



HAL
open science

Analyse Numérique de Modèles de Matériaux Poreux

Simon Lucas, Romain Pacanowski, Pascal Barla

► **To cite this version:**

Simon Lucas, Romain Pacanowski, Pascal Barla. Analyse Numérique de Modèles de Matériaux Poreux. JFIG 2022 - Journées Françaises de l'Informatique Graphique, Nov 2022, Bordeaux (France), France. <hal-03952096>

HAL Id: hal-03952096

<https://hal.science/hal-03952096v1>

Submitted on 23 Jan 2023

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.



HAL Authorization

Analyse Numérique de Modèles de Matériaux Poreux

Simon Lucas^{1,2}, Romain Pacanowski², Pascal Barla²

¹ Université de Bordeaux

² Inria Bordeaux Sud-Ouest

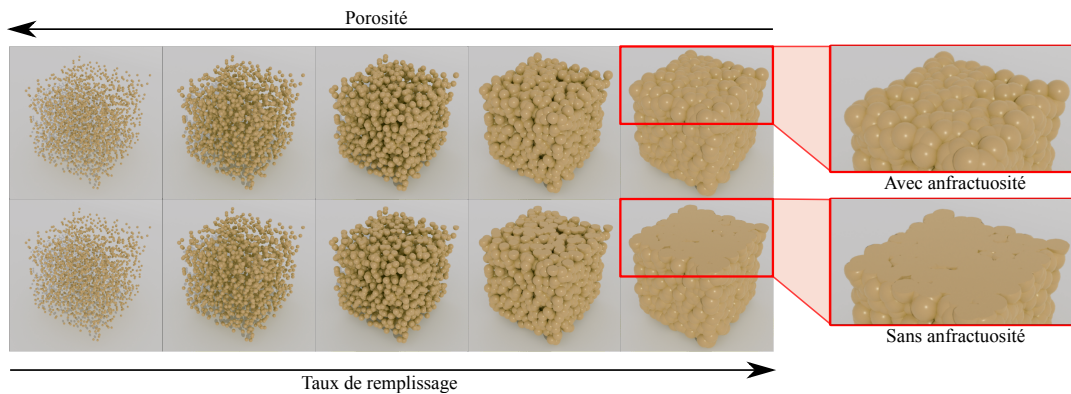


Figure 1: Visualisation des structures de matériaux poreux considérées dans notre analyse. Ces structures sont composées d'amas de sphères mono-disperses, pour plusieurs valeurs de porosité, avec anfractuosités et sans anfractuosités.

Abstract

L'apparence des objets est impactée par leur structure microscopique. Ici nous nous intéressons à l'apparence de matériaux poreux. La présence de pores a été modélisée de deux manières dans les travaux existants: en modifiant l'état de surface d'un matériau, ou en modifiant ses propriétés volumiques. Il n'existe cependant pas de modèle de matériaux poreux suffisamment générique pour tenir compte à la fois des effets surfaciques et volumiques. Nous proposons dans cet article une étude de ces effets à l'aide de simulations du transport de la lumière. Cette approche permet de révéler les limitations des modèles existants, ainsi que des pistes prometteuses pour le développement futur d'un modèle de matériau suffisamment général pour tenir compte de variations de porosités et d'état de surface.

1. Introduction

La porosité est présente dans un grand nombre de matériaux. Les matériaux naturels comme les sols ou les roches présentent des porosités de différentes natures, allant d'agrégats formés par la cohésion de particules, à des pores tubulaires créés par le passage de l'eau ou par des êtres vivants, ou des fissures créées par l'action de forces diverses. D'autres matériaux non naturels présentent également des pores, comme par exemple les cavités présentes à la surface de céramiques. Nous nous restreignons ici à l'étude de pores structurées sous la forme d'agrégats opaques.

Les structures poreuses peuvent se retrouver à différentes échelles. Les plus petites porosités sont de l'ordre du nanomètre. Elles sont trop petites pour être étudiées dans un contexte d'optique géométrique, mais peuvent être prises en compte dans les (micro) matériaux des agrégats. Notre travail porte sur les échelles comprises entre le micron et le millimètre, et se focalise donc sur la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function). Au dessus du millimètre, les pores sont suffisamment grands pour être

visibles à l'oeil nu, et peuvent donc être directement modélisés par des détails géométriques.

Notre objectif principal est de caractériser les effets présents dans des matériaux poreux formés d'agrégats opaques, que ce soit des effets de surface ou de volume. Pour cela, nous nous appuyons sur des simulations de tracer de chemins lumineux dans des structures composées d'amas de sphères opaques (distribution mono-disperse). Les amas de sphères sont paramétrés par leur porosité, ou la proportion de vide dans le matériau ; et par leur anfractuosités qui détermine s'ils sont compactés en surface (cf. Figure 1).

Nos simulations permettent d'évaluer la pertinence de modèles de matériaux poreux existants. Nous montrons que ces modèles ne permettent d'approcher les simulations que pour des structures restreintes: l'espace d'apparence des matériaux poreux reste encore largement non couvert. Notre travail met en avant les effets qu'un modèle de BRDF général devrait reproduire, ce qui aura des applications non seulement en informatique graphique, mais également en télédétection pour l'astronomie ou l'écologie.

2. Travaux précédents

Nous considérons deux approches pour la modélisation de l'apparence de matériaux: surfacique et volumique.

Parmi les modèles surfaciques, les plus employés sont les modèles spéculaires à microfacettes [TS67] [WMLT07]. Ces modèles permettent de représenter l'apparence de divers matériaux: des métaux ou des plastiques (en combinaison avec une composante Lambertienne), à la rugosité plus ou moins prononcée. Dans les simulations que nous avons effectuées, ces modèles sont utilisés pour définir l'apparence des agrégats. La plupart des modèles surfaciques ne sont pas adaptés aux matériaux poreux car la surface est modélisée comme ininterrompue, sans trou ni pore. La méthode de Merillou et al. [MDG00] fait figure d'exception: un modèle surfacique y est modifié en post-traitement pour simuler l'inclusion de pores cylindriques dans une surface. La méthode demeure empirique et limitée à des effets de surface: elle ne s'applique donc pas à des structures composée d'agrégats.

Parmi les modèles approchant les matériaux poreux par une approche volumique, nous retiendrons ceux de Hapke [Hap81], et de d'Eon [d'E21], tous deux basés sur les travaux de Chandrasekhar [Cha60]. La structure d'agrégats est modélisée comme un milieu volumique semi-infini. Hapke a décliné plusieurs versions de son modèle depuis quatre décennies; nous nous intéresserons principalement à deux d'entre elles [Hap86, Hap12].

Une alternative aux modèles analytiques de matériaux est d'obtenir une BRDF par simulation (e.g., [WAT92]). Le résultat d'une simulation de BRDF peut être soit tabulé (e.g., [BRMS20]), soit utilisé à la volée lors du rendu comme il a été proposé pour les matériaux multi-couches (e.g. [GHZ18]). Parmi les travaux existants, l'analyse de Ciarnello et al. [CCF14] se rapproche le plus de notre objectif: ils étudient les approximations faites par différentes versions du modèle de Hapke. Cependant, leurs simulations se limitent à des configurations qui sont favorables aux modèles de Hapke, alors que nous cherchons au contraire à déterminer les limites des modèles existants, et donc d'évaluer les conditions dans lesquelles ils peuvent être mis en échec.

3. Simulations de BRDF

La simulation d'une BRDF consiste à tracer des chemins lumineux dans une scène décrivant la structure du matériau à l'échelle microscopique. Le cas d'une structure d'agrégats est illustré en Figure 2. Les chemins qui sortent de la structure sont collectés dans un hémisphère, ce qui produit une coupe de BRDF suite à une intégration par angle solide. Une BRDF est obtenue en répétant ce processus pour de nombreuses directions d'incidence.

Les géométries utilisées pour les simulations ont été générées procéduralement, le rayon des sphères étant modifié pour faire varier le taux de remplissage (voir Figure 1). Chaque géométrie fait partie d'un groupe composé de 8 réalisations ayant les mêmes paramètres d'anfractuosité et de porosité. La micro-BRDF assignée aux sphères est constante dans la scène, tout comme le rayon des sphères (structure mono-disperse). Comme présenté dans la section 5, plusieurs combinaisons de porosités, d'anfractuosité et de micro-BRDF ont été simulées.

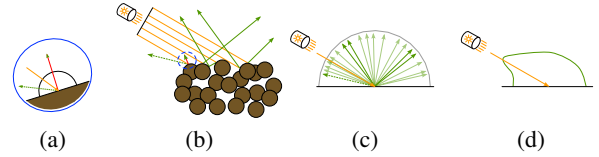


Figure 2: Simulation de BRDF. (a) Un rayon incident (en orange) est réfléchi à la surface d'une sphère selon sa micro-BRDF. (b) Un ensemble de rayons collimatés (en orange) se propage par tracer de chemins dans la structure avant d'en sortir (en vert). Les contributions des rayons sortants sont (c) accumulées dans un hémisphère, puis (d) normalisées en fonction de l'énergie totale émise par la source lumineuse pour obtenir une coupe de BRDF simulée (en vert) pour une direction incidente donnée (en orange).

La source lumineuse utilisée pour la simulation correspond à un faisceau collimaté (voir Figure 2). Elle est configurée de sorte à produire une empreinte d'aire constante sur la géométrie quelle que soit son inclinaison, ce qui permet d'éviter d'utiliser des géométries de plus en plus grandes avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

Lors de la simulation du transport de la lumière, les rayons sortant de la géométrie vers l'hémisphère inférieur et les rayons ayant atteint le nombre maximal de rebonds sont considérés comme ayant une contribution nulle (e.g., comme absorbés).

Familles de chemins Pour chaque chemin lumineux, nous stockons plusieurs informations : sa contribution et sa direction de sortie, ainsi que le nombre de rebonds effectué et la profondeur maximale atteinte. Ces informations sont utiles pour la reconstruction de la BRDF mais aussi pour partitionner les chemins en différentes familles qui permettent d'affiner l'analyse du matériau. Le nombre de rebonds nous permet par exemple de séparer les chemins contribuant à la diffusion simple de ceux contribuant à la diffusion multiple (cf. Figures 4 et 5). La profondeur maximale permet de distinguer les chemins ayant interagi uniquement en surface de ceux qui ont pénétré le volume (cf. Figure 6).

4. Modèles de BRDF considérés

À l'issue de leur analyse, Ciarnello et al. [CCF14] ont identifié deux versions pertinentes du modèle de Hapke: le modèle dit Isotropic Multiple Scattering Approximation [Hap86] (IMSA), qui permet de représenter l'apparence de matériaux fortement poreux malgré sa simplicité; et le modèle de 2012 [Hap12] (H2012) qui permet de prendre en compte diverses porosités.

Le modèle IMSA caractérise la réflectance issue d'un milieu semi-infini en s'appuyant sur une approximation du transfert radiatif. Il définit la BRDF f_r pour des directions entrantes et sortantes ω_i et ω_o comme la somme de deux termes, dûs respectivement aux diffusions simple et multiple :

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r^{SS}(\omega_i, \omega_o) + f_r^{MS}(\omega_i, \omega_o). \quad (1)$$

Le terme de diffusion simple f_r^{SS} repose sur la fonction de phase P du milieu et l'effet d'opposition B (voir plus bas):

$$f_r^{SS}(\omega_i, \omega_o) = \frac{w}{4\pi \cos \theta_i + \cos \theta_o} P(\cos \theta_g) B(\theta_g), \quad (2)$$

124 où $\theta_g = \cos^{-1}(\omega_i \cdot \omega_o)$ est appelé l'angle de phase, et w est l'albédo
 125 de diffusion simple qui décrit la proportion d'énergie repropagée à
 126 chaque évènement de diffusion dans le milieu.

127 Le terme f_r^{MS} représentant la diffusion multiple est donné par :

$$f_r^{MS}(\omega_i, \omega_o) = \frac{w}{4\pi \cos \theta_i + \cos \theta_o} [H(\cos \theta_i)H(\cos \theta_o) - 1], \quad (3)$$

128 avec H une approximation précise de la fonction de Chan-
 129 drasekhar [Cha60], qui fait l'hypothèse de diffusion multiple
 130 isotrope dans le milieu.

131 Le modèle H2012 introduit un paramètre supplémentaire τ , le
 132 taux de remplissage (complément de la porosité, voir Figure 1), qui
 133 modifie à la fois l'intensité globale et la formule de f_r^{MS} [Hap12].

134 **Fonctions de phase** Un avantage des modèles de Hapke est qu'ils
 135 peuvent s'adapter à diverses fonctions de phase. Des formes ana-
 136 lytiques existent pour des cas particuliers (e.g., sphères Lamberti-
 137 ennes [Lam60]). Dans le cas contraire, nous exploitons à nouveau
 138 notre moteur de tracer de chemins pour calculer et tabuler la sec-
 139 tion efficace différentielle de diffusion, à partir de laquelle l'albédo
 140 w et la fonction de phase P peuvent être directement obtenus. Une
 141 simple table 1D suffit étant donné que nos agrégats sont sphériques.

142 **Variante de d'Eon** Un modèle plus précis est proposé par
 143 d'Eon [d'E21] dans le cas d'un matériau fortement poreux ($\tau =$
 144 0.07) composé de sphères Lambertiennes. La différence principale
 145 réside dans le terme de diffusion multiple f_r^{MS} , plus juste (cf., Fig-
 146 ure 5). Le modèle est cependant moins général que ceux de Hapke
 147 et n'inclut pas l'effet d'opposition dans le terme de diffusion sim-
 148 ple. Ce dernier problème peut être trivialement corrigé en utilisant
 149 le terme f_r^{SS} de Hapke (Equation 2) dans le modèle de d'Eon.

150 **Effet d'opposition** Lorsque les directions d'éclairément ω_i et
 151 d'observation ω_o tendent à s'aligner, la portion d'ombre visible
 152 diminue engendrant une augmentation de la réflectance, comme il-
 153 lustré en Figure 3. Cet effet d'opposition est modélisé empirique-
 154 ment par Hapke [Hap86] en considérant les masquages et ombrages
 155 volumiques. L'effet apparait uniquement dans le terme de diffusion
 156 simple (Équation 2) comme une fonction de l'angle de phase :

$$B(\theta_g) = 1 + \frac{B_0}{1 + \frac{1}{h(\tau)} \tan\left(\frac{\theta_g}{2}\right)}, \quad (4)$$

157 avec τ le taux de remplissage, h une fonction de la porosité
 158 qui dépend de la version du modèle de Hapke, et $B_0 = \frac{1}{wP(0)}$
 159 l'amplitude du lobe de rétro-réflexion. Plus la porosité est élevée,
 160 plus l'effet d'opposition est fin (voir Section 5).

161 5. Résultats & analyse

162 Pour notre étude, nous avons réalisé des simulations sur dif-
 163 férentes structures d'agrégats variant selon leur taux de remplis-
 164 sage ($\tau \in \{0.0175, 0.035, 0.07, 0.135, 0.26, 0.47, 0.75, 0.95, 0.99\}$),
 165 les micro-BRDF utilisées (Lambertien avec $\rho_d = 0.5$, GGX micro-
 166 facettes avec $\alpha = 0.02$, $\eta + i\kappa = 1.0152 + 6.6273i$), et avec ou sans
 167 anfractuosité. Dans ce dernier cas, les sphères en surface sont apla-
 168 nies. Les micro-BRDFs utilisées représentent des cas extrêmes.

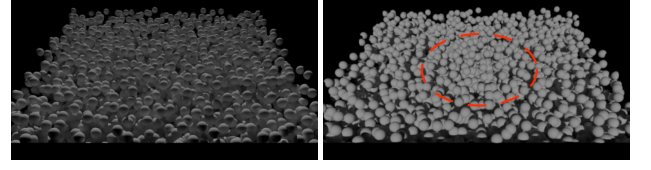


Figure 3: Rendu d'un amas de sphères par une caméra perspec-
 tive. La lumière est soit dans la direction miroir (à gauche), soit
 alignée avec la vue (à droite). L'effet d'opposition est le plus mar-
 qué lorsque les ombres portées sont masquées (ellipse rouge).

169 La Figure 4 présente les comparaisons entre nos simulations
 170 (avec anfractuosités) et le modèle IMSA de Hapke, résumées par
 171 des cartes d'erreur entre des coupes 2D de BRDF pour plusieurs
 172 incidences θ_i et taux de remplissage τ . Chaque coupe de BRDF
 173 $f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta_o$ avec ω_i fixé, est calculée à partir de 384×10^6
 174 chemins. Ces résultats montrent clairement que le modèle IMSA
 175 de Hapke n'est adéquat que pour des valeurs très faibles de τ (les
 176 sphères, pour la plupart, ne se touchant pas). Comme détaillé en
 177 annexe et contrairement à nos attentes, le modèle H2012 a donné
 178 comparativement de moins bons résultats, bien qu'il tienne compte
 179 explicitement du taux de remplissage. Des comparaisons séparées
 180 des termes de diffusion simple et multiple montrent que l'essentiel
 181 de l'erreur est dû à la diffusion simple, notamment aux angles ras-
 182 ants. Le modèle IMSA permet cependant d'approcher très précisé-
 183 ment des distributions de sphères métalliques dans le cas poreux.

184 Le modèle de d'Eon ne possède pas cette généralité, et présente
 185 des cartes d'erreurs sensiblement similaires à celles du modèle
 186 IMSA, comme montré en annexe. Bien que le terme de diffusion
 187 multiple de d'Eon soit plus précis – en particulier à incidence nor-
 188 male (cf. Figure 5) – l'amélioration apportée demeure faible.

189 Les configurations sans anfractuosité présentent des cartes
 190 d'erreur qui diffèrent de celles de la Figure 4 essentiellement aux
 191 angles rasants, hormis lorsque le taux de remplissage est maximal,
 192 comme détaillé en annexe. Il est à noter que dans ce dernier cas,
 193 la BRDF tend logiquement vers la micro-BRDF des agrégats apla-
 194 nis en surface. Afin d'étudier plus finement les effets de surface,
 195 nous présentons en Figure 6 le ratio de la contribution des chemins
 196 lumineux ayant uniquement interagi avec les sphères en surface
 197 sur l'ensemble des chemins, avec ou sans anfractuosités (pour une
 198 micro-BRDF GGX). Nous retrouvons les motifs d'erreurs observés
 199 auparavant, suggérant qu'une partie significative de l'erreur du
 200 modèle IMSA de Hapke est due aux effets de surface. Une com-
 201 paraison des Figures 4 et 6 suggère de plus que l'effet d'opposition
 202 dépend de l'importance de la composante volumique, et tend donc
 203 à disparaître lorsque le taux de remplissage augmente.

204 6. Discussion & travaux futurs

205 Les simulations que nous avons effectuées sur les matériaux poreux
 206 structurés en agrégats montrent que seules les configurations ex-
 207 trêmes sont reproductibles par des modèles de BRDF existants:
 208 structures à très forte porosité via le modèle IMSA de Hapke,
 209 et structures très denses sans anfractuosités via le même modèle
 210 que celui des agrégats sphériques. Un modèle unique qui permet-

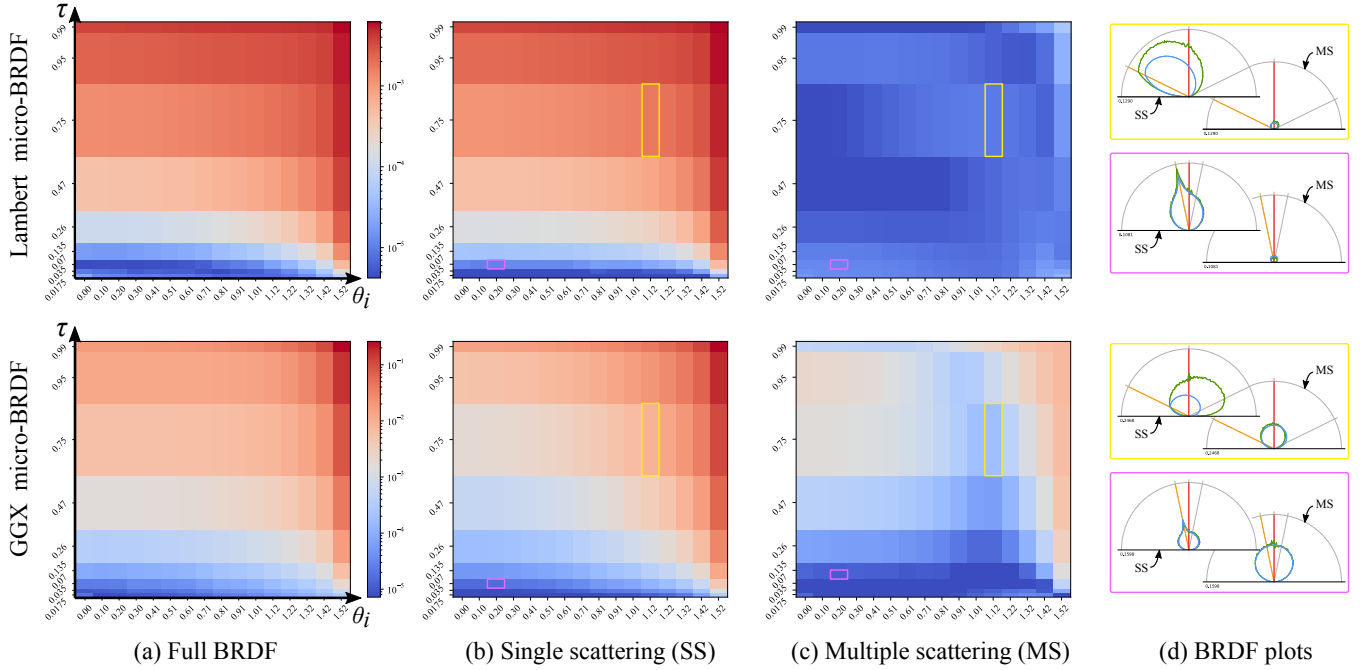


Figure 4: Comparaisons entre des BRDFs simulées et le modèle IMSA de Hapke pour des micro-BRDF Lambertiennes (en haut) et GGX (en bas). Les cartes d'erreur (a) reportent la moyenne des carrés des différences (MSE) entre des coupes 2D de BRDF obtenues par modèle et simulation, pour plusieurs angles d'incidence θ_i et taux de remplissage τ (les échelles de couleur sont logarithmiques et différent par micro-BRDF). Des cartes d'erreur pour les termes de diffusion simple (b) et multiple (c) sont également présentées, montrant la prépondérance de la diffusion simple dans l'erreur totale, en particulier dans le cas de micro-BRDF Lambertienne. Des diagrammes de BRDF (d) permettent de visualiser les sources d'erreur pour deux configurations choisies de θ_i et τ dans le plan d'incidence (les intensités sont normalisées différemment pour chaque configuration, les simulations sont en vert et le modèle en bleu). Bien que le terme MS du modèle IMSA de Hapke soit constant le long de τ , son erreur demeure faible. Au contraire, le terme SS ne donne une bonne approximation qu'aux faibles τ .

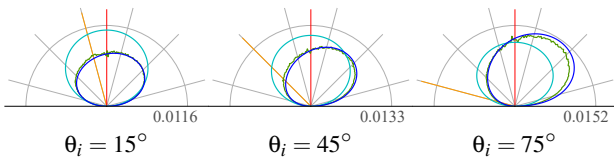


Figure 5: Comparaison du terme de diffusion multiple f_r^{MS} à trois angles d'incidence. La solution de référence calculée par simulation est en vert, le modèle IMSA de Hapke en cyan, et la variante de d'Eon en bleu (ici $w = 0.5$, $\tau = 0.07$).

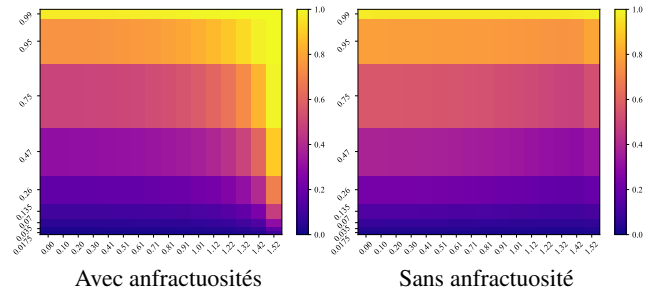


Figure 6: Ratio d'albedo directionel entre une BRDF réduite aux chemins ayant uniquement intégré en surface et la BRDF totale. La présence d'anfractuosités augmente l'erreur aux angles rasants.

211 trait de reproduire non seulement ces cas extrêmes mais également
 212 d'approcher tous les cas de porosité et anfractuosités intermédiaires
 213 reste à trouver. Bien que le modèle de Hapke demeure limité, il
 214 pourrait servir de point de départ dans un modèle hybride général
 215 de matériau poreux, du moment que les agrégats restent opaques. 222
 216 En effet, Skurathov [SKK*12] a montré que le modèle IMSA et 224
 217 ses extensions ne sont pertinents que lorsque la fonction de phase a 225
 218 une asymétrie négative; or cela est souvent le cas pour des agrégats 226
 219 opaques. Une autre piste prometteuse est l'utilisation de modèles 227
 220 de micro-écailles, qui pourraient permettre d'établir un lien entre 228
 221 effets surfaciques et volumiques [DHd16]. 229

Une autre direction de recherche concerne la structuration du
 matériau: nous aimerions conduire des simulations avec des agrégats
 de taille, forme et micro-matériaux variables (i.e., des configura-
 tions polydisperses), et ce afin d'évaluer l'impact de ces varia-
 tions sur les différentes composantes de la BRDF. D'autres types
 de porosité pourraient être étudiées avec cette approche: pores tubu-
 laires, matériaux spongieux, etc. La présence d'eau, en surface et/ou
 dans les pores, serait également un sujet d'étude pertinent.

230 **References**

- 231 [BRMS20] BRINGIER B., RIBARDIÈRE M., MENEVEAUX D., SI-
232 MONOT L.: Design of rough microgeometries for numerical simulation
233 of material appearance. *Appl. Opt.* 59, 16 (Jun 2020), 4856–4864. 2
- 234 [CCF14] CIARNIELLO M., CAPACCIONI F., FILACCHIONE G.: A test of
235 Hapke's model by means of Monte Carlo ray-tracing. *Icarus* 237 (2014),
236 293–305. 2
- 237 [Cha60] CHANDRASEKHAR S.: *Radiative Transfer*. Dover Books on
238 Intermediate and Advanced Mathematics. Dover Publications, 1960. 2,
239 3
- 240 [d'E21] D'EON E.: An analytic brdf for materials with spherical lambertian
241 scatterers. *Computer Graphics Forum* 40, 4 (2021), 153–161. 2, 289
242 3
- 243 [DHd16] DUPUY J., HEITZ E., D'EON E.: Additional progress towards
244 the unification of microfacet and microflake theories. In *Proceedings*
245 *of the Eurographics Symposium on Rendering: Experimental Ideas &*
246 *Implementations* (2016), EGSR '16, p. 55–63. 4
- 247 [GHZ18] GUO Y., HAŠAN M., ZHAO S.: Position-free monte carlo simu-
248 lation for arbitrary layered bsdfs. *ACM Trans. Graph.* 37, 6 (2018).
249 2
- 250 [Hap81] HAPKE B.: Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. theory.
251 *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 86, B4 (1981), 3039–
252 3054. 2
- 253 [Hap86] HAPKE B.: Bidirectional reflectance spectroscopy: 4. The ex-
254 tinction coefficient and the opposition effect. *Icarus* 67, 2 (1986), 264–
255 280. 2, 3
- 256 [Hap12] HAPKE B.: *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*,
257 2 ed. Cambridge University Press, 2012. 2, 3
- 258 [Lam60] LAMBERT J.: *J. H. Lambert, ... Photometria, sive de Mensura et*
259 *gradibus luminis, colorum et umbrae*. sumptibus viduae E. Klett, 1760.
260 3
- 261 [MDG00] MERILLOU S., DISCHLER J.-M., GHAZANFARPOUR D.: A
262 brdf postprocess to integrate porosity on rendered surfaces. *IEEE Trans-*
263 *actions on Visualization and Computer Graphics* 6, 4 (2000), 306–318.
264 2
- 265 [SKK*12] SHKURATOV Y., KAYDASH V., KOROKHIN V., VELIKOD-
266 SKY Y., PETROV D., ZUBKO E., STANKEVICH D., VIDEEN G.: A critical
267 assessment of the Hapke photometric model. *Journal of Quantitative*
268 *Spectroscopy and Radiative Transfer* 113, 18 (Dec. 2012), 2431–2456. 4
- 269 [TS67] TORRANCE K. E., SPARROW E. M.: Theory for off-specular
270 reflection from roughened surfaces*. *J. Opt. Soc. Am.* 57, 9 (Sep 1967),
271 1105–1114. 2
- 272 [WAT92] WESTIN S. H., ARVO J. R., TORRANCE K. E.: Predicting
273 reflectance functions from complex surfaces. In *Proceedings of the 19th*
274 *Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*
275 (1992), SIGGRAPH '92, p. 255–264. 2
- 276 [WMLT07] WALTER B., MARSCHNER S. R., LI H., TORRANCE K. E.:
277 Microfacet models for refraction through rough surfaces. In *Proceedings*
278 *of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques* (2007),
279 EGSR'07, p. 195–206. 2

280 **Appendix A: Résultats supplémentaires**

281 **Comparaisons supplémentaires** La Figure 7 montre la comparai-
282 son entre nos simulations et les modèles H2012 de Hapke, ainsi que
283 celui de d'Eon auquel nous avons incorporé l'effet d'opposition.
284 Nous utilisons la même métrique d'erreur, appliquée sur la totali-
285 té chemins. Dans le cas de sphères Lambertiennes, les erreurs sont
286 légèrement moindres avec le modèle de d'Eon qu'avec le modèle
287 IMSA de Hapke. Le modèle H2012 de Hapke produit des erreurs
288 plus grandes quel que soit le micro-matériau considéré.

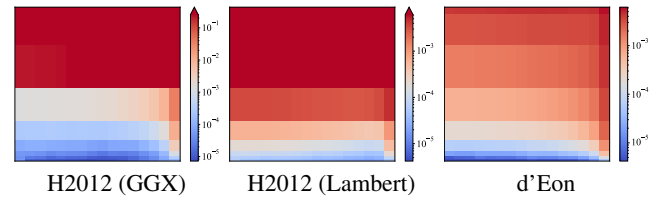


Figure 7: Cartes d'erreur pour des structures avec anfractuosité, pour les modèles H2012 de Hapke ainsi que celui de d'Eon.

Absence d'anfractuosité La métrique MSE est inadaptee à l'évaluation du modèle IMSA de Hapke dans le cas d'une structure sans anfractuosité. En effet, le pic spéculaire produit par les portions de surface planes produit de très fortes erreurs même à de faibles valeurs de τ . Dans la Figure 8, nous appliquons une transformation sur les données ($\sqrt[3]{f_r \cos \theta_o}$) préalablement au calcul de la métrique MSE, et nous comparons les cartes obtenues pour des structures avec et sans anfractuosité. Pour les deux types de micro-BRDFs, deux différences sont observables dans le cas sans anfractuosité: l'erreur augmente plus rapidement le long de l'axe τ , mais plus doucement le long de l'axe θ_i . Notons également une légère diminution de l'erreur aux angles rasants et faibles τ dans le cas GGX, attribuable à l'atténuation du pic spéculaire par le terme $\cos \theta_o$.

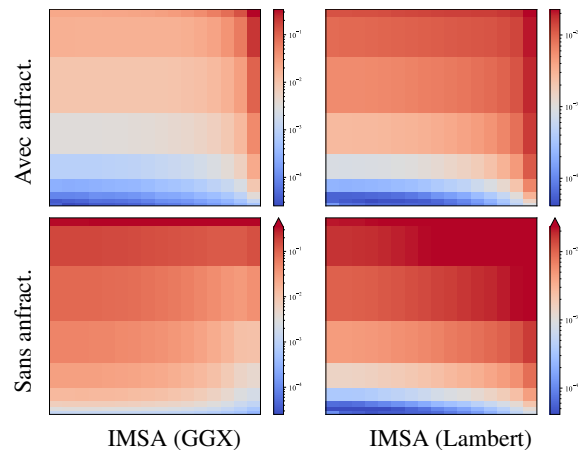


Figure 8: Cartes d'erreur (avec tone mapping préalable) pour des structures avec et sans anfractuosité. L'absence d'anfractuosité entraîne des variations plus douces aux angles rasants.

Lorsque le taux de remplissage augmente, la BRDF simulée converge logiquement vers la micro-BRDF des agrégats, comme montré en Figure 9 pour le cas d'une micro-BRDF GGX.

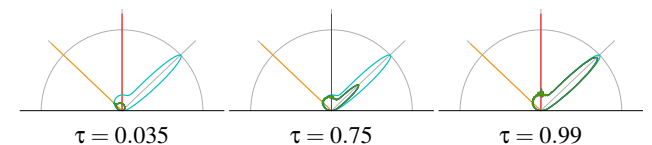


Figure 9: Convergence de la BRDF simulée (en vert) vers la micro-BRDF (en cyan) pour des valeurs croissantes de τ .