



HAL
open science

HOLOGRAPHIE DIGITALE : MODÈLE HYBRIDE DÉPENDANT DE L'INDICE POUR LA CARACTÉRISATION DE PARTICULES DE GRANDES TAILLES

F. R.A. Onofri, Lilian Chabrol

► **To cite this version:**

F. R.A. Onofri, Lilian Chabrol. HOLOGRAPHIE DIGITALE : MODÈLE HYBRIDE DÉPENDANT DE L'INDICE POUR LA CARACTÉRISATION DE PARTICULES DE GRANDES TAILLES. OPTIQUE Normandie 2024, Patrice CAMY, Ammar HIDEUR, Jul 2024, Rouen, France. hal-04797663

HAL Id: hal-04797663

<https://hal.science/hal-04797663v1>

Submitted on 22 Nov 2024

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.

HOLOGRAPHIE DIGITALE : MODÈLE HYBRIDE DÉPENDANT DE L'INDICE POUR LA CARACTÉRISATION DE PARTICULES DE GRANDES TAILLES

Lilian Chabrol¹, Fabrice Onofri¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI, UMR 7343, 13453 Marseille, France

lilian.chabrol@proton.me

RÉSUMÉ

Nous proposons un modèle hybride de diffusion combinant diffraction, optique géométrique et physique pour prédire les diagrammes de diffusion vers l'avant de particules sphériques homogènes éclairées par une onde plane. Ses performances (précision et temps de calcul) le rendent particulièrement intéressant notamment pour des méthodes holographiques inverses nécessitant de longues itérations.

MOTS-CLEFS : *Holographie ; Réfraction ; Optique physique .*

1. INTRODUCTION

L'holographie digitale pour la caractérisation de particules en écoulement fait généralement l'hypothèse de diffuseurs opaques (ou transparents) et/ou de mécanismes de diffusions réduits à un simple phénomène de diffraction. Pour la détermination de la taille et le positionnement 3D des particules, et plus encore de leur composition (v. p. ex. [1, 2]), la précision et l'efficacité numérique du modèle de diffusion (« direct ») sont déterminantes. Ceci est particulièrement vrai pour les méthodes inverses (paramétriques ou non) et, dans une moindre mesure, les méthodes de rétropropagation.

Une solution exacte au problème de la diffusion d'une onde électromagnétique plane, de longueur d'onde λ , par une sphère homogène de rayon a fut proposée par Mie en 1908 (théorie dite de « Lorenz-Mie (LMT) »). Pour la caractérisation statistique de particules en écoulement ayant un grand paramètre de taille $\alpha = 2\pi a / \lambda \gg 1$, cette solution requiert des ressources informatiques totalement prohibitives. C'est pourquoi elle n'est utilisée que pour l'étude de particules microniques [2].

Notre travail, qui fait notamment suite aux travaux de [3, 4, 5], vise à proposer une alternative au modèle complet de Mie. Ce modèle hybride, prenant en compte l'indice de réfraction pour ($\alpha \gg 1$), est basé sur l'optique physique et géométrique, ainsi que la théorie de la diffraction. Nous comparons ses prédictions par méthode directe avec les termes de la série de Debye correspondants. Lors de la présentation orale, nous discuterons également de la possibilité d'appliquer ce modèle dans le cas d'observations à courte distance, pourvu que l'angle maximal de diffusion reste modéré.

2. MODÈLE ET RÉSULTATS ILLUSTRATIFS

Nous indiquons entre parenthèses les paramètres utilisés pour les résultats présentés Figure 2. On considère une onde plane de longueur d'onde dans le vide $\lambda (= 0,6328\mu m)$ dans un milieu 1 d'indice $m_1 (= 1) \in \mathbb{R}$ interagissant avec une sphère homogène de rayon $a (= 0,20mm)$ et d'indice $\mathbb{R} \ni m_2 (= 1,33) > m_1$. Un écran (capteur CCD par exemple) de demi hauteur $y_{éc} (= 2mm)$ est placé perpendiculairement à l'axe optique, à une distance $z_{éc} (= 10cm)$ de la particule centrée dans le repère cartésien $(Oxyz)$. Le nombre de Fresnel correspondant aux hypothèses est $F = a^2 / (\lambda z_{CCD}) \simeq 0,631$.

Dans l'approximation de l'optique géométrique de Van de Hulst [3], un rayon impactant la sphère est décomposé en différents rayons d'ordre p . Un rayon $p \geq 1$ a alors subi $p - 1$ réflexions internes tandis celui d'ordre $p = 0$ a subi une réflexion spéculaire externe (voir Figure 1). La série de Debye se décompose également en différents ordres (ondes partielles) p qui, dans la limite $\alpha \rightarrow \infty$, doivent correspondre aux termes géométriques (plus la diffraction pour le terme $p = 0$ uniquement). L'ordre $p = 0$ de Debye peut lui-même être décomposé en 4 termes : diffraction pure ($p = 0_d$) (indépendante

de la composition de la particule), réflexion spéculaire ($p = 0_s$), et enfin les ondes de surfaces qu'on décompose en réflexion rasante ($p = 0_g$) et ondes subissant un effet tunnel ($p = 0_t$) (voir Figure 1).

Pour des gouttes d'eau, une diffusion vers l'avant et aux petits angles, les termes dominants sont $p = 0, 1$ et 3 . Comme nous le montrerons, l'optique géométrique décrit remarquablement bien les ordres 1 et 3 . Les choses sont plus complexes pour l'ordre 0 , comme ceci est illustré sur la Figure 2. Les intensités normalisées obtenues à partir de la solution de Debye complète $p = 0^{\text{Debye}}$ et de notre modèle $p = 0^{\text{Hybride}}$ en fonction de la distance à l'axe optique sur l'écran y sont représentés, de même que des ondes partielles diffractées $p = 0_d^{\text{Debye}}$ de la série de Debye. On observe un décalage du diagramme obtenu pour la diffraction pure $p = 0_d^{\text{Debye}}$ par rapport à celui obtenu avec $p = 0^{\text{Debye}}$, cas plus complet, qui rend compte de la diffraction mais aussi des ondes de surfaces et de la réflexion spéculaire (voir Figure 1). Ce décalage est, du point de vue de la théorie électromagnétique, une démonstration de l'erreur commise par l'optique physique lorsque l'on assimile la particule à un simple disque opaque ou transparent. Il est une source d'imprécision pour l'estimation du rayon a et de la position $z_{\text{éc}}$ de la particule. Notre modèle hybride, dont nous développerons le formalisme, ne montre quasiment aucun décalage aux petits angles. Le zoom de la Figure 2 démontre la qualité de ses prédictions jusqu'au 12^{ème} maximum en comparaison à Debye. Ses temps de calcul sont aussi **30 fois inférieurs** pour cet exemple. Comme nous le montrerons en détail, ces performances sont obtenues et même dépassées sur une large plage de tailles et d'indices. Ce modèle ouvre donc d'intéressantes perspectives pour le développement de la mesure d'indice par rétropropagation ou le développement de méthodes inverses nécessitant de longues itérations.

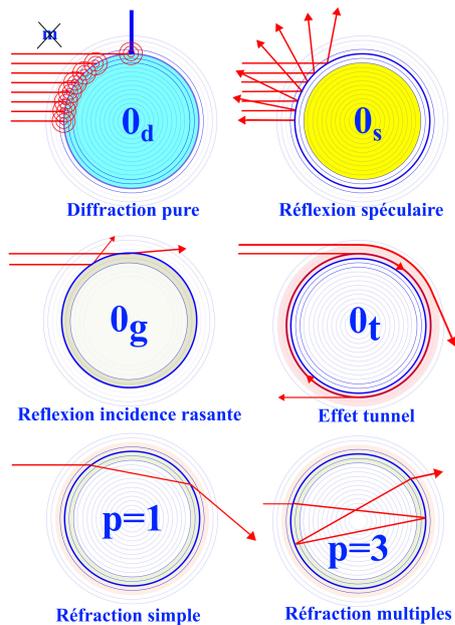


FIGURE 1 : Décomposition du terme $p = 0$ de Debye et représentation des termes $p = 1$ et $p = 3$.

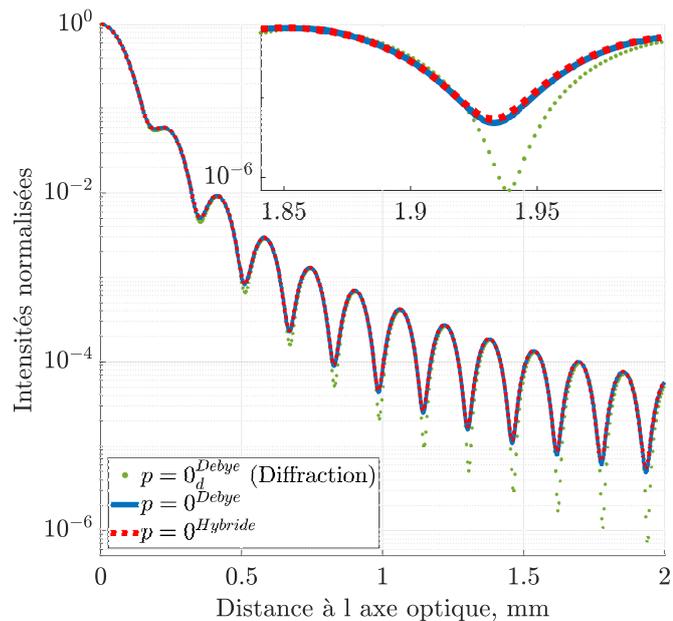


FIGURE 2 : Intensités normalisées des ordres $p = 0$ calculées à partir de la solution de Debye et notre modèle. La diffraction pure est également représentée.

RÉFÉRENCES

- [1] M. P. L. Sentis and al, *Optics Letters*, vol. 43, no. 12, pp. 2945–2948, Jun. 2018, optica Publishing Group.
- [2] A. Yevick and al, *Optics Express*, vol. 22, no. 22, pp. 26 884–26 890, Nov. 2014, optica Publishing Group.
- [3] H. C. Hulst and H. C. v. d. Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. Courier Corporation, Jan. 1981.
- [4] H. M. Nussenzveig, *Journal of Mathematical Physics*, vol. 10, no. 1, pp. 82–124, Jan. 1969.
- [5] M. P. Sentis and al, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 170, pp. 8–18, Feb. 2016.