



HAL
open science

Diffusion des Faisceaux Finis par des Particules et Applications aux Diagnostics Optiques

Kuan Fang Ren

► **To cite this version:**

| Kuan Fang Ren. Diffusion des Faisceaux Finis par des Particules et Applications aux Diagnostics Optiques. Optique [physics.optics]. Université de rouen, 2002. tel-01845346

HAL Id: tel-01845346

<https://hal.science/tel-01845346>

Submitted on 20 Jul 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.

MEMOIRE

présenté
à la Faculté des Sciences de l'Université de Rouen

pour l'obtention de
L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Physique
Spécialité : Énergétique

par

Kuan Fang REN

<p>Diffusion des Faisceaux Finis par des Particules et <i>Applications aux Diagnostics Optiques</i></p>
--

Soutenu le 26 novembre 2002

Rapporteurs :

- Gérard Lavergne :** Professeur à l'École nationale supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (SUPAERO), Toulouse
Cafer Özkul : Professeur à l'Université de Rouen
Bernard Pouligny : Directeur de Recherche au CNRS, Centre de Recherche Paul Pascal, Bordeaux
Alex Taylor : Professeur à l'Imperial College, Londres

Examineurs :

- Gérard Gouesbet :** Professeur à l'INSA de Rouen
Gérard Gréhan : Directeur de Recherche au CNRS, UMR 6614/CORIA, Rouen
Michel Ledoux : Professeur à l'Université de Rouen

*à la mémoire de mes parents
à ma femme
à ma fille et mon fils*

吾生也有崖，而知也无崖。

庄周

Toute la science n'est rien de plus qu'un raffinement de la pensée de tous les jours. ... [Un physicien] ne peut rester indifférent à une réflexion critique sur la pensée de tous les jours, qui est bien plus difficile à analyser.

... ..

Le but de la science est, d'une part, la compréhension, aussi *complète* que possible, et la mise en relation des expériences sensibles dans toute leur variété, et, d'autre part, le parachèvement de ce but *en employant un minimum de concepts primaires et de relations*. (En cherchant, autant que possible, l'unité logique dans l'image du monde, c'est-à-dire la simplicité logique de ses fondements.)

Albert Einstein
Conceptions scientifiques
FLAMMARION
pages 21 et 27

Je tiens à remercier **Gérard Gouesbet, Gérard Gréhan, Gérard Lavergne, Michel Ledoux, Cafer Özkul, Bernard Pouligny et Alex Taylor** d'avoir eu la gentillesse de porter un regard critique sur ce travail.

Je tiens à exprimer tout particulièrement ma gratitude à

Gérard Gouesbet, ancien directeur du LESP¹, composante de l'UMR 6614/CORIA², pour ses conseils avisés, son amitié et ses travaux scientifiques sur lesquels je me suis basé pour ma recherche en TLMG (Théorie de Lorenz-Mie généralisée).

Gérard Gréhan, directeur actuel du LESP³, pour son amitié, ses compétences scientifiques, ses précieux conseils et la discussion constante et fructueuse.

Bruno Maheu pour sa disponibilité et tous les conseils qu'il m'a apportés pour l'enseignement.

Loïc Mèès et Xiang'e Han pour les discussions constantes et approfondies, des parties de ce mémoire sont directement issues de leur travail.

Henri Cavalier et Frédéric Corbin pour la gestion très efficace des moyens informatiques et leur aide à la réalisation de certaines manipulations expérimentales.

Claude Rozé, Thierry Girasole, Bruno Chéron, Siefried Meunier-Guttin-Cluzel pour leur sympathie, leur amitié et les contributions et les conseils qu'ils m'ont apportés au cours de ce travail.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, de manière directe ou indirecte, ont contribué à la réalisation de ce travail, et particulièrement les étudiants que j'ai eu la chance d'accompagner pendant ces années de recherche.

¹Laboratoire d'Énergétique des Systèmes et Procédés

²Complexe de Recherche Interprofessionnelle en Aérothermochimie, Unité Mixte de Recherche 6614 du CNRS.

³Laboratoire d'Électromagnétisme et Systèmes Particulaires

Table des matières

Préambule	1
I Présentation du candidat	3
1 Curriculum vitæ	5
1.1 Titres universitaires	5
1.2 Expériences et parcours professionnel	6
1.3 Distinctions	6
1.4 Appartenance à des associations	6
2 Responsabilités liées à la recherche et à l'enseignement	7
2.1 Participation à un jury de thèse :	7
2.2 Participation à l'encadrement de thèses :	7
2.3 Encadrement de stages de troisième cycle	7
2.4 Encadrement de stages et de post-docteurs	8
3 Collaborations avec des laboratoires extérieurs	9
3.1 Collaborations franco-chinoises	9
3.2 Collaborations européennes	10
3.3 Collaborations avec des laboratoires français	10
4 Activités d'enseignements	11
4.1 Enseignement supérieur en Chine	11
4.2 Enseignement supérieur en France	11
4.2.1 DEA d'énergétique	12
4.2.2 Deuxième cycle	12
4.2.3 Deug SV2 et MIAS 2	12
4.2.4 Deug MIAS 1 et SM	12
5 Activités de recherche	13
5.1 Recherche théorique	13
5.2 Calculs numériques	14
5.3 Applications et suivi des contrats de recherche	15
6 Liste des publications	17
6.1 Thèse	17
6.2 Livre	17
6.3 Journaux scientifiques	17
6.4 Conférences avec actes	19
6.5 Séminaires au sein des laboratoires extérieurs	22

6.6	Rapports de fin de contrats	22
6.7	Logiciels	23
II	Rapport scientifique	25
1	Introduction	29
2	Diffusion de faisceaux finis par des particules sphériques	33
2.1	Description de faisceaux d'extension finie	34
2.2	Calcul des coefficients de forme du faisceau	35
2.3	Diffusion de la lumière par des particules multicouches	38
2.4	Pression de radiation et couple exercés sur la particule	40
3	Diffusion de la lumière par des particules cylindriques	41
3.1	Diffusion de l'onde plane par un cylindre infini	41
3.2	Diffusion d'un faisceau quelconque par un cylindre infini	43
3.3	Approximation localisée cylindrique	44
4	Applications aux diagnostics optiques	47
4.1	Réfractométrie d'arc-en-ciel	47
4.2	Anémométrie de Phase Doppler : PDA — sphère et cylindre	50
4.2.1	Modèle de la diffusion de deux faisceaux	51
4.2.2	Particules cylindriques	51
4.2.3	Applications de la phase Doppler	51
4.3	Imagerie de petites particules	51
4.4	Turbidimétrie	55
5	Perspectives	57
5.1	Recherches théoriques et numériques	57
5.2	Applications	58
	Bibliographie	58

Préambule

Vingt ans se sont écoulés depuis que j'ai été diplômé *Xueshi*⁴ en physique à l'École normale supérieure de Shaanxi (Chine) et plus de dix ans sont passés depuis mon arrivée au CORIA. Ces deux dates remarquent respectivement mes débuts dans l'enseignement supérieur et ma vie de recherche scientifique. Puis ma nomination de maître de conférences en 1998 érige ma carrière enseignant-chercheur en double culture.

D'un garçon paysan, qui ne parlait que son dialecte natal, à l'enseignant-chercheur assez fructueux (si j'ose le dire), qui doit parler couramment trois langues différentes (chinois, français et anglais) et connaître deux cultures (chinoise et française) très diversifiées et très riches, le chemin est sans doute laborieux. Toutefois la joie et les fruits en sont d'autant plus importants. De plus je suis très heureux d'avoir souvent la chance de travailler avec des enseignants sérieux et des chercheurs avertis qui m'ont assuré la confiance, le soutien et le courage. Je suis très reconnaissant à tous ceux qui m'ont, de proche ou de loin, professeurs ou étudiants, collègues ou amis, contribué à mon cheminement.

J'ai commencé mes études universitaires juste après la révolution culturelle en Chine. Avant, cela était impossible compte-tenu de l'instabilité politique du pays. Après l'obtention du diplôme du *Xueshi* en physique, j'ai été nommé maître de conférences et, ainsi, pendant trois ans, à cette même école, j'ai acquis une expérience inestimable dans l'enseignement grâce, notamment, aux réunions pédagogiques hebdomadaires organisées par l'équipe d'enseignement et aux sages conseils prodigués par mes professeurs et collègues.

J'ai suivi, de 1985 à 1987, une étude "étudiant-chercheur" du *Shuoshi*⁵ dans le laboratoire de radiophysique dirigé par le professeur Y. P. Wang à l'Université de Xidian (ancien institut d'ingénierie de télécommunication du nord-ouest), puis j'ai travaillé dans le même laboratoire. Grâce à ces études j'ai commencé la recherche scientifique sur la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux troubles. Ma première publication eut pour objet la théorie quatre flux – un modèle proposé et étudié par l'équipe du LESP (Gouesbet, Gréhan et Maheu), puis sur la diffusion des ondes électromagnétiques par des surfaces rugueuses. Bien que ces problèmes soient directs, c'est-à-dire qu'ils prédisent les champs diffusés pour des objets diffusants donnés, mon intention a été déjà attirée par la recherche d'informations sur les objets diffusants à partir des champs diffusés – diagnostics optiques.

Mais ce sujet d'étude était peu développé en Chine. Je me suis donc inscrit à un concours national en vue d'obtenir une bourse d'étude à l'étranger afin d'apprendre "des nouvelles sciences et technologies". Pour préparer ce "grand voyage en France", le gouvernement chinois finança, pour les lauréats, des cours intensifs de français pour une période de six mois. Et c'est ainsi que le 22 octobre 1990, je débarquais sur le territoire français avec un vocabulaire suffisamment conséquent pour pouvoir "me débrouiller".

Mon premier travail au LESP fut d'apprendre la Théorie de Lorenz-Mie Généralisée (TLMG) et de calculer la pression de radiation exercée sur une particule par un faisceau gaussien. Je disposais de tous les éléments scientifiques : la théorie, les formules, ainsi que les sous-programmes nécessaires : il suffisait d'assembler le puzzle. Après compilation des éléments du programme, le sous-programme essentiel destiné au calcul des fameux coefficients de forme du faisceau se révéla peu performant⁶. Je dus réécrire les formules et un nouveau code en espérant gagner beaucoup

⁴Ce diplôme chinois (Bac+4) est équivalent à la Maîtrise ès sciences

⁵Ce diplôme chinois (Bac+7) est équivalent au doctorat du troisième cycle.

⁶A cet époque l'ordinateur n'était pas très rapide, le temps de calcul est essentiel.

de temps de calcul. Un mois plus tard, ça y est ! Le nouveau code est cent fois plus rapide ! Ma première préoccupation est l'efficacité et l'application des résultats de recherches.

Un an plus tard, j'ai achevé les travaux de calcul de la pression de radiation. Je pus ainsi commencer à préparer ma thèse. Le sujet était "la diffusion d'un faisceau nappe laser⁷ par une sphère". La première étape de mon travail consista à trouver une description analytique de tels faisceaux et à démontrer mathématiquement son ordre d'approximation. L'expression mathématique n'était pas très difficile à trouver, mais la démonstration était un travail vraiment laborieux. Puis il fallait élaborer le calcul numérique. Quelle tâche pour un faisceau de telle complexité ! Et de plus j'envisage toujours l'efficacité et la simplicité optimales. Enfin, quatre années⁸ de travail m'ont permis non seulement d'obtenir le diplôme de doctorat (la thèse est couronnée du prix de Shen Donghai⁹), mais surtout d'approfondir ma connaissance de la TLMG et de contribuer au développement de cette théorie. Plus de dix articles dans des journaux scientifiques sont nés de ce travail (voir la liste de publications).

Durant ma thèse je me suis également intéressé à des applications de la théorie aux diagnostics optiques. Sans avoir eu la possibilité d'effectuer moi-même les manipulations expérimentales, j'ai pu, cependant, interpréter certains résultats expérimentaux qui n'étaient pas exploitables ou difficilement exploitables avec d'autres méthodes et simuler certaines techniques de mesure (voir le rapport scientifique).

Après ma thèse, tout en gardant mon intérêt à la recherche théorique, j'ai visé plus particulièrement les applications des théories dans des domaines divers : granulométrie, vélocimétrie, manipulation de particules, etc. Ma philosophie est d'aller du développement des théories jusqu'à la réalisation des appareils de mesure. Je joue ainsi un rôle quadruple : 1). expérimentateur pour réaliser des expériences existantes et concevoir de nouvelles techniques de mesure, 2). théoricien pour l'extension des théories existantes et le développement de nouvelles méthodes, 3). numéricien pour écrire des codes de calcul numériques très efficaces et livrés si nécessaire avec des interfaces très conviviales à utiliser, (voir le chapitre "activités de recherche" et le rapport scientifique) et 4). administrateur pour la gestion des affaires de collaboration franco-chinoise (voir le chapitre "collaborations internationales").

Et la langue française ! La recherche scientifique à plein temps entre 1990 et 1998 m'a permis également d'apprendre le français en discutant avec des chercheurs et des étudiants au laboratoire. Mais le langage utilisé est relativement limité dans le domaine de la recherche. Ma nomination de maître de conférences m'obligea à parler le français couramment, à savoir exprimer précisément toutes les notions physiques et mathématiques que l'on apprend, de l'école primaire jusqu'à l'université, et à m'adapter aux niveaux des connaissances des étudiants français. Heureusement, l'Université de Rouen m'a autorisé une année pour perfectionner mes expressions de français. Aujourd'hui, la barrière est franchie : je peux donner des cours avec la facilité et adapter ma pédagogie acquise en Chine aux étudiants français.

⁷Un faisceau laser ayant une section elliptique dont les intensités selon les deux axes principaux décroissent de manière gaussienne. Je l'appelle "feuille laser" dans ma thèse.

⁸Pour des raisons purement administratives, la soutenance a été reportée de mars 1994 en mai 1995.

⁹Ce prix de l'Association franco-chinoise pour la Recherche scientifique et Technique est destiné à récompenser la meilleure thèse soutenue entre les années 1995 et 1997 par un jeune chercheur chinois dans un laboratoire français.

Première partie

Présentation du candidat

Chapitre 1

Curriculum vitæ

Nom patronymique :	REN
Prénom :	Kuan Fang
Sexe :	Masculin
Date de naissance :	le 27 juin 1957
Lieu de naissance :	Qishan, Shaanxi en Chine
Nationalité :	Chinoise
Situation de famille :	Marié, deux enfants
Fonction actuelle :	Maître de Conférences à l'Université de Rouen
Adresse professionnelle :	LESP, UMR 6614/CORIA CNRS - Université & INSA de Rouen Avenue de l'Université, BP12 76801 Saint Étienne du Rouvray, Cedex
Adresse personnelle :	535 rue du Tourne Midi 76230 Bois Guillaume
Téléphone :	(33) 02 32 95 37 43
Télécopie :	(33) 02 32 95 37 94
Courrier électronique :	Fang.Ren@coria.fr

1.1 Titres universitaires

- 1982 : *Xueshi*, Equivalent à la **Maîtrise** ès sciences à l'Ecole normale supérieure de Shaanxi, Chine, 1982
- 1988 : *Shuoshi*, Equivalent à la **thèse de troisième cycle**, "*Amélioration du modèle quatre-flux et ses applications à la mesure des tailles de particules*", soutenue le 10 janvier 1988 à l'Institut d'Ingénierie des Télécommunications du Nord-ouest (Université de Xidian), Chine.
- 1991 : **DEA**, Equivalence du DEA français accordée par l'Université de Rouen.
- 1995 : **Doctorat**, Doctorat nouveau régime de l'Université de Rouen : "*Diffusion des faisceaux feuille laser par une particule sphérique et applications aux écoulements diphasiques*".
mention : très honorable avec félicitations

1.2 Expériences et parcours professionnel

- 1982 — 1985 : Maître de Conférences de 2^{me} classe à l'École normale supérieure de Shaanxi, Chine
- 1985 — 1988 : Thèse d'étudiant-chercheur à l'Université de Xidian, Chine
- 1988 — 1990 : Maître de conférences de 1^{ère} classe à l'Université de Xidian, Chine
- 1990 — 1991 : Boursier du gouvernement chinois au LESP, URA 230 CNRS/CORIA, Rouen
- 1991 — 1993 : Boursier du CIES (Centre International des Étudiants et Stagiaires) au LESP, URA CNRS 230/CORIA, Rouen
- 1993 — 1995 : Chercheur contractuel à l'INSA de Rouen
- 1996 — 1998 : Chargé de recherche contractuel à l'Université de Rouen
- 1998 — 1998 : Ingénieur de recherche contractuel du CNRS à l'UMR 6614/CORIA, Rouen
- depuis 1998 : Maître de Conférences à l'Université de Rouen

1.3 Distinctions

- Prix de Shen Donghai 1997. Ce prix de l'AFCRST (Association Franco-chinoise pour la Recherche Scientifique & Technique) est décerné à la meilleure thèse préparée dans un laboratoire français par un chinois et soutenue entre 1995 – 1997.
- Prix du meilleur article de l'Université de Xidian pour l'année 1997
- Troisième prix des *Avances en sciences et technologies* du ministère des sciences électroniques de Chine, 1991

1.4 Appartenance à des associations

- Membre de l'*Association française d'Optique*
- Membre de l'*Optical Society of America*, reviewer des journaux de l'OSA.
- Membre de l'*Association Franco-Chinoise pour la Recherche Scientifique & Technique*
- Membre de l'*Association des Scientifiques et des Ingénieurs Chinois en France*

Chapitre 2

Responsabilités liées à la recherche et à l'enseignement

2.1 Participation à un jury de thèse :

Thèse de Xiang'e Han (thèse en co-tutelle franco-chinoise) : *Étude de la réfractométrie d'arc-en-ciel et ses applications à la mesure d'instabilité et de gradient de température d'un jet liquide*, soutenue le 29 septembre 2000 à l'UMR 6614/CORIA, Université de Rouen.

2.2 Participation à l'encadrement de thèses :

- 1990 ~ 1994 : thèse de Fabrice Onofri : *Prise en compte de la dimension finie des faisceaux d'éclairage en granulométrie : anémométrie phase Doppler et diagnostics de milieux diphasiques*
- 1992 ~ 1996 : thèse de Dariuz Wysoczanski (thèse en cotutelle franco-polonaise) : *Granulométrie par le spectre d'extinction dans le cas de diffusion multiple*
- 1995 ~ 1998 : thèse de Hubert Polaert : *Mesure de faisceau réel et études des effets mécaniques du faisceau sur la particule*
- 1996 ~ 1998 : thèse de Marek Czerswinski : *Diffusion multiple et inversion*
- 1997 ~ 2000 : thèse de Loïc Mees : *diffusion d'un faisceau fini par un cylindre circulaire et elliptique*
- 1997 ~ 2000 : thèse de Xiang'e Han (thèse en cotutelle franco-chinoise) : *Étude de la réfractométrie d'arc-en-ciel et ses applications à la mesure d'instabilité et de gradient de température d'un jet liquide*

2.3 Encadrement de stages de troisième cycle

- 1996 : stage de DEA en aérothermochimie de Nicolas Gauchet : *Anémométrie phase Doppler pour objets cylindriques*
- 1997 : stage de DEA en aérothermochimie de Loïc Mees : *diffusion de faisceaux finis par un cylindre infini*
- 1999 : stage de DESS en métrologie optique de Nicolas Leroy et Mehti Gaiech : *Imagerie de défaut de mise au point*
- 2000 : stage de DESS en métrologie optique de Sylvain Jourdan et Moïse Marchal : *Mise en oeuvre d'une chaîne de manipulation par double pincette optique*
- 2000 : stage de DESS en métrologie optique de Séverine Mussard et Arnaud Anani : *Mesure de la composante réelle de l'indice de réfraction par la turbidimétrie*

- 2000 : stage de DESS en métrologie optique de Caroline Pasquer : *Turbidimétrie : évolution temporelle*
- 2001 : stage de DESS en métrologie optique de Belkacem BOUZID : *Turbidimétrie de fines particules*

2.4 Encadrement de stages et de post-docteurs

Dans le cadre de la collaboration franco-chinoise, plusieurs stagiaires et post-docteurs sont venus travailler dans le laboratoire. Les systèmes d'éducation français et chinois étant très différents, ils ont souvent de difficultés de communication avec des partenaires français et des problèmes dans la recherche. J'ai alors consacré beaucoup de temps à l'encadrement de ces stages : résolution de problèmes informatiques (souvent des petits problèmes mais ils bloquent le travail!), discussions sur des sujets de recherches très variés et définition de l'orientation de la recherche.

- 1998 : Dr. Song Zhang (un mois et demi) de l'Université de Tsinghua (Pékin) sur l'application de la PDA à la mesure de la mécanique des fluides[142]
- 1998 : Dr. Jie Zhou (six mois) de l'Université de Zhejiang, financé par la région de Normandie et par l'INSA de Rouen sur la mesure de la température de flamme par plusieurs longueurs d'onde[143].
- 2000 : Dr. Zenyi Ma (un mois) de l'Université de Zhejiang, venu au LESP comme un Maître de conférences invité de l'INSA de Rouen sur la mesure de l'indice de réfraction par la PDA.
- 2001 : Dr. Yiping Han (un an) de l'Université de Xidian financée par la bourse postdoctorale K. C. WONG du CNRS sur la diffusion de la lumière par une particule sphéroïdale[67, 72, 68].
- 2001 : Dr. Weidong Liu (un an) de l'Université nationale de Technologie de la Défense financé par une bourse du gouvernement chinois sur les systèmes dynamiques[83]
- 2002 : Dr. Fei Wang (un an) de l'Université de Zhejiang financé par une bourse post doctorale du ministère de l'éducation nationale de France sur la radiation et le transfert thermique en milieu dense.

Chapitre 3

Collaborations avec des laboratoires extérieurs

Les collaborations internationales, surtout avec la Chine, occupent une partie très importante dans mes activités de recherche. Elles nous permettent de confronter certains problèmes scientifiques, d'acquérir des nouvelles idées, d'étendre le champs d'application de notre recherche et de faire connaître nos travaux de recherche. Je me suis consacré principalement à la collaboration franco-chinoise en participant également à d'autres collaborations internationales.

3.1 Collaborations franco-chinoises

J'ai contribué activement depuis 1991 aux collaborations franco-chinoises. Grâce à ma connaissance de la langue et de la culture chinoises, alliée à mon savoir-faire scientifique, nous avons établi des relations avec plusieurs universités chinoises. Je m'engage dans les activités administratives et scientifiques liées à ces collaborations : échange de visiteurs scientifiques, accueil de visiteurs administratifs, réalisation de programmes de recherche et de collaboration, encadrement de thèses en co-tutelle et de post-doctorants. De nombreux échanges ont été effectués entre le CORIA et nos partenaires chinois. Citons :

- Collaboration avec l'Université de Xidian : Deux programmes de recherches avancées (PRA) ont été réalisés, financés par l'AFCRST (Association Franco-Chinoise pour la Recherche Scientifique et Technique) : une thèse en co-tutelle sur la réflectométrie d'arc-en-ciel et ses application à la mesure d'instabilité et de gradients de température d'un jet liquide, et un post-doctorant financé par la bourse de K. Wong du CNRS sur la diffusion d'un faisceau laser par un sphéroïde ont été achevés.
- Collaboration avec l'Université de Zhejiang : Plusieurs échanges administratifs et scientifiques ont été réalisés, co-financés par la Région Haute-Normandie, l'INSA de Rouen et le CORIA. Un post-doctorant financé par le ministère de l'Éducation et des recherches scientifiques français est en cours d'exécution. Un programme de recherches avancées (PRA) a été accordé par l'AFCRST. Trois thèses en co-tutelle sont prévues financées par le programme de bourse doctorale en alternance de l'Ambassade de France en Chine et par les laboratoires d'accueil. Une relation de collaboration tripartite CORIA-Université de Zhejiang et SMEDAR (Syndicat mixte d'Élimination des déchets de l'Agglomération de Rouen) a été établie.
- Collaboration avec l'Université de Tsinghua et l'Institut de métrologie et mesure de Changcheng : plusieurs échanges scientifiques ont été réalisés, pour lesquels M. Gréhan a été financé par le Programme du Développement de l'ONU.
- Collaboration avec l'Université de Science et Technologie de Shanghai : En fait, nous

avons travaillé sur la mesure de la vapeur dans des turbines thermiques ou nucléaires par la turbidimétrie dans le cadre du projet européen STEAMQUAL¹. Pour aboutir cette collaboration, une bourse scientifique post-doctorale de l’Ambassade de France en Chine a été accordée sur la diffusion de la lumière par des nuages de particules – théorie et applications.

En outre, nous avons aussi des relations avec l’Université du Nord-ouest de Chine (M. Jingtao Bai) sur la diffusion de pulses laser courts par des particules et avec l’Ecole normale de Shaanxi sur l’effet Raman excité de surface par des pulses femtosecondes.

J’ai participé également, de manière nominative, à l’obtention et la réalisation de quatre projets de “**National Natural Sciences Foundation of China**” :

1. Diffusion de la lumière par un milieu trouble (aléatoire) composé de particules fractales, janvier 1992 — décembre 1994, Université de Xidian.
2. Méthodes systématiques pour le problème ondulatoire dans un milieu trouble statistiquement non-homogène, janvier 1994 — décembre 1996, Université de Xidian.
3. Diffusion des faisceaux finis par des particules non-sphériques et applications aux mesures de phase Doppler, janvier 1997 — décembre 1999, Université de Xidian.
4. Etudes sur les mesures des caractéristiques de particules dans un milieu multiphasique par diffusion de la lumière laser, janvier 1998 — décembre 2000, Université de Qinghua.

3.2 Collaborations européennes

D’autre part, je participe aussi aux collaborations entre le LESP et trois laboratoires européens :

- Professeur Franz Durst du LSTM, Université d’Erlangen-Nürnberg, en Allemagne, sur le développement de la technique Phase Doppler basée sur la TLMG.
- Professeur C. Tropea au SLA (Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik) au Technische Universität Darmstadt sur des techniques de mesures optiques pour des écoulements multiphasiques.
- Professeur Taylor à l’Imperial College (Londres) sur l’imagerie de petites particules. Un projet européen² sur la validation de la SDV (Shadow Doppler Velocimetry en anglais) a été retenu et achevé.

3.3 Collaborations avec des laboratoires français

Dans le cadre de ma thèse, nous avons collaboré avec le Centre de Recherche Paul Pascal (Bordeaux) dirigé par le directeur de recherche Bernard Bouligny pour la validation expérimentale de la pression de radiation prédite par la TLMG.

Nous avons également des échanges d’information intéressantes avec le professeur Gérard Lavergne à l’ONERA (Toulouse) sur la mesure de température des particules dans la combustion.

En collaboration avec le laboratoire de physique des aérosols à l’Université de Paris XII nous avons validé notre code d’inversion de la turbidimétrie. Un programme de recherche PRIMEQUAL est retenu pour l’application de notre technique à la mesure en ligne de la granulométrie et de la concentration des aérosols à la sortie d’un moteur de bus de la RATP.

¹STEAMQUAL - Standardisation of Steam Quality Measurements for Performance Evaluation, SMT4 DT-97 2203

²JOULE III - Energy Efficient Intensified Spray Drying, Contract No. JO 3-CT 97-0086.

Chapitre 4

Activités d'enseignements

Ma carrière d'enseignant commence en 1976 dans une école mixte primaire-secondaire. Elle a été interrompue trois fois afin que je poursuive mes études supérieures. J'ai enseigné en Chine successivement dans une école normale supérieure, puis dans une université pendant six ans et demi. Après mon arrivée en France en 1990, je me suis focalisé sur la recherche jusqu'à 1997 où j'ai recommencé à donner des cours aux étudiants de DEA à l'Université de Rouen. En 1998, je suis nommé Maître de Conférences et depuis j'enseigne à la faculté des sciences et techniques de cette Université

4.1 Enseignement supérieur en Chine

L'enseignement supérieur en Chine a été pratiquement interrompu de 1966 à 1977 à cause de la révolution culturelle. Dès le premier concours national, j'ai eu le "droit d'entrée" pour poursuivre mes études supérieures. Après avoir eu ma maîtrise à l'**École normale supérieure** de Shaanxi, j'ai commencé, à partir de janvier 1982, ma carrière d'enseignant supérieur dans cette même école en qualité de Maître de Conférences (Sans doctorat, à cette époque en Chine, les Maîtres de Conférences étaient recrutés parmi les meilleurs diplômés de maîtrise).

En 1985 j'entre à l'**Université de Xidian** pour préparer le *Shuoshi* (diplôme d'étudiant-chercheur, équivalent à la thèse de troisième cycle) en radiophysique. Après ces études, j'ai recommencé à enseigner dans cette université en qualité de Maître de Conférences de première classe.

J'ai enseigné dans ces deux établissements les travaux pratiques en mécanique, optique et thermique et les travaux dirigés en physique générale (mécanique, thermique, optique, électromagnétique et physique atomique) pour les étudiants de premier cycle, les travaux dirigés en mécanique analytique et le cours magistral de mécanique analytique pour les étudiants de deuxième cycle.

4.2 Enseignement supérieur en France

De 1990 à 1997, je me suis concentré à la recherche (voir les chapitres "*Activités de Recherches, Liste des publications et le rapport scientifique*" pour les détails).

Ces sept ans de recherches en interaction avec des stagiaires, des thésards et des chercheurs au CORIA/LESP m'ont permis non seulement d'obtenir des résultats fructueux, mais aussi d'acquérir des connaissances sur la structure et le fonctionnement de l'éducation française, ainsi que de perfectionner ma pratique du français.

Après ma nomination de Maître de Conférences, j'ai perfectionné mon expression de la langue française pendant la première année pour assurer le meilleur enseignement. A partir de la rentrée 1999-2000, j'ai assuré la totalité de mon service statutaire.

4.2.1 DEA d'énergétique

J'ai assuré de 1997 à 2000 le cours de DEA intitulé **Diffusion de la lumière par des particules et applications à la métrologie optique** aux étudiants de DEA en aérothermochimie et d'énergétique. En collaboration avec G. Gréhan nous avons rédigé un manuel (80 pages) du cours distribué aux étudiants.

4.2.2 Deuxième cycle

Optique ondulatoire : Travaux pratiques de Maîtrise de mécanique

Ondes et vibration : Travaux pratiques de licence des sciences physiques

Pour ces deux TP j'ai renouvelé le fascicule des travaux pratiques qui correspond mieux aux matériels des TP, fournit une bonne base et permet aux étudiants un travail autonome.

Thermodynamique et statistique : Travaux pratiques de Maîtrise des sciences physiques.

Thermodynamique : Travaux pratiques de licence de physiques.

4.2.3 Deug SV2 et MIAS 2

Optique : Travaux dirigés et travaux pratiques (SV 2)

Mécanique des Systèmes : Travaux dirigés (MIAS 2)

4.2.4 Deug MIAS 1 et SM

Cours magistral : **Optique géométrique**

Travaux dirigés : **Ondes, mécanique du point, mécanique des systèmes, physique, physique et astronomie**

Travaux pratiques : **Projet professionnel**

Chapitre 5

Activités de recherche

Les diagnostics optiques étant essentiels pour la recherche à l'UMR 6614/CORIA, mon objectif est d'extraire de modèles physiques et de développer les théories associées afin d'améliorer des techniques de mesure existantes et de développer des nouvelles techniques de mesure. Mes activités de recherches sont donc axées sur l'électromagnétisme optique et ses applications aux diagnostics optiques. Elles portent sur le développement des théories, des techniques de calcul numérique jusqu'à la réalisation de mesures de type industriel. Ce type de recherche est très efficace mais elle exige une compétence triple :

Une bonne maîtrise des mathématiques et de la physique est indispensable pour développer des théories liées à des problèmes très complexes, comme la diffusion d'un faisceau laser de forme quelconque, continu ou pulsé, par une particule régulière (sphérique, cylindrique ou sphéroïdale) ou irrégulière.

Une connaissance en mathématiques appliquées et en informatique est primordiale pour la mise au point ou l'amélioration des algorithmes et pour le développement de nouvelles techniques de calcul numérique et la réalisation des logiciels scientifiques.

Finalement, pour développer des nouvelles techniques de mesure il faut également être un bon expérimentateur.

Mes activités de recherche peuvent ainsi être présentées en trois aspects comme suit.

5.1 Recherche théorique

L'utilisation des sources laser est quasi omniprésente dans la métrologie optique moderne. Cependant, les théories classiques concernées comme l'optique géométrique, la théorie de Lorenz-Mie et la diffraction ne sont valables que sous certaines hypothèses, et ces hypothèses ne sont pas toujours remplies pour des configurations réelles. Dans certains cas, cette limitation est critique. Les théories de Lorenz-Mie généralisées (TLMG), basées sur la résolution rigoureuse des équations de Maxwell, permettent d'étudier et de simuler rigoureusement des systèmes de mesure.

La PIV (Particle Imaging Velocemetry en anglais), par exemple, utilise une nappe laser comme source de lumière. Une description de tels faisceaux et une étude précise des images de particules formées par ce système sont essentielles pour mieux comprendre le fonctionnement de la technique de mesure et pour l'étendre à la mesure de tailles des gouttes.

Durant ma thèse, j'ai obtenu une description analytique de tels faisceaux et étendu la TLMG à la diffusion d'une nappe laser par des particules sphériques qui sert de base pour étudier la formation des images des particules éclairées par ces faisceaux.

Dans la pratique, on rencontre aussi des particules non sphériques. Il est intéressant d'étendre les TLMG à d'autres formes de particules. Le cylindre circulaire infini est particulièrement

intéressant parce que, d'une part, une solution exacte des équations de Maxwell existe pour l'éclairage en ondes planes, et d'autre part, beaucoup de particules rencontrées dans des procédés industriels possèdent, au moins approximativement, une forme cylindrique, telles que les fibres métalliques, de verre, de carbone, les jets liquides, les fils de laine, etc. Une recherche fondamentale est exigée afin d'orienter et de développer des instruments de diagnostic optique.

En me basant sur le travail initial du Professeur Gouesbet j'ai introduit l'approche spectrale pour la diffusion d'un faisceau laser par un cylindre circulaire et l'approximation localisée correspondante en vue du calcul des coefficients de forme du faisceau. Cette approche a été démontrée équivalente à une méthode décrites en termes de distributions mathématiques mais plus stable, robuste et rapide au niveau du calcul numérique. Elle a été appliquée à l'étude de la technique de phase Doppler pour des objets cylindriques et étendue par Loïc Mées à la diffusion d'un cylindre elliptique. Cette extension est particulièrement intéressante pour étudier l'effet de la non sphéricité dans la mesure.

D'autre part, lorsqu'un faisceau laser interagit avec une particule, il exerce un effort mécanique sur la particule. Il la pousse ou l'attire, et la fait tourner. Ces effets sont à la base des pincettes optiques aux nombreuses applications en biologie et biophysique. Ils ont été mis en évidence par plusieurs auteurs. Les TLMG fournissent un outil théorique pour unifier et prédire ces effets. J'ai étudié systématiquement la pression de radiation et la pression de radiation inverse exercées par un faisceau d'extension finie sur une particule sphérique. Nous avons été les premiers à prédire rigoureusement la pression de radiation inverse dans un cadre unifié, que les particules soient de dimensions inférieures ou supérieures à la longueur d'onde, tout en soulignant une bonne sensibilité aux détails fins de la structure du faisceau. Ces résultats ont été confirmés par des mesures expérimentales effectuées par l'équipe de Bernard Pouligny au Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux.

5.2 Calculs numériques

L'application de la théorie dépend fortement de notre capacité à en tirer des prévisions numériques permettant d'orienter et d'interpréter efficacement les travaux expérimentaux. Je m'intéresse particulièrement à l'amélioration et au développement d'algorithmes optimisés.

Le calcul numérique des coefficients de forme du faisceau et des coefficients de diffusion est un travail essentiel pour les applications des TLMG. Dans mon premier travail au LESP, j'ai réécrit un code de calcul pour un faisceau gaussien qui est environ 100 fois plus rapide que le programme original. Ce code a été utilisé dans beaucoup d'applications de la théorie de Lorenz-Mie généralisée. J'ai également étendu l'approximation localisée pour le calcul des coefficients de forme d'une nappe laser. L'approximation localisée intégrale que j'ai introduite pour l'évaluation numérique des coefficients de forme du faisceau est à la fois très souple et très stable.

Compte tenu des applications, je m'intéresse également à l'amélioration d'algorithmes pour les théories classiques. La théorie de diffusion d'une particule multicouches éclairée par une onde plane a été développée depuis plus d'un demi-siècle. Mais le calcul ne peut se faire que pour une petite particule avec un nombre de couches très faible. En collaboration avec le Professeur Wu de l'Université de Xidian (Chine), nous avons développé un code performant pour le calcul des coefficients de diffusion. Ce code permet le calcul de ces coefficients pour une très grosse particule avec un nombre de couches important, par exemple, pour une particule de 400 μm avec 1000 couches éclairée par un faisceau de longueur d'onde dans le visible. Ce code nous a permis la prédiction des champs internes d'une particule multicouche lorsqu'elle est éclairée par un faisceau fini¹, la mise en évidence des ondes de surface, l'étude du gradient de température/indice de la particule par la réfractométrie d'arc-en-ciel.

¹Ceci est très intéressant pour l'étude des modes de résonance et notamment pour les effets non linéaires.

Dix ans de recherche sur la diffusion de la lumière m'ont permis de développer des codes de calcul divers dans ce domaine. Nous disposons ainsi d'une bibliothèque très complète de codes et d'algorithmes optimisés des TLMG.

5.3 Applications et suivi des contrats de recherche

Les applications des théories et des techniques de calcul numérique aux diagnostics optiques dans les écoulements diphasiques sont au coeur de mes préoccupations. J'ai contribué à la fois à la recherche des techniques de mesures optiques comme l'imagerie, l'anémométrie phase Doppler, la turbidimétrie, la réfractométrie d'arc-en-ciel et le système de double onde cylindrique, et à la réalisation de mesures d'intérêt industriel pour lesquelles je me suis engagé dans plusieurs contrats industriels, y compris l'acquisition et le traitement du signal.

Un modèle d'imagerie a été développé pour prévoir les caractéristiques d'images de sphères et de cylindres en défaut de mise au point. L'orientation et la forme du faisceau sont arbitraires, le degré de cohérence peut prendre également une valeur arbitraire. Ces travaux se sont concrétisés par un projet européen JOULE pour évaluer la formation d'images des particules du SDV (Shadow Doppler Velocimetry en anglais)² et par un contrat industriel en collaboration avec le Professeur Cafer Ozkul. Nos prédictions ont permis aussi de valider et d'étendre un modèle basé sur la "point spread function", développé par l'équipe G2O de l'UMR 6614.

Le système de double onde cylindrique (DCW – double cylindrical wave en anglais) est une variante de la technique phase Doppler. Il a été étudié expérimentalement et théoriquement avec la théorie de Lorenz-Mie et l'optique géométrique. Seul le modèle que j'ai développé permet d'expliquer les résultats expérimentaux.

La turbidimétrie ou la mesure du spectre d'extinction a été énormément appliquée pour la déduction de la distribution en tailles de particules. Cependant, le problème d'inversion est souvent instable ou mal conditionné. Après une étude systématique sur les caractéristiques d'extinction de la particule et l'algorithme de "moindre carré non-négatif" proposé par C. Lawson, j'ai développé un logiciel interactif RINVERSE qui est très stable, robuste et très convivial à utiliser. Il est, à notre connaissance, l'un des meilleurs dans ce domaine. Il est utilisé dans différents domaines liés à la mesure des particules de l'ordre du micron par plusieurs laboratoires de recherche. Citons la mesure de vapeur dans les turbines dans le cadre de trois contrats LESP-EDF et d'un projet européen STEAMQUAL³, la recherche des caractéristiques d'évaporation et d'inflammation du colza pour le projet européen ACREVO, la mesure des brouillards artificiels ou naturels par la CETE⁴, l'adaptation de la technique à la mesure d'échappement moteur au CERTAM, le développement d'une nouvelle méthode de mesure en ligne et en continu de la granulométrie et de la concentration des aérosols diesel à la sortie d'un moteur de bus de la RATP (programme PRIMEQUAL 2) et le suivi d'évolution d'une réaction chimique par le Professeur Trong Nguyen de l'UMR 6522/Université de Rouen.

Les travaux sur la diffusion d'une sphère multicouche et d'un cylindre nous permettent de prédire la structure fine d'un arc-en-ciel en prenant en compte les gradients de température et/ou d'indice dans les gouttes de combustible en cours de combustion. Dans le cadre de la thèse en co-tutelle de Mme. Xiang'e HAN, nous avons réalisé une technique de mesure très précise sur la taille ($\pm 3\mu\text{m}$ pour un jet liquide de $600\mu\text{m}$) et sur la variation du diamètre ($\pm 5\text{nm}$ pour le même jet). L'instabilité d'un jet liquide et la sensibilité au gradient de température ont été étudiées. Cette technique est étendue maintenant pour la mesure de la fibre dans le cadre du

²Deux rapports annuels ont été délivrés avec des CD-ROM sur lesquels j'ai compilé les résultats de calculs et fourni un logiciel pour la visualisation instantanée de simulation de l'image Shadow Doppler Vélocimétrie

³Je suis consultant de EDF dans le cadre de ce projet.

⁴Ce travail consiste à la formation scientifique et l'adaptation du matériel à la mesure de brouillards ainsi que la réalisation de mesures dans une salle de brouillards artificiels (LRPC de Clermont-Ferrand)

contrat ALCATEL. Une mesure de précision de 0.1μ pour la fibre de $125 \mu\text{m}$ est réalisable! Je gère actuellement le contrat ALCATEL en vue de développer un nouveau système de mesure précise de la fibre optique par la réfractométrie d'arc-en-ciel.

Les effets mécaniques de la lumière sur les particules éclairées est un sujet particulièrement intéressant pour la recherche et l'application dans les domaines de biologie et de biophysique. Grâce à cet effet on peut manipuler les particules biologiques sans contact mécanique. Les TLMG nous permettent de prédire rigoureusement les forces de pression de radiation et le couple d'un faisceau quelconque sur une particule. Mon travail sur ce sujet se concrétise par un contrat CORIA-GENOPTRIX (américain) afin de réaliser un ensemble de logiciels pour prédire ces effets mécaniques.

J'ai assuré également des mesures liées à l'utilisation de Phase Doppler pour des contrats au CORIA : deux contrats PROMAT AIR sur les mesures de tailles et vitesses des gouttes générées par un disque de mousse tournante et de grillage par l'anémométrie phase Doppler, un contrat IRSID sur la mesure de la vitesse et de la taille de bulles dans une veine hydrodynamique simulant une coulée d'acier, contrat Brite III sur la réalisation de la mesure d'injecteurs dans la chambre haute pression, contrat CETIAT sur les études d'injecteurs fuel et l'intervention pour la mesure du spray ultrasonique (thèse de Olivier Werquin).

Chapitre 6

Liste des publications

6.1 Thèse

Thèse du doctorat **Nouveau Régime**, *Diffusion des faisceaux feuille laser par une particule sphérique et applications aux écoulements diphasiques*, soutenue le 31 mars 1995, à l'Université de Rouen, mention **très honorable avec félicitations**, **prix Shen Donghai 1997**, directeur de thèse : Gérard GREHAN.

6.2 Livre

Electromagnetic Scattering of Shaped beams — generalized Lorenz-Mie theory, G. Gouesbet, G. Gréhan, B. Maheu, K. F. Ren
disponible sur le web : <http://www.coria.fr>

6.3 Journaux scientifiques

Articles publiés ou acceptés

1. Y. P. Wang, Z. S. Wu and K. F. Ren, “The four-flux model with adjusted average crossing parameter to solve the scattering transfer equation”, *Applied Optics*, **28**(1), pp. 24-26, 1989
2. Y. P. Wang, Z. S. Wu and K. F. Ren, “The study on 10.6 μm wave propagation in cloud, fog and haze”, *Intern. Journal of Infra-red and Millimeter Wave*, **11**(4), pp. 499-504, 1990
3. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, “Localized approximation of generalized Lorenz-Mie theory : faster algorithm for computations of beam shape coefficients g_n^m ”, *Part. Part. Syst. Charact.*, **9**, pp. 144-150, 1992
4. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, “Laser sheet scattering by spherical particles”, *Part. Part. Syst. Charact.*, **10**, pp. 146-151, 1993
5. G. Gréhan, K. F. Ren, G. Gouesbet, A. Naqwi and F. Durst, “Evaluation of a particle sizing technique based on laser sheets”, *Part. Part. Syst. Charact.* **11**, pp. 101-106, 1994
6. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, “Symmetry relations in generalized Lorenz-Mie theory”, *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**(6), pp. 1812-1817, 1994. Cet article a gagné le **prix du meilleur article de l'Université de Xidian (Chine)** pour l'année 1997.
7. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, “Evaluation of laser sheet beam shape coefficients in generalized Lorenz-Mie theory by using a localized approximation”, *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**(7), pp. 2072-2079, 1994

8. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Radiation pressure forces exerted on a particle arbitrarily located in a Gaussian beam by using the generalized Lorenz-Mie theory, and associated resonance effects", *Opt. Commun.*, **108**, pp. 343-354, 1994
9. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Electromagnetic field expression of laser sheet and its order of approximation", *J. Opt. (Paris)*, **25**(4), pp. 165-176, 1994
10. K. F. Ren, G. Gouesbet, G. Gréhan and Y. P. Wang, "Generalized Lorenz-Mie theory and its applications in optical particle sizing", *Chinese Journal of Radio Science*, **9**(2), pp. 7-12, 1994, **sélectionné comme l'un des meilleures articles** publiés en Chine en 1994 par le *Chinese Abstract on Radio-electronics Sciences*.
11. G. Gouesbet, C. Letellier, K. F. Ren and G. Gréhan, "Discussion of two quadrature methods to evaluate beam shape coefficients in generalized Lorenz-Mie theory", *Appl. Opt.*, **35**(9), pp. 1537-1544, 1996
12. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory", *Appl. Opt.*, **35**(25), pp. 2702-2710, 1996
13. D. Lebrun, S. Belaid, C. Özkul, K. F. Ren and G. Gréhan, "Enhancement of wire diameter measurement : comparison between Fraunhofer diffraction and Lorenz-Mie theory", *Opt. Eng.*, **35**(4), pp. 946-950, 1996
14. K. F. Ren, D. Lebrun, C. Ozkul, A. Kleitz, G. Gouesbet and G. Gréhan, "On the measurements of particles by imaging methods : theoretical and experimental aspects", *Part. Part. Syst. Character.*, **13**, pp. 156-164, 1996
15. T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan, J. N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren and D. Wysoczanski, "Cylindrical fiber orientation analysis by light scattering : Part 1 : numerical aspect", *Part. Part. Syst. Character.*, **14**, pp.163-173, 1997
16. T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan, J. N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren and D. Wysoczanski, "Cylindrical fiber orientation analysis by light scattering : Part 2 : experimental aspect", *Part. Part. Syst. Character.*, **14**, pp.211-218, 1997
17. Z. S. Wu, L. X. Guo, K. F. Ren, G. Gouesbet and G. Gréhan, "Improved algorithm for electromagnetic scattering of plane waves and shaped beams by multilayered spheres", *Appl. Opt.*, **36**(21), pp.5188-5198, 1997
18. N. Gauchet, T. Girasole, K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Application of generalized Lorenz-Mie theory for cylinders to cylindrical particle characterization by phase Doppler anemometry", *Optical Diagnostics in Engineering* **2**(1) pp1-10, 1997
19. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder in GLMT-framework, formulation and numerical results", *J. Opt. Soc. Am. A*, **14**(11), pp. 3014-3025, 1997
20. G. Gouesbet G. Gréhan and K. F. Ren, "Rigorous justification of the cylindrical localized approximation to speed up computations in GLMT for cylinder", *J. Opt. Soc. Am. A*, **15**(2), pp.511-523, 1998
21. K. F. Ren, G. Gouesbet and G. Gréhan, "The integral localized approximation in generalized Lorenz-Mie theory", *Appl. Opt.*, **37**(19), pp.4218-4225, 1998
22. X. Han, K. F. Ren, W. Zhensen, G. Gréhan, G. Gouesbet, F. Corbin, "Characterization of initial disturbances in liquid jet by rainbow refractometry", *Appl. Opt.*, **37**(36), pp.8498-8503, 1998
23. G. Gouesbet, K. F. Ren, L. Mees and G. Gréhan, "The cylindrical localized approximation to speed up computations in GLMT for cylinders, for arbitrary location and orientation of the scatterer", *Appl. Opt.*, **38**(12), pp2647-2665, 1999

24. L. Mees, K. F. Ren, G. Gréhan, G. Gouesbet, "Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation, numerical results", *Applied Optics*, 38(9), pp1867-1876, 1999
25. G. Gouesbet, L. Mees, G. Gréhan, K. F. Ren, "Description of arbitrary shaped beams in elliptical cylinder coordinates, by using a plane wave spectrum approach", *Optics Communication*, 161, pp63-78, 1999
26. G. Gouesbet, L. Mees, G. Gréhan, K. F. Ren, "Structure of generalized Lorenz-Mie theory for elliptical cylinders", *Part. Part. Syst. Charact.*, 16, pp3-10, 1999
27. G. Gouesbet, L. Mees, G. Gréhan, K. F. Ren, "Localized approximation for Gaussian beams in elliptical cylinder coordinates", *Appl. Opt.*, 16(6), pp1008-1025, 2000
28. T. Girasole, K. F. Ren, D. Lebrun, S. Belaid, G. Gouesbet, G. Gréhan, "Particle imaging : GLMT simulation", *J. of Visualization*, 3(2), pp195-202, 2000
29. S. Zhang, K. F. Ren, Xiong Shen, Gérard Gréhan, Gérard Gouesbet, "A theoretical model for the method of Phase Doppler particle sizing in two-phase flows", *J. of experimental mechanics*, 15(1), pp43-50, 2000
30. X. Han, K. F. Ren, L. Méès, G. Gouesbet et G. Gréhan, "Surface wave/geometrical rays interference : numerical and experimental behaviour et rainbow angles", *Optics Communication*, 195, pp49-54, 2001
31. Y. Han, L. Méès, K. F. Ren, G. Gouesbet, S. Wu et G. Gréhan, "Scattering of light spheroids : the far field case", *Optics Communication*, 210, pp1-9, 2002

Article soumis

32. K. F. Ren, T. Girasole, A. M. K. P. Taylor, G. Gouesbet et G. Gréhan, "Theoretical evaluation of a Shadow Doppler Velocimeter", Soumis à *Optics Communication*, 2002
33. K. F. Ren, Loïc Méès, G. Gréhan and G. Gouesbet "Internal fields of a multilayered sphere illuminated by a gaussian beam", en préparation 2002

6.4 Conférences avec actes

Conférences internationales

1. Y. P. Wang, Z. S. Wu and K. F. Ren (orateur), "Improvement of four-flux model to solve the radiative transfer equation", *Intern. Confer. on Comput. Physics*, Beijing (Pékin), 1988
2. Y. P. Wang, Z. S. Wu and K. F. Ren (orateur), "Inversion of polystyrene particle size and density from the transmittance by a random trial technique in Monte Carlo method", *Intern. Confer. on Comput. Physics*, Beijing (Pékin), 1988
3. Y. P. Wang, Z. S. Wu and K. F. Ren (orateur), "The study on 10.6 μm wave propagation in cloud, fog and haze", *Intern. IR/MM Wave Symposium*, Beijing(Pékin), 1989, published also in *Intern. Journal of Infra-red and Millimeter Wave*, 11(4), pp. 499-504, 1990
4. K. F. Ren, G. Gréhan (orateur) and G. Gouesbet, "Laser sheet scattering by spherical particles", *6th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon (Portugal), 1992, sélectioné pour publication dans *Part. Part. Syst. Charact.*, 10, pp.146-151, 1993
5. G. Gréhan, K. F. Ren, G. Gouesbet (orateur), A. Naqwi and F. Durst, "Applications of generalized Lorenz-Mie theory to multiphase flow experimental techniques", *9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto (Japan)*, pp.27.1.1-27.1.5 1993, **conférence invitée**

6. J. Mroczka (orateur), K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet, "Particle sizing by polarization ratio : on use of laser sheet", *1st International Conference-Workshop on Modelling in Measurement processes, Wroclaw (Poland)*, pp. 58-65, 1993
7. G. Gréhan, K. F. Ren (orateur), G. Gouesbet, A. Naqwi and F. Durst, "Evaluation of a particle sizing technique based on laser sheets", *3rd International Congress on Optical Particle Sizing, Yokohama (Japan)* août 1993, sélectionné pour publication dans *Part. Part. Syst. Charact.* **11**, 1994, pp. 101-106
8. K. F. Ren (orateur), G. Gréhan and G. Gouesbet, "Laser imaging of small particles by using the generalized Lorenz-Mie theory", *Multiphase Flow and Heat Transfer, 3rd International Symposium, Xi'an, (China)*, septembre 1994, pp. 787-794, Edited by Xue-Jun Chen, Ting-Kuan Chen and Fang-De Zhou, Xi'an Jiaotong University Press (Xi'an, China) and Begell House, Inc (New York, USA)
9. K. F. Ren, F. Onofri, G. Gouesbet, G. Gréhan (orateur), G. Martinot-Lagarde and B. Pouligny, "Radiation pressure : a tool for optical measurements of pico-Newton forces", *PARTEC, 4th International Congress of optical Particle Sizing, Nürnberg (Germany)*, 21-23, mars 1995, pp483-491
10. K. F. Ren, D. Lebrun, C. Ozkul, A. Kleitz, G. Gouesbet and G. Gréhan (orateur), "On the measurements of particles by imaging methods : theoretical and experimental aspects", *PARTEC, 4th International Congress of optical Particle Sizing, Nürnberg (Germany)*, 21-23, mars 1995, pp97-106
11. T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan (orateur), J. N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren and D. Wysoczanski, "On fiber orientation diagnostic by light scattering : simulations and experimental results", *PARTEC, 4th International Congress of optical Particle Sizing, Nürnberg (Germany)*, 21-23, mars 1995, pp429-438
12. K. F. Ren, G. Gréhan and G. Gouesbet (orateur), "Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder : numerical results in GLMT-framework", *8th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon (Portugal)*, 1996
13. F. Corbin, X. Han, Z. S. Wu, K. F. Ren, A. Garo, G. Gouesbet et G. Gréhan (orateur), "Rainbow refractometry : application to nonhomogeneous scatterer", *3rd International Conference on fluid dynamic measurement and its applications, Pékin (Chine)*, octobre 1997, **conférence invitée**
14. X. Han (orateur), Z. S. Wu, F. Corbin, A. Garo, G. Gréhan, K. F. Ren, G. Gouesbet, "Measurements of first and second rainbow of liquid jet and fiber", *3rd International Conference on fluid dynamic measurement and its applications Pékin(Chine)*, octobre 1997.
15. G. Gouesbet (orateur), K. F. Ren, G. Gréhan, "Cylindrical localized approximation to speed up computations in the generalized Lorenz-Mie theory", *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Nantes (France)* juillet 1998, **conférence invitée**.
16. G. Gouesbet, L. Mees, G. Gréhan, K. F. Ren, "Generalized Lorenz-Mie theory for elliptical cylinders", accepté par *5th International Congress of Optical Particle sizing, Minneapolis (USA)*, août 1998.
17. L. Méès, X. Han, K. F. Ren, G. Gouesbet, G. Gréhan, "Scattering of a Gaussian beam by a finite cylinder and rainbow refractometry", *5th International Congress of Optical Particle sizing, Minneapolis (USA)*, août 1998.
18. H. Polaert, G. Gouesbet, K.F. Ren et G. Gréhan, "Measurement of the beam shape coefficients in GLMT for axisymmetric beam", *5th International congress on Optical Particle Sizing, Minneapolis, MN, USA, August 10-14, 1998*

19. T. Girasole, K. F. Ren, D. Lebrun, S. Belaid, G. Gouesbet and G. Gréhan, “Generalized Lorenz-Mie theory : an application to imaging of off-axis and defocused droplets”, accepté par *Int. Conf. on Optical Technology and Imaging processing in fluid, thermal and combustion flow, VSJ-SPIE’98*, Yokohama(Japon), décembre 1998.
20. X. Han, Z. Wu, K. F. Ren, F. Corbin, A. Garo, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Cylinder particle sizing at rainbow angle”, *4th Intern. Symposium of Multiphase flow and heat transfer*, Xi’an, 22-24 août 1999.
21. L. Méès, K. F. Ren, G. Gouesbet and G. Gréhan, “Interaction between a short beam pulse and a spherical cavity”, *6th Inter. Congress on Particle characterisation*, 12-15 October, Brighton (Royaume-Uni), 2001
22. K. F. Ren, M. B. Attoui, G. Gréhan, “Determination of the size and the concentration of a submicron aerosol by measurement of the coefficient of extinction to several wavelengths”, European Aerosol Conference, Leipzig (Allemagne), septembre 2001
23. Y. P. Han, G. Gréhan, K. F. Ren, L. Méès, G. Gouesbet, and Z. S. Wu, “Computation of Off-axis Beam Scattering by a spheroidal particle”, *Intern. Conference on Electromagnetics and light scattering by non-spherical particles*, 4-8 mars, Florida (United States), 2002
24. L. Méès, K.F. Ren, G. Gouesbet and G. Gréhan, “Transient internal and near scattered fields from a multilayered sphere illuminated by a pulsed laser”, *11th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon (Portugal), 8-11 July, 2002.

Conférences nationales

25. K. F. Ren (orateur), “The experimental formulas of the eigenfunctions in the scattering of rough surface(in chinese)”, *Second National Conference of Light Scattering*, Xi’an (China), 1989
26. K. F. Ren (orateur), G. Gréhan et G. Gouesbet, “Théorie de Lorenz-Mie généralisée : un outil pour des barrières laser de protection locale”, *8^{mes} Journées d’études sur les aérosols*, GAMS/COFERA, Paris, novembre 1991, pp. 65-70
27. N. Gauchet, T. Girasole, K.F. Ren, G. Gréhan et G. Gouesbet, “Mesure de particules cylindriques par anémométrie phase Doppler”, *12ème Journées d’Etude sur les Aérosols*, 1996, ASFERA, 5-6 Décembre 1996, Paris
28. F. Corbin, X. Han, Z. S. Wu, K. F. Ren (orateur), A. Garo, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Réfractométrie d’arc-en-ciel : Applications à la caractérisation de cylindres” *Congrès français de thermique* Toulouse, mai 1997.
29. K. F. Ren, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Interaction lumière laser/particule : applications météorologiques”, *Journée SFO*, Alsace, 17-19 novembre, 1999
30. M. B. Attoui, K.F. Ren, T. Girasole, A. Garo, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Détermination de la granulométrie et de la concentration d’un aérosol sub-micronique par mesure du coefficient d’extinction à plusieurs d’ondes : 1 stratégie d’inversion”, *15e Congrès français sur les aérosols (ASFERA)*, Paris, 8-9 décembre 1999
31. X. Han, K. F. Ren, L. Mees, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Etude de l’écoulement d’un jet libre de Rayleigh par imagerie d’arc-en-ciel”, *FLUVISU*, Rouen, Juin 2001, pp71–78
32. L. Mees, K. F. Ren, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Imagerie Pulsée femtoseconde d’une particule réfractante, *FLUVISU*, Rouen, Juin 2001, pp105–111
33. G. Boulnois, K. F. Ren, T. Girasole, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Imagerie cohérente aux petits angles”, *FLUVISU*, Rouen, Juin 2001, pp65–70

34. S. Meunier-Guttin-Cluzel, K. F. Ren, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Imagerie de particules complexes : champ interne”, *FLUVISU*, Rouen, Juin 2001, pp113–118
35. L. Méès, S. Meunier-Guttin-Cluzel, K. F. Ren, G. Gouesbet et Gréhan, “Interaction entre un pulse laser femtoseconde et une particule sphérique : champs internes et champs proches”, 17e Congrès Français sur les Aérosols, ASFERA, 11-12 décembre, Paris, 2001
36. Y. Han, K. F. Ren, L. Méès, G. Gouesbet, G. Gréhan, “Diffusion des ondes électromagnétiques par un sphéroïde : solution rigoureuse”, 17e Congrès Français sur les Aérosols, ASFERA, 11-12 décembre, Paris, 2001

6.5 Séminaires au sein des laboratoires extérieurs

1. K. F. Ren, “Théorie de Lorenz-Mie généralisée et les applications”, présenté à Université de Xidian, Septembre 1992
2. G. Gréhan, K. F. Ren, “Diffusion des faisceaux fins par des particules et les applications à la granulométrie Phase Doppler”, présenté à l’Université de Zhejiang (Chine), septembre 1995
3. G. Gréhan, K. F. Ren, “Diffusion des faisceaux fins par des particules et les applications dans la mesure de mécanique de fluide”, présenté à l’Université de Qinghua (Pékin), septembre 1995
4. K. F. Ren, “Description de faisceaux fins et la diffusion par des particules sphériques et cylindriques”, présenté à l’Université de Xidian, novembre 1996
5. G. Gréhan, K. F. Ren, “Diffusion de la lumière par des particules et anémométrie phase Doppler”, présenté à l’Institut national de métrologie et mesures de Chancheng (Pékin), octobre 1997
6. K. F. Ren, “Théories de Lorenz-Mie Généralisées et ses applications au diagnostic optique”, présenté à l’Université de Zhejiang et à l’Université des Sciences et Technologie de Shanghai, mars 2001
7. K. F. Ren, “Principe et nouveau développement de l’Anémométrie Phase Doppler”, Université de Xidian, août 2001
8. K. F. Ren, “Réfractométrie d’arc-en-ciel et ses applications au diagnostic optique”, Université de Xidian, août 2001

6.6 Rapports de fin de contrats

1. K. F. Ren et G. Gréhan, Contrat LESP/EDF : Adaptation d’un code EDF sur le PC avec une interface conviviale, livré avec le logiciel DISTRINV et son mode d’emploi, 1994.
2. K. F. Ren et G. Gréhan, Contrat LESP/EDF : Développement d’un logiciel d’inversion de la turbidimétrie, livré avec le logiciel RINVERSE, 1995.
3. T. Girasole, H. Bultynck, G. Gouesbet, G. Gréhan, J. N. Le Toulouzan, H. Mignon, K. F. Ren, C. Rosé, D. Wysoczanski, “Remote non-destructive monitoring of spatial fibre orientation in polymer composite : Progress report II”, *Brite Euram contract n° BRE2-CT92-0139 Proposal 5081-91*, LESP, URA CNRS 230/CORIA, INSA de Rouen, janvier 1995
4. S. Belaid, G. Gréhan, D. Lebrun, C. Öskul K. F. Ren, “Étude du champ diffracté par les fils opaques : comparaison théorie de Lorenz-Mie – diffraction classique”, *Rapport de fin d’étude, Commande CERSA n° 109/94*, Université de Rouen, URA CNRS 230/CORIA, 1995

5. K. F. Ren et G. Gréhan, deux Contrats LESP/EDF : Simulation du spectre d’extinction pour une distribution en taille des gouttes données, livré avec les logiciels SPECTEX et BiOndes.
6. K. F. Ren, D. Blondel et G. Gréhan, “Mesure de tailles et vitesses des gouttes générées par un disque de mousse tournante par l’anémométrie phase Doppler”, Contrat PROMAT AIR, mai 1997
7. D. Lisiecki, K. F. Ren et D. Blondel, “Mesure de tailles et vitesses des gouttes des sprays dans la chambre haute pression et générées par la soufflerie”, SNECMA, juillet 1997
8. C. Gobin, D. Blondel, K. F. Ren, D. Lisiecki et G. Gréhan, “Système d’injection à vrilles partiellement prémélangé”, Contrat CORIA/SNECMA, STPA n 9392019, Septembre 1997
9. X. Jeandel, C. Gobin, K. F. Ren, D. Lisiecki et M. Ledoux, “Liquid sheet disintegration, measurements in LPP BE01 atomizer”, Contrat CORIA/BRITE, Aero Contract BRPR-CT 95-0122, Rapport définitif December 1997
10. K. F. Ren, D. Blondel et G. Gréhan, “Mesures de tailles des gouttes générées par des disques de mousse et de grillage par l’anémométrie phase Doppler”, Contrat PROMAT AIR, septembre 1997
11. K. F. Ren, T. Girasole, G. Gréhan and A. Garo, “Final report Advanced Combustion Research for Energy from Vegetable Oils”, contrat européen ACREVO FAIR-CT 95-0627, décembre 1997
12. D. Blondel, K. F. Ren et G. Gréhan, “Contrat CORIA/IRSID : Mesure de la vitesse et de la taille de bulles dans une veine hydrodynamique de l’IRSID (Metz), simulant une coulée d’acier”, juin 1998
13. H. Bultynck, K. F. Ren et G. Gréhan”, “Contrat CORIA/CEA : Mesure de la vitesse et de la position de particules dans une couche limite, Mars 1998
14. C. Rozé, T. Girasole, K. F. Ren et G. Gréhan, “Mesure par turbidimétrie d’un brouillard : formation et réalisation d’une chaîne de mesure”, Contrat CETE, 1998
15. K. F. Ren et G. Gréhan, “Contrat CORIA/EDF : Mesure dans une turbine par turbidimétrie : Campagne de Pise, 10-14 Juin 1998
16. K. F. Ren et G. Gréhan, “Contrat CORIA/EDF : Mesure dans une turbine par turbidimétrie : Campagne de Fusina, 20-24 Octobre 1998
17. K. F. Ren et G. Gréhan, “Mesure des gouttelettes d’huile dans un moteur par turbidimétrie”, Contrat avec la société Filtrauto, 1999
18. G. Boulnois, K. F. Ren, T. Girasole, G. Gouesbet et G. Gréhan, “Rouen final report contribution (Theoretical evaluation of a Shadow Doppler Velocimetry)¹”, contrat européen JOULE(Energy efficient, intensified spray drying), 2000
19. G. Boulnois, O. Trohel, K. F. Ren, F. Dionnet et G. Gréhan, “Mesures par turbidimétrie dans l’écoulement de Blowby”, Rapport technique, LESP, UMR 6614/CORIA, CNRS-Université et INSA de Rouen, 2000
20. K. F. Ren et G. Gréhan, “Simulation de la réfractométrie d’arc-en-ciel pour la mesure de la fibre optique”, rapport du contrat ALCATEL, juillet 2001

6.7 Logiciels

1. K. F. Ren et G. Gréhan, **DISTINV** et son mode d’emploi — Distribution de taille de goutte par inversion des mesures de coefficients d’extinction spectraux. Ce travail, sous

¹Un CD-ROM a été fourni avec un logiciel pour visualiser l’évolution d’images de la particule en fonction de la position, de la taille de particule et de la forme du faisceau d’éclairage

- contrat LESP–EDF (1995), a été consacré à la programmation en fortran d’une interface conviviale sous forme de menu et à la quantification de la qualité du programme d’inversion d’EDF.
2. K. F. Ren et G. Gréhan, **RINVERSE** Ce travail, aussi sous contrat LESP–EDF (1996), est dédié à développer une *nouvelle méthode d’inversion* stable pour déduire la distribution en taille des gouttes de vapeur à partir de la mesure du spectre d’extinction. Ce logiciel, basé sur l’algorithme de “moindre carré non-négatif”, est très stable et robuste. Il est, à notre connaissance, l’un des meilleurs dans ce domaine. Il est utilisé pour la mesure de vapeur dans les turbines EDF et la recherche des caractéristiques d’évaporation et d’inflammation du colza pour le contrat ACREVO.
 3. K. F. Ren et G. Gréhan, **SPECTEXT** : Ce logiciel a été réalisé sous contrat LESP – EDF dans le but du calcul direct d’un spectre d’extinction pour une distribution en tailles des gouttes donnée afin de bien comprendre l’évaluation du spectre d’extinction pour différents paramètre et tester le logiciel **RINVERSE**. La dernière version développée sous Delphi permet de modifier la distribution et l’indice de réfraction manuellement et de visualiser directement l’évolution du spectre d’extinction.
 4. K. F. Ren et F. Corbin, **OI2000**, un logiciel d’acquisition du spectromètre Ocean Optics qui, avec le **RINVERSE**, permet de mesurer la distribution en tailles des gouttes. Il a été utilisé pour plusieurs contrats de recherche et par plusieurs laboratoires (voir la partie “activités de recherche” pour le détail).
 5. K. F. Ren, **RadiaPress** : Sous contrat Genoptix (Californie, USA), ce travail est consacré à développer un logiciel permettant de prédire la pression de radiation exercée sur une sphère (homogène ou stratifiées concentrique) éclairée par un faisceau gaussien de section circulaire ou elliptique, ou par un faisceau de forme quelconque, dans le cadre de la Théorie de Lorenz-Mie Généralisée – solution rigoureuse des équations de Maxwell.

Deuxième partie

Rapport scientifique

光是美的源泉
光学是数学家的天堂
光测技术是实验科学的利剑

La lumière est la source de la beauté,
L'optique est un paradis pour les mathématiciens,
Le diagnostic optique est un outil indispensable pour les
chercheurs expérimentateurs.

Chapitre 1

Introduction

La diffusion de la lumière désigne l'interaction entre un rayonnement optique (ou électromagnétique au sens large) et des objets diffusant. On distingue deux types de phénomènes : la diffusion élastique (la fréquence de la lumière diffusée est la même que celle de la lumière incidente) et la diffusion non-élastique (la fréquence de la lumière diffusée est différente de celle de la lumière incidente, comme dans la diffusion de Raman). Mes activités de recherche sont axées principalement sur la diffusion élastique, ou plus particulièrement sur la diffusion par des particules de forme régulière comme la sphère et le cylindre circulaire et ses applications à la métrologie optique et au diagnostic des milieux diphasiques.

La diffusion élastique est un domaine de recherches classiques. Les théories ou les méthodes utilisées peuvent être classifiées selon les objets diffusant et la lumière d'éclairage.

Une grande variété d'objets diffusant a été étudiée. Cependant les recherches se sont axées principalement sur les particules sphériques et cylindriques[12, 77, 76]. Ces deux bornes sont les plus simples à décrire mathématiquement et les plus rencontrées dans la pratique. Une étude approfondie de la diffusion de ces particules nous permet de prédire beaucoup de phénomènes et de les appliquer dans la recherche en métrologie optique.

Par contre, la forme des faisceaux d'éclairage était peu prise en compte. Beaucoup de recherches sont limitées à la diffusion d'ondes planes[8, 12].

Les théories les plus répandues sont l'optique géométrique et la théorie de Lorenz-Mie. La première n'est valide que pour des tailles des objets diffusant grandes devant la longueur d'onde du rayonnement incident[138]. Grâce à ses avantages de calcul rapide et de compréhension directe, elle est largement utilisée pour les analyses et les calculs. La théorie de Lorenz-Mie décrit la diffusion d'une onde plane par une particule sphérique[12]. Cette théorie est rigoureuse. Mais elle ne prend pas en compte l'éclairage non-uniforme du faisceau incident sur la particule. Dans certains cas, la théorie de diffraction est aussi utilisée[85, 95].

Depuis l'invention du laser, la métrologie optique a connu un formidable essor grâce aux propriétés de la lumière émise. Beaucoup de nouvelles techniques de diagnostics optiques ont été développées[39, 11, 132]. L'anémométrie phase Doppler permet en particulier de mesurer simultanément les vitesses et les tailles de particules traversant un petit volume défini par l'intersection des deux faisceaux incidents[24, 23, 74]. La PIV (Particle Image Velocimetry en anglais) est utilisée pour obtenir un champ de vitesse des particules transportées par un écoulement[127, 25]. La réflectométrie d'arc-en-ciel permet de mesurer avec une grande précision l'indice de réfraction et donc la température de particules ainsi que leurs tailles[137]. Cependant, l'analyse et l'interprétation de ces mesures sont souvent basées sur l'hypothèse d'un éclairage uniforme. Une théorie rigoureuse pour traiter la diffusion d'une particule par un faisceau d'extension finie est nécessaire pour décrire tous les phénomènes et améliorer les techniques de mesure. De plus, un faisceau fortement focalisé ou dissymétrique comme la nappe laser ou le faisceau laser en mode TME01* a des effets particuliers, ce dernier est notamment intéressant pour la manipulation de

petites particules et pour développer des nouvelles techniques de mesures.

Les théories de Lorenz-Mie généralisées (TLMG) développées au sein du LESP, basées sur la résolution rigoureuse des équations de Maxwell, ont ouvert de nouvelles perspectives dans l'étude de la diffusion de la lumière et permis d'étudier rigoureusement la diffusion d'un faisceau d'extension finie par une particule mathématiquement régulière (sphère homogène ou à couches concentriques, cylindre circulaire homogène ou concentrique, cylindre elliptique, sphéroïde, etc.) sans limite sur la taille et l'indice complexe de réfraction[52, 42]. Elle a été développée initialement pour la diffusion d'un faisceau gaussien circulaire par une particule sphérique homogène[38, 60, 88, 46, 52, 86], puis étendue au faisceau nappe laser[104, 48, 117, 118], aux sphères multicouches[96, 125], aux cylindres circulaires[122, 57, 91] ou elliptique[90, 55, 56, 53, 54] et récemment au sphéroïde[71, 73, 69, 70]. Beaucoup de phénomènes particuliers liés aux effets d'éclairage non-uniforme tels que résonances et pression de radiation[119], pression de radiation inverse[121], couple optique[100, 98] et ambiguïté de trajectoire[58, 61] dans la mesure par la technique phase Doppler ont été étudiés. Cette théorie a été appliquées dans la recherche en métrologie optique comme le phase Doppler, l'imagerie de petites particules, la réfractométrie d'arc-en-ciel, la lévitation optique.

Mes travaux de recherche dans ce domaine concernent principalement la diffusion de faisceaux d'extension finie par les deux types de particules les plus courants : sphères et cylindres, homogènes ou multicouches concentriques. Les domaines de recherche peuvent alors être représentés par la figure 1.1.

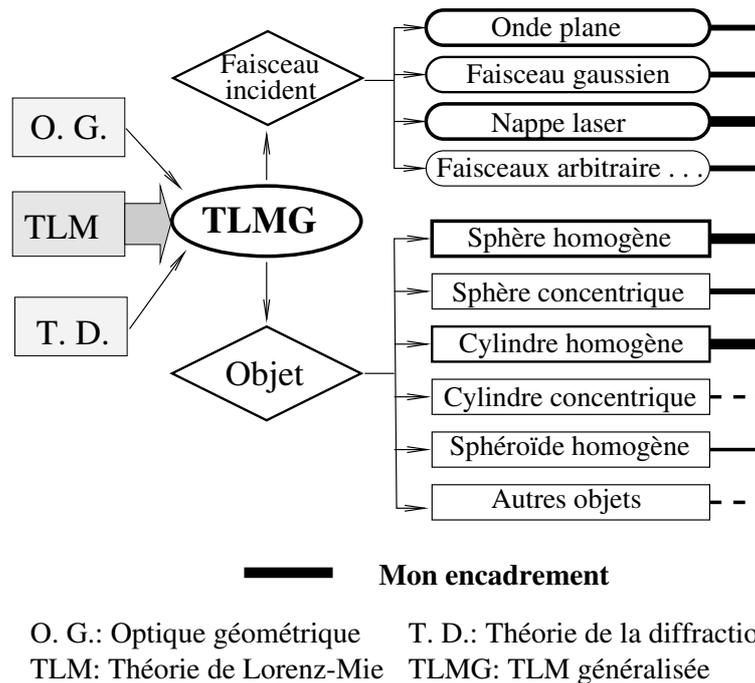


FIG. 1.1 – Domaines de recherches théoriques

La procédure pour développer une théorie de diffusion de la lumière par une particule de forme particulière consiste, dans le cadre des TLMG, en deux étapes : la description du faisceau d'éclairage dans un repère (sphérique, cylindrique par exemple) adapté à la forme de la particule à étudier, et l'application des conditions aux limites afin d'établir les relations entre les quantités diffusives, la forme du faisceau incident et les coefficients de diffusion.

Les études sur la diffusion d'un faisceau quelconque par une particule sphérique et cylindrique

circulaire dans le cadre de la TLMG montrent que toutes les quantités diffusives de la TLMG peuvent être exprimées sous la forme :

$$Q = \sum_n \sum_m F_n^m C_n^m A_n^m$$

où les C_n^m sont les coefficients de forme du faisceau incident (g_n^m pour la sphère et $I_n(\gamma)$ pour le cylindre, dans ce dernier cas l'addition en n devient une intégration sur γ) qui dépendent de la forme du faisceau et de la position du faisceau par rapport à la particule diffusant. Les A_n^m sont les coefficients de diffusion qui ne dépendent que des propriétés de la particule, telles que la forme, la taille, l'indice de réfraction. Ce sont, dans le cas d'une sphère, c_n et d_n pour les champs internes, et a_n and b_n pour les champs diffusés. Tandis que F_n^m sont les facteurs indépendants du faisceau et de la particule diffusant.

Ainsi, l'étude de la diffusion d'un faisceau laser de forme spécifiée par une particule nécessite premièrement une description mathématique du faisceau. Cette description pour le faisceau gaussien a été exhaustivement étudié par Gouesbet et al [21, 43, 6]. Le faisceau nappe laser est largement utilisé dans le diagnostic optique comme la PIV. Durant ma thèse, j'ai obtenu une telle description pour ce faisceau par deux méthodes différentes : le développement en spectre d'ondes planes et le modèle de Davis. L'approximation de la description a été discutée exhaustivement[117]. En connaissant cette description, nous pouvons évaluer les coefficients de forme du faisceau pour un système de coordonnées correspondant à la forme de la particule.

Au niveau de la forme de la particule, la théorie est bien fondée pour la diffusion d'une particule sphérique éclairée par une onde plane ou un faisceau quelconque[44, 87, 52, 7]. En revanche, dans le cas de la diffusion par un cylindre, s'il existe depuis longtemps la théorie de diffusion de l'onde plane[12] et récemment des travaux sur la diffusion d'un faisceau gaussien à deux dimensions par Zimmermann et al[144], il faut attendre le travail initial de Gouesbet pour résoudre le problème de diffusion d'un cylindre infini par un faisceau quelconque à l'aide de la théorie des distributions[32]. Me basant sur ce travail j'ai pu développer une approche, dite méthode spectrale, plus performante pour le calcul numérique[122, 57, 91]. Nous avons démontré que cette méthode spectrale est équivalente à la théorie en terme des distributions.

Au point de vue des applications, l'intérêt des TLMG dépend fortement de notre capacité à calculer numériquement tous les coefficients de forme du faisceau et les coefficients de diffusion. Quatre approches ont été développées pour le faisceau gaussien (ou standard) : La méthode intégrale issue directement de la solution des équations de Maxwell est la plus rigoureuse et souple¹ mais le calcul numérique est onéreux[86, 104, 50]. La méthode des séries finies est aussi théoriquement rigoureuse mais elle manque la souplesse²[45, 104]. Le faisceau standard, avec des avantages et des inconvénients similaires à ceux des séries finies, permet d'étudier des faisceaux fortement focalisés[98, 101]. La méthode la plus adaptée à des applications est l'approximation localisée. Le calcul est très rapide[47, 114] et la validité a été démontrée rigoureusement[37, 84, 51]. Je me suis beaucoup consacré à l'amélioration (la vitesse de calcul, la souplesse et la stabilité numérique) et l'extension de cette méthode. Ce travail concerne principalement : (1) L'étude des relations de symétrie des coefficients g_n^m du faisceau lui même et celles du champ diffusé[120], (2) L'application de l'approximation localisée au calcul des coefficients d'une nappe laser[118], (3) L'introduction d'une nouvelle méthode — approximation localisée intégrale pour le calcul des coefficients g_n^m [112] et (4). l'introduction de l'approximation localisée au cylindre circulaire afin de calculer les coefficients de forme du faisceau dans le système cylindrique[111, 57, 91, 49, 123].

¹Il suffit de changer le noyau d'intégrale lorsque le profil du faisceau incident est modifié

²Une modification de profil du faisceau nécessite de reprendre le travail analytique pour obtenir les séries finies correspondantes.

D'autre part, le calcul de coefficients de diffusion est aussi un travail essentiel. En collaboration avec le groupe des Professeurs Wang et Wu, nous avons développé un code performant pour le calcul des coefficients de diffusion d'une sphère multicouches [141]. En outre, j'ai écrit un code performant pour le calcul des coefficients de diffusion d'un cylindre éclairé par une onde plane avec un angle d'incidence arbitraire.

Mon travail sur les techniques de mesures optiques est consacré principalement à l'application des outils théoriques développés aux diagnostics optiques tels que l'imagerie, l'arc-en-ciel, la turbidimétrie et l'anémométrie phase Doppler.

Le modèle d'imagerie développé durant ma thèse nous permet de prévoir les caractéristiques d'images d'une sphère[126] et d'un cylindre en défaut de mise au point[80, 126] et d'évaluer le fonctionnement du SDV (Shadow Doppler Velocimetry en anglais)[31, 110]. Le modèle de la diffusion de deux faisceaux a été développé initialement pour évaluer un système de mesure réel DCW (dual-cylindrical wave en anglais)[94] et pour valider la théorie de diffusion d'une nappe laser[63]. Ce modèle a été aussi utilisé pour étudier la technique du phase Doppler[15, 16].

L'anémométrie phase Doppler est une des techniques de diagnostics optiques les plus performantes. Je me suis engagé dans plusieurs contrats industriels pour les mesures de vitesses et/ou de tailles des gouttes par le phase Doppler [82, 106, 107]. La TLMG pour le cylindre a été appliquée à l'étude du phase Doppler pour cylindre[28].

La réfractométrie d'arc-en-ciel classique permet la mesure de l'indice de réfraction et de la taille de la particule. L'interprétation basée sur l'optique géométrique et l'interférence permettent de relever approximativement la relation entre ces paramètres et les quantités diffusives. Seule la TLMG nous permet de séparer différents modes et de prédire rigoureusement la structure fine d'un arc-en-ciel en prenant en compte les gradients de température et/ou d'indice de réfraction dans les gouttes[20, 141, 66, 65]. Sur cette base nous avons réalisé un système de mesure très précis selon la fréquence ripple et le déphasage angulaire. L'un des avantages de cette méthode est que l'on n'a plus besoin de connaître la position angulaire précise du détecteur[64]. Elle a été appliquée à l'étude de l'instabilité et au gradient de température d'un jet liquide. On l'étend actuellement pour la mesure de la fibre.

Ce mémoire est organisé comme suit : les chapitres 2 et 3 présenteront mes travaux de recherche fondamentaux, y compris le développement des théories et des techniques de calculs numériques. Les applications des outils théoriques et numériques aux diagnostics optiques seront décrits dans le chapitre 4. Dans le dernier chapitre, je présenterai mes projets de recherche à venir.

Chapitre 2

Diffusion de faisceaux finis par des particules sphériques

Lorsqu'une particule sphérique est éclairée par un faisceau lumineux, le champ interne de la particule et le champ diffusé s'obtiennent par la résolution des équations de Maxwell en coordonnées sphériques. Ces champs dépendent à la fois des propriétés de la particule comme la taille et l'indice complexe de réfraction, et de la forme du faisceau incident. Si la particule est très petite devant la largeur du faisceau incident (ou plus généralement l'éclairage sur la particule est uniforme), ce dernier peut être considéré comme une onde plane. Les champs interne et diffusé ne dépendent que des propriétés de la particule. Toutes les quantités de diffusion (champ interne, champ diffusé, section d'extinction, d'absorption, pression de radiation ...) sont déterminées par les coefficients de diffusion. Le calcul de ces coefficients est donc un travail essentiel.

Par contre, si la particule n'est pas suffisamment petite (l'éclairage n'est pas uniforme), le profil du faisceau incident doit être pris en compte (figure 2.1). Dans ce cas, on doit être capable de décrire ce faisceau incident. Ce travail consiste souvent en deux étapes : obtention de la description analytique du faisceau incident et développement de cette forme analytique dans le système de coordonnées convenables à la forme de la particule. Cette description est évidemment indépendante de la particule.

Dans le cadre de la TLMG, le faisceau incident est décrit avec deux séries de coefficients de forme $g_{n,TE}^m$ et $g_{n,TM}^m$ ¹ et les quantités diffusives sont toutes sous la forme d'une sommation de terme de produits de ces coefficients de forme du faisceau et des coefficients de diffusion de la particule. Une composante de champ diffusé, par exemple, s'écrit :

$$E_{\theta}^s = \frac{iE_0}{kr} \exp(-ikr) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n g_{n,TM}^m \tau_n^{|m|}(\cos \theta) + im b_n g_{n,TE}^m \pi_n^{|m|}(\cos \theta) \right] \exp(im\phi)$$

et la section d'extinction vaut :

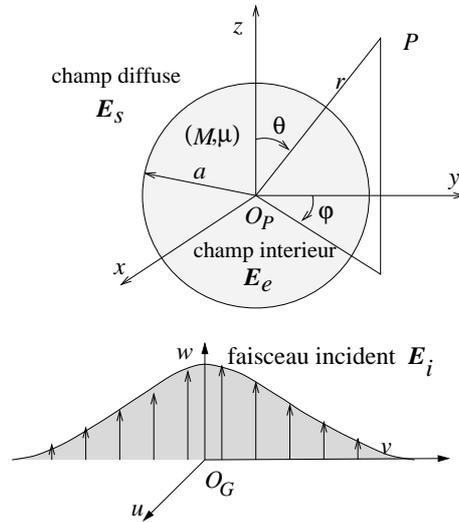


FIG. 2.1 – Théorie de Lorenz-Mie généralisée décrivant la diffusion d'un faisceau arbitraire par une particule sphérique

¹Les coefficients de forme du faisceau peut être obtenu aussi par la mesure[98, 102, 99].

$$C_{ext} = \frac{\lambda^2}{\pi} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n+|m|)!}{(n-|m|)!} (a_n |g_{n,TM}^m|^2 + b_n |g_{n,TE}^m|^2)$$

Sachant que les coefficients de diffusion a_n and b_n ne dépendent que des propriétés de la particule et sont identiques à ceux de la Théorie de Lorenz-Mie classique, nous pouvons calculer toutes les quantités diffusives. Les calculs de ces deux types de coefficients sont essentiels et primordiaux.

Je présente donc dans les deux premières sections mes contributions à la description analytique d'un faisceau nappe laser et à l'évaluation numérique des coefficients de formes de faisceau et dans la section 3 le calcul des coefficients de diffusion pour une sphère multicouche. La section 4 est dédiée à la discussion des effets mécaniques exercés par le faisceau incident sur la particule diffusante.

2.1 Description de faisceaux d'extension finie

L'étude de la diffusion d'un faisceau laser par une particule nécessite premièrement une description mathématique du faisceau. Mon premier travail sur ce sujet était la description d'une nappe laser. Ce faisceau est défini comme un faisceau gaussien avec une section elliptique. Il possède deux axes au col w_{0x} et w_{0y} , et est donc un faisceau non axisymétrique (figure 2.2). En changeant les longueurs des deux axes au col w_{0x} et w_{0y} , on peut obtenir de formes de faisceau très différentes. Par exemple, lorsque $w_{0x} = w_{0y}$, un faisceau gaussien circulaire est retrouvé. En posant $w_{0x} \gg w_{0y}$ on obtient un faisceau quasiment cylindrique. Cette forme du faisceau trouve de plus en plus d'applications dans des techniques de mesure pour élargir le domaine mesurable ou pour simplifier le traitement des signaux.

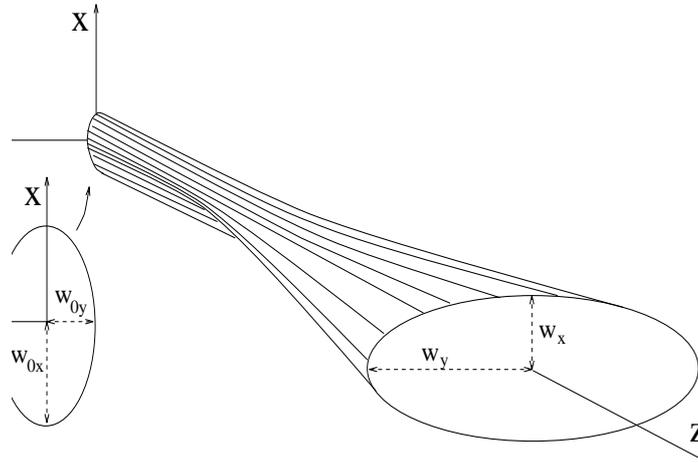


FIG. 2.2 – Projection oblique d'une nappe laser

Durant ma thèse, j'ai obtenu la description mathématique par deux méthodes différentes[104, 117] : le développement en spectre d'ondes planes et le modèle de Davis. L'approximation de la description est discutée exhaustivement : en partant du potentiel scalaire, vis-à-vis des équations de Maxwell pour les systèmes de coordonnées cartésiennes et sphériques, et du point de vue de la TLMG. J'ai démontré que l'approximation est à l'ordre $O(s^2)^2$ lorsque le point observé est

² s est un petit paramètre défini par la longueur d'onde et le rayon au col du faisceau. Plus le faisceau est large, plus ce paramètre est petit.

dans la région du faisceau, c'est-à-dire, lorsque ce point est situé dans l'ellipse définie par les deux axes locaux du faisceau w_x et w_y .

Lorsque le faisceau est fortement focalisé, une description d'ordre plus élevé est nécessaire [104, 48]. Un faisceau gaussien circulaire de l'ordre jusqu'à $O(s^5)$ a été également étudié avec différentes approches telles que la description électromagnétique, la description avec les coefficients de forme du faisceau [104] et la méthode dite "faisceau standard" [98, 101].

D'autre part, dans la TLMG, les expressions du champ incident sont développées en potentiels scalaires de Bromwich avec deux séries infinies des coefficients $g_{n,TM}^m$ et $g_{n,TE}^m$, dits les coefficients de forme du faisceau. Ceux-ci prennent en compte la description du faisceau. Ils sont déterminés par le champ incident. Bien connaître les relations de symétrie des coefficients de forme du faisceau g_n^m nous permet d'étudier des caractéristiques du champ diffusé, d'interpréter et vérifier la cohérence des résultats numériques et des valeurs physiques mesurables, et d'améliorer ou d'accélérer le calcul des coefficients g_n^m .

En partant de conditions générales du champ incident, j'ai établi les relations de symétrie des coefficients g_n^m et celles du champ diffusé [120]. Ces relations de symétrie obtenues peuvent être appliquées directement aux champs incidents qui possèdent la même symétrie. Les relations entre les coefficients g_n^m permettent d'obtenir les expressions des quatre coefficients $g_{n,TM}^m, g_{n,TM}^{-m}, g_{n,TE}^m$ et $g_{n,TE}^{-m}$ à partir de l'une d'entre elles. La méthode proposée peut aussi être appliquée à l'étude des champs possédant d'autres symétries.

2.2 Calcul des coefficients de forme du faisceau

Dans le cadre de la TLMG pour la sphère, les deux séries des coefficients $g_{n,TM}^m$ et $g_{n,TE}^m$ sont déterminées par les composantes radiales électrique et magnétique E_r et H_r du champ incident. Ces relations issues directement de la TLMG sont sous forme intégrale :

$$g_{n,TM}^m = C_{n,B}^{|m|} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} E_r(a_s, \theta, \phi) P_n^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta \exp(-im\phi) d\phi d\theta \quad (2.1)$$

$$g_{n,TE}^m = C_{n,B}^{|m|} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} H_r(a_s, \theta, \phi) P_n^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta \exp(-im\phi) d\phi d\theta \quad (2.2)$$

où

$$C_{n,B}^{|m|} = \frac{i^{n+1} (n - |m|)!}{4\pi (n + |m|)!} \frac{a_s}{\psi_n^{(1)}(a_s)}$$

En possédant la description analytique, on peut, en principe, calculer ces coefficients. En revanche, cette évaluation numérique est souvent une tâche difficile. La qualité des algorithmes (vitesse de calcul, souplesse d'adaptation aux différents profils de faisceaux et la stabilité des résultats numériques) est critique pour l'application de la théorie.

Beaucoup de travaux remarquables ont été faits afin d'améliorer le calcul pour le faisceau gaussien. Parmi les méthodes possibles, telles que l'intégration, le faisceau standard, les séries finies et l'approximation localisée, la première est la définition originale de ces coefficients et la dernière est la méthode la plus rapide. Les techniques de calcul numérique des g_n^m basées sur ces deux méthodes sont exhaustivement discutées et soigneusement étendues au faisceau nappe laser [104, 118]. Une nouvelle méthode – l'approximation localisée intégrale – est développée qui combine les avantages de souplesse de la méthode intégrale et de rapidité de l'approximation localisée [112]. Les caractéristiques des différentes méthodes de calcul des coefficients de forme du faisceau sont comparées dans le tableau 2.2.

TAB. 2.1 – Comparaison des caractéristiques des différentes méthodes de calcul des coefficients du faisceau

méthode	intégrale		séries finies	approx. localisée	
	F1	F2		classique	intégrale
souplesse	oui	oui	non*	non*	oui
temps de calcul	long	très long	rapide	très rapide	très rapide
stabilité	bonne**	très bonne	pas bonne	bonne	très bonne

* un travail analytique nécessaire pour chaque profil de faisceau

** dépendant du choix du paramètre a_s pour l'intégration, le meilleur choix étant

$$a_s = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2\pi}$$

La méthode intégrale est souple et théoriquement rigoureuse[104, 50]. Elle peut être facilement appliquée aux faisceaux quelconques. Il existe deux méthodes intégrales. La méthode F1 (équations 2.1 et 2.2), qui utilise une intégration double pour le calcul des g_n^m et simple pour le calcul des g_n , est relativement rapide. Mais sa précision dépend du choix du rayon de la surface sphérique a_s utilisé et de la qualité de description du faisceau. J'ai trouvé que le meilleur choix de ce rayon est $ka_s = n + 1/2$, où n est l'indice des g_n^m . La précision des g_n^m calculés est à l'ordre de la description du faisceau. La méthode F2, qui utilise une intégration triple pour le calcul des g_n^m et double pour le calcul des g_n , est stable, mais onéreuse, car elle nécessite une intégration de plus sur kr de zéro à l'infini par rapport à la méthode F1. J'ai montré que c'est l'intervalle environnant de $kr \sim n$ qui contribue le plus à l'intégration. Et donc différents intervalles peuvent être pris pour l'intégration sur kr , d'après la précision envisagée.

L'approximation localisée a été introduite par l'analogie avec le principe de localisation de van de Hulst[138] sans justification mathématique rigoureuse[59, 47], et puis la validation rigoureuse a été démontrée par les travaux de Gouesbet et Lock pour un faisceau gaussien[37, 84, 51]. Cette démonstration a permis aussi d'introduire le concept de faisceau "standard" et une méthode dite s -expansion pour calculer les coefficients de faisceau, et a modifié légèrement l'opérateur de localisation.

J'ai étendu cette méthode avec succès au faisceau nappe laser [115, 118], au faisceau gaussien circulaire jusqu'à l'ordre $O(s^5)$ [104] et au faisceau laser en mode TEM_{01}^* . Même si la sommation devient triple pour une nappe laser au lieu d'une sommation simple pour un faisceau gaussien circulaire, on peut encore gagner trois ou quatre ordres de grandeur en temps de calcul par rapport à la méthode intégrale, en cherchant un algorithme efficace. Sa validité est démontrée en comparant avec les résultats numériques de la méthode intégrale. Les erreurs relatives des g_n^m calculés dépendent de l'indice m en $0.1 * m\%$ par rapport aux résultats de la méthode intégrale. Mais lorsque l'indice n est très grand, une instabilité numérique apparaît.

Afin de résoudre le problème d'instabilité numérique et rendre le calcul plus rapide j'ai introduit et étudié une méthode, dite *approximation localisée intégrale*, basée sur l'approximation localisée et la méthode intégrale[104, 112]. Cette méthode applique directement l'approximation localisée aux composantes radiales du champ incident, donnant une forme intégrale simple pour calculer les coefficients g_n^m . Elle combine les avantages de souplesse de la méthode intégrale et de rapidité de l'approximation localisée. De plus, elle n'a plus de problème d'instabilité numérique même pour un très grand indice n .

Les coefficients de forme d'un *faisceau quelconque* sont calculés avec les deux expressions :

$$g_{n, TM}^m = \frac{Z_n^m}{2\pi E_0} \int_0^\infty \overline{E_r^i} \left(r = \rho_n, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi \right) \exp(-im\varphi) d\varphi \quad (2.3)$$

$$g_{n, TE}^m = \frac{Z_n^m}{2\pi E_0} \int_0^\infty \overline{H_r^i} \left(r = \rho_n, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi \right) \exp(-im\varphi) d\varphi \quad (2.4)$$

où Z_n^m est un facteur de normalisation, $\rho_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2\pi}$. En connaissant les composantes radiales des champs électrique et magnétique E_r^i et H_r^i , nous pouvons calculer tous les coefficients en les introduisant dans ces expressions et en remplaçant les coordonnées r et θ par les valeurs correspondantes. Si les intégrales peuvent être réalisées analytiquement, on trouve également des expressions simple ou en séries.

Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- L’approximation localisée intégrale est plus stable que l’approximation localisée classique. Cela a été remarqué dans ma thèse.
- Le complexité est indépendante de la forme du faisceau. Puisque l’approximation localisée intégrale est une intégration simple pour toutes les formes de faisceau à étudier, le temps de calcul ne change pas évidemment de l’un à l’autre, tandis que l’approximation localisée classique dépend fortement de la complexité et de la symétrie du faisceau. Par exemple, pour un faisceau gaussien dans le cas sur l’axe, les coefficients sont exprimés avec une fonction exponentielle ; dans le cas hors axe, ils sont exprimés comme une addition simple ; pour une nappe laser, dans le cas sur l’axe, les coefficients sont exprimés comme une addition simple, et dans le cas hors axe, ils sont exprimés comme une addition double.
- Le calcul est beaucoup plus rapide surtout lorsque l’indice n est important. On compare dans le tableau 2.2 les temps de calcul pour un faisceau nappe laser de rayons au col $w_{0x} = 3$ mm, $w_{0y} = 2$ μm et de longueur d’onde $\lambda = 0.5145$ μm , dans le cas sur l’axe ($x_0 = y_0 = 0$, $z_0 = 0.2$ mm) et hors-axe ($x_0 = 0$, $y_0 = 16.5$ μm , $z_0 = 0.2$ mm). Les nombres de points d’intégration sont de 32 dans le cas sur l’axe et de 64 dans le cas hors axe. Les calculs sont effectués pour tous les coefficients de l’indice n inférieur à n_{max} avec la méthode d’intégration de Gauss-Legendre. On trouve que l’approximation localisée classique est plus rapide que l’approximation intégrale pour n_{max} inférieur à 600 et plus lente pour les indices plus importants, le temps de calcul est de la même grandeur. Par contre, dans le cas hors axe, l’approximation localisée intégrale est toujours beaucoup plus rapide que l’approximation localisée classique, environ 3500 fois plus rapide pour $n = 500$, puisque les coefficients sont calculés avec une addition double.

TAB. 2.2 – Temps de calcul (CPU) en secondes

sur l’axe			hors axe		
n_{max}	AL	ALI	n_{max}	AL	ALI
200	0.9	2.4	100	384.5	2.3
400	2.7	4.8	200	1046.3	4.6
600	6.2	7.2	300	4254.4	6.9
800	11.9	9.8	400	13900.8	9.2
900	17.5	10.9	500	38636.2	11.4

AL : approximation localisée en séries

ALI : approximation localisée intégrale

- En effet, les intégrales (2.3) et (2.4) sont deux transformées de Fourier, nous pouvons donc bénéficier des techniques bien développées pour la transformée de Fourier rapide afin d’accélérer le calcul.
- Cette méthode est facile à appliquer à des faisceaux de forme différentes. Nous avons examiné la validité pour une onde TEM₀₁* par exemple. De plus, cette méthode nous permet de calculer les coefficients de forme du faisceau en utilisant seulement le champ dans un plan $z = 0$ [112]. Dans la figure 2.3 on compare les champs électriques originaux et reconstruits à partir des coefficients calculés. L’accord est parfait.

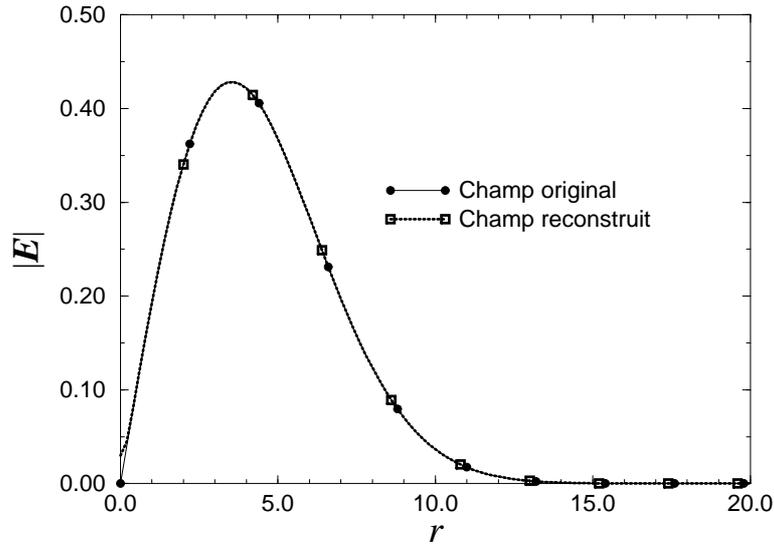


FIG. 2.3 – Comparaison des champs original et reconstruit

2.3 Diffusion de la lumière par des particules multicouches

On rencontre souvent des particules multicouches dans les applications telles que l’environnement, la combustion, la communication, la biologie, le génie chimique. Par exemple, lorsqu’une goutte est injectée dans un milieu chaud, son indice de réfraction n’est plus homogène, elle peut être simulée comme une particule multicouche concentrique. Une théorie et un outil numérique sont donc nécessaires. Une particule multicouches désigne dans ce rapport une particule avec un gradient radial de l’indice complexe de réfraction.

D’une part, pour une sphère, si la taille est suffisamment grande devant la longueur d’onde du faisceau incident, l’optique géométrique s’applique. Par contre, elle est inapplicable pour prédire la structure fine de l’arc-en-ciel par exemple. La théorie de diffusion de la lumière par des particules multicouches doit être appliquée et l’algorithme doit être aussi applicable à de grosses particules.

Ainsi, pour simuler un gradient d’indice très fin, des particules chauffées dans la combustion par exemple, de nombreuses couches sont nécessaires. En conséquence, un algorithme applicable aux grosses particules avec nombreuses couches est exigé. Plusieurs auteurs ont contribué à l’amélioration de la robustesse de l’algorithme. Kerker[76], Bohren et Huffman[12] présentent sous forme de déterminants une solution analytique des coefficients de diffusion. Toon et Ackermann[133] réécrit les équations de Aden et Kerker[1] pour mieux traiter le problème numérique. Mais les erreurs parasites (round-off) numériques introduisent des inexactitudes importantes qui s’accumulent et/ou le problème de “overflow” apparaît lorsqu’on calcule les fonctions de Riccati-Bessel.

Pour résoudre ce problème, Bhandari[10] a proposé en 1985 une procédure itérative dans laquelle les coefficients de diffusion de la i -ème couche sont liés à ceux de la $(i - 1)$ -ème couche. Cependant, le schéma de calcul algorithmique est compliqué. Ce travail repris par Kai et Massoli[75] donne d’excellents résultats selon ces auteurs, pour des petites particules. Parallèlement, Wang et Wu[140] ont développé un algorithme de récurrence plus stable. Cet algorithme inclut les calculs des dérivées logarithmiques et des rapports de fonctions de Riccati-Bessel. Ils ont examiné la stabilité et la convergence de leur algorithme.

Toutefois, Wang et Wu travaillent dans le domaine de propagation de micro-ondes. Les particules considérées ne sont pas très grandes devant leur longueur d’onde.

Après un travail minutieux sur l'algorithme, un code performant, très robuste et très rapide a été écrit en Fortran pour calculer les coefficients de diffusion d'une sphère multicouches en collaboration avec l'Université de Xidian[141]. Il peut être utilisé pour une très grosse particule avec de très nombreuses couches (le produit du paramètre de taille et du nombre de couches peut atteindre 10^6) et facilement intégré dans des applications qui en ont besoin. La seule limite est la mémoire de l'ordinateur utilisé. Les domaines calculables par l'algorithme de Kai et par notre code sont comparés dans la figure (2.4).

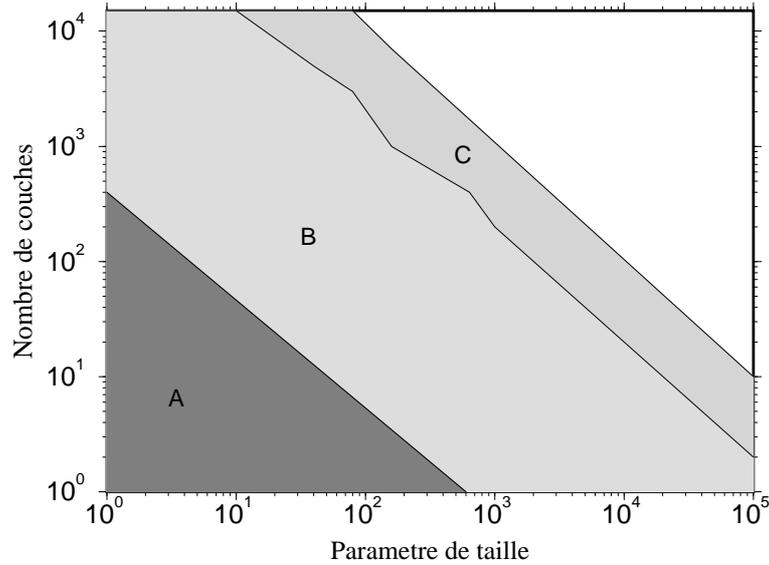


FIG. 2.4 – Domaines calculables des coefficients de diffusion par l'algorithme de Kai et Massoli (A) et par notre code sur un PC (B) ou sur une station de travail (C)

En outre, plusieurs auteurs ont étendu parallèlement cette théorie à la diffusion d'un faisceau gaussien ou arbitraire par une particule sphérique multicouches. Puisque les coefficients de forme du faisceau sont indépendants de la particule diffusant et les coefficients de diffusion a_n and b_n sont identiques lorsque la particule est éclairée par un faisceau arbitraire ou par une onde plane, cet algorithme est applicable pour la diffusion d'une particule multicouches éclairée par un faisceau arbitraire. D'autre part, du point de vue formel, toutes les expressions déduites sur les quantités diffusives en TLMG sont conservées : expressions pour le calcul des diagrammes de diffusion, des sections efficaces, des pressions de radiation et des couples de radiation. Du point de vue du calcul numérique, puisque les coefficients de diffusion n'apparaissent que comme des termes multiplicatifs des coefficients de formes du faisceau et des coefficients de diffusion établis pour un éclairage d'onde plane, seul le programme de calcul numérique de ces coefficients est à modifier.

Les codes développés pour le calcul des coefficients de diffusion d'une particule multicouches et pour le calcul des coefficients de forme du faisceau gaussien ont été utilisés dans des applications diverses comme pour prévoir des diagrammes de diffusion, des arcs-en-ciel[20], des pressions et couples de radiation. J'ai participé au travail d'Onofri[96] pour étendre cette théorie et au travail de Polaert[100] pour le calcul de pression et de couple de radiation d'une particule multicouche éclairée par un faisceau gaussien.

Cependant, le champ interne d'une sphère multicouche n'a pas été traitée. Ce travail devient critique pour la diffusion des pulses de courtes durées ou pour l'étude de phénomènes non linéaires. J'ai repris ce travail récemment et calculé le champ interne et le champ proche de la particule[125].

2.4 Pression de radiation et couple exercés sur la particule

Lorsqu'un faisceau interagit avec une particule, il y a transfert de quantité de mouvement entre le faisceau et la particule. Cette pression de radiation a été étudiée pour l'onde plane par Debye en 1909. Au début des années 1970, Ashkin et Roosen ont montré que la pression de radiation exercée par un faisceau laser de quelques milliwatts est suffisante pour maintenir en équilibre une bille de verre de quelques dizaines de micron, c'est la lévitation optique[2, 3, 128, 130, 129]. Puis, en 1986 Ashkin a montré que lorsque le faisceau laser est extrêmement focalisé (de l'ordre de la longueur d'onde) il existe une région où la pression de radiation est opposée à la direction de propagation de la lumière[5]. Cette pression de radiation inverse permet de manipuler des corps sans contact mécanique et indépendamment de la pesanteur[4]. Ces effets sont à la base des pincettes optiques aux nombreuses applications en biologie et biophysique.

Comme mon premier projet au LESP dans ce cadre, j'ai développé un code dans le cadre de la TLMG pour prédire les forces exercées par un faisceau laser sur des particules homogènes[119]. Nous avons étudié l'importance des résonances sur la pression de radiation. En combinant ce code avec mon sous programme pour le calcul des coefficients de diffusion de particules multicouches, nous avons aussi étudié la pression de radiation pour de telles particule.

En outre, nous avons été les premiers à prédire rigoureusement la pression de radiation inverse dans un cadre unifié, tout en soulignant sa sensibilité aux détails fins de structure du faisceau[124]. Ces prédictions numériques ont été aussi, pour la première fois, confirmées quantitativement par les mesures expérimentales en collaboration avec le Dr. Pouligny du Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux.

J'ai également participé à l'encadrement des travaux de thèse de H. Polaert sur le couple optique exercé sur une particule sphérique homogène et concentrique éclairée par un faisceau gaussien de polarisation linéaire ou circulaire[98, 100].

Chapitre 3

Diffusion de la lumière par des particules cylindriques

Bien que la majorité des efforts aient été dédiés à la recherche sur la diffusion par des particules sphériques, les études de la diffusion par des particules d'autres formes sont aussi souhaitables tant pour des aspects de recherches fondamentales que pour des applications. Parmi tous les types de particules possibles, le cylindre circulaire infini est particulièrement intéressant parce que, d'une part, une solution exacte des équations de Maxwell existe pour l'éclairage de l'onde plane et d'autre part, beaucoup de particules rencontrées dans des procédés industriels possèdent, au moins approximativement, une forme cylindrique, tels que les fibres métalliques, chimiques, de verre, de charbon, les jets liquides, les fils de laine, etc.

Une recherche fondamentale est donc exigée afin d'orienter et de développer les instruments de diagnostic optique puisque ceux-ci sont non-intrusifs et rapides, caractéristiques nécessaires aux moyens de contrôle d'une production moderne par exemple.

Grâce à mes connaissances en algorithmique pour la diffusion d'un cylindre incliné arbitrairement et éclairé par une onde plane, et me basant sur les travaux de Gouesbet pour la diffusion d'un faisceau arbitraire par un cylindre, j'ai proposé une approche différente, dite la méthode spectrale, pour le même problème. Cette approche m'a permis, par analogie avec l'approximation localisée pour la sphère, d'introduire une approximation localisée pour le cylindre afin de calculer les coefficients de forme du faisceau incident.

La géométrie est définie dans la figure 3.1.

3.1 Diffusion de l'onde plane par un cylindre infini

Bien que la théorie de la diffusion du cylindre circulaire infini éclairé par une onde plane avec un angle d'incidence arbitraire existe depuis longtemps[12], le calcul des quantités diffusives n'est pas toujours facile : grosse particule, angle d'incidence très faible par exemple, à cause d'instabilité et d'“overflow” numériques dans le calcul des fonctions de Bessel. Ce sont des cas que nous rencontrons pour étudier la structure de l'arc-en-ciel, par exemple, où nous avons besoin de calculer des diagrammes pour de très grosses particules. Pour la simulation de la répartition de l'intensité diffusée par des fibres dans des matériaux composite avec le code Monte-Carlo, nous rencontrons des cas d'angle d'incidence très faible[29, 30].

A partir du formalisme de Bohren[12], j'ai réécrit les expressions des coefficients de diffusion en fonction des dérivées logarithmiques et des rapports de fonctions de Bessel et de Hankel, permettant de calculer les coefficients de diffusion de très grosses particules avec un angle d'incidence φ très faible. Lorsque l'angle d'incidence tend vers zéro ($\varphi \rightarrow 0$) un formalisme asymptoptique a été trouvé à l'aide du logiciel de calcul formel MAPLE et a été adapté à la programmation

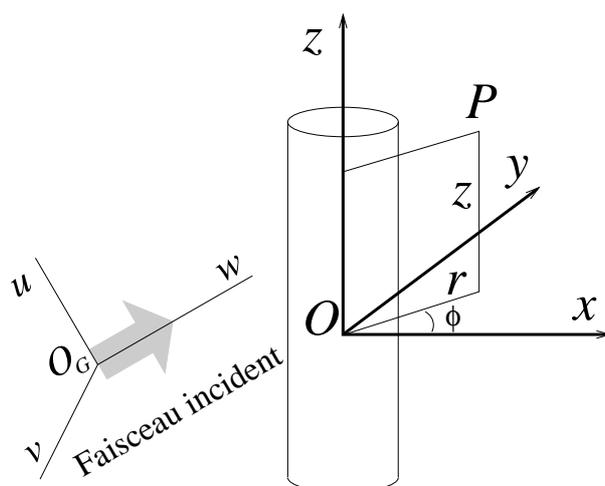


FIG. 3.1 – Géométrie de la diffusion d'un faisceau arbitraire par un cylindre infini

du calcul des coefficients de diffusion. Cet algorithme a été démontré très stable et efficace. Ce travail est aussi essentiel à l'étude de la diffusion d'un *faisceau arbitraire* par un cylindre infini[116].

Le code écrit à partir de cet algorithme a été appliqué à l'étude de l'orientation des fibres dans des matériaux composite[29, 30], de la structure de l'arc-en-ciel et de l'anémométrie Phase Doppler pour le cylindre[93, 97, 27, 28].

Il pourrait être utile de remarquer que la lumière diffusée par un cylindre infini est sur un cône lorsqu'il est éclairé par une onde plane. Ce cône autour du cylindre est défini par la direction de propagation de la lumière incidente. La figure 3.2 que j'ai réalisée avec le logiciel graphique AVS montre les répartitions de l'intensité diffusée pour quatre angles différents d'incidence. Cette figure nous aide beaucoup à comprendre les phénomènes concernant la diffusion par un cylindre[116].



FIG. 3.2 – Diagrammes de diffusion d'un cylindre circulaire éclairé par une onde plane inclinée sous quatre angles différents.

3.2 Diffusion d'un faisceau quelconque par un cylindre infini

La description de l'interaction entre un faisceau finie et un cylindre infini arbitrairement localisé et arbitrairement incliné est un travail de grande difficulté. Premièrement, un cylindre infini est un objet diffusant d'extension infinie. Lorsqu'il est éclairé par une onde plane qui est uniforme dans tout l'espace, le problème devient quasi-bidimensionnel. Quand on compare avec la diffusion d'une sphère éclairée par un faisceau d'extension finie, le faisceau et l'objet diffusant sont tous les deux d'extension finie. En revanche, dans le cas de diffusion d'un cylindre infini par un faisceau d'extension finie, on rencontre le problème d'un objet d'extension infinie éclairé par un faisceau fini. Cela rend le problème beaucoup plus difficile.

Gouesbet a commencé en 1993 à résoudre ce problème en suivant la même procédure que pour la sphère[41, 35], puis il a étudié la séparabilité des variables en coordonnées cylindriques[40, 34, 81]. Il a constaté que seule la théorie des distributions est convenable pour ce problème et obtenu des solutions analytiques dans le cadre de cette théorie pour un cylindre perpendiculaire au faisceau incident et arbitrairement orienté[32, 33].

Me basant sur ces travaux, j'ai :

1. Écrit un code de calcul numérique à partir des solutions analytiques obtenues par Gouesbet[32] pour étudier les caractéristiques de diffusion du cylindre. On trouve que les intensités diffusées divergent lorsque le point d'observation s'éloigne du cylindre ou du centre de faisceau. Pour une compréhension profonde de cette théorie, nous avons étudié le champs incident. En comparant les champs incidents direct et reconstruit avec des approximations jusqu'à l'ordre $O(s^{10})$ ($s = \frac{1}{kw_0}$ est le paramètre du faisceau gaussien, k étant le nombre d'onde et w_0 le rayon au col du faisceau), on trouve que la zone de convergence dépend de la qualité de description du faisceau et est de l'ordre de $w_0/2$ autour du faisceau et $kw_0^2/3$ le long de la direction de propagation du faisceau. En augmentant l'ordre de description du faisceau, la zone de convergence s'accroît de plus en plus lentement.

2. Développé une approche spectrale[111, 123] :

Pour réaliser des calculs numériques efficaces, j'ai proposé une méthode spectrale basée sur le travail effectué par Gouesbet et j'ai retrouvé les mêmes résultats que ceux obtenus par les distributions[105]. Dans cette méthode, les champs incidents et diffusés sont exprimés avec un formalisme équivalent à la TLMG pour la sphère. Les composantes du champs électrique diffusé s'écrivent, par exemple, comme :

$$E_z^s = -\frac{E_0}{(kr)^2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (-i)^m e^{im\phi} \int_{-1}^1 \rho_0^2 S_{m,TM}(\gamma) H_m(\rho_0) e^{i\gamma kz} d\gamma \quad (3.1)$$

$$E_r^s = \frac{E_0}{kr} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (-i)^m e^{im\phi} \int_{-1}^1 [-i\gamma \rho_0 S_{m,TM}(\gamma) H'_m(\rho_0) + m S_{m,TE}(\gamma) H_m(\rho_0)] e^{i\gamma kz} d\gamma \quad (3.2)$$

$$E_\phi^s = \frac{E_0}{kr} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (-i)^m e^{im\phi} \int_{-1}^1 [m\gamma S_{m,TM}(\gamma) H_m(\rho_0) + i\rho_0 S_{m,TE}(\gamma) H'_m(\rho_0)] e^{i\gamma kz} d\gamma \quad (3.3)$$

où $\rho_0 = kr\sqrt{1-\gamma^2}$. Les coefficients $S_{m,TM}$ et $S_{m,TE}$ sont des produits des coefficients de diffusion a_m et b_m pour le cylindre et des coefficients de forme du faisceau incident. Les indices I et II désignent les deux différentes polarisations du champs incident.

$$S_{m,TM} = -b_{mI} I_{m,TM} + b_{mII} I_{m,TE} \quad (3.4)$$

$$S_{m,TE} = a_{mI} I_{m,TM} - a_{mII} I_{m,TE} \quad (3.5)$$

Cette méthode a été démontrée équivalente à la théorie des distributions. Elle a été étendue à la diffusion d'un cylindre elliptique dans le cadre de la thèse de Loïc Méès[90, 55, 56, 53, 54].

3. Du point de vue du calcul numérique, on dispose de codes développés pour la diffusion d'une onde plane par un cylindre pour les coefficients a_m et b_m puisqu'ils sont indépendants du faisceau incident, tandis que les coefficients $I_{m,TM}$ et $I_{m,TE}$ doivent être extraits des expressions du faisceau dans le système de coordonnées cylindriques. L'approximation localisée cylindrique a donc été développée.

3.3 Approximation localisée cylindrique

Par analogie avec l'approximation localisée sphérique j'ai introduit une approximation localisée cylindrique[91, 57] dans la quelle l'opérateur $kr = n + \frac{1}{2}$ est remplacé par $kr = m$ car les fonctions de Bessel sphériques sont remplacées par les fonctions de Bessel cylindriques. Comme pour la sphère nous pouvons calculer les coefficients de faisceau en introduisant directement les composantes z du champs incident dans les expressions suivantes :

$$I_{m,TM} = \frac{k}{2\pi(1-\gamma^2)E_0} \int_{-\infty}^{\infty} E_z^i(\phi = \frac{\pi}{2}, \rho = m) \exp(i\gamma kz) dz \quad (3.6)$$

$$I_{m,TE} = \frac{k}{2\pi(1-\gamma^2)H_0} \int_{-\infty}^{\infty} H_z^i(\phi = \frac{\pi}{2}, \rho = m) \exp(i\gamma kz) dz \quad (3.7)$$

Si le faisceau gaussien est perpendiculaire au cylindre, ces expressions deviennent simplement :

$$I_{m,TM} = \frac{1}{2s(1-\gamma^2)} \sqrt{\frac{iQ}{\pi}} \exp \left[-s^2 \left(m - \frac{y_0}{w_0} \right)^2 + i \frac{x_0}{w_0} - \frac{\gamma^2}{4s^2} \right] \quad (3.8)$$

où x_0 et y_0 sont les coordonnées du cylindre par rapport de l'axe du faisceau. Cette méthode rapide et efficace rend la théorie applicable

Cette approximation a été démontrée rigoureusement par Gouesbet, Gréhan et moi-même pour le faisceau gaussien en comparant avec les expressions analytiques et les résultats numériques de la théorie des distributions[49, 36]. Dans la figure 3.3 on compare les potentiels de Bromwich du champ incident calculé directement à partir des expressions de Davis (courbes avec les cercles creux) et ceux qui sont reconstruits soit par la méthode spectrale en utilisant l'approximation localisée (courbes avec les losanges pleins), soit par la théorie des distributions (courbes sans symboles). L'intensité est mesurée à différentes hauteurs (en fonction de z) et à trois angles différents. Il est évident que la méthode spectrale reconstruit bien le champ incident. Par contre, le désaccord entre le champ incident et celui reconstruit avec la théorie des distributions devient important lorsque le point d'observation est en dehors du faisceau.

La théorie bien fondée, nous l'appliquons à étudier les diagrammes du champ diffusé pour orienter ou interpréter les travaux expérimentaux.

Problème numérique : le champ diffusé proche du cylindre est un champ quasi-cylindrique, le champ lointain devrait être un champ de caractéristiques sphériques. Le passage du cylindrique au sphérique dépend de la forme (rayon au col) du faisceau. On ne peut pas obtenir une expression générale simplifiée pour le champ lointain comme dans le cas de la diffusion par une sphère éclairée par un faisceau arbitraire ou dans le cas de la diffusion par un cylindre éclairé par une onde plane. Donc on est obligé d'utiliser directement les expressions générales pour calculer toutes les quantités diffusives. De plus, lorsqu'on s'éloigne du cylindre on a beaucoup de difficultés pour le calcul des fonctions de Hankel et pour les intégration sur γ à cause des oscillations de la fonction $\exp(ik\gamma z)$.

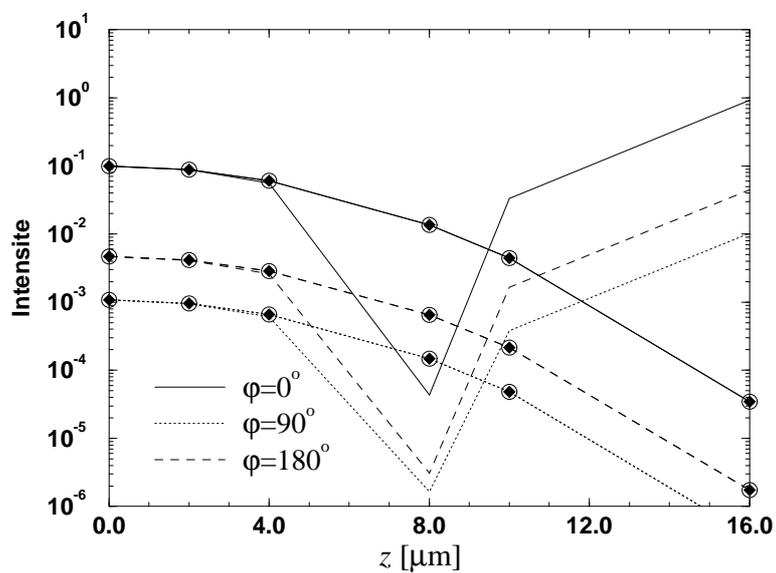


FIG. 3.3 – Comparaison des champs incidents calculés par l'expression analytique (courbes avec les cercles creux), par la méthode spectrale (courbes avec les losanges pleins) et par les distributions (courbes sans symboles).

Chapitre 4

Applications aux diagnostics optiques

La TLMG étant une théorie rigoureuse de diffusion de la lumière, elle comprend tous les effets optiques : réflexion, diffraction et réfraction. Théoriquement dans le cadre de la TLMG, il n'y a pas de contraintes sur la longueur d'onde du faisceau incident, la taille et l'indice complexe de réfraction de la particule (transparente ou absorbante). La simulation basée sur cette théorie nous permet d'étudier des phénomènes difficiles ou impossibles à étudier par d'autres méthodes.

Dans ce chapitre, je présenterai mes travaux sur des applications des théories développées à quelques techniques métrologiques optiques, y compris la simulation et la réalisation des systèmes de mesure.

La réfractométrie d'arc-en-ciel est une technique classique pour la mesure de taille et d'indice de réfraction de la particule. La simulation avec la TLMG nous a permis de mieux comprendre la structure fine d'arc-en-ciel et de développer un système de mesure très précis sans calibration de l'angle de mesure, en donnant accès au gradient de température/indice de la particule. Ces travaux seront présentés dans la première section.

L'imagerie de particules basée sur la TLMG peut prédire la structure fine de l'image d'une particule dans différentes configurations. Dans la deuxième section, après une introduction de la géométrie de l'imagerie de la TLMG, je présenterai notre contribution à l'application aux études des effets de défaut de mise au point, à l'évaluation du SDV (Shadow Doppler Velocimetry en anglais) et à l'amélioration d'un système de mesure industriel d'un cylindre métallique.

La troisième section est consacrée à l'application de la TLMG au développement de la technique phase Doppler. Nos contributions à la turbidimétrie seront présentées dans la dernière section.

4.1 Réfractométrie d'arc-en-ciel

Au point de vue de l'optique géométrique (voir la figure 4.1), lorsqu'un faisceau lumineux éclaire une particule, ce faisceau subit une réflexion (rayon B dans la figure 4.1), ou deux réfractions, ou une ou plusieurs réflexions internes.

Pour une particule sphérique ou cylindrique, il existe un angle de déviation minimale pour le rayon qui subit une réflexion interne (rayon C épais). Les rayons voisins (rayons fins) sortent du même côté de ce rayon. Cet angle correspond à la position de l'arc-en-ciel du premier ordre. Pour le rayon qui subit deux réflexions internes il existe également un angle limite : il s'agit de la position de l'arc-en-ciel du deuxième ordre.

Cependant, l'optique géométrique ne peut prédire qu'approximativement la position de l'arc-en-ciel et n'est valable que pour des grosses particules. La théorie d'Airy prend en compte

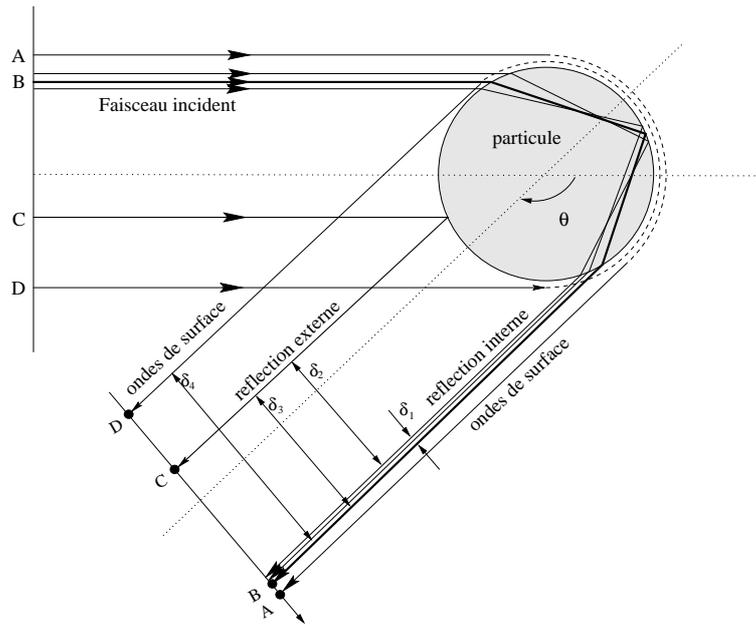


FIG. 4.1 – Schéma du principe d'arc-en-ciel

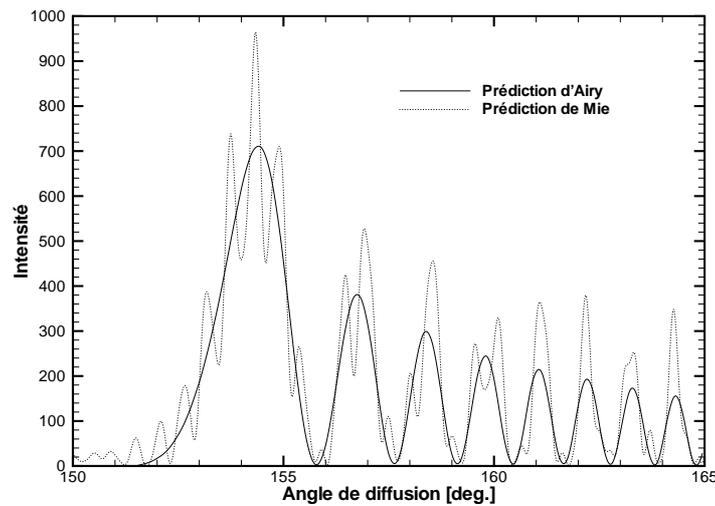


FIG. 4.2 – Comparaison de l'intensité prédite par la théorie d'Airy et par la théorie de Lorenz-Mie

l'interférence des rayons au voisinage de l'angle limite, qui donne une structure d'Airy (figure 4.2).

En fait, les rayons de différents ordres interfèrent. Par exemple, le rayon réfléchi (rayon C) interfère avec le rayon qui subit une réflexion interne (rayon B) et crée une structure d'oscillation angulaire d'une fréquence plus élevée – la structure ripple (courbe pointillée dans la figure 4.2). La théorie de Lorenz-Mie (TLM) ou la théorie de Lorenz-Mie généralisée (TLMG) nous permet de prendre en compte tous les effets (la réflexion, la réfraction, les ondes de surface ...) et de prédire la répartition d'intensité pour une particule de taille et d'indice de réfraction quelconques. En simulant l'éclairage de la particule avec des faisceaux assez focalisés nous avons pu mettre en évidence les différents modes de réflexion, de réfraction, d'interférence et surtout des ondes de surfaces[65].

Les positions des pics d'Airy dépendent essentiellement de l'indice de réfraction de la particule et les écarts angulaires des pics dépendent principalement de la taille de la particule. La réfractométrie d'arc-en-ciel classique consiste à mesurer l'indice de réfraction à partir des positions des pics d'Airy et la taille par les écarts entre ces pics, ou la combinaison des deux pour atteindre une meilleure précision. Cette technique exige donc une mesure de la position angulaire absolue très précise.

D'autre part, on sait que le nombre des lobes de ripple n_{ripple} dépend du paramètre de taille de la particule $\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$ (d est le diamètre et λ la longueur d'onde) : $n_{ripple} \sim \alpha$. De plus une petite variation en taille entraîne un décalage des pics de ripple (figure 4.3).

En effectuant la FFT du diagramme de diffusion, nous pouvons extraire la fréquence ripple dominante pour mesurer la taille de la particule. La technique de CSD (Cross Spectrum Density en anglais) sur deux diagrammes de diffusion nous permet, par contre, de quantifier le déphasage des deux diagrammes et de mesurer la variation de la taille avec une très grande précision[64].

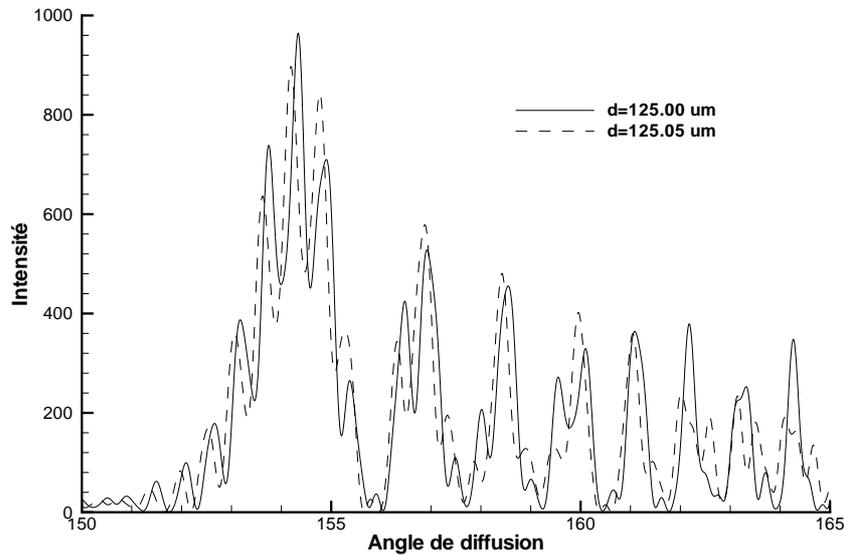


FIG. 4.3 – Déphasage des lobes de ripple

Dans le cadre de la thèse de Mme. X. Han, nous avons réalisé un système de mesure pour l'étude d'instabilités d'un jet liquide (figure 4.4). Ce système de mesure nous a permis de mesurer le diamètre d'un jet d'eau avec une précision de $2 \mu\text{m}$ pour un jet de $600 \mu\text{m}$ et sa fluctuation initiale avec une précision jusqu'à 10 nm sans connaître l'angle précis du détecteur. La figure 4.5 montre l'amplitude d'instabilité en fonction de la distance entre la sortie de la buse et le point de mesure mesurée avec ce système.

D'autre part, la position et la structure d'arc-en-ciel dépendent non seulement de la taille et de l'indice de réfraction de la particule mais aussi du gradient d'indice de réfraction qui est lié au gradient de température de la particule (jet) au chauffage. A partir de l'étude théorique et expérimentale du déphasage angulaire du diagramme de diffusion et des positions des pics type d'Airy de l'arc-en-ciel d'un jet en échauffement, nous avons mis en évidence qu'une particule avec gradient d'indice ne peut pas être traitée comme une particule homogène avec un indice de réfraction effectif et nous en avons aussi retiré des informations sur les gradients du jet[64].

À la suite de ce travail, j'ai montré, par la simulation, que l'on peut combiner la relation de diamètre-fréquence ripple et celle de variation du diamètre - déphasage afin de mesurer le diamètre absolu avec une précision d'ordre de nanomètre pour une fibre de $125 \mu\text{m}$ en utilisant la diffusion avant. Ces travaux sont destinés à réaliser un système de mesure de la fibre optique

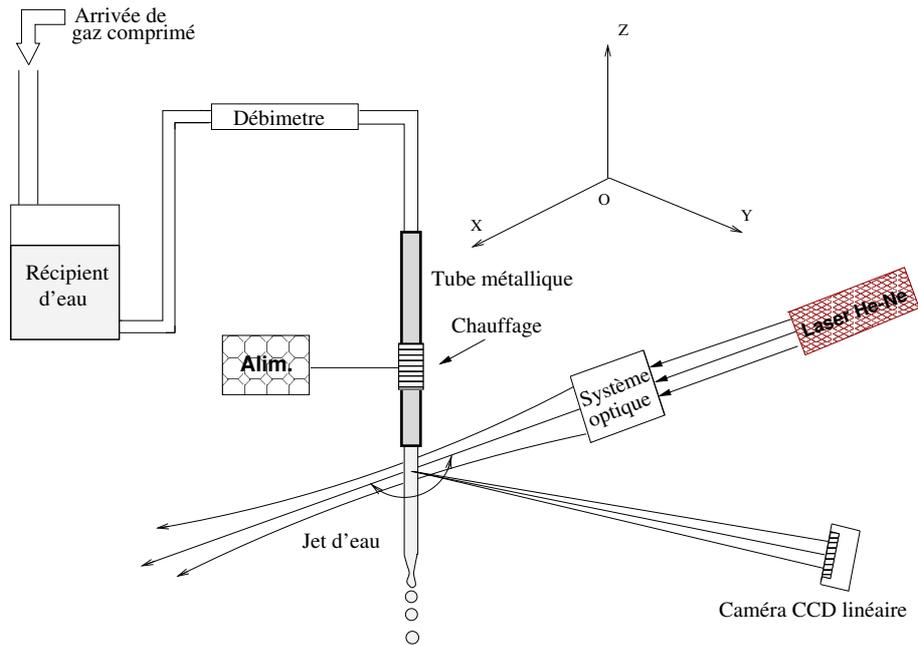


FIG. 4.4 – Configuration du système de mesure de la réfractométrie d’arc-en-ciel.

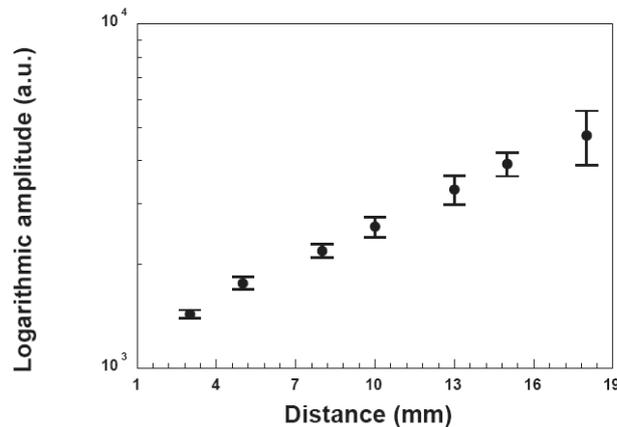


FIG. 4.5 – Instabilité d’un jet d’eau en fonction de la distance entre la sortie et le point de mesure

dans le cadre du Contrat ALCATEL[113].

4.2 Anémométrie de Phase Doppler : PDA — sphère et cylindre

Dans la recherche sur les écoulements multiphasiques, la mesure de la corrélation taille - vitesse des particules est un paramètre clé. Pour atteindre cet objectif, plusieurs techniques ont été développées parmi lesquelles l’anémométrie phase Doppler (PDA — Phase Doppler anemometry en anglais) est une des techniques de diagnostics optiques les plus performantes. Elle mesure *in situ* la vitesse et la taille des gouttes individuelles dans des écoulements diphasiques, par l’analyse de la lumière diffusée de la particule en mouvement dans le volume optique défini par l’intersection de deux faisceaux laser.

Or, les résultats dépendent de la trajectoire de la particule dans le volume de mesure[139, 58]. Par la simulation précise de la réponse de PDA, la TLMG permet d’étudier systématiquement

le fonctionnement de cette technique et de proposer des configurations libres de trajectoires[58, 61, 22].

D'autre part, cette technique a été limitée aux particules parfaitement sphériques. Grâce à nos travaux sur la diffusion d'un cylindre infini circulaire et elliptique, elle a été étendue aux particules correspondantes.

4.2.1 Modèle de la diffusion de deux faisceaux

Ce modèle est développé initialement pour évaluer un système de mesure réel DCW (dual-cylindrical wave en anglais)[134]. Ce système est une variante de la technique phase Doppler qui permet de mesurer la taille, la vitesse et la nature de la particule à partir de la fréquence du champ diffusé, et évite l'ambiguïté de 2π de phase rencontrée dans la mesure du système phase Doppler. Il a été étudié expérimentalement et théoriquement avec la TLM et l'optique géométrique. Le modèle de la diffusion de deux faisceaux développé durant ma thèse permet d'expliquer les résultats expérimentaux[104, 63, 62].

4.2.2 Particules cylindriques

La théorie et les codes développés pour la diffusion d'un faisceau laser par un cylindre circulaire ont été appliqués à l'étude de l'anémométrie phase Doppler pour cylindre[93, 27, 92, 28].

4.2.3 Applications de la phase Doppler

En outre, je me suis engagé dans plusieurs contrats industriels pour les mesures de vitesses et/ou de tailles des gouttes de kérosène dans une chambre haute pression ou générées par une soufflerie, des gouttes d'eau générées par des disques de mousse ou de grillage, et des bulles (IRSID). J'ai aussi étudié l'influence d'une particule dans le faisceau en dehors de volume de mesure de la technique phase Doppler sur les interfranges dans le volume de mesure[103].

4.3 Imagerie de petites particules

Grâce à l'évolution des caméras CCD et des techniques informatiques, l'imagerie trouve de plus en plus d'applications. La qualité de la mesure dépend fortement de nos connaissances de formation d'images pour certaines configurations définies. Un modèle d'imagerie d'une particule a été développé en combinant la TLMG et la théorie de diffraction. La géométrie du système est schématisée dans la figure 4.6.

Une particule est éclairée par un faisceau incident dont l'orientation, la position et la forme peuvent être arbitraires. Nous pouvons alors calculer le champ diffusé et/ou le champ incident par la TLMG sur la lentille. L'effet de la lentille est pris en compte par la transformée de phase de lentille mince¹. Puis l'intensité de la lumière sur le plan image est calculée en utilisant le principe d'Huygens-Fresnel par l'intégration du champ électromagnétique sur la lentille.

L'imagerie d'une particule éclairée par un faisceau gaussien ou une nappe laser a été étudiée. Les cas où la direction de propagation du faisceau incident est confondue avec l'axe optique ou perpendiculaire à l'axe optique sont exhaustivement étudiés pour une onde plane, un faisceau gaussien et un faisceau nappe laser. Les effets dus à la position de la particule et la polarisation du faisceau sont aussi discutés. Lorsque la direction de propagation du faisceau incident est confondue avec l'axe optique et que la particule est éclairée par un faisceau nappe laser, la répartition de l'intensité sur le plan image dans la direction de grande dimension du faisceau est

¹L'effet de lentille épaisse peut être pris en compte en introduisant la transformé correspondante.

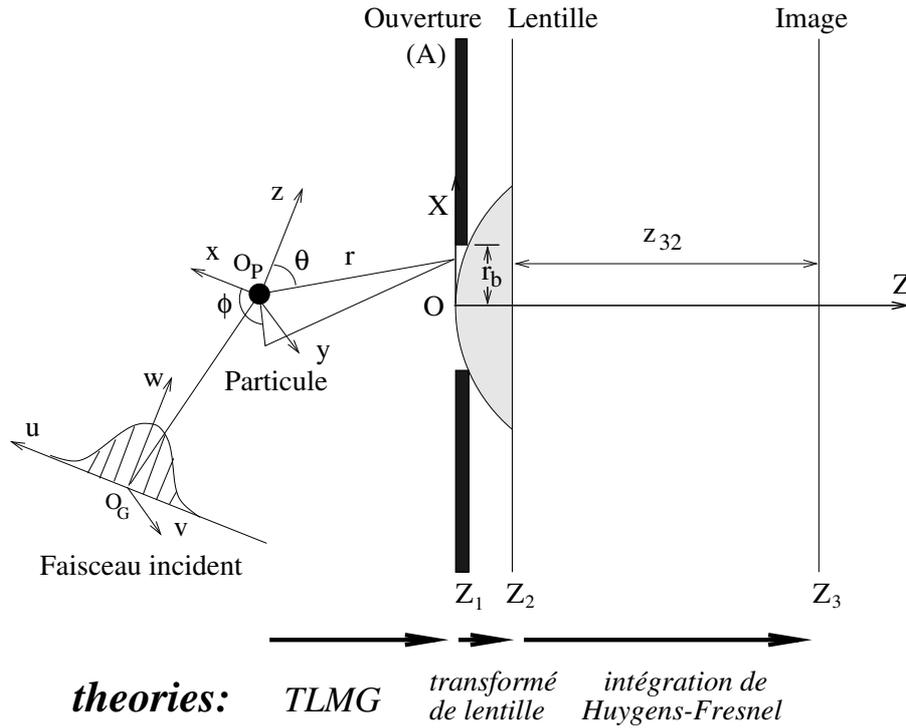


FIG. 4.6 – Géométrie du système d'imagerie

similaire à celle de la particule éclairée par une onde plane, la répartition de l'intensité sur le plan image dans la direction de petite dimension du faisceau est similaire à celle de la particule éclairée par un faisceau gaussien de même dimension. Lorsque la direction de propagation du faisceau incident est perpendiculaire à l'axe optique, la position de la particule dans le faisceau, la polarisation du faisceau et la taille de la particule jouent un rôle très important sur le comportement de l'image. Lorsque la particule est située sur le bord du faisceau plus éloigné de la lentille et que la particule est grosse par rapport à la dimension du faisceau, l'intensité dans l'image est beaucoup plus forte (jusqu'à trois ordres de grandeur) que lorsque la particule est située au centre ou sur le bord plus proche de la lentille.

Lorsque l'écran d'observation est hors axe sur le plan image, on peut distinguer la lumière due à la réflexion et à la réfraction. Dans certains angles, les contributions de ces deux parties sont aussi importantes et on aura deux points chauds (figure 4.7 (a)). Par contre, lorsque l'écran d'observation est hors le plan image, la lumière réfléchie interfère avec la lumière réfractée et on obtient donc des franges dont les interfranges dépendent de la taille de la particule et de la position de l'écran (figure 4.7 (b)). Ces interfranges permettent par conséquent de mesurer le diamètre de la particule. La forme et l'inclinaison des franges donnent une signature de la forme et/ou de l'homogénéité de la particule. Cette configuration donne donc un accès ces informations sur la particule.

D'autre part, en imagerie, classique ou champ proche, il est connu que la meilleure qualité d'image (absence de speckle) est obtenue pour un éclairage incohérent. Cependant, les techniques optiques en milieux diphasiques sont principalement basées sur la diffusion de la lumière issue de faisceaux lasers, c'est à dire d'une lumière cohérente. Ceci est particulièrement important pour l'extension de la PIV (Particle Image Velocimetry en anglais) aux milieux diphasiques, en configuration stéréoscopique. En effet, le principe de la PIV est d'enregistrer deux images consécutives d'un nuage de particules éclairé par une nappe laser. Les images sont enregistrées avec un angle important vis à vis de la direction de propagation du faisceau incident ($45^\circ, 60^\circ$,

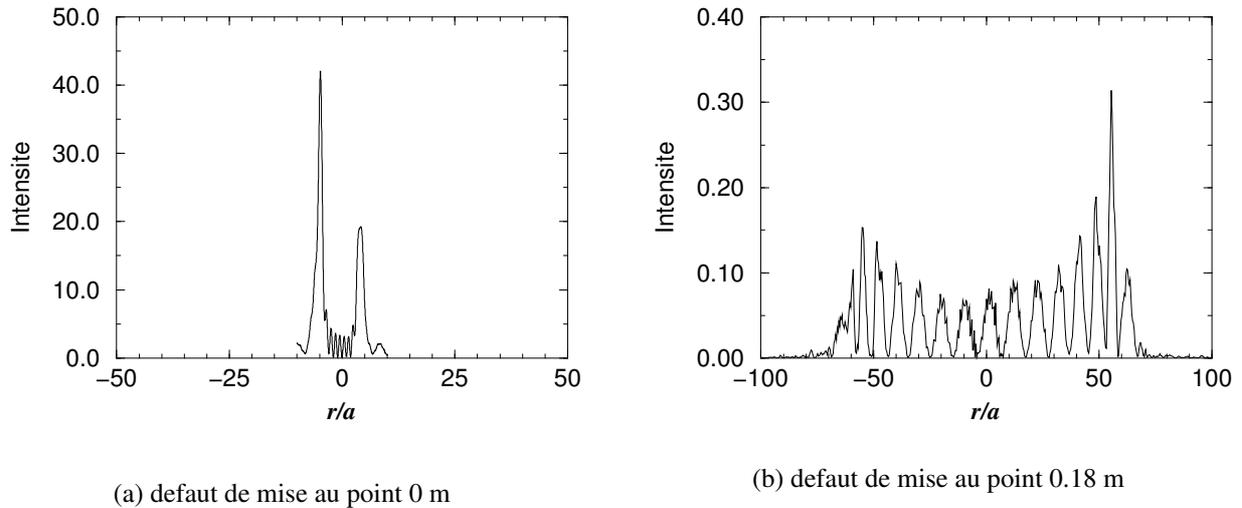


FIG. 4.7 – Image d’une particule de l’indice de réfraction $m = 1,33$, de rayon $a = 30\mu\text{m}$, observée à $66,5^\circ$ avec une lentille de $f = 0,6\text{ m}$, la particule est éclairée par une onde plane de longueur d’onde $\lambda = 0,488\mu\text{m}$.

90° , 135°). Lorsque les particules diffusantes ont une taille suffisamment conséquente, l’image enregistrée sera dominée par les points chauds (glare spot). A chaque particule correspondront plusieurs taches de lumières. La maîtrise de la PIV pour des écoulements chargés de grosses particules, ainsi que l’extension de cette technique à la réalisation de cartes de répartition granulométrique nécessitent la description de l’image des particules en défaut de mise au point. Les outils de base ont été créés au LESP. Ils seront appliqués à l’étalonnage des montages de PIV stéréoscopique ou multinappes. Cet outil a été appliqué à l’étude des effets de défaut de mise au point, d’incohérence et de forme du faisceau sur la qualité de l’image. Dans le cas de la détection avant, les résultats ont été comparés avec l’approche de convolution en utilisant la fonction PSF (point spread function) pour le faisceau gaussien. Les expériences ont confirmé l’amélioration pour la mesure de taille de particule[80, 126, 31].

Cet outil a été aussi utilisé pour améliorer les performances d’un instrument de mesure. Cet instrument est basé sur l’analyse des franges au plan focal pour mesurer la taille de cylindres métalliques individuels en utilisant la théorie de diffraction de Fraunhofer. En utilisant notre outil d’imagerie, nous avons trouvé : (a). pour des objets cylindriques opaques non-réfléchissants, l’écart entre les diamètres mesurés (dans la gamme de $100\mu\text{m}$ à $600\mu\text{m}$) en appliquant la diffraction de Fraunhofer ou la théorie de TLMG est relativement petit à condition de prendre un gros diamètre comme référence d’étalonnage, (b). pour des fils métalliques réfléchissants, la prise en compte de la réflexion est nécessaire pour définir les corrections à apporter aux mesures effectuées à l’aide de la diffraction de Fraunhofer. Nous avons mis en évidence des écarts entre les deux théorie pour des objets réfléchissants[9].

Le système SDV (Shadow Doppler Velocimetry en anglais) combine la LDV (Laser Doppler Velocimetry en anglais) et l’imagerie de la particule (figure 4.8) et permet de mesurer la vitesse et la taille de particules non sphériques.

La connaissance de la formation de l’image aux différents paramètres de configuration (propriétés de la particule, du faisceau incident, position et ouverture de la lentille ...) est essentielle pour la mesure. Dans le cadre du contrat européen JOULE nous avons effectué une simulation systématique de la formation d’image de ce système : une ou deux particule(s) de position(s) et de taille(s) différente(s) éclairée(s) par un ou deux faisceau(x) d’ondes planes ou gaussien(s).

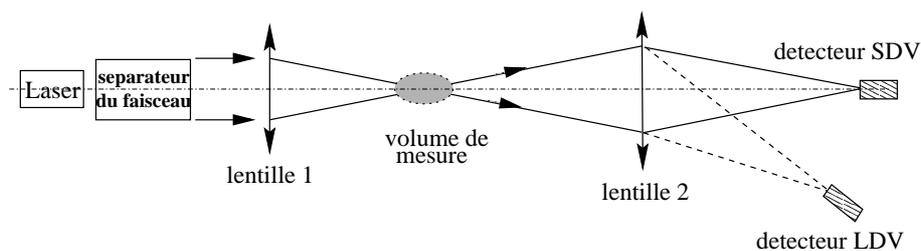


FIG. 4.8 – Schéma du SDV : Shadow Doppler Velocimetry

La figure 4.9 montre des images formées avec ce système. On a aperçu que lorsque le plan d'observation se situe exactement dans le plan image ($x=0$) les images ne sont pas nettes. Par contre, les images sont nettes si le plan d'observation se rapproche de la lentille ($x = 1100$ mm). Afin de comprendre ces résultats nous avons effectué une simulation d'imagerie sans et avec la particule en éclairant avec un faisceau gaussien fortement focalisé et démontré que ce décalage est dû à l'effet de l'aberration sphérique de la lentille (figure 4.10). Le cas de la présence de deux particules dans le volume de mesure a été également étudié[110]. Tous ces résultats ont été fournis avec un CD-ROM qui permet de visualiser des images formées avec ce système et de bien comprendre l'influence de différents paramètres sur la formation des images.

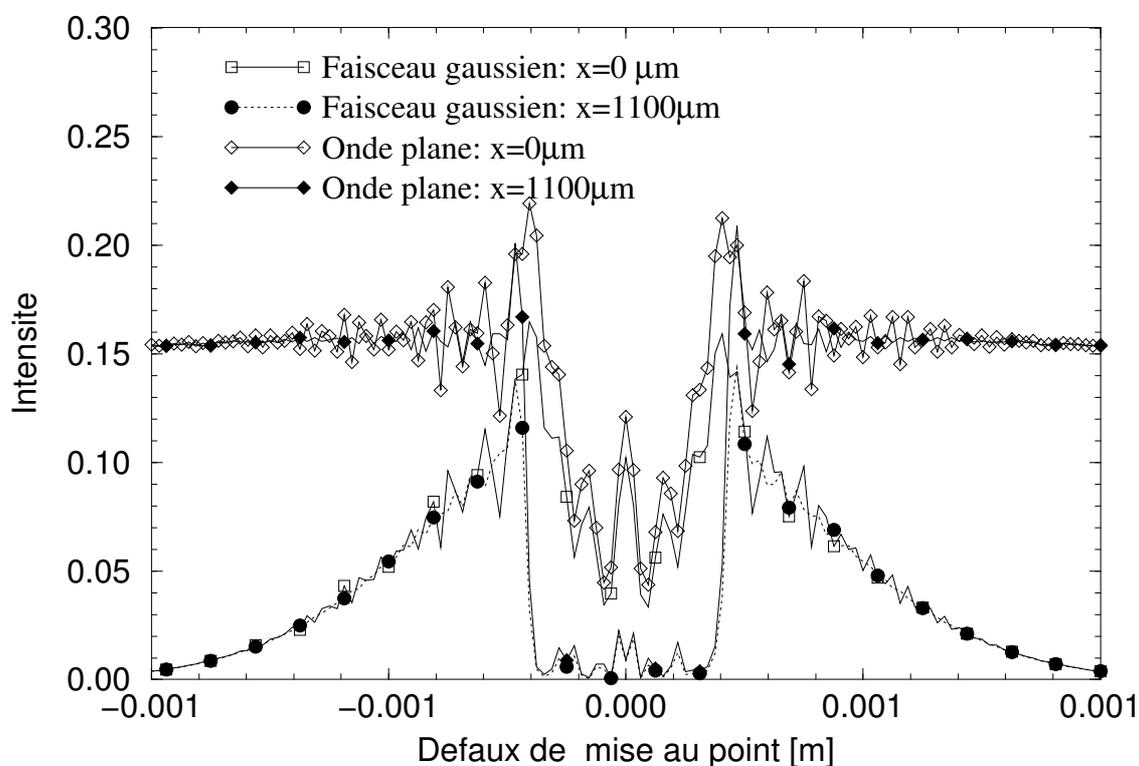


FIG. 4.9 – Comparaison des images d'une sphère éclairée par une onde plane ou par un faisceau gaussien, observée dans le plan focal nominal et dans un plan de 1,1 mm plus proche de la lentille

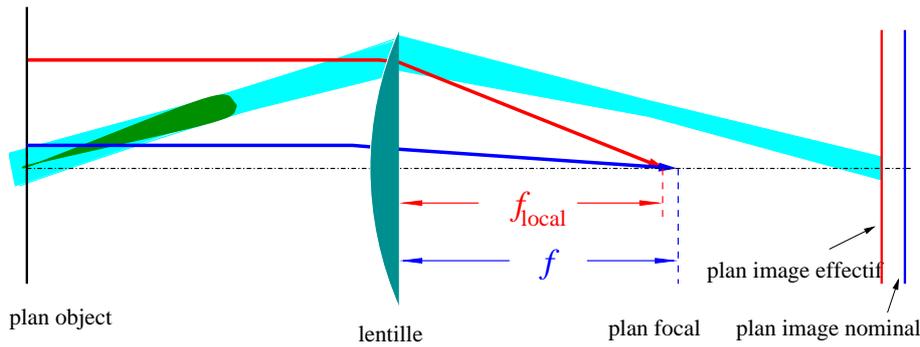


FIG. 4.10 – Mise en évidence de l’effet d’aberration sphérique : lorsque la lentille est éclairée sur le bord, la focale effective locale est plus courte que la focale nominale, l’image formée est donc plus proche de la lentille

4.4 Turbidimétrie

Lorsqu’un nuage de particules sphériques polydispersées est éclairé par un faisceau lumière, l’intensité de la lumière transmise s’exprime avec la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 \exp \left[-L \int_0^\infty C_{ext}(m, r, \lambda) N(r) dr \right]$$

où C_{ext} est la section d’extinction des particules, L la longueur de traversée, $N(r)$ la concentration volumique des gouttes.

Quand les particules ont des paramètres de taille $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ proches de 1, la section d’extinction varie très fort. Ce comportement est utilisé dans les mesures de la distribution en tailles de particules par l’extinction ou turbidimétrie. En mesurant spectre de la transmittance nous pouvons déduire la distribution. Cette technique est simple à réaliser. Elle a été utilisée principalement dans la mesure de la vapeur dans des turbines, des nuages naturels ou artificiels. Cependant, la solution est souvent instable à cause de problèmes d’inversion[8].

Phillips-Twomey a proposé une méthode au début des années 60[135, 136]. Plusieurs chercheurs ont contribué à améliorer cette technique[19, 78, 89, 17, 18]. Lawson et Hanson ont proposé en 1974 un algorithme de moindre carré non-négatif (NNLS – Non-negative least square en anglais)[79]. Cet algorithme évite le problème de la distribution négative. Mais la solution n’est pas toujours stable. Plusieurs équipes ont travaillé pour améliorer ces algorithmes d’inversion[78, 89, 17].

Afin de mesurer la turbidité de la vapeur dans des turbines, EDF a fait développer un logiciel qui ne tournait que sur la grosse machine CRAY jusqu’au début des année 90 et la manipulation était très lourd (il faut environ une heure pour traiter un spectre). Dans un contrat avec EDF j’ai transcrit ce logiciel pour qu’il tourne sur un PC avec une interface très conviviale.

Cependant, l’algorithme du logiciel EDF est très sensible aux paramètres choisis et les distributions de tailles des gouttes sont toujours semblables pour différents spectres mesurés.

Après avoir étudié attentivement l’évolution des coefficients d’extinction en fonction de tailles de particules, j’ai développé un algorithme basé sur le moindre carré non-négatif[79] et écrit un code convivial en Fortran. Ce logiciel RINVERSE est robuste et très stable. Il est, à notre connaissance, l’un des meilleurs dans ce domaine. Il a été validé en collaboration avec l’Université de Paris XII et il est utilisé par plusieurs laboratoires de recherches, citons la mesure de vapeur dans les turbines EDF dans le cadre d’un projet européen STEAMQUAL[26], la recherche des caractéristiques d’évaporation et d’inflammation du colza pour le projet européen ACREVO[13,

108], la mesure des brouillards par la CETE[131], l'adaptation de la technique à la mesure d'échappement moteur au CERTAM[14] et le suivi d'évolution d'une réaction chimique par le Professeur Trong. Nguyen l'UMR 6522/Université de Rouen.

Ce logiciel a également été utilisé pour étudier l'évaporation et la combustion de kolza dans le cadre du contrat ACREVO[109].

Chapitre 5

Perspectives

Les théories de Lorenz-Mie généralisées (TLMG) sont basées sur la solution rigoureuse des équations de Maxwell. Elles permettent d'étudier précisément des phénomènes concernés, de prédire des effets mécaniques comme la pression de radiation et les couples, de simuler l'ensemble des techniques de mesures élastiques et d'évaluer leur qualité.

D'un point de vue pratique, pour une sphère (homogène ou multicouche) de taille et d'indice quelconques, éclairée par un faisceau arbitraire, on peut prédire toutes les grandeurs physiques (les champs internes, les champs proches, les champs lointains et les effets mécaniques). Par contre, bien que la TLMG soit bien écrite pour le cylindre (circulaire ou elliptique), le calcul numérique est limité, à l'heure actuelle, aux cylindres de petite taille. Une extension pour les particules sphéroïdes a été réalisée, mais la direction de propagation du faisceau incident est supposé parallèle à l'axe de symétrie de la particule et la taille calculable est restreinte.

D'autre part, la diffusion d'un (des) pulse(s) de lumière extrêmement court(s) par un objet permet de séparer différents modes de diffusion pour mieux comprendre la physique et d'atteindre des intensités importantes pour créer des effets particuliers tout en n'apportant que très peu d'énergie à la goutte. Cette recherche est particulièrement importante pour les applications liées à la thermo-physique-chimie des gouttes et les milieux extrêmement denses.

La prise en compte d'effets non linéaires induit par le faisceau sur l'objet diffusant est également un sujet séduisant. La combinaison entre notre savoir faire en TLMG et de l'optique non-linéaire (collaboration avec le G2O du CORIA) ouvre une voie très prometteuse pour une meilleure compréhension de ces effets ainsi que vers des applications potentielles aux diagnostics optiques, à la réalisation d'éléments optronique miniature, ...

Ainsi, tout en continuant la recherche fondamentale (théorique et numérique) et ses applications, je vise donc, à moyen terme, principalement les aspects suivants :

5.1 Recherches théoriques et numériques

- Diffusion d'un faisceau quelconque par un sphéroïde arbitrairement orienté : champ proche, champ interne, effets mécaniques
- Diffusion d'un faisceau arbitraire par un cylindre infini (homogène) ainsi que le calcul numérique des champs lointains et pour grosses particules, et par un cylindre infini multicouche
- Extension des TLMG à la description de l'interaction de la particule avec un (des) pulse(s) d'une durée arbitraire
- Maîtrise des MDR (Morphology dependent resonance) pour des sphères parfaites et des sphéroïdes
- Prédiction des lois de ré-émission et des effets non-linéaires des particules diffusant (Raman, Fluorescence ...)

5.2 Applications

1. Arc-en-ciel pour la mesure précise du diamètre de particule, pour l'études des oscillations et instabilités d'un jet liquide et des gradients de température de gouttes réchauffées ou en combustion ;
2. PDA : mesure d'indice de réfraction, étude de la formation du spray et ses caractéristiques, PDA miniature et mesure des particules non-sphériques.
3. Imagerie - application aux particules non-sphériques
4. Mesure des propriétés de la particule par les MDR
5. Applications aux manipulations de particules biologiques, biophysiques ...

Bibliographie

- [1] A. L. Alden and M. Kerker. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres. *J. Appl. Phys.*, 22 :1242–1246, 1951.
- [2] A. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 24 :156–159, 1970.
- [3] A. Ashkin. Atomic-beam deflection by resonance-radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 24 :1321–1324, 1970.
- [4] A. Ashkin and J.M. Dziedzic. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. *Science (Wash. D.C.)*, 235 :1517–1520, 1987.
- [5] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, and S. Chu. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*, 11(5) :288–290, 1986.
- [6] J.P. Barton and D.R. Alexander. Fifth-order corrected electromagnetic field components for fundamental Gaussian beam. *J. Appl. Phys.*, 66(7) :2800–2802, 1989.
- [7] J.P. Barton, D.R. Alexander, and S.A. Schaub. Internal and near-surface electromagnetic fields for a spherical particle irradiated by a focused laser beam. *J. Appl. Phys.*, 64(4) :1632–1639, 1988.
- [8] L.P. Bayvel and A.R. Jones. *Electromagnetic scattering and its applications*. Applied Science Publishers, 1981.
- [9] S. Belaid, G. Gréhan, D. Lebrun, C. Ozkul, and K. F. Ren. Etude du champ diffracté par les fils opaques : comparaison théorie de Mie-diffraction classique, 1995.
- [10] R. Bhandari. Scattering coefficients for a multilayered sphere : analytic expressions and algorithms. *Appl. Opt.*, 24 :1960–1967, 1985.
- [11] D.L. Black, M. Queiroz McQuay, and M.P. Bonin. Laser-based techniques for particle-size measurement : a review of sizing methods and their industrial applications. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 22 :267–306, 1996.
- [12] C. F. Bohren and D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley-Interscience, New York, 1983.
- [13] G. Boulnois, K. F. Ren, T. Girasole, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Rouen final report contribution (theoretical evaluation of a shadow doppler velocimetry). contrat JOULE(Energy efficient, intensified spray drying), May 2000.
- [14] G. Boulnois, O. Trohel, K. F. Ren, F. Dionnet, and G. Gréhan. Mesures par turbidimétrie dans l'écoulement de blowby. Rapport technique, LESP, UMR 6614/CORIA, CNRS-Université et INSA de Rouen, 2000.
- [15] H. Bultynck, G. Gréhan, G. Gouesbet, and D. Boulaud. Resuspension de particules : mesure simultanée de la hauteur et de la vitesse de particules le long d'une paroi. In *12^{ème} Journées d'Etude sur les Aérosols*. ASFERA, 1996. 5-6 Décembre 1996, Paris.
- [16] H. Bultynck, K. F. Ren, and G. Gréhan. Contrat CORIA/CEA : Mesure de la vitesse et de la position de particules dans une couche limite, Mars 1998.

- [17] X. S. Cai. *Light Extinction Method and Application in the Measurement of Wetness Steam*. PhD thesis, Shanghai Mechinary Institute, June 1991.
- [18] X. S. Cai, N. N. Wang, J. M. Wei, and Zheng Gang. Experimental investigation of the light extinction method for measuring aerosol size distributions. *J. Aerosol Sci.*, 23(7), 1992.
- [19] Y. N. Cai and N. N. Wang. *Two Phase Flow of Witness Steam*. Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an (China), 1985.
- [20] F. Corbin, A. Garo, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Réfractométrie d'arc-en-ciel : Application au diagnostic de gouttes avec gradient d'indice. In *5ème congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Rouen, 24-27 Septembre 1996*, pages E1.1–E1.8, 1996.
- [21] L.W. Davis. Theory of electromagnetic beams. *Phys. Rev. A*, 19 :1177–1179, 1979.
- [22] F. Durst, Y. Aizu, T.H. Xu, G. Gréhan, G. Gouesbet, and F. Onofri. Laser-Doppler-gerat sowie verfahrenbetreiben eines solchen gerates, 1993. Brevet Allemand, Pat 2153/3-93.
- [23] F. Durst, A. Melling, and J.H. Whitelaw. *Principles and Practice of laser-Doppler-Anemometry*. Academic Press, 1981.
- [24] F. Durst and M. Zaré. Laser Doppler measurements in two phase flows. In *Proceedings of LDA-Symposium, Copenhagen*, pages 403–429, 1975.
- [25] F. Foucher, S. Burnel, C. Mounaïm-Rousselle, M. Boukhalfa, B. Renou, and M. Trinité. étude expérimentale de l'interaction flamme-paroi par PIV rapide. In *FLUVISU 2001, Recueil des actes*, 2001.
- [26] EDF (France), ENEL (Italie), ISTM (Allemagne), and ISA-JY (France). Standardisation of steam quality measurements for turbine performance evaluation. Technical Report for the european project SMT4 CT-97 2203, 1999.
- [27] N. Gauchet, T. Girasole, K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Mesure de particules cylindriques par anémométrie phase doppler. In *12 ème Journée d'Etude sur les Aérosols. ASFERA*, 1996. 5-6 Décembre 1996, Paris.
- [28] N. Gauchet, T. Girasole, K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Application of generalized Lorenz-Mie theory for cylinders to cylindrical characterization by phase-Doppler anemometry. *Optical Diagnostic in Engineering*, 2(1) :1–10, 1997.
- [29] T. Girasole, H. Bultynck, G. Gouesbet, G. Gréhan, F. Le Meur, J.N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren, C. Rozé, and D. Wysoczanski. Cylindrical fibre orientation analysis by light scattering. part 1 : Numerical aspect. *Part. Part. Syst. Charac.*, 14 :163–174, 1997.
- [30] T. Girasole, G. Gouesbet, G. Gréhan, J.N. Le Toulouzan, J. Mroczka, K. F. Ren, C. Rozé, and D. Wysoczanski. Orientation analysis by light scattering from cylindrical fibres : part 2 : Experimental aspect. *Part. Part. Syst. Charac.*, 14 :211–218, 1997.
- [31] T. Girasole, K. F. Ren, D. Lebrun, S. Belaid, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Generalized Lorenz-Mie theory : an application to imaging of off-axis and defocused droplets. *J. of visualization (Visualization Society of Japan)*, 3(2) :195–202, 2000.
- [32] G. Gouesbet. Interaction between Gaussian beams and infinite cylinders, by using the theory of distributions. *J. of Optics (Paris)*, 26(5) :225–239, 1995.
- [33] G. Gouesbet. Scattering of a first-order Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation. *Part. Part. Syst. Charac.*, 12 :242–256, 1995.
- [34] G. Gouesbet. The separability theorem revised with applications to light scattering theory. *J. of Optics (Paris)*, 26(3) :123–135, 1995.

- [35] G. Gouesbet. Interaction between an infinite cylinder and an arbitrary shaped beam. *Appl. Optics*, 36(18) :4292–4304, 1997.
- [36] G. Gouesbet. Validity of the cylindrical localized approximation for arbitrary shaped beams in generalized Lorenz-Mie theory for circular cylinders. *J. of Modern Optics*, 46(8) :1185–1200, 1999.
- [37] G. Gouesbet. Validity of the localized approximation for arbitrary shaped beams in generalized Lorenz-Mie theory for spheres. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 16(7) :1641–1650, 1999.
- [38] G. Gouesbet and G. Gréhan. Sur la généralisation de la théorie de Lorenz-Mie. *J. of Optics*, 13(2) :97–103, 1982.
- [39] G. Gouesbet and G. Gréhan. *Optical Particle Sizing : Theory and Practice*. Plenum Press, New York, 1987. May 12-15, in Rouen, France.
- [40] G. Gouesbet and G. Gréhan. Interaction between a Gaussian beam and an infinite cylinder using non Σ -separable potentials. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 11(12) :3261–3273, 1994.
- [41] G. Gouesbet and G. Gréhan. Interaction between shaped beams and an infinite cylinder, including a discussion of Gaussian beams. *Part. Part. System Charac.*, 11 :299–308, 1994.
- [42] G. Gouesbet and G. Gréhan. Generalized Lorenz-Mie theories, from past to future. *Atomization and Sprays*, 10(3-5) :277–333, 2000.
- [43] G. Gouesbet, G. Gréhan, and B. Maheu. The order of approximation in a theory of the scattering of a Gaussian beam by a Mie scatter center. *J. Optics (PARIS)*, 16(5) :239–247, 1985. Re-published in *Selected Papers on Light Scattering*, SPIE Milestone series, Vol. 951 edited by M. Kerker, Part I, pp. 352–360, 1988.
- [44] G. Gouesbet, G. Gréhan, and B. Maheu. Scattering of a Gaussian beam by a Mie scatter center, using a Bromwich formulation. *J. Optics (PARIS)*, 16(2) :83–93, 1985. Re-published in *selected papers on light scattering*, SPIE Milestone series, Vol. 951 edited by M. Kerker, Part I, pp. 361-371, 1988.
- [45] G. Gouesbet, G. Gréhan, and B. Maheu. Expressions to compute the coefficients g_n^m in the generalized Lorenz-Mie theory using finite series. *J. Optics (PARIS)*, 19(1) :35–48, 1988.
- [46] G. Gouesbet, G. Gréhan, and B. Maheu. The localized interpretation to compute the coefficients g_n , g_n^{+1} , and g_n^{-1} in the framework of the generalized Lorenz-Mie theory. In *ICALEO 88, October 30- November 4, Santa Clara, California, USA, Proceedings*, pages 263–273, 1988.
- [47] G. Gouesbet, G. Gréhan, and B. Maheu. A localized interpretation to compute all the coefficients g_n^m in the generalized Lorenz-Mie theory. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 7(6) :998–1007, 1990.
- [48] G. Gouesbet, G. Gréhan, B. Maheu, and K. F. Ren. *Electromagnetic Scattering of Shaped Beams (generalized Lorenz-Mie theory)*. Manuscript available on request or on www.coria.fr, 1998.
- [49] G. Gouesbet, G. Gréhan, and K. F. Ren. Rigorous justification of the cylindrical approximation to speed up computations in GLMT for cylinders. *J. Opt. Soc. Am. A*, 15(2) :511–523, 1998.
- [50] G. Gouesbet, C. Letellier, K. F. Ren, and G. Gréhan. Discussion of two quadrature methods to evaluate beam shape coefficients in generalized Lorenz-Mie theory. *Applied Optics*, 35(9) :1537–1542, 1996.
- [51] G. Gouesbet and J.A. Lock. A rigorous justification of the localized approximation to the beam shape coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory. II : off-axis beams. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 11(9) :2516–2525, 1994.

- [52] G. Gouesbet, B. Maheu, and G. Gréhan. Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation. *J. Opt. Soc. Amer. A.*, 5(9) :1427–1443, 1988.
- [53] G. Gouesbet and L. Mees. Generalized Lorenz-Mie theory for infinitely long elliptical cylinders. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 16(6) :1333–1341, 1999.
- [54] G. Gouesbet and L. Mees. Validity of the elliptical cylinder localized approximation for arbitrary shaped beams in generalized Lorenz-Mie theory for elliptical cylinders. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 16(12) :2946–2958, 1999.
- [55] G. Gouesbet, L. Mees, and G. Gréhan. Partial wave description of shaped beams in elliptical cylinder coordinates. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 15(12) :3028–3038, 1998.
- [56] G. Gouesbet, L. Mees, G. Gréhan, and K. F. Ren. Description of arbitrary shaped beams in elliptical cylinder coordinates, by using a plane wave spectrum approach. *Optics Communications*, 161 :63–78, 1999.
- [57] G. Gouesbet, K. F. Ren, L. Mees, and G. Gréhan. Cylindrical localized approximation to speed up computations for Gaussian beams in the generalized Lorenz-Mie theory for cylinders, with arbitrary location and orientation of the scatterer. *Applied Optics*, 38(12) :2647–2665, 1999.
- [58] G. Gréhan, G. Gouesbet, A. Naqwi, and F. Durst. Trajectory ambiguities in phase Doppler systems : study of a near-forward and a near-backward geometry. *Part. and Part. Syst. Charact.*, 11 :133–144, 1994.
- [59] G. Gréhan, B. Maheu, and G. Gouesbet. Localized approximation to the generalized Lorenz-Mie theory and its applications to optical sizing. In *5th Intern. Congress on applications of laser and electro-Optics, the changing frontiers of flow and particle diagnosis*, 1986. Arlington, Virginia, Nov. 10-13 1986.
- [60] G. Gréhan, B. Maheu, and G. Gouesbet. Scattering of laser beams by Mie scatter centers : numerical results using a localized approximation. *Applied optics*, 25(19) :3539–3548, 1986.
- [61] G. Gréhan, F. Onofri, T. Girasole, G. Gouesbet, F. Durst, and C. Tropea. Measurement of bubbles by phase Doppler technique and trajectory ambiguity. In *proceedings of the Seventh International Symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, 1994*. 11-14 July, paper 18.2. Republished in *Laser techniques and applications to fluid mechanics*, edited by R.J. Adrian, D.F.G. Durao, F. Durst, M.V. Heitor, M. Maeda and J. Whitelaw, Springer, pp. 290-302, 1996.
- [62] G. Gréhan, K. F. Ren, G. Gouesbet, A. Naqwi, and F. Durst. Evaluation of a particle sizing technique based on laser sheets. In *Third International Congress on Optical Particle Sizing, Yokohama, (JAPAN)*, pages 127–133, August 1993.
- [63] G. Gréhan, K. F. Ren, G. Gouesbet, A. Naqwi, and F. Durst. Evaluation of a particle sizing technique based on laser sheets. *Part. Part. Syst. Charact.*, 11 :101–106, 1994.
- [64] X. Han. *Etude de la réfractométrie d’arc-en-ciel et applications à la mesure d’instabilités et des gradients de température d’un jet liquide*. PhD thesis, Thèse en cotutelles des Universités de Rouen et de Xidan (Chine), Septembre 2000.
- [65] X. Han, K. F. Ren, L. Mees, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Surface waves/geometrical rays interferences : numerical and experimental behaviour at rainbow angles. *Optics Communication*, 195 :49–54, 2001.
- [66] X. Han, K. F. Ren, Z. Wu, F. Corbin, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Characterization of initial disturbances in liquid jet by rainbow sizing. *Applied Optics*, 37(36) :8498–8503, 1998.

- [67] Y. Han, L. Méès, K. F. Ren, G. Gouesbet, S. Wu, and G. Gréhan. Scattering of light spheroids : the far field case. *soumis Optics Communication*, January 2002.
- [68] Y. Han, K. F. Ren, L. Méès, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Diffusion des ondes électromagnétiques par un sphéroïde : solution rigoureuse. In *17e Congrès Français sur les Aérosols, ASFERA, 11-12 décembre, Paris, 2001*.
- [69] Y. Han and Z.S. Wu. Absorption and scattering by an oblate particle. *J. Optics A. Pure Appl. Opt.*, pages –, 2001.
- [70] Y. Han and Z.S. Wu. The expansion coefficients of a spheroidal particle illuminated by Gaussian beam. *IEEE Transactions on antennas and transactions*, 49(44) :615–620, 2001.
- [71] Y. P. Han. *Scattering of a spheroidal particle illuminated by Gaussian beam*. PhD thesis, Xidian University, China, January 2000.
- [72] Y. P. Han, G. Gréhan, K. F. Ren, L. Méès, G. Gouesbet, and Z. S. Wu. Computation of off-axis beam scattering by a spheroidal particle. In *Intern. Conference on Electromagnetics and light scattering by non-spherical particles*, march 2002.
- [73] Y. P. Han and Z. S. Wu. Scattering of a spheroidal particle illuminated by a Gaussian beam. *Applied Optics*, 40(15) :2501–2509, 2001.
- [74] E.D. Hirlleman. History of development of the phase-Doppler particle sizing velocimeter. *Part. Part. Syst. Charact.*, 13 :56–67, 1996.
- [75] L. Kai and P. Mossoli. Scattering of electromagnetic plane waves by radially inhomogeneous spheres : a finely stratified sphere model. *Appl. Opt.*, 33 :501–511, 1994.
- [76] M. Kerker. *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. Academic Press, 1969.
- [77] M. Kerker, editor. *Selected papers on Light Scattering, Part 1 and 2*. SPIE Volume 951, 1988.
- [78] M. Lallemand. Distribution de taille de gouttes par inversion des mesures de coefficients d’extinction spectraux. Technical report, Lab. d’Etudes des Systemes Thermiques et Energitiques, ENSMA, URA CNRS 1098, June 1987.
- [79] C. L. Lawson and R. J. Hanson. *Solving Least Square Problem*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1974.
- [80] D. Lebrun, S. Belaid, C. Özkul, K. F. Ren, and G. Gréhan. Enhancement of wire diameter measurements : comparison between Fraunhofer diffraction and Lorenz-Mie theory. *Opt. Eng.*, 35(4) :946–950, 1996.
- [81] E. Lenghart and G. Gouesbet. The separability theorem in terms of distributions with discussion of electromagnetic scattering theory. *J. of Math. Phys.*, 37(9) :4705–4710, 1996.
- [82] D. Lisieki, K. F. Ren, and D. Blondel. Mesure de tailles et vitesses des gouttes des sprays dans la chambre haute pression et générées par la soufflerie. SNECMA, July 1997.
- [83] W. D. Liu, K. F. Ren, S. Meunier-Guttin, and G. Gouesbet. Global vector reconstruction of nonlinear dynamical system from time series with svd method and validation by lyapunov exponent. *En préparation, à soumettre à Physical Review*, 2002.
- [84] J.A. Lock and G. Gouesbet. A rigorous justification of the localized approximation to the beam shape coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory. I : on-axis beams. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 11(9) :2503–2515, 1994.
- [85] J.A. Lock and E.A. Hovenac. Diffraction of a Gaussian beam by a spherical obstacle. *Am. J. Phys.*, 61(8) :698–707, 1993.
- [86] B. Maheu. *Généralisation de la théorie de Lorenz-Mie et applications*. PhD thesis, Université de Rouen, June 1987.

- [87] B. Maheu, G. Gouesbet, and G. Gréhan. A concise presentation of the generalized Lorenz-Mie theory for arbitrary location of the scatterer in an arbitrary incident profile. *J. Optics (PARIS)*, 19(2) :59–67, 1988.
- [88] B. Maheu, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Generalized Lorenz-Mie theory : first exact values and comparisons with the localized approximation. *Applied Optics*, 26(1) :23–26, 1987.
- [89] L. Mazzocchi, M. Verga, P. Barbucci, C. Carbone, and F. Donatini. Steam quality measurement by optical probe using a light scattering method. In *Inter. Conference on Multiphase Flows*, Tsukuba (Japan), 1991.
- [90] L. Mees. *Diffusion de la lumière par des objets cylindriques : simulations par théorie de Lorenz-Mie généralisée et applications métrologiques*. PhD thesis, Université de Rouen, Janvier 2000.
- [91] L. Mees, K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder with arbitrary location and arbitrary orientation, numerical results. *Applied Optics*, 38(9) :1867–1876, 1999.
- [92] H. Mignon, G. Gréhan, G. Gouesbet, T.H. Xu, and C. Tropea. Measurement of cylindrical particles with phase Doppler anemometry. *Applied Optics*, 35(25) :5180–5190, 1996.
- [93] H. Mignon, F. Onofri, G. Gréhan, G. Gouesbet, and C. Tropea. Mesure de particules non sphériques par phase-Doppler : cas des cylindres et des particules irrégulières. In *Recueil des actes du 4^{ème} congrès francophone de vélocimétrie laser*, pages 1–4, 1994. Poitiers-Futuroscope, 26-29 septembre 1994.
- [94] A. Naqwi, X. Z. Liu, and F. Durst. Evaluation of dual-cylindrical wave laser technique for particle sizing of liquid droplets. *Part. Part. Syst. Charact.*, 9 :44–45, 1992.
- [95] H.M. Nussenzveig. *Diffraction effects in semiclassical scattering*. Cambridge University Press, 1992.
- [96] F. Onofri, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Electromagnetic scattering from a multilayered sphere located in an arbitrary beam. *Appl. Optics*, 34(30) :7113–7124, 1995.
- [97] F. Onofri, H. Mignon, G. Gouesbet, and G. Gréhan. On the extension of Phase-Doppler anemometry to the sizing of spherical multilayered and cylindrical particles. In *4th International Congress on Optical Particle Sizing*, pages 275–284. Nürnberg, Germany, 21-23 March, 1995.
- [98] H. Polaert. *Effets mécaniques et structures de faisceaux en théorie de Lorenz-Mie généralisée*. PhD thesis, Université de Rouen, Février 1999.
- [99] H. Polaert, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Measurements of beam shape coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory for the on-axis case : numerical simulations. *Applied Optics*, 37(21) :5005–5013, 1998.
- [100] H. Polaert, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Forces and torques exerted on a multilayered spherical particle by a focused Gaussian beam. *Optics communications*, 155(1-3) :169–179, 1998.
- [101] H. Polaert, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Improved standard beams with application to reverse radiation pressure. *Applied Optics*, 37(12) :2435–2440, 1998.
- [102] H. Polaert, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Measurement of beam shape coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory for the on axis case : actual beam. *Applied Optics*, 40(10) :1699–1706, 2001.
- [103] K. F. Ren. Influence de particules aux franges des deux faisceaux laser. Rapport interne, LESP, 1994.

- [104] K. F. Ren. *Diffusion de faisceaux feuille laser par des particules sphériques et applications aux écoulements diphasiques*. PhD thesis, Université de Rouen, March 1995.
- [105] K. F. Ren. Relation entre les deux approches – théorie des distributions et spectre continu. Rapport interne, LESP, 1996.
- [106] K. F. Ren, D. Blondel, and G. Gréhan. Mesure de tailles et vitesses des gouttes générées par un disque de mousse tournante par l’anémométrie phase doppler. Contrat PROMAT AIR, May 1997.
- [107] K. F. Ren, D. Blondel, and G. Gréhan. Mesures de tailles des gouttes générées par des disques de mousse et de grillage par l’anémométrie phase dopple. Contrat PROMAT AIR, September 1997.
- [108] K. F. Ren, T. Girasole, and G. Gréhan. Contrat CORIA/CEE : Energy efficient intensified spray drying, 1998. Rapport à six mois dans le cadre du contrat CEE-Joule JO 3-CT 97-0086.
- [109] K. F. Ren, T. Girasole, G. Gréhan, and A. Garo. Final report advanced combustion research for energy from vegetable oils. Contrat européen ACREVO FAIR-CT 95-0627, December 1997.
- [110] K. F. Ren, T. Girasole, A. M. K. P. Taylor, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Theoretical evaluation of a Shadow Doppler Velocimeter. Submitted to Applied Optics AO 016728.
- [111] K. F. Ren, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder : numerical result in GLMT-framework. In *8th intern. symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics*, pages 6.5.1–6.5.8, 1996.
- [112] K. F. Ren, G. Gouesbet, and G. Gréhan. The integral localized approximation in generalized Lorenz-Mie theory. *Applied Optics*, 37(19) :4218–4225, 1998.
- [113] K. F. Ren and G. Gréhan. Simulation de la réfractométrie d’arc-en-ciel pour la mesure de la fibre optique. rapport du contrat ALCATEL, July 2001.
- [114] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Localized approximation of generalized Lorenz-Mie theory : faster algorithm for computations of the beam shape coefficients,. *Part. Part. Syst. Charact.*, 9 :144–150, 1992.
- [115] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Laser sheet scattering by spherical particles. *Part. Part. Syst. Charact.*, 10 :146–151, 1993.
- [116] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Light scattering from an infinite cylinder and oblique incidence, 1993. LESP Internal report.
- [117] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Electromagnetic field expression of a laser sheet and the order of approximation. *J. Optics (PARIS)*, 25(4) :165–176, 1994.
- [118] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Evaluation of laser sheet beam shape coefficients in generalized Lorenz-Mie theory by using a localized approximation. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 11(7) :2072–2079, 1994.
- [119] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Radiation pressure forces exerted on a particle arbitrarily located in a Gaussian beam by using the generalized Lorenz-Mie theory, and associated resonance effects. *Opt. Communications.*, 108 :343–354, 1994.
- [120] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Symmetry relations in generalized Lorenz-Mie theory. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 11(6) :1812–1817, 1994.
- [121] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory. *Appl. Optics*, 35(15) :2702–2710, 1996.
- [122] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Scattering of a gaussian beam by an infinite cylinder in GLMT-framework, formulation and numerical results. *J. Opt. Soc. Am. A*, 14(11) :1–10, 1997.

- [123] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Scattering of a Gaussian beam by an infinite cylinder in GLMT-framework, formulation and numerical results. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 14(11) :3014–3025, 1997.
- [124] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory. *Applied Optics*, 40(15) :2501–2509, 2001.
- [125] K. F. Ren, G. Gréhan, and G. Gouesbet. Internal field of a multilayered sphere illuminated by a shaped beam. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002. en rédaction.
- [126] K. F. Ren, D. Lebrun, C. Özkul, A. Kleitz, G. Gouesbet, and G. Gréhan. On the measurement of particles by imaging methods : theoretical and experimental aspects. *Part. Part. Syst. Charact.*, 13 :156–164, 1996.
- [127] M. L. Riethmuller. Vélométrie par images de particules ou PIV : synthèse des travaux récents. In *5ème Comgrès francophone de vélocimétrie laser, 24-27 septembre 1996, Rouen*, page SESJ1, 1996.
- [128] G. Roosen. A theoretical and experimental study of the stable equilibrium position of spheres levitated by two horizontal laser beams. *Optics Communications*, 21(1) :189–436, 1977.
- [129] G. Roosen. La lévitation optique de sphères. *Journal Canadien de physique*, 57(9) :1260–1279, 1979.
- [130] G. Roosen, F. de saint Louvent, and S. Slansky. Etude de la pression de radiation exercée sur une sphère creuse transparente par un faisceau cylindrique. *Opt. Commun.*, 24(1) :116–120, 1978.
- [131] C. Rozé, T. Girasole, K. F. Ren, and G. Gréhan. Mesure par turbidimétrie d’un brouillard : formation et réalisation d’une chaîne de mesure, 1998.
- [132] N.E. Tayali and C.J. Bates. Particle sizing techniques in multiphase flows : a review. *Flow Meas. instrum.*, 1 :77–105, 1990.
- [133] O. B. Toon and T. P. Ackerman. Algorithms for the calculation of scattering by stratified spheres. *Appl. Opt.*, 20 :3657–3660, 1981.
- [134] C. Tropea, T.H. Xu, F. Onofri, G. Gréhan, P. Haugen, and M. Stieglmeier. Dual-Mode Phase-Doppler Anemometer. *Part. Part. Syst. Charact.*, 13 :165–170, 1996.
- [135] S. Twomey. On the numerical solution of fredholm integral equations of the first kind by the inversion of the linear system produced by quadrature. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 1963.
- [136] S. Twomey. *Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Indirect Measurement*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1977.
- [137] J.P.A.J. van Beeck. *Rainbow phenomena : development of a laser-based, non-intrusive technique for measuring droplet size, temperature and velocity*. PhD thesis, University Eindhoven, June 1997.
- [138] H.C. van de Hulst. *Light scattering by small particles*. Dover Publications, Inc , New York, 1957.
- [139] F. Vannobel, J.B. Dementhon, and G. Gréhan. Phase Doppler et ambiguïté de trajectoire : aspects théoriques et expérimentaux. In *Congrès francophone de vélocimétrie Doppler*, September 1992.
- [140] Z. S. Wu and Y. P. Wang. Electromagnetic scattering for multilayered sphere : recursive algorithms. *Radio Science*, 26(6) :1393–1401, 1991.
- [141] Z.S. Wu, L.X Guo, K. F. Ren, G. Gouesbet, and G. Gréhan. Improved algorithms for electromagnetic scattering of plane waves and shaped beams by multilayered spheres. *Applied Optics*, 36(21) :5188–5198, 1997.

-
- [142] S. Zhang, K. F. Ren, X. Shen, G. Gréhan, and G. Gouesbet. A theoretical model for the method of phase-Doppler particle sizing in two-phase flows, (in chinese). *J. of Experimental mechanics*, 15(1) :43–50, 2000.
- [143] J. Zhou and G. Gréhan and K. F. Ren. Experimental study of application of the multi-wavelength method on flame temperature measurement. Rapport de recherche scientifique, LESP et Université de Zhejiang, February 1999.
- [144] E. Zimmermann, R. Dändliker, N. Souli, and B. Krattiker. Scattering of an off-axis gaussian beam by a dielectric cylinder compared with a rigorous electromagnetic approach. *J. Opt. Soc. Am. A*, 12 :395–403, 2002.