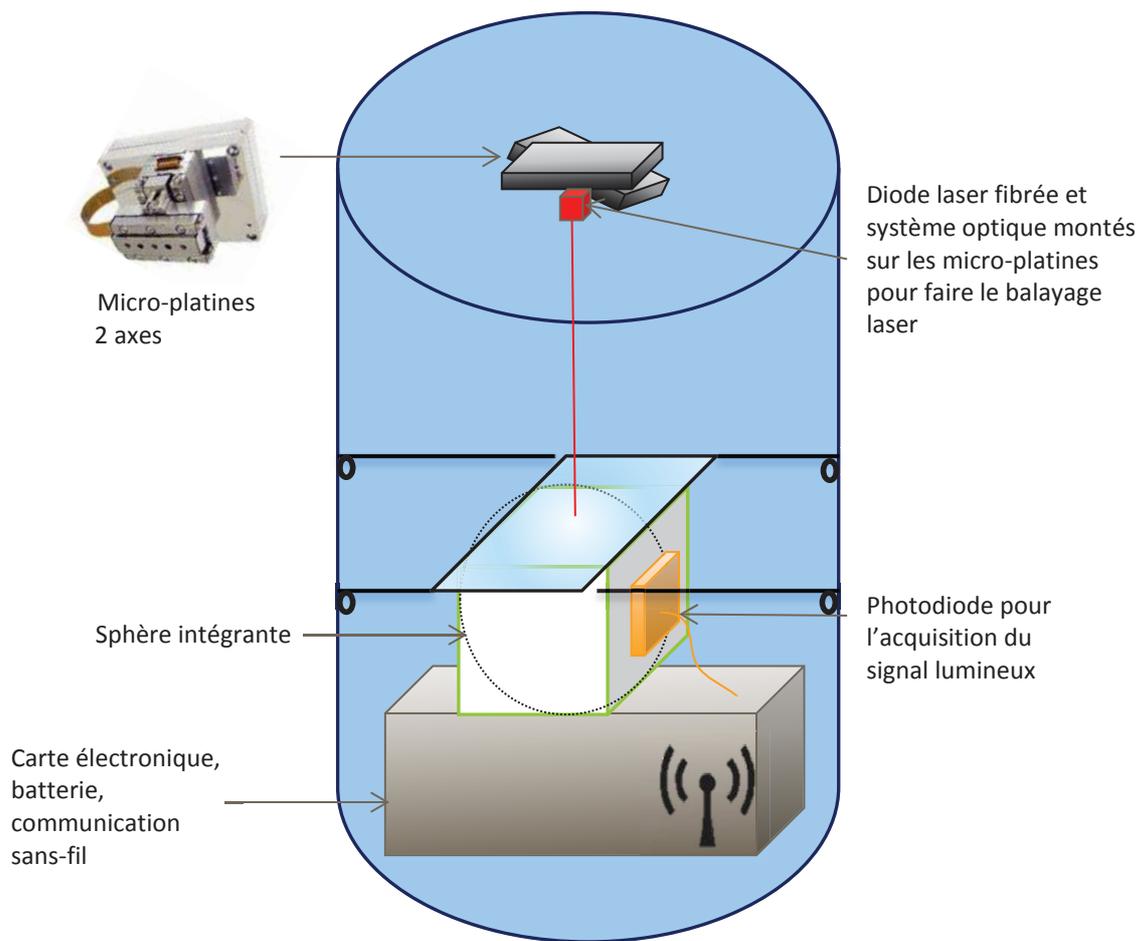
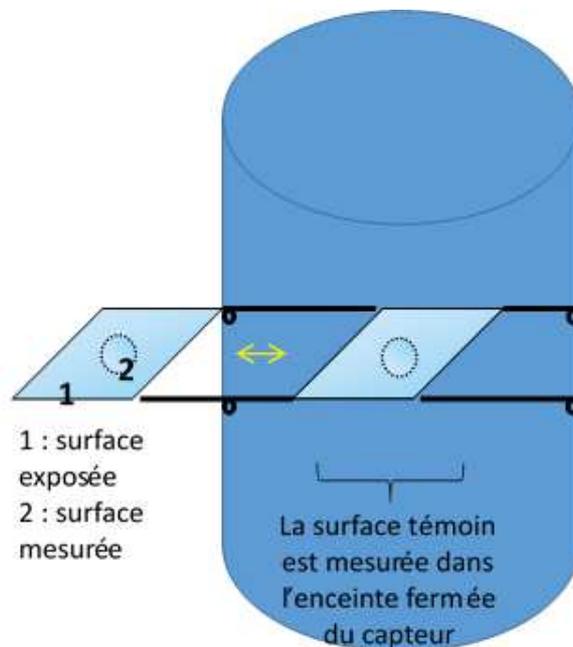


Figure 93 : Schéma de l'intérieur de l'enceinte contenant la cellule de mesure



**Figure 94 : Représentation schématique du système 1. La cellule de mesure est contenue dans l'enceinte.**

### V.3.2.2. Système 2

Dans le second système présenté sur la Figure 95, la surface de collecte des particules est constamment exposée à l'environnement à mesurer. Cette surface transparente est un disque de verre percé en son centre. L'ensemble du système de mesure des particules est contenu dans une « pince » dont les deux parties sont solidaires par le centre du disque. Un côté de la « pince » contient la diode laser et le montage de focalisation tandis que l'autre côté contient la photodiode pour détecter le système lumineux. Sur la figure, la source du faisceau focalisé est contenue dans la partie supérieure de la « pince ». Pour la détection optique, il n'y aurait pas de différence à inverser le système de source lumineuse et le système de détection. En effet, la simulation faite au cours de la partie IV.4.4.6 montre que la présence de la surface en verre de dépôt des particules n'influence que de manière très minime la qualité de la focalisation. Cette possibilité pourrait donc être prise en compte. Cependant il est conseillé d'utiliser la source laser dirigée vers le bas pour des raisons de sécurité. L'ensemble du disque et de la « pince » est monté sur un socle non représenté sur la figure. Ce socle contient l'électronique, le système d'alimentation et le système de communication sans fil. Une antenne devra être montée sur ce socle afin de communiquer les mesures à une base de récolte des données. L'ensemble du système est compact, peu encombrant et présente l'intérêt de pouvoir être placé n'importe où, y compris dans des caissons par exemple. Il peut également être orienté de différentes manières, en étant placé avec de l'adhésif sur des surfaces verticales par exemple.

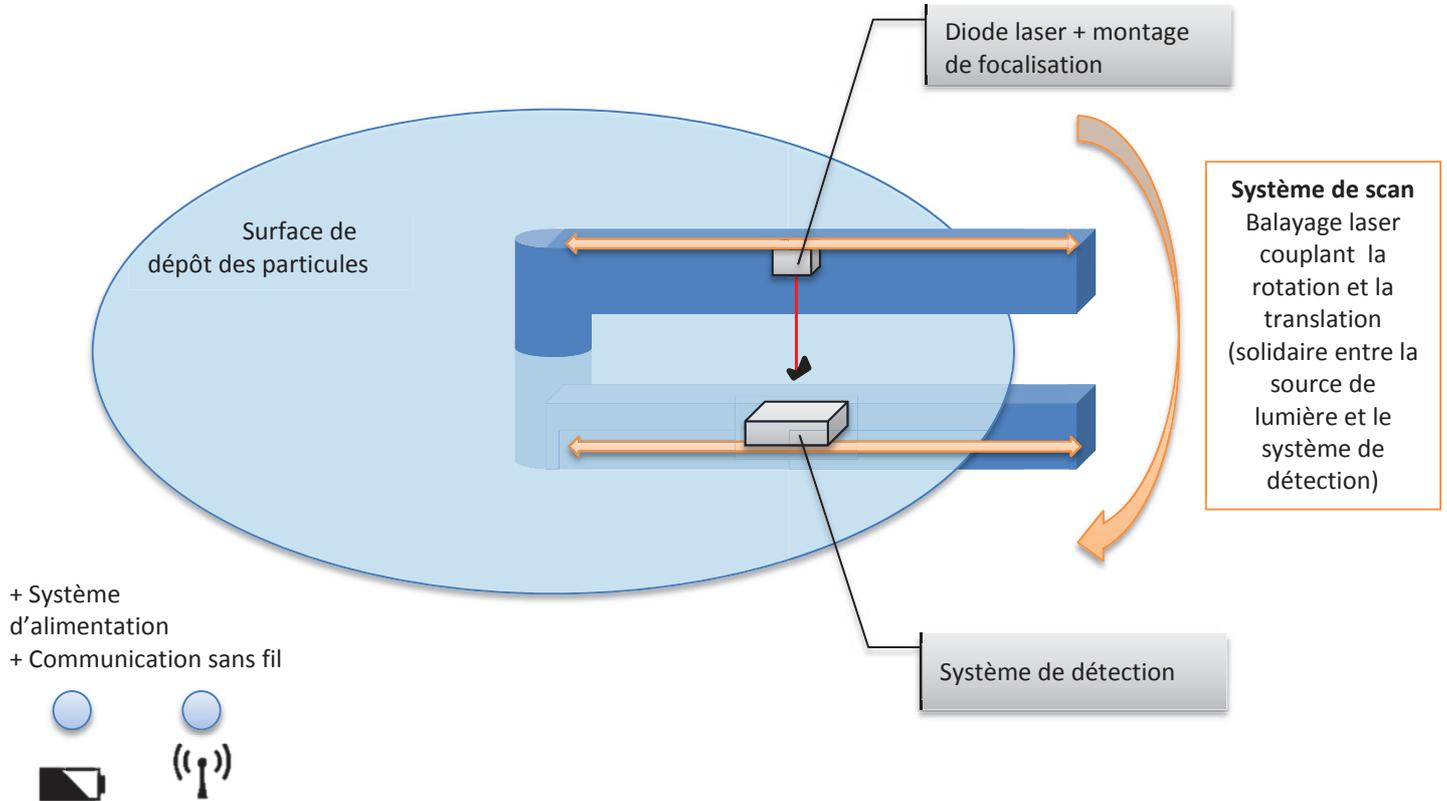


Figure 95 : Schéma d'une architecture envisageable pour le capteur

L'intérêt majeur de ce type de montage est le couplage d'une rotation et d'une translation dans le système de scan. Ce type de couplage est retrouvé dans les systèmes de lecteur CD. Le temps de scan de la surface est diminué. Uniquement la surface obstruée par la pince n'est pas exposée à l'environnement à contrôler. La pince effectue un mouvement de rotation tandis que les deux systèmes effectuent un mouvement de translation le long de la pince, tout en étant solidaires pour conserver un parfait alignement du faisceau et du photodétecteur. Le choix de la rotation de la pince et non de la surface a été fait afin de limiter le risque de mise en mouvement des particules déposées lors de la rotation du disque de verre. Cependant, étant donnée la faible distance entre la pince et le disque, il est possible que des flux turbulents se créent lors de la rotation de la pince. Ces flux turbulents sont susceptibles de déplacer les particules sur la surface. Afin de limiter ce phénomène, une étude complémentaire devra être réalisée afin de définir la vitesse de rotation maximale admise. L'ensemble du système de scan est contrôlé avec des mouvements au micromètre, et sa position est enregistrée afin de pouvoir tracer une cartographie en temps-réel de la présence des particules sur la surface. Ce système a fait l'objet d'un dépôt de demande de brevet.

### V.3.2.3. Elargissement des fonctionnalités du capteur

Deux fonctionnalités seraient intéressantes dans le cadre de l'analyse des contaminants se déposant sur les surfaces. La première fonctionnalité est la reconnaissance de forme. Il s'agirait de pouvoir identifier automatiquement les formes des particules et les classer ainsi en différentes

catégories. Nous pourrions par exemple imaginer que le capteur soit capable de discriminer les fibres qui ont une forme allongée de particules métalliques qui ont une forme d'avantage sphérique. En réalité, cette fonctionnalité découle assez simplement de l'implémentation d'un balayage de la surface sur deux-dimensions. La localisation des particules sur une cartographie permettrait de fournir une image reconstituée de la surface. Des logiciels d'analyse d'images de particules existent actuellement sur le marché. Une fois les données transmises, un tel logiciel permettrait de fournir les facteurs de forme des particules.

La seconde fonctionnalité est la discrimination des particules en fonction de leur matériau. Pour cela, une étude approfondie des particules se déposant couramment serait nécessaire afin de constituer une base de données. Cette base de données devrait fournir une valeur d'atténuation du signal lumineux en fonction du matériau de la particule. Cette solution permettrait de discriminer les particules ayant un facteur d'obscurcissement très différent. Une autre solution est de proposer le balayage non plus par une seule source lumineuse mais par deux sources lumineuses de longueur d'onde différentes. Ainsi, dans sa thèse, J.P. Black développe un capteur MEMS couplé à une discrimination optique des particules (48). L'application est la mesure des particules carbonées émises par les moteurs automobiles. L'utilisation d'une longueur d'onde dans le visible et d'une longueur d'onde dans l'infrarouge permet de discriminer les particules sombres des autres particules (il se place dans ce cas-là dans une mesure par réflexion optique).

#### **V.3.2.4. Elargissement de l'étendue granulométrique**

Nous avons vu au cours de l'état de l'art qu'il existait actuellement des recherches pour détecter des nanoparticules (Tableau 9). Au cours de la partie III.4.2.1, nous avons défini que, dans le cadre d'une mesure de particules de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre, nous nous plaçons dans le cadre de la théorie de Rayleigh, à la frontière avec la théorie de Mie. Dans les applications par détection optique, aborder la problématique des particules submicroniques impose de se placer dans le cadre de la théorie de Mie. Cette théorie concerne la diffusion de la lumière pour des particules dont la dimension est inférieure à la longueur d'onde du faisceau incident. Notre capteur étant conçu avec une source lumineuse de longueur d'onde visible, les particules nanométriques sont de dimensions inférieures à la longueur d'onde. La présence d'une forte « pollution » lumineuse liée à une forte diffusion par les particules submicroniques devra donc être prise en considération dans le cadre d'un élargissement de la limite basse de détection. En outre, afin de pouvoir détecter des nanoparticules, le faisceau lumineux devra être plus focalisé ce qui imposera des recherches supplémentaires pour la définition du système optique.

Il est également pertinent de se demander quelle serait la conséquence de la présence d'une particule de taille supérieure à celles des particules attendues. En effet, rappelons que dans l'environnement des salles propres, il est normalement peu probable qu'une particule supérieure à 20  $\mu\text{m}$  soit présente. Néanmoins, le risque zéro n'existant pas, la perturbation par des particules de taille très supérieure doit être anticipée. Le risque majeur est une saturation excessivement rapide de la surface de dépôt.

## V.4. Conclusion du chapitre V

Le chapitre V avait pour objectif de proposer une architecture complète du capteur, basée sur le système optique défini au cours du chapitre IV. L'architecture imaginée respecte les exigences du cahier des charges établi lors du chapitre III. Rappelons que le principal objectif de ces recherches était de proposer un principe innovant afin de mesurer en continu le risque de sédimentation des particules au sein des salles propres où sont intégrés les satellites. Vis-à-vis de la veille technologique réalisée au cours du chapitre II, le premier point dur était d'atteindre une limite inférieure de détection de 1  $\mu\text{m}$ . Le capteur proposé par ce travail de thèse est basé sur un système de balayage de la surface témoin exposée aux particules permettant de focaliser un signal monochromatique provenant d'une source laser. Le second point dur était d'intégrer ce système de mesure dans une architecture compacte.

L'intérêt du chapitre V réside réellement dans les réflexions qui y sont menées afin de concilier les différents challenges imposés par le cahier des charges. De plus, il propose deux architectures du capteur qui intègrent toutes les contraintes techniques. Enfin, des perspectives sont présentées telles que l'élargissement des fonctionnalités et de l'étendue granulométrique du capteur.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude conduite dans cette thèse avait pour objectif le développement d'un nouveau type de capteur répondant aux exigences de mesure de la contamination particulaire surfacique. Il s'agissait de proposer une solution innovante afin de concevoir un réseau de capteurs intégrés, autonomes et sans-fil pour détecter en temps-réel le dépôt des particules dans les salles propres. Pour cela, le travail présenté dans ce document a été axé autour de la définition du besoin et de l'établissement des limites technologiques actuelles afin de proposer un développement en accord avec le cahier des charges établi.

Le chapitre I visait à restituer un ensemble de connaissances élémentaires sur la contamination particulaire dans l'environnement spécifique des salles propres. Les notions de transport et de dépôt des particules ont été abordées. Le chapitre I a également présenté l'ensemble des conséquences de la contamination des surfaces selon leur fonctionnalité, ainsi que les contraintes fortes et spécifiques au milieu orbital. Outre la non-accessibilité du satellite dès son lancement, de nombreux effets tels que les forts écarts en température, le vide, ou les rayonnements, viennent complexifier d'avantage les phénomènes pouvant induire une remise en suspension de particules embarquées et une contamination particulaire en orbite. Une meilleure compréhension de ces phénomènes et le contrôle du taux de contamination surfacique dès les étapes de fabrication, d'assemblage et d'intégration des satellites et de leurs instruments s'avèrent indispensables. Une telle étude théorique des phénomènes de dépôt de particules et de leurs conséquences sur les équipements spatiaux n'avait encore jamais été réalisée.

Le chapitre II a établi un état de l'art des techniques actuellement disponibles dans le domaine de la métrologie de la contamination particulaire en salle propre. Dans un premier temps, les moyens couramment utilisés ont été présentés : il s'agit notamment des compteurs optiques de particules qui mesurent le taux de contamination volumique, *i.e.* la quantité de particules en suspension dans l'air de la salle. Néanmoins, au cours du développement de ce chapitre, nous avons démontré l'importance de discriminer la contamination des surfaces de la contamination de l'air grâce à des mesures comparatives dans des conditions réelles d'intégration des satellites. Les méthodes de caractérisation des dépôts particuliers ont été présentées. Si ces techniques sont très intéressantes vis-à-vis de la quantité et de la diversité des informations qu'elles apportent sur les particules sédimentées, elles sont néanmoins limitées pour effectuer une surveillance des salles propres. En effet, nous recherchons le moyen de réaliser une mesure du taux de contamination particulaire surfacique en temps-réel et à proximité des zones critiques. Dans cet objectif, des

instrumentations ont été récemment développées. La fin du chapitre II propose une analyse et une comparaison de ces systèmes.

Le chapitre III a défini les bases du développement d'un capteur en temps-réel de la contamination particulaire surfacique. L'étude des contraintes de mesure liées au milieu spécifique des salles propres et des exigences de mesure fixées entre autres par la norme ISO 14644-9 nous a permis d'établir un cahier des charges. En s'appuyant sur ces spécifications et sur une étude des modes de détection envisageable, un principe de mesure a été choisi. Ainsi, le capteur se base sur un principe de détection optique. Différentes possibilités de développement ont été envisagées et confrontées au cahier des charges, nous permettant ainsi d'effectuer des choix technologiques. Nous avons opté pour un capteur basé sur la détection de la lumière transmise à travers une surface transparente dédiée à la collecte des particules. Cette détection est couplée à une source de lumière focalisée et à un système de balayage.

Le chapitre IV portait sur le développement de la cellule de mesure, en se basant sur les choix technologiques réalisés au cours du chapitre III. Une solution « idéale » a été simulée avec trois lentilles asphériques sur mesure. Le système proposé présente des caractéristiques très proches du cahier des charges au niveau de l'optique de focalisation et des besoins opto-mécaniques. La mise en développement d'un tel système permettrait de définir une architecture en phase avec les exigences de notre application. En outre, les simulations numériques réalisées avec des composants optiques disponibles dans le commerce ont démontré la possibilité d'obtenir, avec deux lentilles asphériques, des caractéristiques proches des objectifs afin d'établir les premiers tests. Le développement d'un banc de test et la mise en œuvre de la cellule de mesure débutés à la fin de la thèse ne sont pas présentés dans ce mémoire, n'ayant pu aboutir à des résultats. La solution proposée fait cependant l'objet d'une demande de dépôt de brevet. Les bases étant posées, un développement à caractère industriel permettrait d'aboutir rapidement à un prototype démonstrateur.

Afin d'ouvrir des perspectives à ce travail initiant la réflexion autour de la problématique de la contamination particulaire surfacique, le chapitre V décrit le principe de mesure. Le travail d'analyse des séquences de mesure a permis de valider le type de détection choisi vis-à-vis du cahier des charges. Enfin, de nombreuses perspectives de ce travail ont été présentées. Deux stratégies de conception ont été abordées, le choix de l'une ou l'autre reviendra à l'industriel qui développera ce capteur. Par ailleurs, ces propositions présentent l'avantage de permettre un élargissement des fonctionnalités du capteur. La perspective de connaître le facteur de forme des particules ou d'augmenter l'étendue granulométrique du capteur représenterait un intérêt certain.

Au final, le travail de recherche mené au cours de ce chapitre pourra servir à un développement industriel de la solution. Les applications seront adaptées au domaine spécifique des salles d'intégration satellites mais pourront également intégrer les besoins d'autres types de salles à environnement contrôlé. L'originalité de ce mémoire de thèse réside dans l'établissement des fondamentaux dans le domaine du contrôle de la contamination particulaire surfacique, travail ayant fait l'objet d'une publication. Ce domaine, encore méconnu et ayant pourtant des conséquences de plus en plus important, fait aujourd'hui l'objet d'un travail de synthèse en balayant les aspects théoriques de la contamination particulaire et ses interactions avec l'environnement. Enfin, le lien est créé entre la compréhension théorique des phénomènes de contamination des surfaces et le besoin concret d'être en capacité de les mesurer en temps-réel. Ce besoin souffrait de n'avoir pas été étudié en profondeur, et le travail de thèse a permis de combler ce manque en proposant un cahier des charges détaillé et une étude des solutions de détection envisageables. La fin de ce travail a permis de mettre en lumière la solution de détection la plus pertinente : la détection optique par transmission. Une étude par simulation poussée du système optique pouvant être développé ainsi qu'un travail architectural à l'échelle du système ont engendré le dépôt d'un brevet et une publication.



## Liste des publications

Menant N., Nouet P., Faye D., Lafontan X., Lellouchi D., *Monitoring of particle deposition in cleanrooms: state-of-the-art*, Symposium DTIP 2014, Cannes, France, avril 2014.

Menant N., Faye D., Nouet P., Lafontan X., Lellouchi D., Latorre L., Mailly F., *Monitoring of particle deposition in cleanrooms: state-of-the-art and new development for space applications*, Poster, 9th ESA Workshop on micro and nano technologies, Lausanne, Suisse, juin 2014.

Menant N., Faye D., Bourcier F., Nouet P., Latorre L., Lafontan X., Lellouchi D., *New development for particle deposition monitoring during space instrument integration in cleanroom*, ISMSE, Pau, France, avril 2015.

Menant N., Faye D., Bourcier F., *Microcapteur pour salle propre*, demande de Brevet, INPI, n°1558699, déposée le 16 Septembre 2015.



# Bibliographie

1. **Renoux, A. et Boulaud, D.** *Les aérosols, physique et métrologie*. s.l. : Tec & Doc Lavoisier, 1998. p. 301.
2. **Allen, T.** *Particle Size Measurement*. Londres : Chapman and Hall, 1975.
3. NF EN ISO 14644-1 Salles propres et environnements maîtrisés apparentés - Partie 1: Classification de la propreté de l'air. s.l. : ISO, Juillet 1999.
4. NF EN ISO 14644-9 Salles propres et environnements maîtrisés apparentés - Partie 9: Classification de la propreté des surfaces par la concentration de particules. s.l. : ISO, Sept. 2012.
5. ECSS-Q-ST-70-01C Space product assurance : cleanliness and contamination control. s.l. : ESA, Nov. 2008.
6. ECSS-Q-ST-70-50C Space product assurance : particles contamination monitoring for spacecraft systems and cleanrooms. s.l. : ESA, Oct. 2011.
7. **Kohli, R. et Mittal, K. L.** *Developments in surface contamination and cleaning - Volume two : particle deposition, control and removal*. s.l. : Elsevier, 2010. ISBN-13: 978-1-4377-7830-4.
8. **Lai Alvin, C. K. et Nazaroff, W. W.** Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *J. Aerosol Sci.* 2000, Vol. 31, 4, pp. 463-476.
9. **Peillon, S. et Gensdarmes, F.** *Physique des aérosols, mécanismes de transport, de dépôt et de remise en suspension*. s.l. : Revue bibliographique de l'IRSN, Oct. 2012.
10. **Hinds, W. C.** *Aerosol technology : properties, behavior and measurement of airborne particles*, Second Edition. *A Wiley-interscience publication*. 1998.
11. **Preining, O.** Photophoresis. *Aerosol Science*. Davies CN, 1966, pp. 111-135.
12. **Van de Vate, J. F.** The thickness of the stagnant air layer in aerosol contaminants and the aerodynamic diameter of aggregate of small spheres. *Colloid Interf Sci.* 1972, 41.
13. **Corner, J. et Pendlebury, E. D.** The coagulation and deposition on a stirred aerosol. *Proc Phys Soc.* 1951, Vol. 364, pp. 645-654.
14. **Leighton, D. et Acrivos, A.** The lift of small sphere touching a plane in the presence of a simple shear flow. *J. appl. Math. Phys.* 1985, Vol. 36, pp. 174-178.
15. **Wang, H-C.** Effects of inceptive motion on particle detachment from surfaces. *Aerosol Science and Technology*. 1990, Vol. 13, 3, pp. 386-393.
16. **Reeks, M. W. et Hall, D.** Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*. 2001, Vol. 32, pp. 1-31.
17. **Tippayawong, N. et Preechawuttipong, I.** Analysis of microparticle resuspension in turbulent flows with horizontally vibrating surface. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011, Vol. 5, 7, pp. 356-363.
18. **Hidy, G. M. et Brock, J. R.** *The Dynamics of Aerocolloidal Systems*. s.l. : Pergamon Press, Oxford, 1970.
19. **Corn, M. et Stein, F.** Mechanism of Dust Redisperison. *Proceedings of Int. Sym. on Surface Contamination. Gathinburg, Tennessee*. Pergamon press, New York, 1964.
20. **Alloul-Marmor, L.** *Thèse. Réentraînement par écoulement d'air d'une contamination particulaire déposée sur une surface, application au cas d'un "tas" de poudre*. s.l. : Faculté des Sciences de Créteil, UFR de Sciences et Technologies, Univ. Paris XII - Val de Marne, 2002.
21. **Mana, Z.** *Thèse. Etude de la remise en suspension de particules due à la marche d'un opérateur*. s.l. : Laboratoire de Physique et métrologie des aérosols. Univ. Paris-Sud., 2014.
22. **Johnson, K. L., Kendall, K. et Roberts, A. D.** Surface energy and contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society*. 1971, Vol. 324, pp. 301-313.
23. **Biasi, L., et al., et al.** Use of a simple model for interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows. 2001, Vol. 32, pp. 1175-1200.

24. **Nerisson, P.** Thèse. *Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé*. Doctorat de l'Université de Toulouse, Institut de mécanique des fluides de Toulouse : s.n., 2009.
25. **Crump, J. G. et Seinfeld, J. H.** Turbulent deposition and gravitational sedimentation of an aerosol in a vessel of arbitrary shape. *J. Aerosol Sci.* 1981, Vol. 12, 405.
26. **Pandian, M. D. et Friedlander, S. K.** Particle deposition to smooth and rough walls of stirred chamber : mechanisms and engineering correlations. *Physicochem. Hydrodynam.* 1988, Vol. 10, 639.
27. **Corn, M.** The adhesion of solid particles to solids surfaces. *Journal of the Air Pollution Control Association.* 1961, Vol. 11, 12, pp. 566-567.
28. **Zimon, A. D.** *Adhesion of dust and powder (Second Edition)*. New York : Consultants bureau, 1982.
29. **Okuyama, K., et al., et al.** Particle loss of aerosols with particle diameters between 6 and 2000 nm in stirred tank. *Journal of Colloid and Interface Science.* March 1986, Vol. 110, 1, pp. 214-223.
30. **Wang, S.** Effects of surface roughness on the indoor particle deposition rate constant. *Mechanical and Aerospace Engineering - Dissertations.* 2012.
31. **Byrne, M. A., et al., et al.** Stable tracer aerosol deposition measurements in a test chamber. *Journal of Aerosol Science.* 1995, Vol. 26, 4, pp. 645-653.
32. **Thatcher, T. L. et Nazaroff, W. W.** Particle deposition from natural convection enclosure flow onto smooth surfaces. *Aerosol Sci. Technol.* 1995, Vol. 25, 359.
33. **Wu, Y. L., Davidson, C. I. et Russel, A. G.** Controlled wind tunnel experiments for particle bounceoff and resuspension. *Aerosol Sci. Technol.* 1992, Vol. 17, pp. 245-262.
34. **Tribble, A. C., et al., et al.** *Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community*. Rockwell International Corporation. Downey, CA : s.n., May 1996. NASA Contractor Report. 4740.
35. **Hamberg, O. et Tomlinson, F. D.** Sensitivity of thermal surface solar absorptance of particulate contamination. *6th Thermophysics Conference.* April 1971.
36. **Raab, J. H.** *Particulate contamination effects on solar cell performance*. January 1987. Final Report for F04701-83-C-0045. MCR-86-2015, Rev A.
37. **Maeng J-Y., Park D., Kim Y-H., Hwang J. and Kim Y-J.** Micromachined cascade virtual impactor for aerodynamic size classification of airborne particulate. [éd.] IEEE. *Micro-Electro Mechanical Systems.* IEEE 20th International Conference on MEMS, 2007, pp. 619-622.
38. **Santiago, D.J. Laser and J. G.** A review of micropumps. *Journal of micromechanics and microengineering.* 2004, Vol. 14, R35–R64.
39. NF-EN 13284-2 Détermination de faibles concentrations en masse de poussières - systèmes automatiques de mesure. s.l. : ISO, 2004.
40. NF X44-052 Détermination des fortes concentrations massiques de poussières - méthode gravimétrique manuelle. 2002 : ISO.
41. **Daley, D. A. et Lundgren, P. S.** The performance of piezoelectric crystal used to determine aerosol mass concentration. *J. Amer. Ind. Hyg. Ass.* 1975, Vol. 36, 518-532.
42. **Ward, D. A. et Buttry, M. D.** Interfacial mass detection with piezoelectric transducers. *Science.* 1990, Vol. 249, 1000-1007.
43. **Patashnick, G. et Rupprecht, H.** *Personal dust exposure monitor based on the tapered element oscillating microbalance*. s.l. : BuMines, 1983. OFR 56-64, NTIS PB, 84-173749.
44. **Lieberman, A.** Evolution of optical airborne particle counters in the U.S.A. *Aerosols : formation and reactivity, proceedings of the 2nd International Aerosol Conference.* 1986, 22-26 septembre, pp. 590-593.

45. **Kang, J. S., et al., et al.** Real-time detection of an airborne microorganism using inertial impaction and mini fluorescent microscopy. *California Institute Technology Lab Chip*. 2014, Vol. 14, 244.
46. **Gundel, L. A., et al., et al.** *Apparatus for particulate matter analysis*. US Patent Application 20040259267 US, 23 December 2004.
47. **White, R. M. et Apte, M. G.** *Development of a low-cost particulate matter monitor*. California Air Resources Board : s.n., 2003.
48. **Black, J. P.** *MEMS based system for particle exposure assessment using thin film bulk acoustic wave resonators and IR / UV optical discrimination*. s.l. : University of Berkeley, 2006.
49. **Paprotny I., Doering F.L., Solomon Paul A.** Microfabricated Air-microfluidic sensor for personal monitoring of airborne particulate matter : design, fabrication and experimental results. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013.
50. **Hajjam, A., Wilson, J. C. et Pourkamali, S.** Individual airborne particle mass measurement using high-frequency micromechanical resonators. *IEEE Sensors Journal*. Nov. 2011, Vol. 11, 11.
51. *MEMS based integrated particle detection chip for real time environmental monitoring*. **Lim, H. H., et al., et al.** Istanbul : Micro Electro Mechanical Systems, 2006, Vol. 19th IEEE International Conference on MEMS.
52. **Chua, B. et Tien, N.C.** *Corona MEMS for wide study area air particulate monitoring*. Berkeley, CA : Industrial Advisory Board Semi-annual Research report , Berkeley Sensor & Actuator Center, University of California at Berkeley, Fall 2005.
53. NF X43-017. *Mesure de la concentration des matières en suspension dans l'air ambiant - Méthode par absorption de rayons bêta*. s.l. : ISO, Juillet 1984.
54. **Jaklevic, J. M., et al., et al.** A beta gauge method applied to aerosol samples. *Environ. Sci. Tech.* 1981, Vol. 15, 680.
55. IEST-STD-CC1246D Contamination Control Division Standard 1246D : Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program. s.l. : Institute of Environmental Sciences and Technology, 2002.
56. **Pecault I., Gensdarmes F., Basso G., Sommer F.** Performance assessment of probes dedicated to the monitoring of surface particle contamination. *Particle and Particle Systems Characterization*. 2012, Vol. 29, 3, pp. 156-166.
57. **Singh, V. R., Hedge, G. et Asundi, A.** Particle field imaging using digital in-line holography. *Current Science*. 2009, Vol. 96, 3.
58. **Mehdizadeh, E., et al., et al.** Aerosol impactor with embedded MEMS resonant mass balance for real-time particulate mass concentration monitoring. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers & Eurosensors XXVII*. IEEE, 2013, pp. 661-664.
59. **Boutier, A.** *Métrologie laser pour la mécanique des fluides : Granulométrie et techniques spectroscopiques*. s.l. : Lavoisier, 2012.
60. **Bohren, C. F. et Huffman, D. R.** *Absorption and scattering of light by small particles*. New York : John Wiley & sons , 1988.
61. **Van Der Gucht, Bernard.** Les compteurs optiques de particules aéroportées. *Salles propres*. Bimestriel ISSN 1291-6978, 2010, 70.
62. **Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B. et Yoder, P. R.** *Optical System Design (Second Edition)*. s.l. : Spie Press, 2008.
63. **Silverman, E. M.** *Space environmental effects on spacecraft : LEO materials selection guide*. Aug. 1995.
64. **Champion, K. S. W., Cole, A. E. et Kantor, A. J.** Standard and reference atmosphères. *Handbook of Geophysics and Space Environment*. 1985, Vol. 14, 1.

65. **Banks, B. A.** Atomic Oxygen. *LDEF MAterial DATA Analysis Workshop, NASA CP.* 1990, p. 191.
66. **Alby, F., Lansard, E. et Michal, T.** Collision of CERISE with space debris. *Second European Conference on Space Debris.* 1997, p. 589.
67. **Alby, P. et Moskwa, F.** Overview on space debris activites in France. *Advances in Space Research.* Jan. 1999, Vol. 23, 1, p. 261.

## Liste des figures

Figure 1 : La première salle à flux laminaire construite par Sandia corporation ( <i>Source : www.ultraproprete.com</i> ) .....	14
Figure 2 : Comparaison entre un flux laminaire (a) et un flux turbulent (b) .....	15
Figure 3 : Illustration de la limite de visibilité de l'œil humain .....	18
Figure 4 : Échelle des dimensions particulières ( <i>Source : www.ultraproprete.com</i> ) .....	18
Figure 5 : Exemple de calcul des diamètres équivalents d'une particule quelconque .....	20
Figure 6 : Régime d'écoulement lorsqu'un flux d'air rencontre une particule (2).....	22
Figure 7 : Évolution de la vitesse de sédimentation des particules en fonction de leur taille pour chaque mécanisme de transport de la particule.....	31
Figure 8 : Évolution du coefficient de dépôt en fonction du diamètre de la particule pour une enceinte cubique de $1 \text{ m}^3$ (12) .....	32
Figure 9 : Forces exercées sur une particule en contact avec une surface et soumise à un écoulement d'air ( $F_D$ étant la force de traînée, $F_L$ la force de portance et $F_G$ la force de gravité) (Illustration par interprétation de (13)) .....	34
Figure 10 : Détachement d'une particule d'une surface. $F_{ad}$ représente la force d'adhérence de la particule à la surface, $F_{ext}$ représente la force extérieure appliquée à la particule .....	36
Figure 11 : Le modèle Rock'n Roll d'après Reeks and Hall décrit le mouvement de basculement/roulement d'une particule sphérique en contact avec deux points d'aspérité P et Q de la surface : .....	37
Figure 12 : Définitions de la couche limite de concentration et de la couche limite de quantité de mouvement (ou couche limite aérodynamique) (18).....	38
Figure 13 : Distributions log-normales des forces d'adhésion pour des particules d'alumine sur une surface époxy (21).....	40
Figure 14 : Évolution de la constante k du taux de dépôt des particules en fonction de leur taille et du type de surface; $S_z$ représente le coefficient de rugosité de la surface (30) .....	44
Figure 15 : Les différentes contraintes de l'environnement spatial (CNES©).....	48

Figure 16 Mesure cumulative du nombre de particules prélevées par des compteurs volumique particulaire pendant un mois, répartition en fonction du diamètre des particules (de 0,3 à 5 $\mu\text{m}$ ).....	49
Figure 17 Analyse EDX de particules prélevées sur tissu fibreux montrant la présence de chlorure de sodium dans les salles d'intégration .....	50
Figure 18 Image MEB d'une particule métallique prélevée en salle d'intégration de satellites .....	50
Figure 19 : Effet d'une particule sur une surface soumise à un rayonnement .....	52
Figure 20 : Perte de puissance d'un panneau solaire due à l'obscurcissement par des particules sédimentées.....	53
Figure 21 : Schéma de principe d'un étage d'impaction.....	61
Figure 22 : Schéma du micro-impacteur virtuel développé par Maeng (37). Seules les plus petites particules contenues dans le flux mineur (10%) ne sont pas évacuées.....	62
Figure 23 : Mesure de l'efficacité de collection de l'impacteur virtuel en cascade développé par Maeng (37). Les trois diamètres de coupure sont 135 nm, 1,9 $\mu\text{m}$ et 4,8 $\mu\text{m}$ .....	63
Figure 24 : Schéma d'une microbalance à élément oscillant de type TEOM .....	66
Figure 25 : Action d'une particule contenue dans un aérosol sur une onde lumineuse .....	67
Figure 26 : Fonctionnement d'une sonde isocinétique. 1 : l'écoulement est non laminaire, peu de particules sont captées; 2 : vers la cavité sensible du compteur de particules; 3 : l'écoulement est laminaire, certaines particules ne sont pas captées; 4 : sonde isocinétique .....	69
Figure 27 : Schéma de principe d'un capteur optique. Aujourd'hui les capteurs optiques utilisent quasi-exclusivement des diodes laser comme source lumineuse. L'intensité du signal est proportionnelle à la taille d'une particule (et fonction du matériau de la particule).....	70
Figure 28 : Schéma de la puce de détection de microbes aéroportés; b) Photo du mini-microscope par fluorescence; c) Surface d'impaction en PDMS ; d) micro canal avec trois étages d'impaction (toutes les barres d'échelles représentent 1 cm) (50).....	72
Figure 29 : Images de la fluorescence émise par les particules à différents temps d'échantillonnage et étages d'impaction. Le schéma indique le point de vue du mini-microscope. Les photos a), b) et c) représentent le second étage d'impaction avec des temps d'échantillonnage respectifs de 20 s, 40 s et 60s. ; Les photos d), e) et f) représentent respectivement le premier, le second et le troisième étage d'impaction pour un temps d'échantillonnage de 30 s; la photo g) représente une image des	

particules PSL de diamètre 1 µm dans la seconde zone d'impaction pour un temps d'échantillonnage de 30s. (Toutes les barres d'échelles représentent 100 µm).....	73
Figure 30 : Procédé schématique de la charge et de la mesure des particules par effet corona .....	75
Figure 31 : A gauche : photographie du prototype du microcapteur de particules réalisé par Paprotny et al. À droite : réponse expérimentale du capteur à une exposition à des particules provenant d'un moteur diesel.....	75
Figure 32 : A gauche : image MEB de la pointe de silicone utilisée pour la décharge corona ; à droite : résultat expérimental montrant la variation de courant en fonction de la concentration particulaire .....	76
Figure 33 : Démarche expérimentale pour la caractérisation de contaminants particuliers .....	82
Figure 34 : Particule complexe fluorée provenant d'un joint défectueux. À gauche : image MEB ; à droite : analyse EDX de la composition chimique (CNES©).....	82
Figure 35 : (A gauche) Schéma du principe de mesure des particules sédimentées par détachement à l'aide d'une sonde de surface ; (à droite) Photo de la base de la sonde de surface (56).....	85
Figure 36 : Schéma d'un témoin PFO, breveté par Ingenious Systems B.V. 1 : Surface en verre non réfléchissant. 2 : Surface de mesure (appelée zone sensible), égale à la surface d'un cercle de 15 mm de diamètre.....	86
Figure 37 : Comparaison de deux photos de témoins particulaire prises avec un PFO-photomètre ...	87
Figure 38 : Comparaison entre une mesure de la contamination particulaire volumique "globale" et la contamination particulaire volumique "locale" dans une salle d'intégration du CNES .....	90
Figure 39 : Mesures des obscurcissements de quatre témoins réalisées avec un PFO-photomètre après exposition en salle AIT du CNES du 18 avril au 24 mai 2013.....	92
Figure 40 : Schéma du montage expérimental pour le système d'imagerie des particules par holographie digitale développé par Singh et al. (57) .....	94
Figure 41 : Images reconstruites numériquement par holographie digitale a) des particules sur la face avant de la surface de dépôt en verre; b) des particules sur la face arrière (57) .....	95
Figure 42 : Image de synthèse de l'APMON développé par Technology of Sense .....	96
Figure 43 : Schéma du principe de fonctionnement de l'APMON.....	97

Figure 44 : Photos et schéma de l'instrumentation développée par SAC Netherlands : le PDM (Particle Deposition Monitoring); les photos de droite représentent la surface de dépôt en verre.....	98
Figure 45 : a) Particules cartographiées sur la surface de mesure; b) Particules détournées pour la mesure de la taille et de l'air.....	98
Figure 46 : Le Cleapart-100, commercialisé par Winlight System. La surface de dépôt peut être placée horizontalement ou verticalement.....	100
Figure 47 : Images MEB de capteur MEMS développé par Mehdizadeh, E. du Dept. of Electr. & Comput. Eng., de l'Université de Denver. Des particules de 130 nm à 1 µm sont déposées sur les surfaces (65).....	116
Figure 48 : Capteur CCD (provenant d'une caméra Sony).....	117
Figure 49 : Spot laser focalisé sur la surface d'un CD.....	119
Figure 50 : Photos prises avec une binoculaire. A gauche : lentille extérieure du système de focalisation, placée à quelques millimètres de la surface du CD ; à droite : la diode laser qui émet le faisceau lumineux .....	119
Figure 51 : Illustration du phénomène de diffraction par une fente dont la largeur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.....	124
Figure 52 : Evolution de l'intensité de la lumière diffusée par les particules en fonction de l'angle formé par la lumière incidente et l'angle de détection du capteur – pour différents diamètres de particules.....	125
Figure 53 : Distribution gaussienne d'un faisceau laser (10) .....	127
Figure 54 : Dans le cas de la mesure de la lumière diffusée par une particule, les caractéristiques optiques de la surface de dépôt influent sur la position du détecteur .....	129
Figure 55 : Schéma d'un micro-miroir orientable développé et commercialisé par Hamamatsu Photonics.....	130
Figure 56 : Schéma de positionnement des différents éléments de la cellule de mesure par rapport à la surface de dépôt des particules. (a) Vision de l'intérieur de la cellule de mesure ; (b) le capteur est encapsulé.....	131
Figure 57 : Schéma optique d'une lentille convergente; l'axe optique est tracé en pointillés .....	137

Figure 58 : Illustration d'un défaut de focus : tous les rayons lumineux ne convergent pas en un point unique.....	138
Figure 59 : Illustration de l'effet de coma d'une lentille .....	140
Figure 60 : Comparaison entre une image distordue (à gauche) et une image corrigée (à droite) ....	140
Figure 61 : Schémas de lentilles sphériques présentant des géométries différentes.....	141
Figure 62 : Schéma d'une lentille asphérique biconvexe .....	142
Figure 63 : Ouverture numérique d'une fibre optique ; $\theta_A$ est le demi-angle d'ouverture.....	145
Figure 64 : Schéma paraxial permettant le calcul du grandissement du système.....	146
Figure 65 : Divergence d'un Faisceau Laser (62).....	147
Figure 66 : Tracé des trois premières fonctions de Bessel.....	149
Figure 67 : Simulations numériques avec deux lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	155
Figure 68 : Simulations numériques avec un doublet achromatique ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	156
Figure 69 : Simulations numériques avec trois lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	157
Figure 70 : Simulations numériques avec quatre lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	158
Figure 71 : Simulations numériques avec six lentilles simples ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	159
Figure 72 : Simulations numériques avec une lentille asphérique ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	161
Figure 73 : <i>Layout</i> des systèmes avec deux lentilles asphériques ; à gauche : système limité par la diffraction ayant une tâche d'Airy de 1.92 $\mu\text{m}$ , à droite : système non limité par la diffraction ayant une tâche d'Airy de l'ordre de 1 $\mu\text{m}$ .....	162

Figure 74 : <i>Spot diagram</i> des systèmes avec deux lentilles asphériques ; à gauche : système limité par la diffraction ayant une tâche d’Airy de 1.92 $\mu\text{m}$ , à droite : système non limité par la diffraction ayant une tâche d’Airy de l’ordre de 1 $\mu\text{m}$ .....	163
Figure 75 : Simulations numériques avec trois lentilles asphériques ; à gauche : schéma paraxial, à droite : <i>spot diagram</i> .....	164
Figure 76 : Schéma de la solution avec focalisation sur les particules .....	167
Figure 77 : Système sur étagère composé de deux lentilles asphériques.....	167
Figure 78 : <i>Spot diagram</i> montrant l’influence de la distance d1 avec un pas de 1 mm entre chaque configuration.....	168
Figure 79 : <i>Spot diagram</i> montrant l’influence de la distance d1 avec un pas de 0.3 mm entre chaque configuration.....	169
Figure 80 Schéma des 11 configurations simulées par modification des distances d1 et d2, à partir de la solution sur étagère .....	170
Figure 81 : <i>Spot Diagram</i> Multi-Configuration, modification de d1 et d2, pas 1 mm .....	170
Figure 82 : <i>Spot Diagram</i> Multi-Configuration, modification de d1 et d2, entre les configurations 5 et 6.....	171
Figure 83 : Full Field Spot Diagram Multi-Configuration, modification de d1 et d2 ; à gauche : configuration n°9, à droite : configuration sur étagère de départ .....	172
Figure 84 : Spot Diagram Multi-Configuration, modification de d1 et d2 configurations 6 et 7 de la figure 85.....	172
Figure 86 : <i>Spot Diagram</i> Multi-Configuration, influence du défocus sur la solution de référence sur étagère, en faisant varier la distance au plan focal avec un pas de 0,1 mm.....	174
Figure 85 : <i>Spot Diagram</i> Multi-Configuration, influence du défocus sur la solution de référence sur étagère, en faisant varier la distance au plan focal avec un pas de 10 $\mu\text{m}$ .....	174
Figure 87 : <i>Spot Diagram</i> Multi-Configuration, influence de la longueur d’onde sur la solution de référence sur étagère, pour des longueurs d’onde bleues, vertes et rouges .....	175
Figure 88 : Comparaison des <i>Full Field Spot Diagram</i> des configurations 6 et 10 .....	176
Figure 90 : Schéma du montage avec la lame de verre incluse dans le montage de focalisation .....	177

Figure 91 : Spot Multi-Configuration pour une configuration où la lame de verre est incluse dans le montage de focalisation, influence de l'épaisseur de la lame de verre variant de 1 mm à 0.1 mm par pas de 0.1 mm .....	178
Figure 91 : Séquence de mesure de la solution développée.....	184
Figure 92 : Schéma de principe de la solution développée.....	184
Figure 93 : Schéma de l'intérieur de l'enceinte contenant la cellule de mesure.....	189
Figure 95 : Représentation schématique du système 1. La cellule de mesure est contenue dans l'enceinte.....	190
Figure 95 : Schéma d'une architecture envisageable pour le capteur.....	191
Figure 96 : Layout Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction.	214
Figure 97 : Spot Diagram Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0,1 mm .....	215
Figure 98 : Full Field Spot Diagram configurations 5 et 7, influence du défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0 ,1 mm .....	216
Figure 99 : Spot Diagram Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0,01 mm .....	217
Figure 100 : Full Field Spot Diagram configurations 5 et 7, influence du défocus de la solution limitée par la diffraction, pas 0 ,01 mm .....	218

## Annexe A : Tableau comparatif des différents moyens de mesure de la contamination particulaire volumique et surfacique

Méthode de mesure		Contamination volumique							
		Mesure gravimétrique			COP	Tribo-électricité	Jauge bêta	MEMS	Mini-microscope
		I*	II*	III*					
Données	Masse	X				X	X	X	
	Nombre				X				X
	Taille				X				X
	Forme								
	Obscurcissement								
Résolution		10 µm			0,1 µm	0,1 mg/cm <sup>3</sup>	5 µg/cm <sup>2</sup>	2,5 µm	0,1 µm
Sensibilité			10 <sup>9</sup> Hz/g						
Encombrement		+			++	+	+	--	--
Temps-réel		Oui			Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Méthode de mesure		Contamination surfacique			
		PFO-photomètre	Holographie (APMON)	Analyse d'images (PDM)	Analyse de la lumière diffusée (CLEAPART-100)
Données	Masse				
	Nombre		X	X	X
	Taille		X	X	X
	Forme		X	X	
	Obscurcissement	X			
Résolution		1 µm	25 µm	10 µm	5 µm
Sensibilité					
Encombrement		-1	++	++	++
Temps-réel		Non	Oui	Oui	Oui

\* I : pesée de filtre ; II : cristaux de quartz ; III : microbalance à élément oscillant

(1) Non concerné car mesure passive

## Annexe B : Cahier de spécifications du capteur

Etendue granulométrique	1 à 20 $\mu\text{m}$
Résolution dimensionnelle	10 % de la taille mesurée
Concentration limite inférieure de détection	1 particule de 1 $\mu\text{m}$
Incertitude en concentration	$\pm 1$ particule
Fonctions	Mesure du nombre de particules Classification par taille Optionnel : mesure du facteur de forme des particules
Matériaux des particules	Tous
Durée d'une mesure	Inférieure à 1 minute
Temps entre deux mesures	Variable entre 10 min et 1 heure
Dimension de la surface de dépôt	1 à 2 $\text{cm}^2$
Dimensions du capteur	10 x 10 x 10 cm
Autonomie	Minimum 2 mois

### Exigences d'industrialisation :

Configuration multi-capteur modulaire

Possibilité de fabrication et test en série des capteurs

Coût

## Annexe C : Influence du défocus sur un système optique à deux lentilles asphériques limité par la diffraction

Nous allons étudier les mêmes variations de focus que celles présentées dans la partie IV.4.4.4, mais cette fois pour une solution limitée par la diffraction.

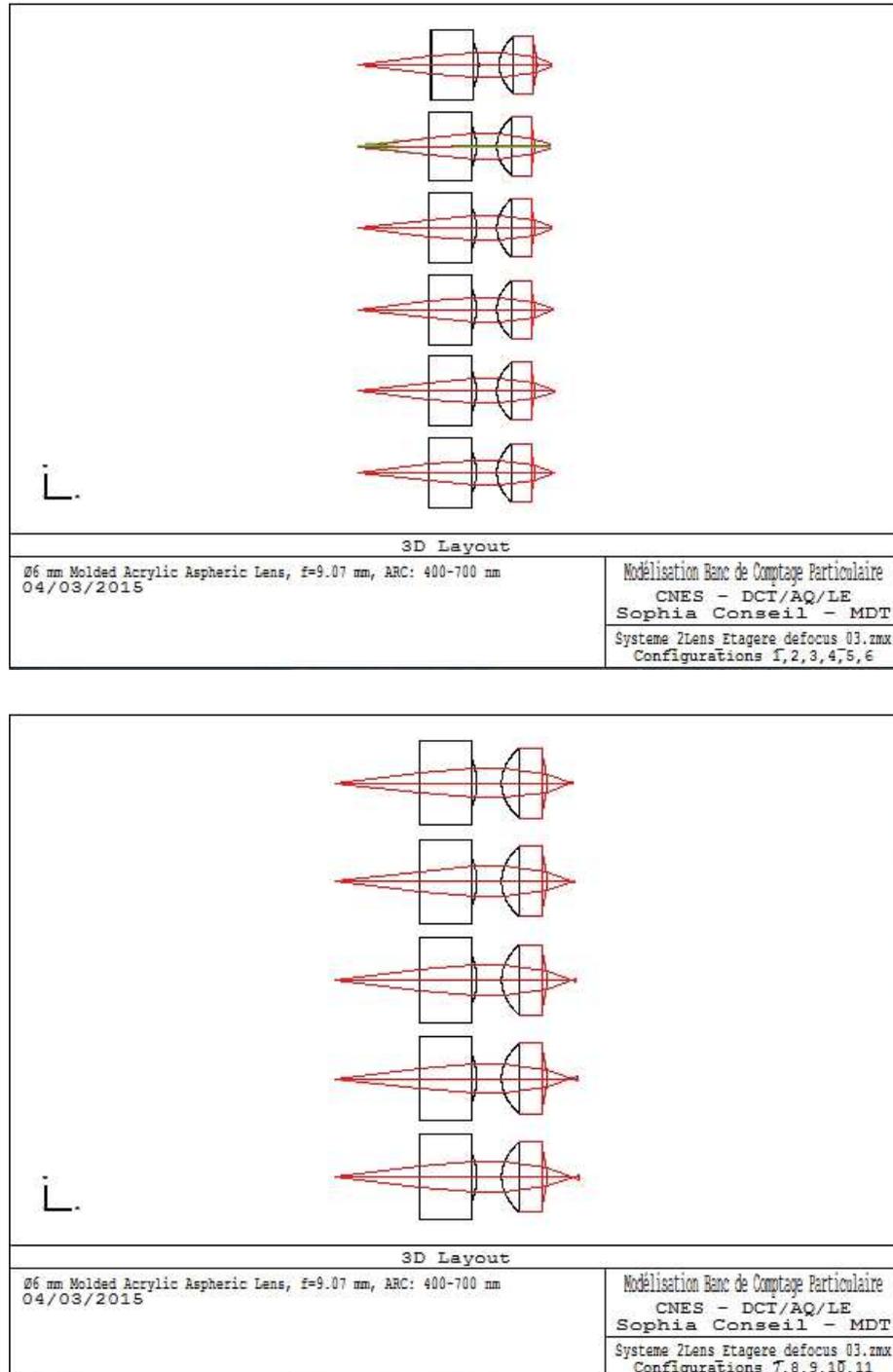


Figure 96 : Layout Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction

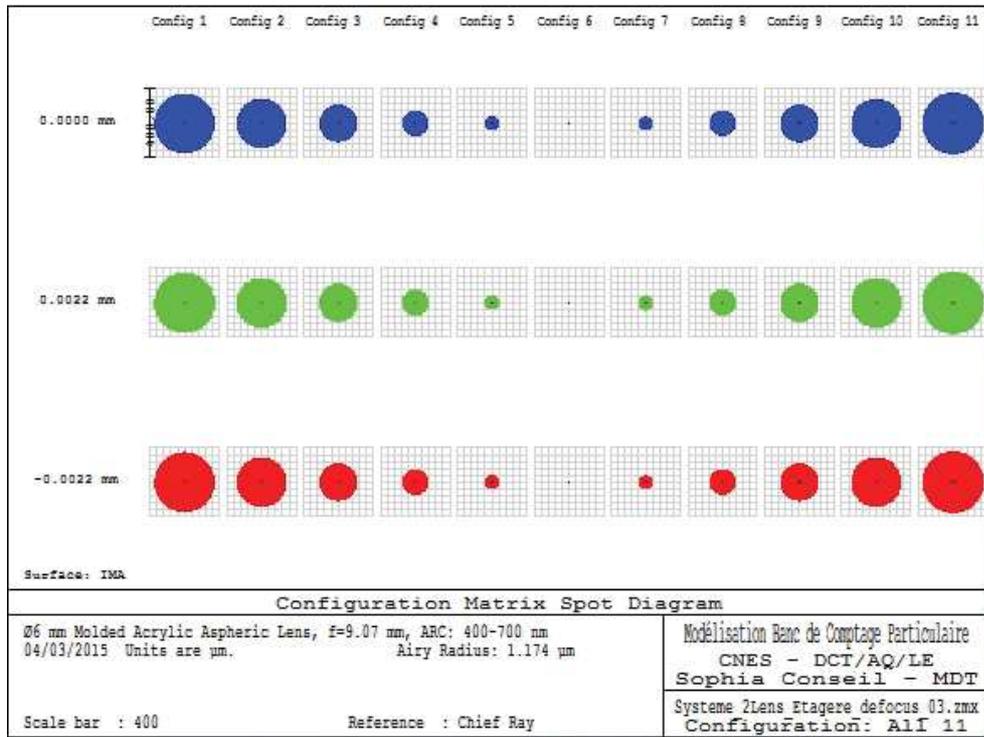
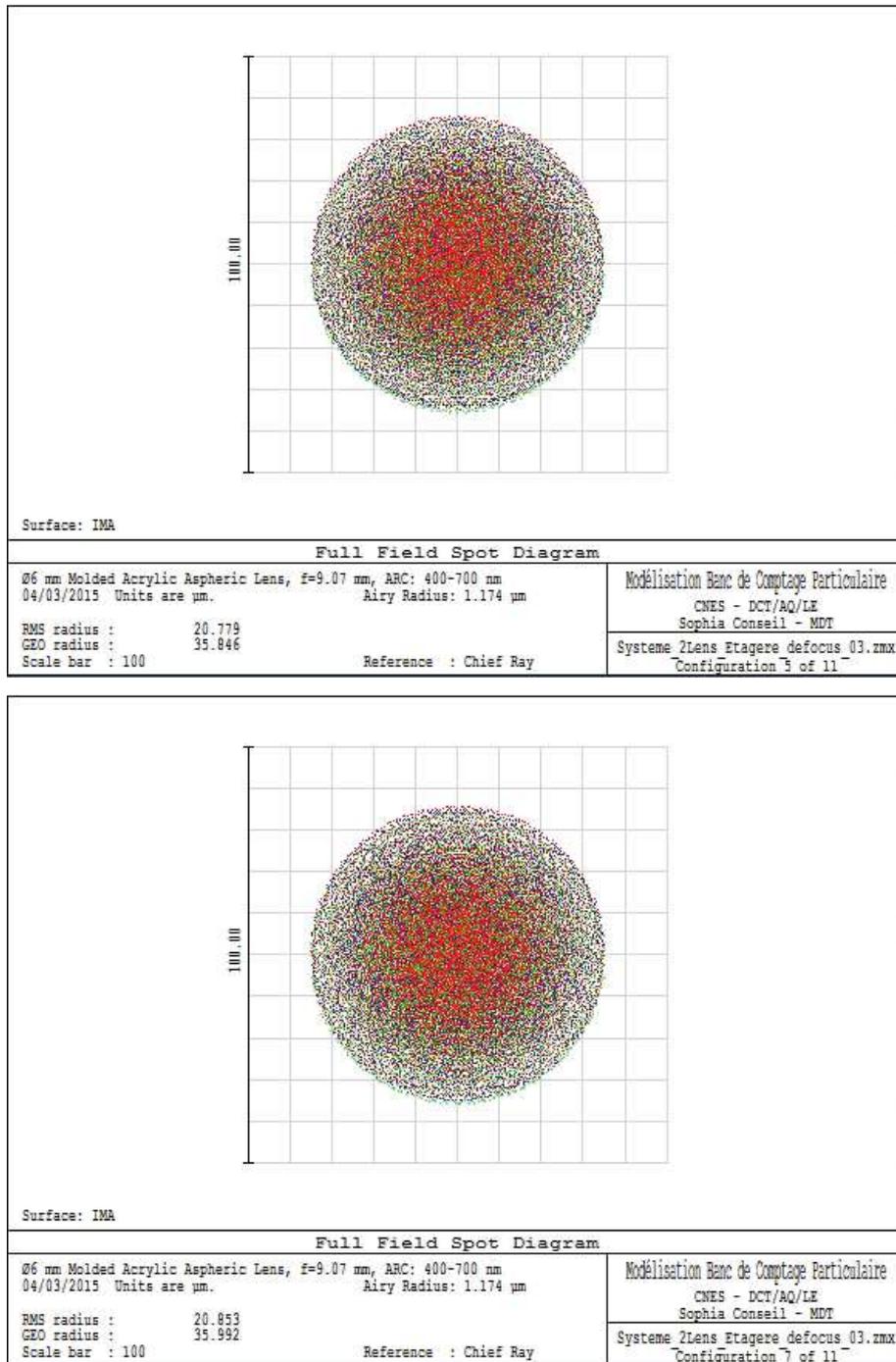


Figure 97 : Spot Diagram Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0,1 mm



**Figure 98 : Full Field Spot Diagram configurations 5 et 7, influence du défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0,1 mm**

Il est constaté comme précédemment qu'un défocus, dès un écart de 0,1 mm du foyer, dégrade les performances du système. Pour les deux configurations, c'est-à-dire pour un défocus positif et un défocus négatif, nous obtenons un diamètre de tâche image de 71,692 µm. Le diamètre de la tâche image a donc été multiplié par un facteur 32.

L'impact d'un défaut de 10 µm sur la qualité image pour la solution limitée par la diffraction est à présent simulé.

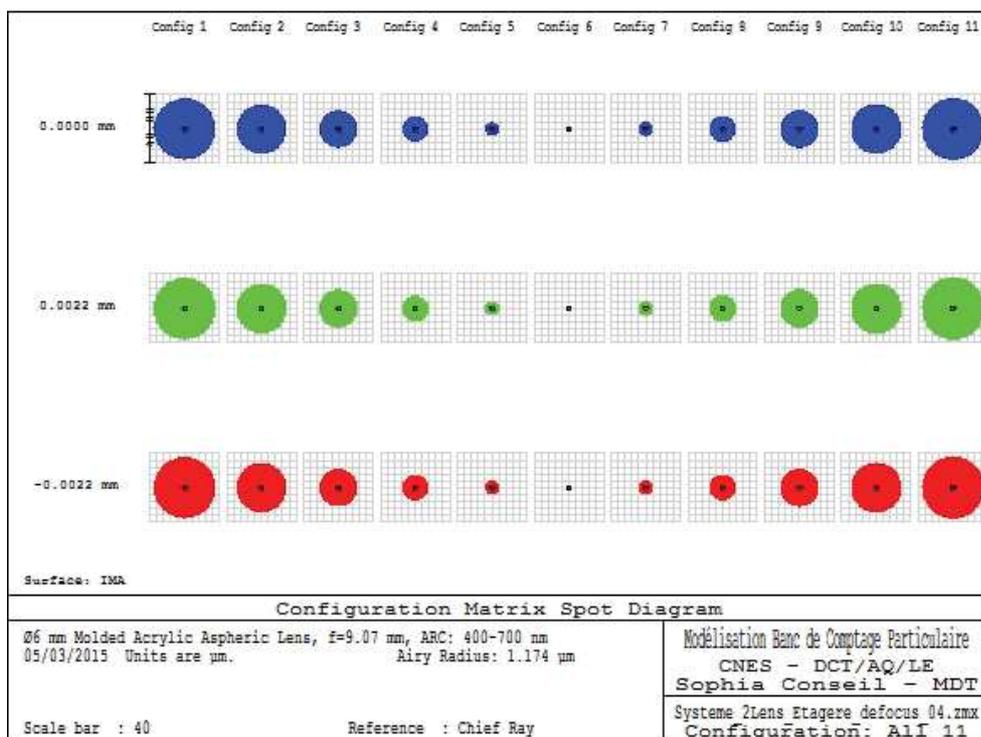
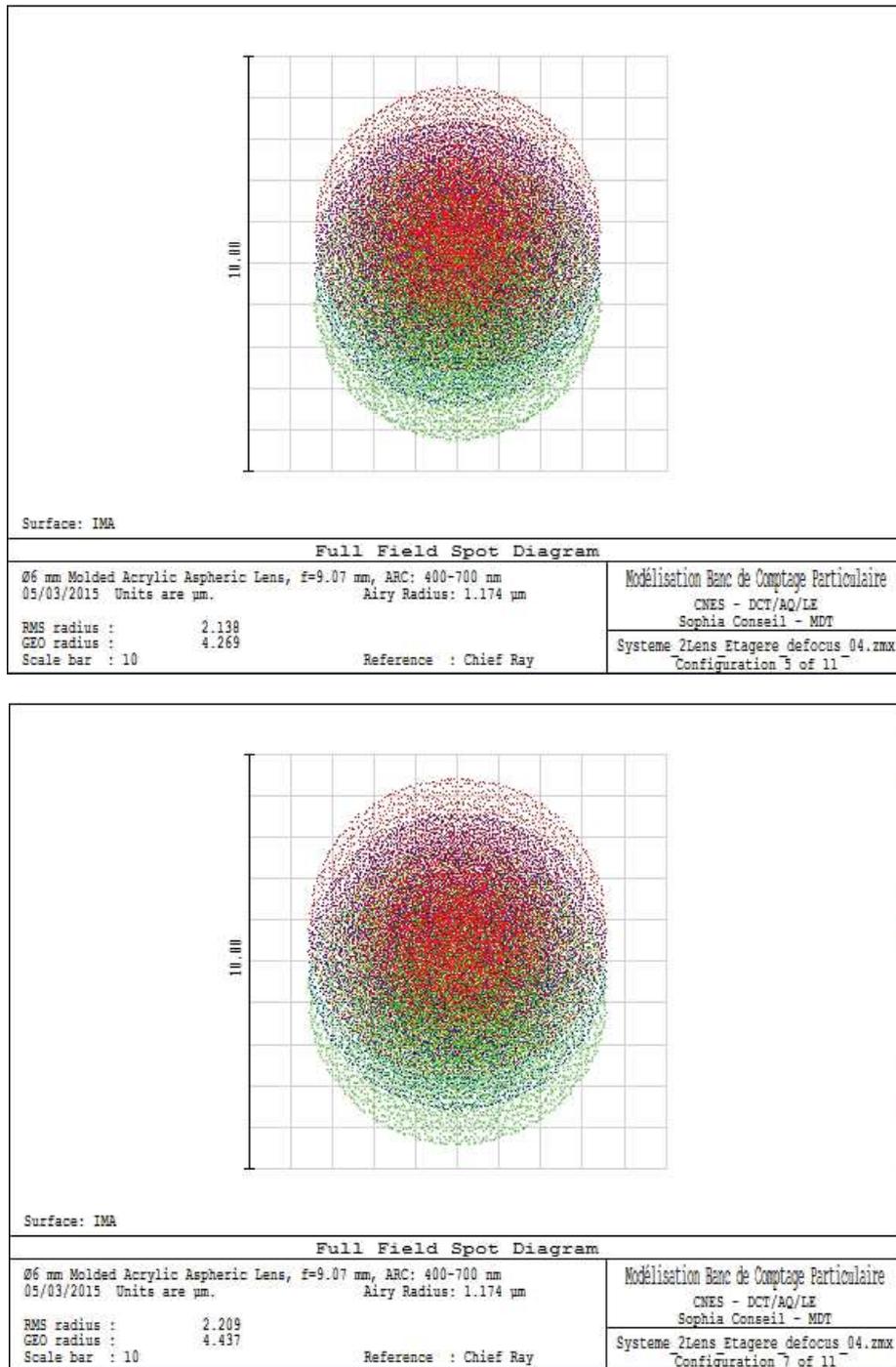


Figure 99 : Spot Diagram Multi-Configuration, influence du Défocus, solution limitée par la diffraction, pas 0,01 mm



**Figure 100 : Full Field Spot Diagram configurations 5 et 7, influence du défocus de la solution limitée par la diffraction, pas 0,01 mm**

Pour un défocus de 0,01mm, les performances du système sont également dégradées. Le diamètre de la tâche image est de 8,538 µm ce qui est quatre fois plus important que celui de la limite de diffraction.



**Titre:** Etude des mécanismes de contamination particulaire et des moyens de détection : proposition et évaluation de solutions innovantes pour la détection en temps-réel de la sédimentation des particules sur les surfaces critiques

**Résumé:** L'assemblage des satellites dans des salles propres est actuellement surveillé, afin de garantir leur fiabilité, via des compteurs optiques de particules qui indiquent la quantité de particules par volume d'air prélevé dans la salle. Cependant, pourquoi mesurer la quantité de particules qu'il y a dans l'air alors que c'est la propreté des surfaces qui est importante ? La complexité des phénomènes de transport et de sédimentation des particules rend la simulation, la prédiction ou la prévention de ces phénomènes particulièrement difficile. L'objectif de cette thèse, qui s'est déroulée au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), est de proposer une méthode de mesure de la contamination particulaire locale et surfacique. Deux axes sont privilégiés dans ce but. En premier lieu, une évaluation des phénomènes de contamination et des moyens de mesure existants est proposée en abordant les spécificités du domaine du spatial. Les études théoriques et expérimentales rassemblées dans ce mémoire et le bilan des interrogations restantes tracent un portrait clair de l'état des connaissances actuelles dans ce domaine. Cet état de l'art amène à la définition d'un besoin pour la première fois clairement exprimé. Un tour d'horizon des moyens métrologiques s'appuyant sur cette évaluation préalable permet d'étudier avec précision les possibilités de développement d'un capteur. Finalement, cette thèse démontre que l'objectif de mesure de particules de  $1\ \mu\text{m}$  avec un moyen actif et en temps-réel est atteint avec une méthode de détection optique par transmission du signal lumineux. En second lieu, cette thèse s'attache donc aux caractéristiques du capteur dont les spécifications ont été étudiées et précisées en première partie. Si le développement du capteur est encore au stade initial, les perspectives de valorisation industrielle sont clairement établies. Ce mémoire s'appuie donc sur une recherche de fond sur la théorie de la contamination particulaire et les phénomènes physiques d'interaction entre les particules et leur environnement pour définir une méthode de mesure optique fiable, validée par la simulation, et faisant l'objet d'un dépôt de brevet.

**Mots-clés:** contamination particulaire – micro-capteurs – détection – temps-réel – sédimentation – environnement spatial



**Title:** Study of particulate contamination mechanisms and detection methods: proposition and evaluation of innovating solutions for the real-time detection of particles sedimentation on critical surfaces

**Summary:** The assembly of the satellites in cleanrooms is currently monitored, in order to guarantee their reliability, via optical counters of particles which indicate the quantity of particles per volume of air in the room. However, why measure the quantity of particles in the air whereas it is the cleanliness of surfaces which is important? The complexity of the phenomena of transport and sedimentation of the particles makes the simulation, the prediction or the prevention of these phenomena particularly difficult. The objective of this thesis, which proceeded at the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), is to propose a method of measurement of the local and surface particulate contamination. Two axes are privileged to this end. Initially, an evaluation of the phenomena of contamination and existing methods of measurement are proposed by approaching space field specificities. The theoretical and experimental studies gathered in this memory and the assessment of the remaining interrogations trace a clear portrait of the state of current knowledge in this field. This state of the art brings to the definition of a need for the first time clearly expressed. A review of the metrological methods being based on this preliminary evaluation makes it possible to study with precision the possibilities of development of a sensor. Finally, this thesis shows that the goal of active and real-time measurement of particles of 1  $\mu\text{m}$  is achieved with a method of optical detection by transmission of the light signal. In the second place, this thesis attempts to describe the characteristics of the sensor whose specifications were studied and specified in first part. If the development of the sensor is still at the initial stage, the prospects for industrial valorization are clearly established. This memory is thus based on a background research on the theory of the particulate contamination and the physical phenomena of interaction between the particles and their environment to define a method of optical measurement reliable, validated by simulation, and being the object of a patent filling.

**Keywords:** particulate contamination – microsensors – detection – real time – sedimentation – space environment