

UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE  
POLITEHNICA BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE CALCULATOARE



# PROIECT DE DIPLOMĂ

Implementarea algoritmului Ray Tracing  
folosind arhitectura DirectX Raytracing

Alex-Andrei Cioc

**Coordonator științific:**

Conf. Dr. Ing. Victor Asavei

**BUCUREȘTI**

2024

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
POLITEHNICA BUCHAREST  
FACULTY OF AUTOMATIC CONTROL AND COMPUTERS  
COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING DEPARTMENT



## DIPLOMA PROJECT

Implementation of the Ray Tracing algorithm  
using the DirectX Raytracing architecture

Alex-Andrei Cioc

**Thesis advisor:**

Conf. Dr. Ing. Victor Asavei

**BUCHAREST**

2024

# CUPRINS

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
1.1	Context . . . . .	1
1.2	Problema . . . . .	1
1.3	Obiective . . . . .	3
1.4	Soluția propusă . . . . .	4
1.5	Rezultatele obținute . . . . .	5
1.6	Structura lucrării . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Motivație de cercetare</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Metode Existente</b>	<b>10</b>
3.1	Rasterizare . . . . .	10
3.2	Ray Tracing . . . . .	11
3.3	Metode Monte Carlo . . . . .	15
3.3.1	Integrare Monte Carlo . . . . .	16
3.3.2	Eșantionare bazată pe importanță . . . . .	17
3.3.3	Eșantionare Stratificată . . . . .	18
3.3.4	Ecuatia transportului luminii . . . . .	19
3.4	Radiosity . . . . .	20
3.5	Path Tracing . . . . .	21
3.5.1	Strategii de eșantionare a pixelilor . . . . .	23
3.5.2	Strategii de alegere a funcției de distribuție a reflectantei . . . . .	24
3.5.3	Strategii de eșantionare a direcțiilor de ieșire . . . . .	32
3.5.4	Next Event Estimation . . . . .	34
3.6	Accelerare Hardware . . . . .	35

3.6.1	Vulkan . . . . .	36
3.6.2	DirectX 12 . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Soluția Propusă</b>	<b>37</b>
4.1	Comparație cu Ray Tracing Whitted . . . . .	37
4.2	Tehnici de accelerare a convergenței . . . . .	38
4.3	Suport pentru suprafete implice și analitice . . . . .	40
4.4	Sistemul de materiale . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Detalii de implementare</b>	<b>46</b>
5.1	Indicații formatare tabele . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Evaluare</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Concluzii</b>	<b>48</b>
<b>Anexe</b>		<b>52</b>
<b>Anexa A</b>	<b>Figuri</b>	<b>53</b>
<b>Anexa B</b>	<b>Extrase de cod</b>	<b>56</b>

## SINOPSIS

Algoritmul Ray Tracing este o tehnică de randare a imaginilor care simulează propagarea și comportamentul razelelor de lumină într-o scenă tridimensională. Acesta este adesea folosit în industria cinematografică pentru a obține imagini fotorealiste. Până de curând, natura computațională intensivă a acestui algoritm a limitat utilizarea sa în aplicații interactive, precum jocurile video. Totuși, cu avansul tehnologiei, utilizarea acestuia a devenit tot mai accesibilă și pentru aceste aplicații. Suport hardware pentru Ray Tracing în contextul consumatorilor a fost introdus de NVIDIA în 2018, prin intermediul arhitecturii Turing.<sup>1</sup> Tot în același an, Microsoft a anunțat DirectX Raytracing<sup>2</sup> (DXR), o extensie a API-ului DirectX 12 care permite programatorilor să folosească Ray Tracing în aplicațiile lor, utilizând hardware-ul compatibil.

Lucrarea de față își propune să studieze și să implementeze algoritmul Ray Tracing pe un sistem de calcul modern, folosind accelerarea hardware oferită de arhitectura DirectX Raytracing. Acest algoritm va fi folosit pentru randarea iluminării unor scene arbitrare, în timp real, oferind o reprezentare fotorealistă a acestora. În cadrul lucrării se va realiza o analiză a performanțelor implementării curente, atât a fidelității imaginilor generate, cât și a eficienței spațio-temporale a implementării. Se vor explora și posibilitățile de optimizare a algoritmului, precum și modul în care acestea pot fi folosite pentru a îmbunătăți performanțele sistemului.

## ABSTRACT

The Ray Tracing algorithm is an image rendering technique that simulates the propagation and behavior of light rays in a three-dimensional scene. It is often used in the film industry to achieve photorealistic images. Until recently, the computationally intensive nature of this algorithm has limited its use in interactive applications, such as video games. However, with technological advances, its use has become increasingly accessible for these applications as well. Hardware support for Ray Tracing in the consumer context was introduced by NVIDIA in 2018, through the Turing<sup>1</sup> architecture. In the same year, Microsoft announced DirectX Raytracing<sup>2</sup> (DXR), an extension of the DirectX 12 API that allows programmers to use Ray Tracing in their applications, using compatible hardware.

This paper aims to study and implement the Ray Tracing algorithm on a modern computing system, using the hardware acceleration provided by the DirectX Raytracing architecture. This algorithm will be used for rendering the lighting of arbitrary scenes, in real-time, providing a photorealistic representation of them. The paper will perform an analysis of the current implementation's performance, both in terms of the fidelity of the generated images and the spatio-temporal efficiency of the implementation. It will also explore the possibilities for optimizing the algorithm, as well as how these can be used to improve the system's performance.

---

<sup>1</sup><https://images.nvidia.com/aem-dam/en-zz/Solutions/design-visualization/technologies/turing-architecture/NVIDIA-Turing-Architecture-Whitepaper.pdf>. Accesat 10.06.2024.

<sup>2</sup><https://devblogs.microsoft.com/directx/announcing-microsoft-directx-raytracing/>. Accesat 10.06.2024.

## **MULTUMIRI**

Adresez mulțumiri coordonatorului meu de proiect, Conf. Dr. Ing. Victor Asavei, pentru îndrumarea și sprijinul acordat pe parcursul realizării acestei lucrări, dar și pentru inspirația și motivația oferită în cadrul cursurilor de Elemente de Grafică pe Calculator. De asemenea, mulțumesc familiei și prietenilor pentru susținere și încurajare.

# 1 INTRODUCERE

## 1.1 Context

Industria jocurilor video este una dintre cele mai mari și mai profitabile industrii de divertisment din lume. În 2021, piața jocurilor video era evaluată la aproximativ 202.64 miliarde de dolari și este estimat să se extindă la o rată anuală compusă de creștere de 10.2% în perioada 2022-2030.<sup>1</sup> Această industrie este alimentată de cererea pentru experiențe interactive și captivante, care să ofere o experiență de joc cât mai realistă și cât mai imersivă. Toate studio-urile de dezvoltare de jocuri video AAA (i.e., jocuri cu bugete mari și echipe de dezvoltare extinse) investesc resurse semnificative în dezvoltarea de tehnologii care să le permită să creeze jocuri cu grafică de înaltă calitate. Aceste tehnologii includ motoare grafice puternice, care să permită randarea unor scene complexe, cu iluminare realistă și efecte speciale impresionante. Multe studio-uri folosesc propriile motoare dezvoltate in-house (e.g., Frostbite de la EA, CryEngine de la Crytek, Anvil de la Ubisoft), dar există și motoare comerciale, precum Unreal Engine și Unity. Aceste motoare oferă un set de instrumente și funcționalități care permit dezvoltatorilor să creeze jocuri video de înaltă calitate, fără a fi nevoie să dezvolte de la zero toate componentele necesare. O componentă critică a acestor motoare este motorul grafic, care se ocupă de randarea scenei jocului, de la geometria obiectelor până la iluminare și efecte speciale. Astfel, programatorii, artiștii, animatorii și designerii de jocuri pot să se concentreze pe crearea conținutului jocului, fără a fi nevoie să se ocupe de detalii tehnice ale randării grafice.

## 1.2 Problema

Tehnica tradițională și cea mai răspândită de randare a imaginilor în jocurile video este rasterizarea. Această tehnică se bazează pe proiecția obiectelor 3D pe un plan bidimensional, folosind o serie de algoritmi și tehnici pentru a simula iluminarea și efectele speciale. Rasterizarea este o tehnică eficientă și rapidă, care permite randarea unui număr mare de obiecte în timp real, dar are și limitări. Una dintre cele mai mari limitări ale rasterizării este incapacitatea de a simula iluminarea globală, care este esențială pentru obținerea unor imagini fotorealiste. De asemenea, reflexiile și refractiile pot fi doar approximate, de exemplu prin tehnici de cubemapping sau screen-space reflections. Aceste tehnici sunt eficiente, dar nu oferă rezultate realistice, iar în multe cazuri pot fi observate artefacte vizuale care afectează calitatea imaginii.

În continuare se evidențiază aceste limitări (care nu sunt deloc exhaustive) ale rasterizării, prin

---

<sup>1</sup><https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gaming-industry>. Accesat 10.06.2024.

comparație cu tehnica de Ray Tracing (așa numita *RTX* în jocurile sponsorizate de Nvidia). Comparând Figurile 1 și 2, se observă neajunsul reflexiilor în screen space. Atâtă timp cât obiectele reflectate se află în viewport, reflexiile sunt corecte și realiste. Însă, dacă obiectele ies din viewport, reflexiile se pierd, ceea ce duce la o imagine nerealistă. Un alt exemplu și mai elovent este ilustrat în Figura 4, unde imaginea randată cu Ray Tracing redă reflexii ale exploziei care nu este vizibilă decât parțial în cadru.



Figura 1: Screen space reflections în Minecraft<sup>2</sup>

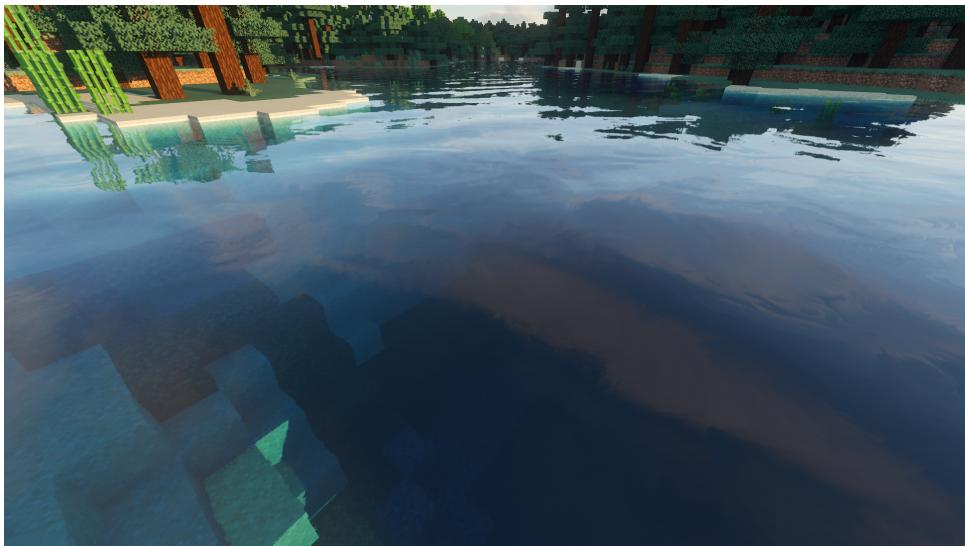


Figura 2: Artefacte vizuale în screen space reflections.<sup>2</sup> Se poate observa cum reflexiile se pierd dacă obiectele reflectate ies din viewport

Am văzut cum tehnica de Ray Tracing poate oferi rezultate mult mai realiste decât rasterizarea, dar această tehnologie vine cu un cost. Algoritmul Ray Tracing este computațional intensiv,

<sup>2</sup>Shader folosit: <https://continuum.graphics/>. Accesat 10.06.2024.

<sup>3</sup>©Nvidia Corporation: <https://blogs.nvidia.com/blog/geforce-rtx-real-time-ray-tracing/>. Accesat 10.06.2024.

<sup>4</sup>©Nvidia Corporation: <https://www.youtube.com/watch?v=WoQr0k2IA9A>. Accesat 10.06.2024.

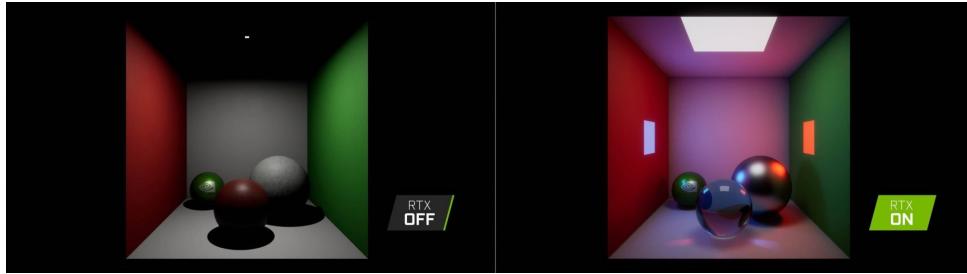


Figura 3: Iluminarea globală este absentă în imaginea randată cu rasterizare<sup>3</sup>

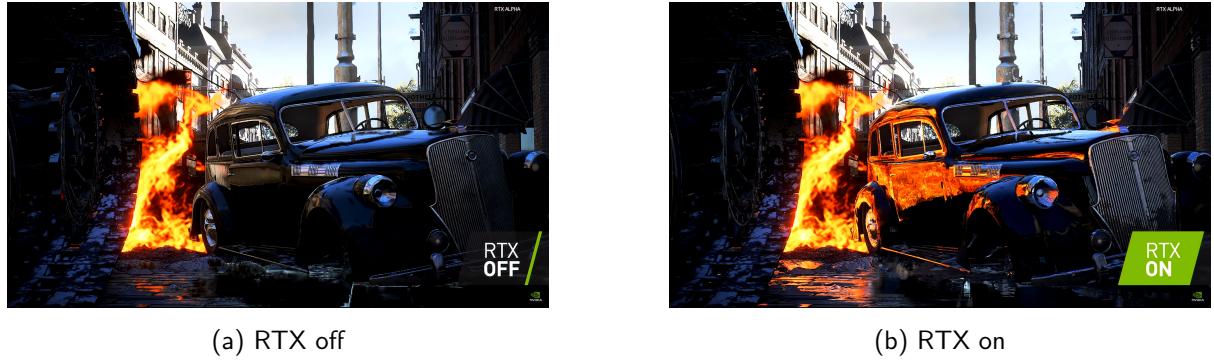


Figura 4: Comparație RTX on/off în Battlefield V<sup>4</sup>

deoarece necesită calcularea intersecțiilor mai multor raze de lumină pentru fiecare pixel cu obiectele din scenă și calcularea contribuției acestora la culoarea pixelului. Pentru a obține o imagine de calitate, este nevoie de un număr mare de raze de lumină și tehnici de denoising, ceea ce face ca algoritmul să fie greu de balansat între fidelitate și performanță.

### 1.3 Obiective

Scopul acestei lucrări este de a cerceta și implementa algoritmul Ray Tracing în context de timp real și a evalua performanțele acestuia, prin comparație cu implementări destinate producției cinematografice. Eforturile vor fi concentrate pe implementarea unui motor grafic simplu, cu câteva funcționalități de bază:

- Controle de cameră simple (mișcare, rotire)
- Randarea obiectelor definite ca mesh-uri triunghiulare
- Randarea obiectelor definite prin funcții隐式 (e.g., sfere, planuri)
- Suport pentru materiale PBR (Physically Based Rendering)
- Suport pentru mai multe scene precum:
  - Cornell Box<sup>5</sup>
  - Demonstrație a suprafeteelor implicită

<sup>5</sup><https://www.graphics.cornell.edu/online/box/>. Accesat 19.06.2024.

- Scenă de testare a materialelor PBR
- Meniu de configurare a mai multor parametri (e.g., pentru materiale, configurarea algoritmului etc.),

precum și a unor efecte de iluminare care să ofere o imagine fotorealistică a scenei:

- Iluminare globală
- Reflexii și refracții
- Umbre.

De asemenea, vom explora și implementa tehnici de optimizare a algoritmului propriu-zis, pe care le vom evalua în contextul de performanță și fidelitate obținute.

În final, dorim să obținem o implementare eficientă, care să țintească un frametime de 33.3ms (30 de cadre pe secundă) la o rezoluție Full HD (1920x1080), pentru hardware entry-level cu suport pentru DirectX Raytracing (e.g., Nvidia GeForce RTX 2060).

## 1.4 Soluția propusă

Soluția propusă este un motor grafic simplu de utilizat. Din perspectiva utilizatorului, acesta are un meniu din care poate configura diversi parametri ai algoritmului de Ray Tracing, precum și ai scenei. Utilizatorul poate încărca scene predefinite și poate interacționa cu acestea folosind controalele de cameră.

La nivel de bază, motorul grafic conține două implementări din clasa algoritmilor de Ray Tracing. Prima este o versiune simplă a algoritmului original descris de Whitted (1979) [37], peste care se aplică modelul clasic de iluminare Phong (1975) [26]. Această implementare a fost adaptată din codul sursă suport oferit de Microsoft [24]. A doua implementare este scrisă de la zero și folosește algoritmul de tip Monte Carlo Path Tracing pentru a rezolva ecuația de iluminare globală propusă de Kajiya (1986) [16]. Fără a intra în prea multe detalii tehnice (vezi capitolul 3), această ecuație descrie cantitatea de lumină emisă dintr-un punct de pe o suprafață, de-a lungul unei direcții de vizualizare, dându-se o funcție de distribuție a luminii și un BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) pentru materialul de pe suprafață. Ecuția conține o integrală de suprafață (peste emisfera unitate), care integrează contribuțiile din toate direcțiile. Pentru eficiență, această integrală este eșantionată folosind tehnici de eșantionare bazate pe importanță, descrise în capitolul 3. Totuși, numărul de eșantioane per pixel rămâne în continuare foarte limitat, din cauza bugetului de calcul (nu depășește 16 eșantioane per pixel). Pentru a reduce în continuare varianța (manifestată prin zgomot în imaginea finală), se folosește un algoritm de denoising în fază de post procesare. Mai multe detalii tehnice despre implementare sunt prezentate în capitolul 5.

Algoritmul de Path Tracing folosește un sistem de materiale diferit de cel folosit de algoritmul Whitted. Dacă acesta din urmă este limitat de modelul simplu de iluminare Phong, Path Tracing folosește un model PBR (Physically Based Rendering) inspirat de cel introdus de Burley în 2012 [7], pentru a fi folosit în producția filmelor marca Walt Disney Animation Studios. Varianta implementată în această lucrare este augmentată cu o componentă de transmisie, descrisă într-un curs organizat de Hill et al. la conferința SIGGRAPH din 2015 [14]. Acest model este mult mai complex, având la bază un BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function - oferă și o componentă de transmisie a luminii prin materiale) care descrie cum un material interacționează cu lumina incidentă. Fiind totuși folosit în producția cinematografică, modelul se concentrează pe a avea o interfață cât mai intuitivă pentru artistul grafic, deviând puțin de la un model fizic strict. Bazele teoretice și implementarea acestui model PBR sunt descrise în sectiunile 3 și 5.

Pentru evaluare se folosesc 2 scene distincte. Se va putea face o comparație între cei doi algoritmi de Ray Tracing. Se va mai observa și capabilitatea algoritmului de Path Tracing de a simula surse de lumină de tip area light, care sunt dificil de modelat în algoritmul Whitted. Prima scenă este un test al materialelor PBR, exclusiv pentru algoritmul de Path Tracing. Aceasta permite utilizatorului să tuneze parametrii materialelor de pe câteva sfere pentru a observa cum aceștia influențează aspectul final al obiectelor. A doua scenă testează performanțele de rulare a algoritmilor. Aceasta conține mai multe obiecte definite prin suprafete implice și obiecte definite ca mesh-uri triunghiulare.

## 1.5 Rezultatele obținute

//TODO

Descriere pe scurt a rezultatelor obținute, eventual de ce acestea sunt importante față de alte soluții sau studii.

## 1.6 Structura lucrării

Vreau să încep prin a clarifica faptul că această lucrare nu își propune să introducă noi metode sau concepte în domeniul graficii pe calculator. Scopul acesteia este de a experimenta și de a înțelege mai bine tehnologiile existente, precum și de a pune în practică teoria care stă la baza acestora. Lucrarea este structurată într-o parte teoretică inițială, menită să familiarizeze cititorul printr-o introducere lină în conceptele care stau la baza algoritmului de Path Tracing, și o parte practică, care se concentrează pe utilizarea API-ului DirectX12 pentru a implementa algoritmul cu accelerare hardware. Din nou, nici conceptele tehnice din urmă nu vor fi prezentate într-o lumină precisă, ci mai degrabă într-un mod simplificat și intuitiv.

În capitolul 2 este descris contextul actual în care se plasează eforturile din domeniu, din

perspectiva industriilor de gaming și de cinematografie, și se prezintă motivațiile principale pentru a continua avansurile în cercetare.

În capitolul 3 se analizează stadiul curent al cercetărilor în domeniul algoritmilor de Path Tracing, cu focus pe optimizări pentru timp real. De asemenea, se poziționează lucrarea de față în acest peisaj și se conturează aspectul didactic al acesteia.

În capitolul 4 se prezintă bazele teoretice ale algoritmilor utilizați (Ray Tracing Whitted și Path Tracing), iar pentru cel din urmă se detaliază modelul de materiale PBR folosit și tehniciile de denoising. De asemenea, se descrie arhitectura generală a motorului grafic, cu accent pe concepte din API-urile DirectX 12 și DXR.

Capitolul 5 detaliază utilizarea API-urilor DirectX 12 și DXR pentru implementarea algoritmilor de Ray Tracing cu accelerare hardware. Accentul este pus pe transpunerea aspectelor teoretice în cod și pe deciziile de design luate pentru a obține o implementare eficientă și ușor de înțeles. Tot aici se notează și dificultățile întâmpinate și compromisurile făcute pentru a obține un echilibru între fidelitate și performanță.

Capitolul de evaluare 6 prezintă rezultatele obținute în urma testelor efectuate pe cele trei scene descrise anterior. Se analizează performanțele sistemului, fidelitatea imaginilor generate și se fac comparații între cei doi algoritmi de Ray Tracing. De asemenea, se analizează impactul pe care îl au diferitele optimizări asupra stabilității imaginilor generate.

Ultimul capitol 7 conține concluziile trase din rezultatele obținute și se analizează calitativ produsul final. De asemenea, se discută posibile direcții de dezvoltare viitoare și se oferă o perspectivă asupra importanței acestei lucrări în contextul cercetării în domeniul graficii pe calculator.

Extrase de cod și imagini detaliate sunt oferite în anexă.

## 2 MOTIVATIE DE CERCETARE

Proiectul de față cercetează tehnici de randare a imaginilor în timp real. Acst domeniu este de mare interes pentru industria jocurilor video, care investesc resurse semnificative în dezvoltarea de motoare grafice puternice.

Un studiu de caz recent<sup>1</sup> analizează costurile de dezvoltare ale unui joc video AAA. Două dintre jocurile cu cel mai mare buget sunt Grand Theft Auto V și Cyberpunk 2077, care investesc peste 270, respectiv 300 milioane de dolari în dezvoltare și marketing. O parte importantă a acestor bugete a fost alocată pentru dezvoltarea motoarelor grafice proprietare.

RAGE (Rockstar Advanced Game Engine) este motorul grafic folosit de Rockstar Games pentru jocurile sale de tip open-world, precum GTA V. Acesta a trebuit să fie adaptat pentru portarea jocului pe consolele de nouă generație (PS4 și Xbox One) și pentru PC, suportând rezoluții de până la 4K pe PC.<sup>2</sup> RAGE a primit o iterare semnificativă odată cu lansarea Red Dead Redemption 2 în 2018 (un alt joc cu un buget de dezvoltare mare, de peste 100 milioane de dolari<sup>1</sup>), care a adus noi tehnici de randare precum suport PBR, nori volumetrici și iluminare globală precalculată.<sup>3,4</sup>

Cyberpunk 2077 a început dezvoltarea folosind un nou motor REDEngine 3,<sup>5</sup> creat special pentru a îmbina o lume de joc vastă și detaliată cu o poveste complexă, bazată pe deciziile jucătorului. Totuși, acest motor nu era destul de flexibil pentru a suporta toate cerințele jocului<sup>6</sup> (precum first person shooting și condus de mașini), așa că au început lucrul la o nouă versiune, REDEngine 4, folosind un grant de 7 milioane de dolari de la guvernul polonez.<sup>7</sup> Nici acest proces nu a fost fără dificultăți (lansarea jocului a fost dezastruoasă și plină de bug-uri,<sup>8</sup> iar studio-ul a decis după lansare să tranzitioneze către Unreal Engine 5<sup>7</sup> pentru jocurile viitoare), dar a permis jocului să fie primul care să ofere iluminare realizată integral cu

<sup>1</sup><https://vnextglobal.com/category/blog/game-development-cost-an-in-depth-analysis>. Accesat 19.06.2024.

<sup>2</sup><https://www.eurogamer.net/digitalfoundry-2015-grand-theft-auto-5-pc-face-off>. Accesat 19.06.2024.

<sup>3</sup><https://www.eurogamer.net/digitalfoundry-2017-red-dead-redemption-2-trailer-tech-analysis>. Accesat 19.06.2024.

<sup>4</sup><https://www.eurogamer.net/digitalfoundry-2018-red-dead-redemption-2-tech-analysis>. Accesat 19.06.2024.

<sup>5</sup><https://www.engadget.com/2013-02-01-cd-projekt-red-introduces-redengine-3-latest-iteration-of-in-ho.html>. Accesat 19.06.2024.

<sup>6</sup><https://www.superjmpmagazine.com/why-cd-projekt-reds-switch-to-unreal-engine-is-a-big-deal/>. Accesat 19.06.2024.

<sup>7</sup>[https://www.wipo.int/edocs/mdocs/en/wipo\\_smes\\_ge\\_20/wipo\\_smes\\_ge\\_20\\_p3.pdf](https://www.wipo.int/edocs/mdocs/en/wipo_smes_ge_20/wipo_smes_ge_20_p3.pdf). Accesat 19.06.2024.

<sup>8</sup><https://gamerant.com/cyberpunk-2077-review-bombing-negative-impact-bad-example/>. Accesat 19.06.2024.

Path Tracing.<sup>9</sup> Acest lucru a fost posibil datorită colaborării cu Nvidia,<sup>10</sup> care a oferit suport în implementarea tehnologiei RTX în REDengine 4.

Am văzut astfel ce eforturi depun companiile mari pentru a aduce fidelitate grafică în jocurile lor. Un studiu realizat de Tondello și Nacke în 2019[32] pe două esantioane de gameri a arătat că majoritatea jucătorilor sunt interesati de aspectele estetice ale jocurilor video, precum grafica și sunetul. În alt studiu realizat de Katja et al. în 2022[28], s-a analizat concepția literaturii asupra realismului în jocuri video. Deși s-a concluzionat că acest termen nu este bine definit de multe ori, cel mai adesea în literatură acesta se referă, printre altele, la fidelitatea grafică a jocului.

Așadar, unul dintre cele mai importante aspecte ale unui joc video, în relație cu experiența jucătorului, este fidelitatea grafică.<sup>11</sup> Aceasta este influențată de calitatea modelelor 3D, a texturilor, a animațiilor, a efectelor speciale, dar și de iluminare. Iluminarea este un aspect critic al fidelității grafice, deoarece aceasta influențează cum percepem obiectele din joc. O lume frumos modelată nu poate avea un impact vizual puternic dacă nu este pusă într-o "lumină bună". Această "lumină bună" izvorăște adânc din tehnologiile folosite de motorul grafic pentru a da valoare obiectelor în scenă. Deși există multe stiluri atractive de a prezenta o scenă (e.g., cel-shading, pixel art), realismul este unul dintre cele mai populare, deoarece oferă o experiență de joc mai imersivă. Clasa de algoritmi de Ray Tracing este una dintre cele mai bune tehnici de a obține realism în jocuri, însă aceasta vine cu un cost computațional ridicat. De aceea, eforturi de cercetare în domeniul său sunt necesare pentru a găsi soluții care să ofere un compromis între fidelitate și performanță.<sup>12</sup> Ca referință, NVIDIA oferă public multe studii de cercetare și articole științifice publicate de echipa lor de cercetare.<sup>13</sup> Marea majoritate se concentrează pe optimizarea tehnicii de prezentare grafică (Path Tracing reprezentând o parte importantă a acestora) și oferă o privire de ansamblu asupra eforturilor de cercetare în domeniu.

Ca o ultimă observație, să ne imaginăm că fidelitatea cu care se realizează producția filmelor de animație ar putea fi adusă în jocurile video. Din cealaltă perspectivă, filmele video ar putea fi randate în timp real, fără consum enorm de energie. Aceste avantaje ar reduce costurile de producție și ar accelera procesul de dezvoltare a filmelor. Eforturile de cercetare în domeniu sunt necesare pentru a face aceste viziuni realitate.

La nivel personal, această lucrare reprezintă o oportunitate de a învăța și de a experimenta cu tehnologii avansate de randare a imaginilor. Scriu lucrarea de față în ideea în care dacă ar fi să o iau de la început și să învăț aceste concepte din nou, aş vrea să am la dispoziție un

<sup>9</sup><https://www.tomshardware.com/news/cyberpunk-277-rt-overdrive-available-to-all>. Accesat 19.06.2024.

<sup>10</sup><https://www.nvidia.com/en-us/geforce/news/cyberpunk-2077-nvidia-partnership-ray-tracing/>. Accesat 19.06.2024.

<sup>11</sup><https://goombastomp.com/why-good-graphics-matter-in-video-games-enhancing-the-visual-experience/>. Accesat 19.06.2024.

<sup>12</sup><https://blogs.nvidia.com/blog/rtx-real-time-ray-tracing/>. Accesat 19.06.2024.

<sup>13</sup><https://research.nvidia.com/labs/rtr/publication/>. Accesat 19.06.2024.

ghid simplu și intuitiv care să mă ajute să înțeleg teoria și să o pun în practică. În cercetarea efectuată de mine nu am găsit o introducere completă și accesibilă, mai ales în contextul API-urilor de ultimă generație precum DirectX 12. Așadar, această lucrare își propune să fie un astfel de ghid, care să ofere cititorului o introducere lină și încurajatoare.

### 3 METODE EXISTENTE

Literatura de specialitate din domeniul graficii pe calculator este vastă. Există multe metode de randare a imaginilor și se dă o luptă constantă între a balansa performanța cu fidelitatea. Direcția de cercetare cea mai proeminentă se axează în jurul metodelor de tip Monte Carlo, care reprezintă state-of-the-art în domeniu. Deși concepțele care vor fi prezentate nu sunt noi (metode de rezolvare a ecuației de randare există de aproape 40 ani), apar întotdeauna noi tehnici de optimizare și de îmbunătățire a performanțelor de convergență și de stabilitate a algoritmilor. Pentru o privire mai detaliată asupra avansurilor curente și asupra viitorului cercetării în domeniu, notițele de curs din 2019 ale lui Keller et al. [17] sunt o resursă excelentă. De asemenea, pentru o privire de ansamblu și de actualitate asupra tehnologiilor de accelerare în timp real folosite în industria jocurilor video (mai ales cele de la Nvidia - RTXDI, RTXGI, NRD, DLSS), recomand prezentarea de la GTC și GDC 2022 a lui Clarberg et al. [8], din partea Nvidia Corporation.

În continuare, vom prezenta fundamentele teoretice ale clasei de algoritmi Ray Tracing și vom analiza cele mai importante metode existente.

#### 3.1 Rasterizare

Pentru a avea un punct de plecare, vom vorbi puțin și despre rasterizare. Aceasta este metoda de bază folosită în majoritatea jocurilor video din trecut și de astăzi. Ea este reprezentată ca un stagiu fix (neprogramabil) din pipeline-ul de randare al GPU-ului (vezi Figura 34), care transformă primitivele definite vectorial (triunghiuri, linii, puncte) în pixeli pe ecran. Acest proces este foarte eficient, deoarece folosește hardware specializat pentru a face calculele necesare.

Etapele principale ale rasterizatorului sunt<sup>1</sup>:

1. *Clipping* - eliminarea primitiveelor care nu se află în câmpul vizual (view frustum)
2. *Perspective division* - împărțirea coordonatelor omogene pentru a obține coordonatele normalize (NDC)
3. *Transformarea viewport* - transformarea coordonatelor normalize în coordonate ecran
4. *Rasterizarea* - determinarea pixelilor acoperiți de primitivă.

După rasterizare urmează etapa programabilă de pixel shader, unde se calculează de obicei

---

<sup>1</sup><https://learn.microsoft.com/en-us/windows/uwp/graphics-concepts/rasterizer-stage--rs->. Accesat 19.06.2024.

efecte de iluminare, umbre, texturi etc. Un exemplu de imagine randată cu rasterizare se poate vedea în Figura 5.

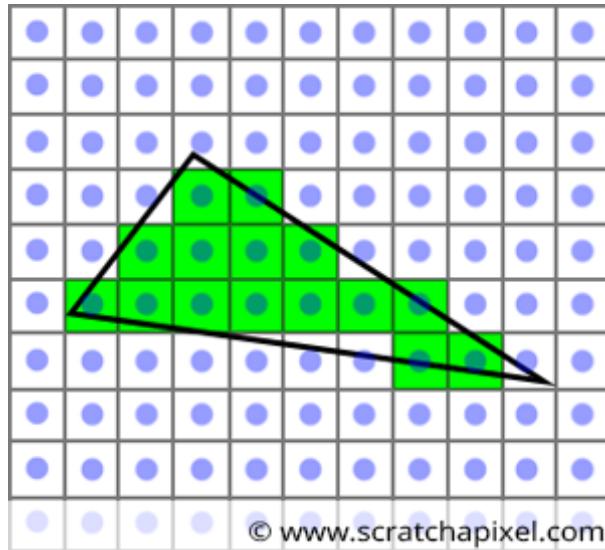


Figura 5: Exemplu de imagine randată folosind rasterizare<sup>2</sup>

Deși rasterizarea este foarte eficientă, ea are multe limitări. Efectele de iluminare pot fi doar approximate, iar umbrele și reflexiile/refracțiile sunt greu de realizat. Motoarele grafice folosesc metode de baking<sup>3</sup> pentru a precalcula iluminarea statică în scenă la o calitate bună (folosind alte metode, e.g., radiosity (3.4)), dar iluminarea dinamică și umbrele dinamice sunt randate la calitate scăzută. Printre tehniciile folosite pentru a îmbunătăți aspectul vizual al jocurilor se numără ocluzia ambientală, shadow mapping, screen-space reflections, cubemap reflections, light probes, lightmaps, etc.

## 3.2 Ray Tracing

În sens general, Ray Tracing reprezintă o clasă de algoritmi și tehnici de randare a imaginilor care au la bază simularea transportului luminii într-o scenă. Spre deosebire de rasterizare, care proiectează obiectele 3D pe un plan 2D, Ray Tracing rezolvă problema vizibilității trasând raze din ochiul camerei în scenă și calculând intersecțiile cu geometria 3D. Vom prezenta în continuare diferite variații ale acestui algoritm.

### Ray Casting

Prima aplicație a algoritmului în grafica pe calculator a fost făcută de Appel în 1968 [5] - în acest context algoritmul era nerecursiv. Razele primare calculau intersecțiile cu obiectele din

<sup>2</sup>©<https://www.scratchapixel.com/>. Accesat 19.06.2024.

<sup>3</sup>[https://www.flipcode.com/archives/Light\\_Mapping\\_Theory\\_and\\_Implementation.shtml](https://www.flipcode.com/archives/Light_Mapping_Theory_and_Implementation.shtml). Accesat 20.06.2024.

scenă, iar razele secundare erau folosite pentru a calcula umbre. Această variantă nerecursivă a algoritmului este cunoscută sub numele de Ray Casting. Figura 6 prezintă vizualizarea algoritmului.

Datorită simplității sale, Ray Casting este un algoritm foarte eficient (fiind ușor paralelizabil), însă nu oferă în sine niciun efect de iluminare - este un algoritm de vizibilitate.

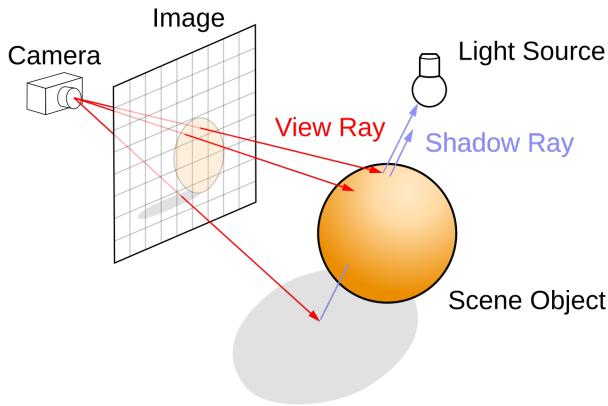


Figura 6: Algoritmul Ray Casting. Cu roșu sunt reprezentate razele primare, iar cu albastru razele secundare<sup>4</sup>

## Ray Tracing Recursiv

Algoritmul inițial de Ray Casting nu putea calcula efecte precum reflexii și refracții. Pentru acestea, era nevoie de o variantă recursivă a algoritmului, care să calculeze traectoria razei de-a lungul mai multor puncte din scenă și să țină cont de contribuțiile tuturor suprafețelor intersectate. Această variantă a fost prezentată în practică pentru prima dată de Whitted (1979) [37]. Astfel, fiecare intersecție, se pot genera 3 noi raze: o rază de reflexie, o rază de refracție și o rază de umbrit. Adâncimea recursivității este, evident, limitată, căci complexitatea crește exponențial. Este de remarcat faptul că efectele de reflexie, refracție, umbrări, precum și alte efecte specifice (e.g., blur, depth of field) pot fi modelate foarte ușor folosind Ray Tracing recursiv, prin opoziție cu rasterizarea. O ilustrare a algoritmului este prezentată în Figura 7.

Turner Whitted a oferit într-un blog post<sup>5</sup> pe site-ul de la Nvidia o mică retrospectivă a algoritmului său și a deciziilor pe care a trebuit să le facă la momentul respectiv - este o lectură scurtă dar interesantă.

<sup>4</sup>©<https://en.wikipedia.org/>. Accesat 20.06.2024.

<sup>5</sup>©<https://blogs.nvidia.com/blog/ray-tracing-global-illumination-turner-whitted/>. Accesat 20.06.2024.

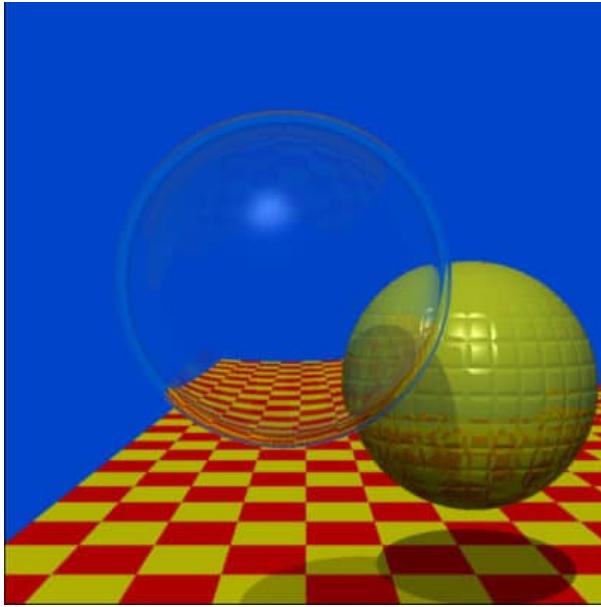


Figura 7: Algoritmul Ray Tracing recursiv, ilustrat de Turner Whitted<sup>5</sup>

## Ray Marching

Un algoritm foarte drag mie, datorită eleganței matematice, este Ray Marching. Dacă celelalte metode de Ray Tracing calculează intersecții cu obiecte definite prin primitive geometrice (e.g., triunghiuri), această variantă ia în considerare doar suprafete definite prin câmpuri de distanță (SDF). Un câmp de distanță este o funcție asociată unei mulțimi care întoarce distanța ortogonală de la un punct din spațiu la frontieră mulțimii. Un SDF are valori pozitive pentru puncte aflate în afara mulțimii și valori negative pentru puncte aflate în interiorul mulțimii. Principala caracteristică a acestui algoritm care îl diferențiază de celelalte este faptul că nu calculează intersecții. În schimb, fiecare rază mărșăluiește treptat în spațiu, apropiindu-se din ce în ce mai mult de suprafetele definite, dar fără a le intersecta. La fiecare pas, algoritmul se folosește de aceste câmpuri de distanță pentru a calcula o rază minimă în jurul punctului curent, care reprezintă sferă de dimensiune maximă care nu intersectează cu certitudine nicio suprafață. Această rază este numită pas de marșăluire (marching step) și este folosită pentru a avansa în spațiu. Algoritmul se oprește când distanța minimă calculată este mai mică decât o anumită toleranță (indicând faptul că o intersecție este foarte aproape), sau când un număr maxim de pași prestatibil este atins (caz în care nu se înregistrează nicio intersecție). Datorită utilizării sferelor pentru mărșăluire, algoritmul mai este cunoscut și sub numele de Sphere Tracing. O ilustrație a funcționării acestuia se poate vedea în Figura 8.

O aplicație naturală a acestui algoritm este randarea suprafetelor implice. Acestea sunt suprafete în spațiul Euclidian definite prin ecuații de forma

$$f(x, y, z) = 0. \quad (3.2.1)$$

Funcția  $f$  definește câmpul de distanță al suprafetei. De asemenea, se pot calcula foarte ușor și vectorii normali la suprafață (gradientul funcției  $f$ ), ceea ce face posibilă randarea efectelor

de iluminare a suprafețelor. Exemple de randări ale unor suprafețe implicate se pot vedea în Figurile 9 și 10.

Deși acest algoritm a fost studiat în literatura de specialitate încă din 1996 de către Hart [12], el a devenit popular în cadrul demoscene-ului<sup>6</sup> și a comunității de programatori de shadere. Inigo Quilez a fost printre primii care a adus algoritmul în atenția publicului larg, prin intermediul platformei Shadertoy<sup>7</sup> și a blogului personal.<sup>8</sup>

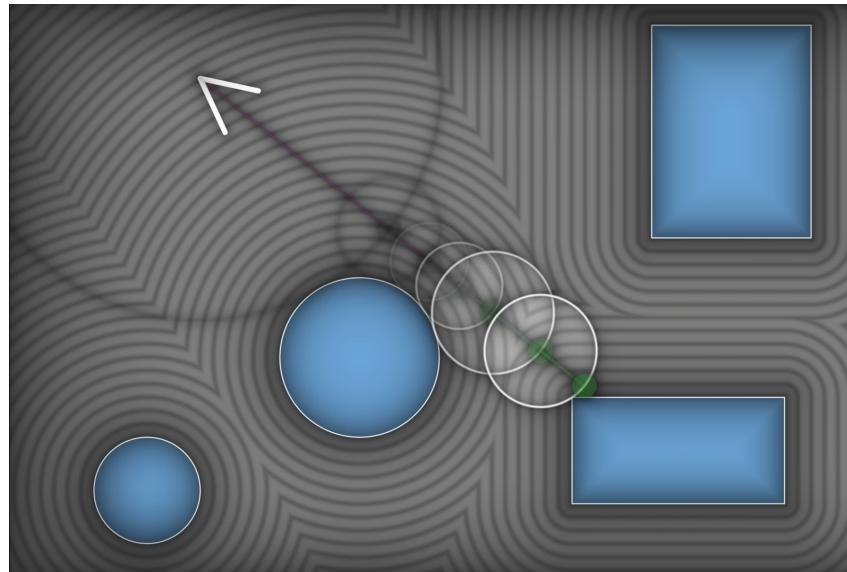


Figura 8: Algoritmul Sphere Tracing - reprezentare 2D. Se pot observa și câmpurile de distanță ale obiectelor<sup>9</sup>

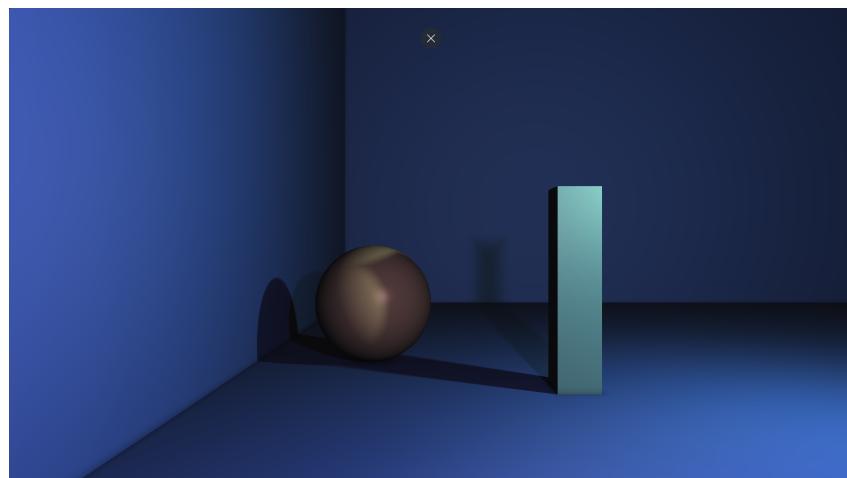


Figura 9: Shader scris în GLSL care demonstrează soft shadows bazate pe difracție<sup>10</sup>

<sup>6</sup><https://en.wikipedia.org/wiki/Demoscene>. Accesat 20.06.2024.

<sup>7</sup><https://www.shadertoy.com/>. Accesat 20.06.2024.

<sup>8</sup><https://iquilezles.org/>. Accesat 20.06.2024.

<sup>9</sup><https://www.youtube.com/@simondev758>. Accesat 20.06.2024.

<sup>10</sup>Shader scris de mine, disponibil la adresa: <https://www.shadertoy.com/view/tscSRS>. Accesat 20.06.2024.

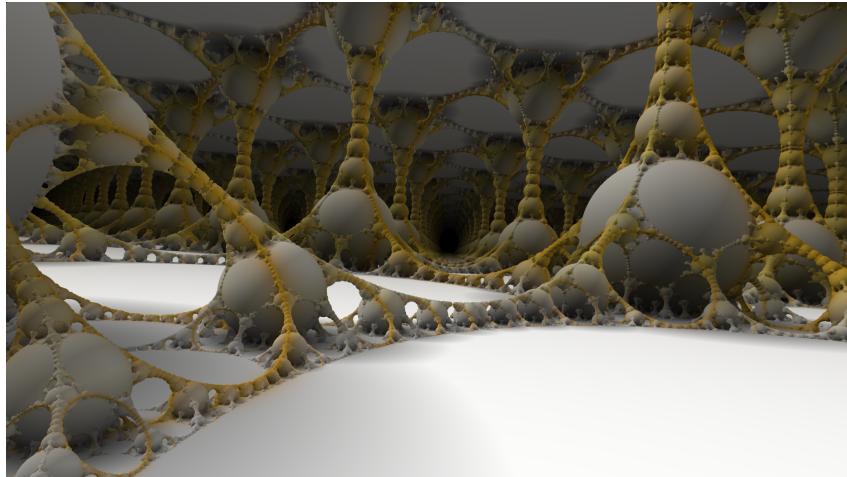


Figura 10: Randare 3D a unui fractal de tip Apollonian<sup>11</sup>

### 3.3 Metode Monte Carlo

Algoritmii prezentăți mai sus au pus bazele teoretice și practice pentru metode mai avansate de randare, care se concentrează pe realism. Un dezavantaj major al metodelor prezentate până acum este faptul că acestea nu sunt fotorealistice - ele nu iau în considerare toate fenomenele interacțiunii luminii cu materialele. Deși Ray Tracing recursiv poate calcula reflexii și refracții perfecte, acesta nu poate simula din punct de vedere fizic efecte precum difuzia, dispersia, radianța, etc. Spre exemplu, un obiect care nu este perfect reflectant sau refractant va difuza lumina în toate direcțiile, nu doar în cea de reflexie sau refracție geometrică. De asemenea, algoritmul de Ray Tracing recursiv consideră că lumina este o sursă punctiformă, când de fapt aceasta are o distribuție finită în spațiu. Astfel, umbrele generate de acest algoritm sunt "dure" și nu iau în considerare umbrele penumbrale. Este adevărat că se pot approxima aceste efecte folosind diferite modele de iluminare care se aplică și în rasterizare (e.g., modelul Phong [26]), dar acestea sunt doar approximații și nu oferă realismul dorit.

Este nevoie aşadar de modele mai avansate ale transportului luminii, care să simuleze fenomenele fizice cu o acuratețe cât mai mare. Vom prezenta în continuare metode care au la bază soluționarea ecuației de transport a luminii [16] (folosind extensiv concepte din teoria probabilității), metode care oferă o fidelitate net superioară celor prezentate anterior. Pentru că scopul acestei lucrări nu este de a oferi o introducere în teoria probabilității, vom prezenta doar concepțele de bază necesare înțelegерii algoritmilor de tip Monte Carlo. Pentru o introducere mai detaliată în acest domeniu, cititorul poate consulta lucrări de specialitate precum [10] și [11].

Metodele de tip Monte Carlo sunt metode iterative care folosesc eșantionare aleatoare pentru a aproxima valoarea unei integrale sau pentru a simula comportamentul unui sistem complex determinist, modelat stocastic. Ele sunt utilizate pentru a găsi soluții aproximative, care să conveargă către soluția corectă, pentru probleme intractabile sau care nu pot fi rezolvate

---

<sup>11</sup>©Inigo Quilez: <https://www.shadertoy.com/view/4ds3zn>. Accesat 20.06.2024.

analitic.

Un exemplu de pași pe care îi urmează un algoritm de tip Monte Carlo este:

1. Definirea unui domeniu de eșantionare
2. Generarea unui număr de eșantioane în domeniu, folosind o distribuție de probabilitate
3. Efectuarea calculelor (deterministe) pentru fiecare eșantion, care să aproximeze soluția
4. Agregarea rezultatelor.

### 3.3.1 Integrare Monte Carlo

Relevant în particular pentru această lucrare este conceptul de integrare Monte Carlo. Acesta se referă la aproximarea unei integrale definite folosind metode Monte Carlo de eșantionare.

Să luăm un exemplu de problemă. Dându-se o funcție

$$f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$$

și o variabilă aleatoare continuă  $X$  cu distribuția de probabilitate  $p(x)$ , vrem să calculăm valoarea medie (expected value)

$$\mathbb{E}_p(f(X)) = \int_{\mathbb{D}} f(x)p(x) dx. \quad (3.3.1)$$

Valoarea medie se poate approxima prin eșantionare, folosind formula

$$\mathbb{E}_p(f(X)) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad (3.3.2)$$

aproximarea devenind mai bună cu creșterea numărului de eșantioane  $N$ .

Așadar, putem approxima integrala (3.3.1) prin

$$\int_{\mathbb{D}} f(x)p(x) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i). \quad (3.3.3)$$

Partea dreaptă a ecuației (3.3.3) este estimatorul Monte Carlo. Teorema limitei centrale afirmă că, pentru un număr suficient de mare de eșantioane, distribuția de probabilitate a estimărilor se apropiă de o distribuție normală în jurul valorii medii estimate. Acest lucru înseamnă că estimatorul Monte Carlo este imparțial (unbiased) și are o varianță redusă. Dacă notăm cu  $f_p$  estimatorul, atunci au loc următoarele relații:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_p(f_p) &= \mathbb{E}_p(f(X)), \\ Var_p(f_p) &= \frac{1}{N} Var_p(f(X)). \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

### 3.3.2 Eșantionare bazată pe importanță

În practică, distribuția de probabilitate  $p(x)$  este adesea greu de eșantionat, sau nu produce varianța cea mai mică, ceea ce duce la o convergență lentă a estimării. Eșantionarea pe baza importanței (importance sampling) este o tehnică prin care se eșantionează variabila aleatoare  $X$  dintr-o altă distribuție de probabilitate,  $q(x)$ , cu scopul de a reduce varianța și a estima mai bine valoarea medie a funcției  $f$ .

Să introducem această distribuție în ecuația valorii medii (3.3.1):

$$\begin{aligned}\mathbb{E}_p(f(X)) &= \int_{\mathbb{D}} f(x)p(x) dx \\ &= \int_{\mathbb{D}} f(x) \frac{p(x)}{q(x)} q(x) dx \\ &= \mathbb{E}_q \left( f(X) \frac{p(X)}{q(X)} \right).\end{aligned}\tag{3.3.5}$$

Obținem astfel un nou estimator Monte Carlo, notat cu  $f_q$ , care își păstrează imparțialitatea (căci valoarea medie rămâne aceeași) și care folosește distribuția  $q(x)$ :

$$\mathbb{E}_q(f_q) = \mathbb{E}_p(f(X)) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \frac{p(x_i)}{q(x_i)}.\tag{3.3.6}$$

Varianța acestui estimator, este dată de

$$Var_q(f_q) = \frac{1}{N} Var_q \left( f(X) \frac{p(X)}{q(X)} \right).\tag{3.3.7}$$

Scopul este de a alege distribuția  $q(x)$  astfel încât varianța estimatorului să fie mai mică decât varianța inițială, i.e.

$$\frac{1}{N} Var_q \left( f(X) \frac{p(X)}{q(X)} \right) < \frac{1}{N} Var_p(f(X)).\tag{3.3.8}$$

Pentru a minimiza varianța noului estimator, în mod ideal, vrem ca funcția  $f(x) \frac{p(x)}{q(x)}$  să fie constantă, pentru orice  $x$  eșantionat, ceea ce ar duce la o varianță nulă. Acest lucru se întamplă dacă

$$q(x) = c \cdot f(x)p(x),\tag{3.3.9}$$

unde  $c$  este o constantă de normalizare. Pentru a păstra imparțialitatea,  $c$  trebuie să fie egal cu  $\frac{1}{\mathbb{E}_p(f(X))}$ , însă această valoare este necunoscută (altfel nu am mai avea nevoie de estimator!). Așadar, nu este fezabilă alegerea optimă pentru  $q(x)$ . Totuși, ecuația (3.3.9) ne arată că distribuția optimă este proporțională cu funcția  $f(x)p(x)$ . Acest produs măsoară fix importanța fiecărui eșantion în estimarea mediei, de unde și numele tehnicii.

În Figura 11 se poate observa efectul eșantionării bazate pe importanță. În acest caz, funcția  $f$  are o regiune mică de unde vine majoritatea contribuției către valoarea medie. Dacă distribuția de probabilitate  $p$  nu eșantinează bine această regiune (în acest caz, este o distribuție uniformă), varianța estimării va fi mare. Distribuția  $q$  este aleasă astfel încât să eșantineze mai mult din zonele importante și se poate vedea pe subgraficul din dreapta cum raportul  $\frac{p(x)}{q(x)}$  încearcă să echilibreze contribuția fiecărui eșantion, reducând varianța estimării.

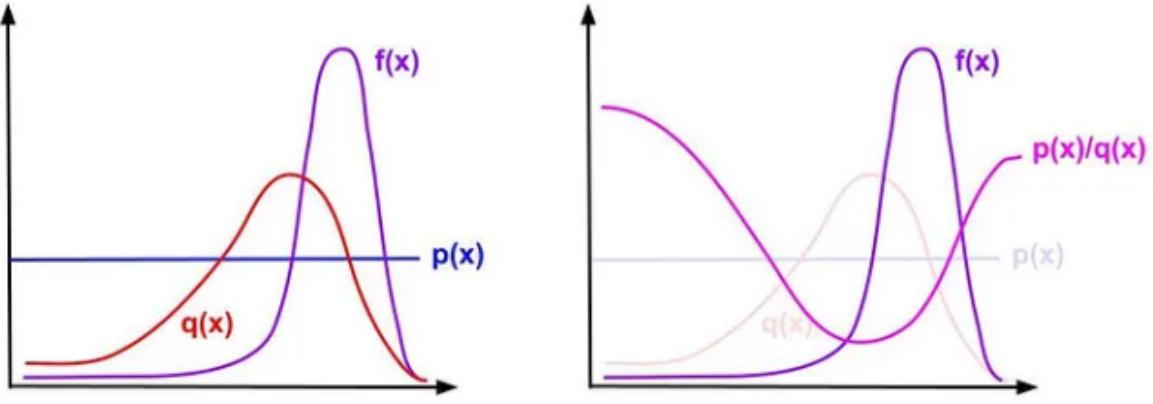


Figura 11: Efectul eșantionării bazate pe importanță<sup>12</sup>

### 3.3.3 Eșantionare Stratificată

O altă metodă de a reduce varianța estimării este eșantionarea stratificată (Stratified Sampling). În această metodă se partiționează domeniul de eșantionare  $\mathbb{D}$  în  $n$  subdomenii, numite straturi, iar evaluarea integralei se face pe fiecare strat îndeapta:

$$\int_{\mathbb{D}} f(x)p(x) dx = \sum_{i=1}^n \int_{\mathbb{D}_i} f(x)p(x) dx. \quad (3.3.10)$$

În acest caz, varianța estimării devine suma varianțelor pe fiecare strat:

$$Var(f_s) = \sum_{i=1}^n Var(f_i). \quad (3.3.11)$$

Se poate demonstra că, în cazul în care toate straturile au aceeași măsură, i.e.

$$\int_{\mathbb{D}_i} p(x) dx = \frac{1}{n} \int_{\mathbb{D}} p(x) dx, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (3.3.12)$$

atunci varianța estimării nu va fi mai mare decât fără eșantionare stratificată. Pentru mai multe informații se poate consulta cartea de specialitate a lui Kleijnen et al. [18].

<sup>12</sup>©<https://medium.com/>

Un exemplu de eșantionare stratificată este ilustrat sub tehnica de jittering în eșantionarea pixelilor, detaliată în capitolul 5.

### 3.3.4 Ecuăția transportului luminii

Introdusă simultan de Kajiya [16] și Immel et al. [15] în 1986, ecuația transportului luminii (sau ecuația de randare) este cea mai importantă ecuație din domeniul graficii pe calculator. Aceasta descrie modul în care lumina interacționează cu suprafetele și ajunge către observator. Una dintre formele acesteia este:

$$\begin{aligned} L_o(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t) &= L_e(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t) + L_r(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t) \\ L_r(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t) &= \int_{\Omega_+} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega_i, \lambda, t) (\omega_i \cdot \mathbf{n}) d\omega_i. \end{aligned} \quad (3.3.13)$$

Sunt destul de multe simboluri folosite în această ecuație, aşa că le vom explica pe rând. Folosind Figura 12 drept referință:

- $\mathbf{x}$  este poziția punctului de intersecție cu suprafața
- $\omega_o$  este direcția de observare (direcția pe care vrem să măsurăm radianța)
- $\omega_i$  este opusul direcției de incidentă (direcționat de la punctul de intersecție către sursa de lumină)
- $\mathbf{n}$  este normala la suprafață în punctul  $\mathbf{x}$
- $\lambda$  este lungimea de undă a luminii
- $t$  este un moment particular în timp
- $L_o(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t)$  este radianța spectrală de lungime de undă  $\lambda$  observată în punctul  $\mathbf{x}$ , pe direcția  $\omega_o$ , la momentul  $t$
- $L_e(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t)$  este radianța spectrală de lungime de undă  $\lambda$  emisă de suprafață în punctul  $\mathbf{x}$ , pe direcția  $\omega_o$ , la momentul  $t$
- $L_r(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t)$  este radianța spectrală de lungime de undă  $\lambda$  reflectată în punctul  $\mathbf{x}$ , pe direcția  $\omega_o$ , la momentul  $t$
- $L_i(\mathbf{x}, \omega_i, \lambda, t)$  este radianța spectrală de lungime de undă  $\lambda$  incidentă în punctul  $\mathbf{x}$ , pe direcția  $\omega_i$ , la momentul  $t$
- $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o, \lambda, t)$  este funcția de distribuție bidirecțională a reflectanței (BRDF), care reprezintă câtă lumină este reflectată în direcția  $\omega_o$  din direcția  $\omega_i$
- $\Omega_+$  este emisfera unitate superioară centrală în jurul normalei  $\mathbf{n}$ , care conține toate direcțiile posibile de incidentă  $\omega_i$  pentru care  $\omega_i \cdot \mathbf{n} > 0$ .

Putem observa că această ecuație nu include o componentă de transmisie a luminii. Putem augmenta aditiv ecuația 3.3.13 cu o componentă de transmisie, definită astfel:

$$L_t(\mathbf{x}, \omega_o, \lambda, t) = \int_{\Omega_-} f_t(\mathbf{x}, \omega_t, \omega_o, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega_t, \lambda, t) (\omega_t \cdot \mathbf{n}) d\omega_t, \quad (3.3.14)$$

cu diferență că  $\Omega_-$  este emisfera unitate inferioară centrată în jurul normalei  $\mathbf{n}$ , care conține toate direcțiile posibile de incidentă internă  $\omega_t$  pentru care  $\omega_t \cdot \mathbf{n} < 0$ . În acest caz, funcția  $f_t(\mathbf{x}, \omega_t, \omega_o, \lambda, t)$  este funcția de distribuție bidirecțională a transmisiei (BTDF), care reprezintă câtă lumină este transmisă în direcția  $\omega_o$  din direcția  $\omega_t$ .

De obicei, componenta de reflectanță și cea de transmisie se combină într-o singură componentă, care are la bază o funcție de distribuție bidirecțională a împrăștierii (BSDF). Mai multe detalii despre această clasă de funcții, într-un context de materiale bazate pe fizică, se pot găsi în secțiunea 3.5.2.

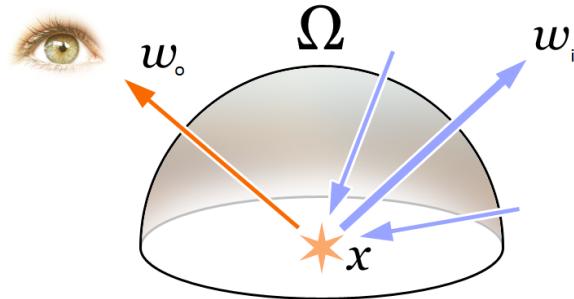


Figura 12: Ilustrație a componentelor din ecuația de randare<sup>4</sup>

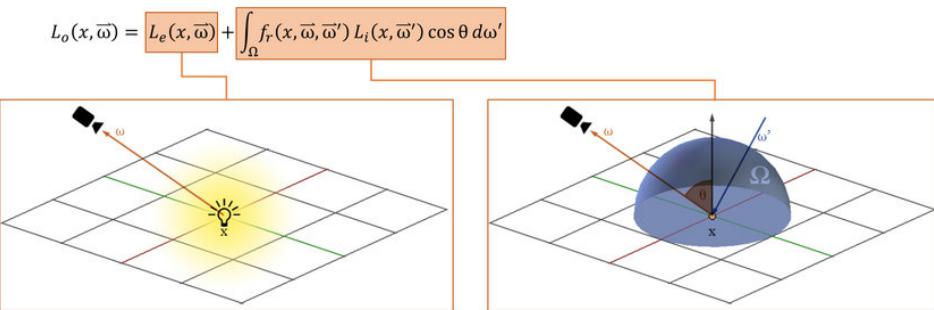


Figura 13: Formă alternativă a ecuației transportului luminii. Se pot vedea componente de emisie și împărăștiere<sup>13</sup>

Găsirea soluției la ecuația transportului luminii (i.e., determinarea radianței  $L_o$ ) este provocarea primară în algoritmii de randare realistică. Vom enumera în secțiunea următoare câteva dintre metodele de rezolvare a acestei ecuații, însă ne vom concentra asupra algoritmului de Path Tracing.

### 3.4 Radiosity

Radiosity este o tehnică de iluminare globală bazată pe metoda elementului finit. Aceasta presupune împărțirea scenei în elemente mici, numite petice, și calcularea energiei luminoase reflectată de fiecare dintre acestea. Algoritmul în sine consideră numai interacțiunile de tip

<sup>13</sup>©<https://www.researchgate.net/>. Accesat 20.06.2024.

difuz, ceea ce îl face să fie un algoritm independent de direcția de vizualizare. De aceea, acesta poate fi folosit în special pentru a precalcula iluminarea statică a scenei (spre exemplu, la compilarea unei hărți create în editorul Hammer al companiei Valve se aplică acest algoritm sub forma utilitarului VRAD<sup>14</sup>).

Algoritmul funcționează prin calcularea vizibilității între petice și asocierea unor factori de vizualizare pentru fiecare pereche. Acest factor descrie cât de bine se văd două petice între ele.

Într-o variantă brută a algoritmului, factorii sunt folosiți drept coeficienți pentru a rezolva un sistem de ecuații liniare (unde ecuațiile sunt variante simplificate ale ecuației de transport al luminii). Soluția acestui sistem oferă radiozitatea fiecărui petice (i.e., luminozitatea). O ilustrație a rezultatului algoritmului într-o scenă de tip Cornell Box se poate vedea în Figura 14.

O variantă optimizată, denumită "shooting radiosity", folosește un proces iterativ în care la fiecare pas se emite lumină dintr-un petice și se calculează radianța reflectată de celelalte petice. Acest proces se repetă până când se atinge o stare stabilă, aşa cum se poate vedea în Figura 15.

Avantajele algoritmului sunt faptul că este relativ simplu de implementat, nu necesită matematică avansată și deci este un instrument didactic bun. De asemenea, caracterul său independent de direcție îl face potrivit pentru precalcularea iluminării statice. Ca dezavantaje, este un algoritm lent și trebuie făcut un compromis între timpul de randare și calitatea rezultatului (e.g., rezoluția peticelor, numărul de pași). Nu este potrivit pentru iluminarea speculară sau transmisie, fiind limitat la interacțiuni de tip difuz (deși poate fi extins la medii non-difuze [15]). Un alt aspect care îl limitează este nevoia de a precalcula funcția de vizibilitate între petice. Din experiență proprie, lucrând la hărți complexe în editorul Hammer,<sup>15</sup> era necesar să ajut manual algoritmul de radiosity prin partionarea artificială a scenei în zone de vizibilitate,<sup>16</sup> pentru a reduce numărul de perechi de petice care trebuiau luate în considerare. Fără această intervenție, doar calculul vizibilității<sup>17</sup> putea să dureze și 24 de ore.

### 3.5 Path Tracing

Algoritmul Radiosity face o presupunere simplificatoare, și anume că iluminarea venită de pe suprafete depinde doar de direcția de ieșire, și nu și de direcția incidentă. Vedem totuși că ecuația transportului luminii (3.3.13) include un termen de distribuție  $f$  care depinde de ambele direcții (de unde și numele de distribuție bidirectională). Algoritmul de Path Tracing modelează acest aspect, ajustând probabilistic contribuția fiecărui eșantion la radianță observată.

<sup>14</sup><https://developer.valvesoftware.com/wiki/VRAD>. Accesat 20.06.2024.

<sup>15</sup>[https://developer.valvesoftware.com/wiki/Valve\\_Hammer\\_Editor](https://developer.valvesoftware.com/wiki/Valve_Hammer_Editor). Accesat 20.06.2024.

<sup>16</sup>[https://developer.valvesoftware.com/wiki/VIS\\_optimization](https://developer.valvesoftware.com/wiki/VIS_optimization). Accesat 20.06.2024.

<sup>17</sup><https://developer.valvesoftware.com/wiki/VVIS>. Accesat 20.06.2024.

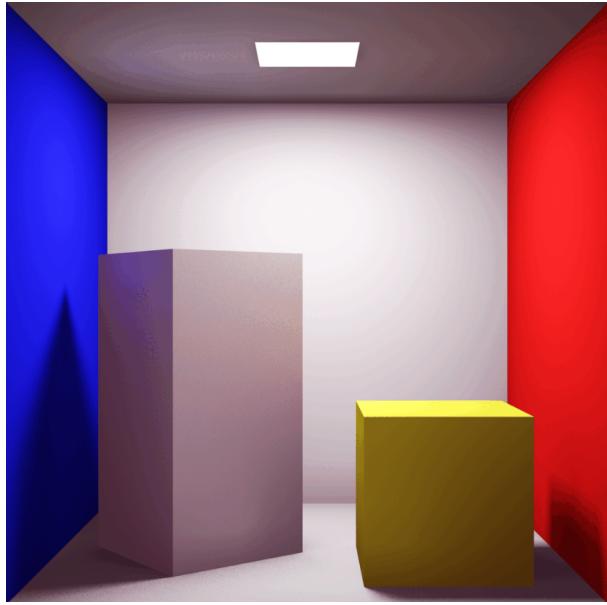


Figura 14: Rezultatul algoritmului de radiosity într-o scenă de tip Cornell Box<sup>4</sup>

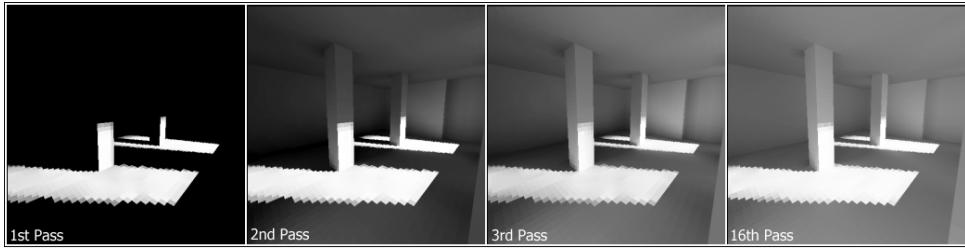


Figura 15: Ilustrație a algoritmului de shooting radiosity. Tot aici se poate observa și rezoluția peticelor<sup>4</sup>

O variantă naivă a algoritmului este prezentată în Pseudocodul 1. Dacă ar fi să sumarizăm pașii algoritmului, aceștia ar fi:

1. Pentru fiecare pixel din imagine:
  - (a) Generăm o rază de la observator către pixel
  - (b) Intersectăm raza cu scena
  - (c) Dacă nu există intersecție, pixelul primește culoarea de fundal și ne întoarcem la pasul 1
  - (d) Altfel, calculăm contribuția de lumină pentru punctul intersectat (folosind BRDF)
  - (e) Eșantionăm o nouă rază pornind din punctul intersectat, în funcție de BRDF
  - (f) Calculăm contribuția de lumină pentru noua rază, recursiv
2. În final, mediem contribuțiile pentru a obține culoarea pixelului.

---

**Algoritmul 1** Pseudocodul algoritmului de Path Tracing recursiv

---

```
1: function PATHTRACE(ray, depth)
2:   if depth > MAX_DEPTH then
3:     return backgroundColor                                ▷ Ne oprim dacă am atins adâncimea maximă
4:   end if
5:   intersection ← INTERSECTSCENE(ray)                ▷ Intersectăm raza cu scena
6:   if intersection = null then
7:     return backgroundColor                                ▷ Ne oprim dacă nu există intersecție
8:   end if
9:   m ← intersection.material
10:  p ← intersection.position
11:  n ← intersection.normal
12:  v ← -ray.direction
13:  bounceRay ← SAMPLERAY(m, p, n)                  ▷ Eșantionăm o nouă rază
14:  pdf ← PDF(m, n, bounceRay)                      ▷ Evaluăm probabilitatea de eșantionare
15:  reflectance ← EVALBRDF(m, n, v, bounceRay)      ▷ Evaluăm reflectanța
16:  color ← PATHTRACE(bounceRay, depth + 1)          ▷ Pasul recursiv
17:  return m.emission + reflectance · color/pdf    ▷ Evaluăm ecuația de rendering
18: end function
19: function RENDER(pixels, samples)
20:   for p in pixels do
21:     for i ← 1 to samples do
22:       ray ← GENERATECAMERARAY(p, i)                 ▷ Generăm raza de la observator
23:       pixel.color ← pixel.color + PATHTRACE(ray, 0)  ▷ Acumulăm contribuția
24:     end for
25:     pixel.color ← pixel.color / samples           ▷ Mediem contribuțiile
26:   end for
27: end function
```

---

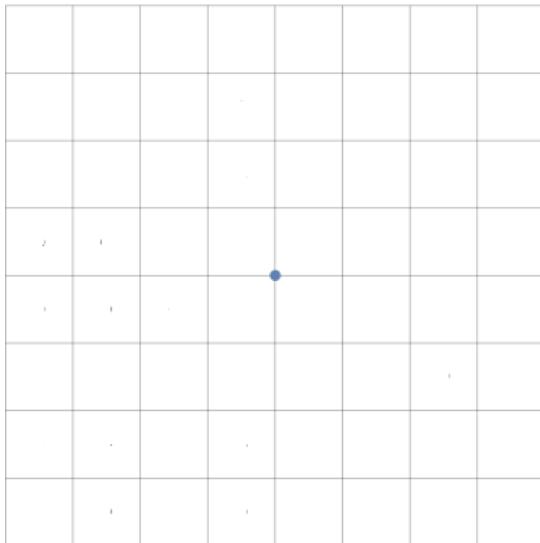
Algoritmul Path Tracing reprezintă transpunerea completă a ecuației de randare într-un algoritm de calcul numeric. Se poate cupla orice tip de BRDF la acest algoritm, ceea ce îl face extrem de versatil. Se pot obține simulări de interacțiuni difuze (precum cele obținute cu Radiosity), folosind un BRDF Lambertian [22], sau simulări de interacțiuni speculare, folosind un BRDF precum Cook-Torrance([9]). Se poate extinde de asemenea și la interacțiuni de transmisie, folosind un BTDF. Path Tracing este o metodă generală de rezolvare a ecuației de randare, iar componente sale pot fi alese în funcție de necesități. Identificăm astfel câteva dintre diferențele categorii de strategii de bază care pot fi customizează în Path Tracing.

### 3.5.1 Strategii de eșantionare a pixelilor

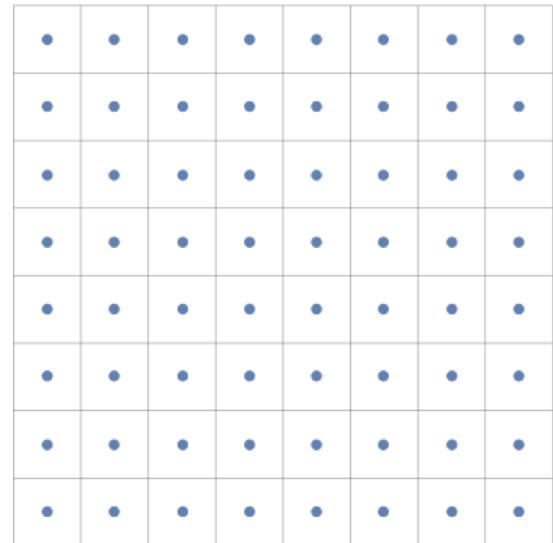
Pentru o convergență mai rapidă și o imagine mai stabilă, se rulează algoritmul de mai multe ori pe același pixel și se combină rezultatele. Strategia de alegere a eșantioanelor aferente unui pixel poate influența calitatea finală a imaginii.

Pentru vizualizare, să considerăm un sistem de 64 de eșantioane per pixel. Cele mai comune opțiuni sunt:

- Eșantionare uniformă (Figura 16): se alege același eșantion de fiecare dată
- Eșantionare stratificată uniformă (Figura 16): se împarte fiecare pixel în subpixeli și se alege câte un eșantion pentru fiecare subpixel
- Eșantionare aleatoare/jittering (Figura 17): fiecare eșantion este ales aleator
- Eșantionare stratificată + jittering (Figura 17): se împarte fiecare pixel în subpixeli și se alege un eșantion aleator pentru fiecare subpixel, fără a se suprapune zonele de eșantionare.



(a) Eșantionare uniformă



(b) Eșantionare stratificată

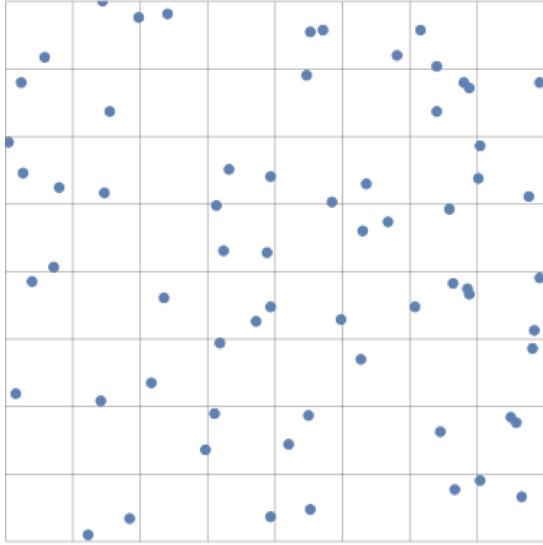
Figura 16: Eșantionare uniformă vs stratificată<sup>18</sup>

În mod evident, eșantionarea uniformă lasă multe de dorit. Aceasta produce artefacte de tip aliasing în jurul obiectelor (Figura 18). Eșantionarea stratificată (descrisă și în secțiunea 3.3.3) reușește să rezolve parțial această problemă, având date din mai multe zone ale pixelului. Eșantionarea aleatoare este altă soluție la problema aliasing-ului, însă introduce prea mult zgomot. Totuși, reușește să integreze mai bine semnalele de frecvență mare, cum ar fi cazul de randare a unei texturi sub unghi mare. Cea mai bună variantă este o combinație între cele două din urmă, care să ofere avantaje din ambele părți. Comparații calitative sunt reprezentate în Figurile 18 și 19.

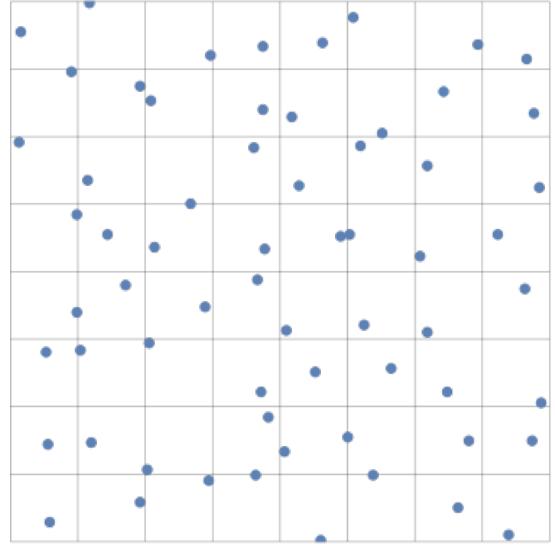
### 3.5.2 Strategii de alegere a funcției de distribuție a reflectanței

Un model bun de material (mai ales PBR) face diferența între o randare fotorealistă și una care nu este. Chiar dacă algoritmul converge către soluția ecuației de transport, rezultatul poate fi unul nerealist dacă nu se folosește un model de materiale adecvat.

<sup>18</sup>©<https://pbr-book.org/>. Accesat 20.06.2024.



(a) Eșantionare aleatoare



(b) Eșantionare stratificată + jittering

Figura 17: Eșantionare aleatoare vs stratificată + jittering<sup>18</sup>

## BRDF

Definit prima oară de un model matematic general de către Nicodemus (1965) [25], BRDF-ul este o funcție care descrie câtă lumină este reflectată într-o anumită direcție. Am menționat-o de multe ori în cadrul acestei lucrări și am vorbit despre rolul ei în cadrul ecuației de randare (atât de importantă este), dar nu am explicitat cum se construiește. Să considerăm modelul simplificat în care nu se ține cont de lungimea de undă a luminii și nici de variabila de timp. În acest caz, tot ce ne mai rămâne de făcut pentru a defini BRDF sunt două concepte de radiometrie, pe care le vom defini informal aici:

**Definiția 1.** Radianța  $L$  este măsura fluxului de lumină care trece printr-o suprafață unitară într-o direcție dată.

**Definiția 2.** Iradianța  $E$  este măsura fluxului de lumină primit de o suprafață unitară (din toate direcțiile).

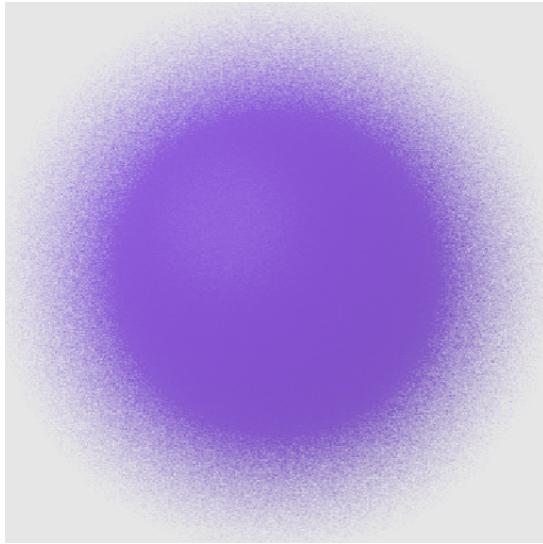
Așadar, observăm că radianța depinde de direcția incidentă, în timp ce iradianța nu. O ilustrație a acestor concepte se poate vedea în Figura 20.

Putem acum să definim, informal, BRDF-ul:

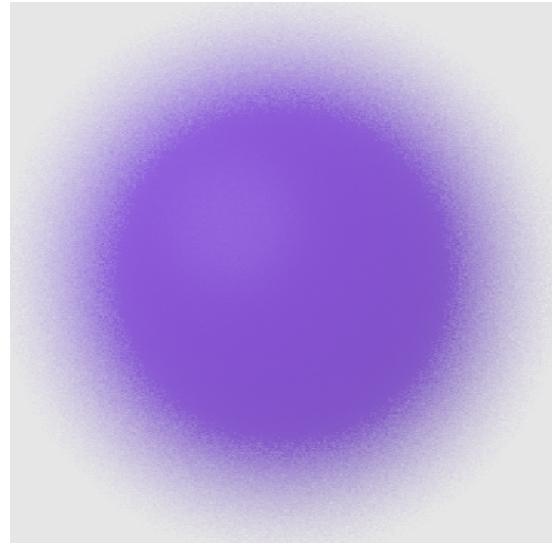
**Definiția 3.** Functia de distribuție bidirecțională a reflectanței (BRDF) este raportul infinitesimal dintre radianța reflectată și iradianța incidentă, în funcție de direcția de incidentă și de cea de reflexie.

Matematic, aceasta se scrie sub forma:

$$f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = \frac{dL_r(\mathbf{x}, \omega_o)}{dE_i(\mathbf{x}, \omega_i)}, \quad (3.5.1)$$



(a) Eșantionare aleatoare



(b) Eșantionare stratificată

Figura 18: Comparație la 1 eșantion per pixel. Se pot observa artefacte de aliasing în varianta de jittering<sup>18</sup>

Derivarea se face după direcția incidentă  $\omega_i$ . Motivul pentru care valorile din raport sunt infinitezimale este faptul că ne interesează strict contribuția pe direcția incidentă - astfel, restrângem domeniul iradianței  $E_i$  la un unghi solid infinitezimal.

## Plauzibilitate fizică

Scopul unui BRDF este de a modela împrăștierea luminii înapoi în mediul din care a venit. Contextul în care este folosit ignoră transmisia (refracția) și se concentrează strict pe reflectare. O funcție de distribuție care modelează această componentă se numește BTDF. Cel mai adesea în producție se folosește o generalizare care include ambele modele, numită BSDF, însă aceasta nu are o definiție precisă și de obicei se referă la combinarea a două modele separate de BRDF și BTDF. Totuși, nici aceste modele nu sunt suficiente pentru a descrie complet interacțiunile de lumină. De pildă, într-un fenomen de transmisie, lumina poate fi absorbată sau dispersată pe mai multe căi până când părăsește complet materialul. Astfel, o aparentă transmisie poate rezulta în ieșirea luminii în același mediu, dar din alt punct. Acest fenomen este cunoscut drept subsurface scattering (dispersie sub suprafață), iar o ilustrație se află în Figura 21. Totuși, pentru scopul lucrării nu vom modela acest fenomen, ci îl vom aproxima, aşa cum vom vedea în capitolul 5.

Pentru a fi considerat pentru uz PBR (physically based rendering), un BRDF este supus unor constrângeri care s-au standardizat în literatura de specialitate (Lafortune et. al. 1994 [20]):

1. **Pozitivitatea:**  $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) \geq 0$ , pentru orice  $\mathbf{x}$ ,  $\omega_i$  și  $\omega_o$ .
2. **Conservarea energiei:**  $\int_{\Omega_+} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot \mathbf{n}) d\omega_i \leq 1$ , pentru orice  $\mathbf{x}$  și  $\omega_o$ .
3. **Reciprocitatea Helmholtz:**  $f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = f_r(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i)$ , pentru orice  $\mathbf{x}$ ,  $\omega_i$  și  $\omega_o$ .



(a) Eșantionare stratificată



(b) Eșantionare aleatoare

Figura 19: Comparație la 1 eșantion per pixel. Varianta cu jittering minimizează artefactele dar adaugă zgomot<sup>18</sup>

Dacă modelul nu respectă cel puțin aceste constrângeri, algoritmul de Path Tracing poate să nu conveargă sau să producă rezultate nerealiste.

Există multe modele de distribuție în literatura de specialitate, cu grade diferite de complexitate și reprezentare a fenomenelor fizice. Printre primele modele apărute se numără modelul Lambertian (bazat pe modelul perfect difuz descris de Lambert în 1760 [22]), modelul Phong (1975) [26] împreună cu optimizarea Blinn-Phong (1977) [6], precum și modele speculare bazate pe microfățete ([33], [9]). Vom prezenta în continuare funcțiile de distribuție pentru aceste modele, fără a intra în prea multe detalii matematice de derivare. Pentru acestea, cititorul este îndrumat spre literatura de specialitate.

## Modelul Lambertian

Modelul Lambertian modelează reflectanța difuză a unui material. Dându-se o normală la suprafață  $\mathbf{n}$  și o direcție de incidentă  $\omega_i$ , reflectanța Lambertiană se calculează ca produsul dintre albedo-ul materialului, normala și direcția de incidentă:  $L = \rho \cdot (\omega_i \cdot \mathbf{n})$ . Acest model trebuie totuși normalizat pentru a fi transformat într-un BRDF - o derivare folosind concepte de bază se găsește în [1]. BRDF-ul rezultat este:

$$f_{Lambert}(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = \frac{\rho}{\pi}, \quad (3.5.2)$$

unde  $\rho$  este culoarea materialului (albedo). Observăm că termenul de cos nu apare aici. Acesta este inclus implicit în ecuația de randare 3.3.13.

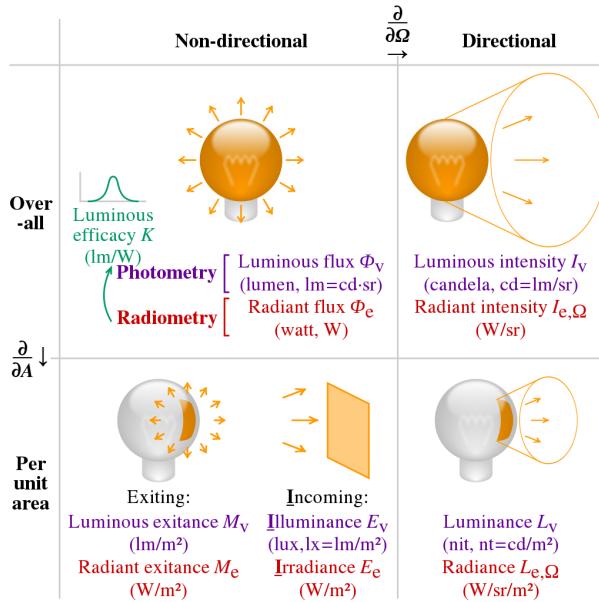


Figura 20: Ilustrație a diferitelor mărimi fizice din radiometrie<sup>4</sup>

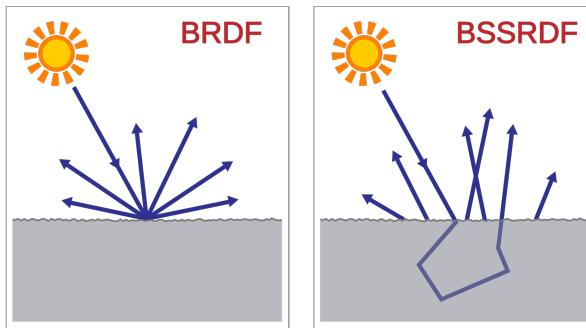


Figura 21: Ilustrație a fenomenului de subsurface scattering. Razele intră în obiect și ies în alt punct<sup>4</sup>

Definiția exactă pentru albedo seamănă destul de mult cu termenul integral din ecuația de transport a luminii:

$$\rho = \int_{\Omega_+} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot \mathbf{n}) d\omega_i, \quad (3.5.3)$$

deoarece măsoară reflectanța unei suprafete perfect difuze când este iluminată uniform de la toate direcțiile de lumină cu radianță unitară.

## Modelul Phong

În adiție față de modelul Lambertian, modelul Phong adaugă un termen de reflexie speculară. Modelul inițial introdus de Phong în 1975 [26] nu este un BRDF propriu-zis (nu respectă constrângerile definite anterior), ci mai degrabă un model de iluminare. O adaptare a acestuia pentru a fi folosit ca BRDF a fost făcută de Lafortune și Willemens în 1994 [20].

Definiția BRDF-ului din publicație este:

$$f_{Phong}(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{n+2}{2\pi} (\omega_r \cdot \omega_o)^n, \quad (3.5.4)$$

unde  $k_d$  și  $k_s$  sunt coeficienții de reflexie difuză și speculară, definiți în intervalul  $[0, 1]$ ,  $n$  este exponentul de reflexie speculară iar  $\omega_r$  este direcția de reflexie perfect speculară a luminii. De remarcat că termenul de cos este restrictionat să nu fie mai mic decât zero. Un exponent  $n$  mare va duce la o reflexie mai concentrată, în timp ce unul mic va duce la o reflexie mai difuză. Ideal, pentru a nu viola legea conservării a energiei, trebuie să nu reflectăm mai multă lumină decât am primit. Acest lucru se poate obține prin condiția  $k_d + k_s \leq 1$ .

## Modelul Microfațetelor

Introdusă în anul 1982 de Cook și Torrance [9], teoria microfațetelor postulează ideea că majoritatea materialelor de diferite grade de lăcuit sunt compuse din microfațete (drepte sau modelate de curbe simple - vezi Figura 22). Acestea sunt orientate aleator și sunt descrise de două lucruri: distribuția orientării lor și profilul (i.e., cum sunt dispuse pe suprafață). Două suprafete diferite pot avea aceeași distribuție dar profiluri diferite, ceea ce duce la aspecte diferite ale materialului (vezi Figura 24).

Asumptia de bază a modelului funcționează prin agregarea comportamentului luminii de la nivel microscopic (microfațete) la nivel macroscopic (suprafața modelată). Este același principiu pe care funcționează și monitoarele - fiecare pixel este compus din subpixeli care emis lumină de diferite culori (RGB), dar la distanță la care ne aflăm noi de monitor nu mai putem distinge acești subpixeli individuali, ci doar culoarea agregată a pixelului.

Un aspect foarte important care trebuie luat în considerare este profilul microfațetelor. Acestea pot fi reprezentate fizic de câmpuri de înălțimi, iar zonele dintre două vârfuri adiacente pot fi obstrucționate și private de lumină. Acest fenomen este mai departe categorizat în două:

- **Mascare (Masking):** microfațeta este obstrucționată din perspectiva observatorului
- **Umbrire (Shadowing):** microfațeta este obstrucționată din perspectiva sursei de lumină.

De asemenea, un alt fenomen extrem ce trebuie luat în considerare este cel al retroreflexiei. Acesta este manifestat drept o reflexie a luminii înapoi pe direcția incidentă (spre deosebire de o reflexie speculară), preponderent mai ales la unghiuri de incidentă mari. Totuși, există materiale care prezintă acest fenomen mai pronunțat, precum cele reflectorizante sau textile. În acest model teoretic, retroreflexia apare atunci când lumina este reflectată de mai multe ori între microfațete. O ilustrație intuitivă a tuturor acestor fenomene importante se poate vedea în Figura 23.

O să concluzionăm prin a prezenta unul dintre primele și cele mai cunoscute BRDF-uri bazate pe teoria microfațetelor - descris de Torrance și Sparrow în 1967 [33]. În continuare, vom nota

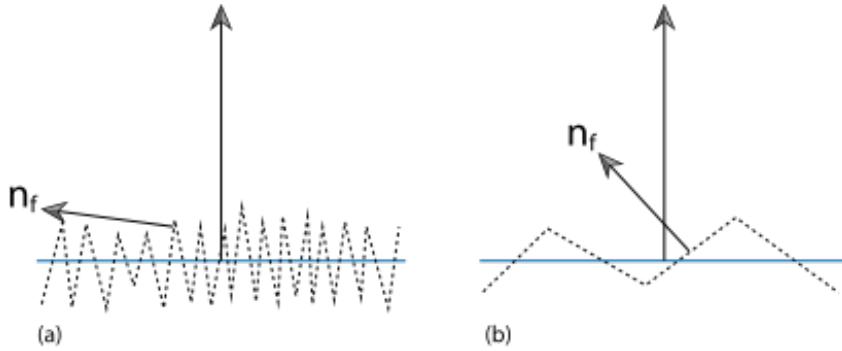


Figura 22: Profilul microfațetelor pentru materiale dure (stânga), respectiv licioase (dreapta)<sup>18</sup>

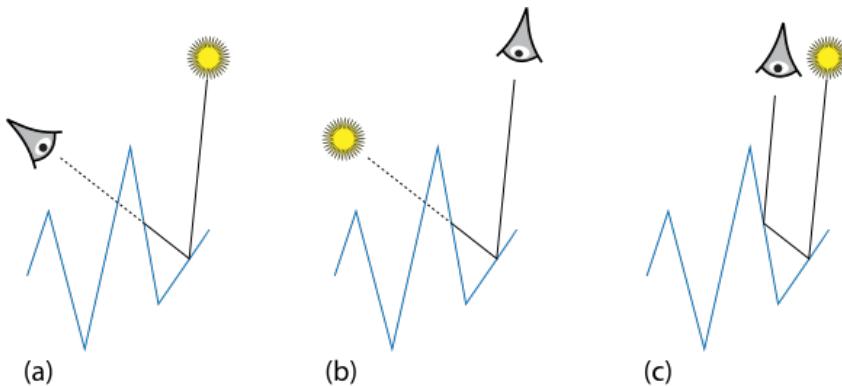


Figura 23: Efecte geometrice ale microfațetelor: mascare (a), umbrire (b) și retroreflexie (c)<sup>18</sup>

cu  $\omega_i$  direcția de incidentă, cu  $\omega_o$  direcția de ieșire, și cu  $\omega_h$  normala microfațetei. Notăm funcția de distribuție a normalelor ca  $D(\omega_h)$ . De notat că această funcție este normalizată, adică

$$\int_{\Omega} D(\omega_h) \cos \theta_h d\omega_h = 1. \quad (3.5.5)$$

Ecuția 3.5.5 este o condiție necesară pentru plauzibilitatea modelului, iar intuitiv reprezintă faptul că orice rază incidentă la suprafață de-a lungul macronormalei  $n$  va intersecta microfațetele o singură dată.

Pentru a ține cont de efectele de mascare și umbrire, ne trebuie o altă funcție de distribuție care să determine ce porțiuni din microfațete sunt vizibile în funcție de direcția de incidentă (mascare) și de direcția de ieșire (umbrire). Această distribuție poate fi modelată separat (pentru o singură direcție) de către funcția  $G_1(\omega, \omega_h)$  a lui Smith, introdusă în 1967 [31]. Aceasta modelează proporția microfațetelor cu normală  $\omega_h$  care sunt vizibile din direcția  $\omega$ . O formă generală a acestei funcții este:

$$G_1(\omega, \omega_h) = \frac{1}{1 + \Lambda(\omega, \omega_h)}, \quad (3.5.6)$$

unde  $\Lambda(\omega)$  este o funcție nespecificată. Totuși, ea trebuie aleasă pentru a satisface o constrângere de vizibilitate. Concret, aria  $dA$  a suprafeței văzută sub un unghi  $\theta$  format între

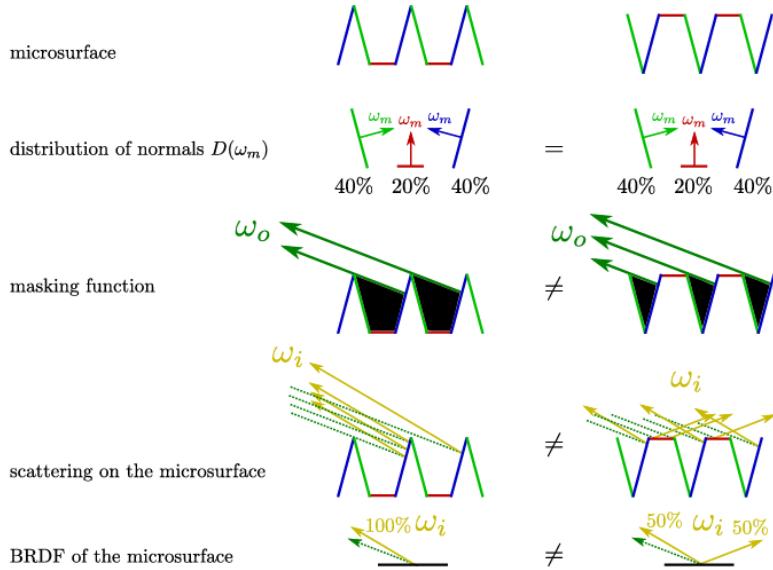


Figura 24: Diferite profiluri de microfațete pentru aceeași distribuție.  
©Heinz [13]

normala la suprafață  $n$  și direcția de observare  $\omega$  trebuie să fie egală cu aria microfațetelor vizibile din aceeași direcție (vezi Figura 25):

$$\cos \theta = \int_{\Omega} G_1(\omega, \omega_h) \max(0, \cos \theta) D(\omega_h) d\omega_h, \quad (3.5.7)$$

unde adăugarea factorului  $\max(0, \cos \theta)$  ne asigură că nu luăm în considerare microfațetele care sunt orientate în direcția opusă observatorului.

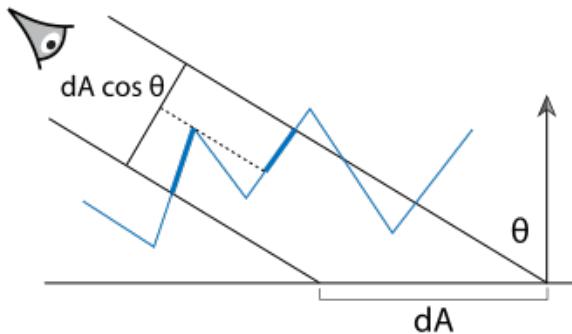


Figura 25: Ilustrație a vizibilității microfațetelor sub un unghi  $\theta^{18}$

Pentru un model corect trebuie să ținem cont și de mascare și de umbră simultan. Cu alte cuvinte, trebuie să calculăm proporția microfațetelor vizibile din ambele direcții. Astfel, avem nevoie de o funcție  $G_2(\omega_i, \omega_o, \omega_h)$  care să depindă de toate cele trei direcții. O tehnică comună (Walter et. al. [36]) este să se aproximeze această funcție prin produsul a doi termeni separabili Smith  $G_1$ :

$$G_2(\omega_i, \omega_o, \omega_h) = G_1(\omega_i, \omega_h) G_1(\omega_o, \omega_h). \quad (3.5.8)$$

Deși nu este o soluție perfectă, căci nu ține cont de corelațiile dintre microfațete, această aproximare este suficient de bună pentru a fi folosită în practică.

În final, modelul Torrance-Sparrow are și o componentă speculară modelată de legea lui Fresnel. Presupunerea modelului este că microfațetele sunt perfect reflectante și că reflexia speculară este dată de reflexia totală a luminii pe suprafață. BRDF-ul Torrance-Sparrow este definit ca:

$$f_{TS}(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = \frac{D(\omega_h)G_2(\omega_i, \omega_o, \omega_h)F(\omega_o)}{4(\omega_i \cdot \mathbf{n})(\omega_o \cdot \mathbf{n})}, \quad (3.5.9)$$

care poate fi simplificată sub presupunea că vizibilitatea microfațetelor este independentă de orientarea acestora:

$$f_{TS}(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = \frac{D(\omega_h)G_2(\omega_i, \omega_o)F(\omega_o)}{4(\omega_i \cdot \mathbf{n})(\omega_o \cdot \mathbf{n})}. \quad (3.5.10)$$

Frumusețea acestui model generalizat este faptul că acceptă diferite distribuții de microfațete și funcții Fresnel, deci poate fi folosit atât pentru metale cât și pentru materiale dielectrice. În plus, modelul este destul de simplu pentru a putea fi folosit în practică, dar suficient de complex pentru a modela fenomene fizice complexe.

### 3.5.3 Strategii de eșantionare a direcțiilor de ieșire

Ce am prezentat mai devreme despre funcțiile de distribuție a reflectanței sunt expresiile acestora și modul în care se evaluatează. Concret, evaluarea BRDF-ului presupune cunoștința în prealabil a direcției de incidentă și a celei de ieșire. Într-un algoritm de Path Tracing, la fiecare pas al recursivității se cunoaște doar direcția incidentă (începând cu prima rază pornită de la observator), urmând să se determine, după intersecția cu o suprafață, direcția de ieșire (care va constitui direcția incidentă pentru următoarea rază s.a.m.d.). Această direcție de ieșire poate fi aleasă aleator sau conform unei strategii de eșantionare. În orice caz, fiind un algoritm Monte Carlo, se va ține cont de distribuția strategiei de eșantionare și se va pondera rezultatul contribuției reflectanței în consecință.

Așa cum am discutat în secțiunea 3.3.2, eșantionarea bazată pe importanță este crucială pentru a obține o convergență rapidă a algoritmului. Dacă BRDF-ul unui material modeleză o suprafață speculară (poate chiar o oglindă perfectă), atunci distribuția direcțiilor de ieșire va fi foarte îngustă, apropiindu-se de funcția delta Dirac:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0. \end{cases}, \quad (3.5.11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1.$$

Folosind o eșantionare uniformă (3.5.13), această distribuție va fi eșantionată neoptim, iar majoritatea direcțiilor generate nu vor contribui la radianța observată, având probabilitate 0 (nefiind pe direcția de reflexie).

Pentru eşantionare, ne trebuie un generator de numere aleatoare. Fie  $\xi_1$  și  $\xi_2$  numere aleatoare din intervalul  $[0, 1]$  (alese conform unei distribuții uniforme). Aceste numere vor fi folosite în strategiile descrise jos pentru a genera direcții de ieșire. De asemenea, facem precizarea că metodele prezentate mai jos presupun că ne aflăm în sistemul de coordonate tangent la suprafață  $(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ , cu normala  $\mathbf{n}$  orientată în sus,  $\mathbf{n} = (0, 1, 0)$ . Câteva metode presupun coordonatele sferice  $(\theta, \phi)$ , din care putem transforma în cele carteziene folosind formulele:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \sin \theta \cos \phi, \\ \mathbf{y} &= \cos \theta, \\ \mathbf{z} &= \sin \theta \sin \phi.\end{aligned}\tag{3.5.12}$$

Cea mai simplă strategie este eşantionarea emisferică uniformă. Aceasta presupune alegerea aleatoare a unei direcții de ieșire din emisfera superioară a punctului de intersecție. Considerând coordonatele sferice  $(\theta, \phi)$ , formulele de transformare, împreună cu probabilitatea eşantionului, sunt:

$$\begin{aligned}\theta &= \arccos \xi_1, \\ \phi &= 2\pi \xi_2, \\ pdf &= \frac{1}{2\pi}.\end{aligned}\tag{3.5.13}$$

Această strategie este foarte brută. Nu ține cont de distribuția BRDF-ului și poate să genereze multe direcții care nu contribuie la radianța observată (mai ales în cazul unui material specular - atunci rezultatele ar fi chiar greșite). O variantă mai bună (dar care tot nu ține cont de material) este eşantionarea ponderată de cosinusul unghiului de ieșire. Această strategie ponderează probabilitatea eşantionului cu  $\cos \theta$  (unghiul făcut cu normala) și are la bază principiul cosinusului Lambertian. Formulele sunt:

$$\begin{aligned}\theta &= \arccos \sqrt{\xi_1}, \\ \phi &= 2\pi \xi_2, \\ pdf &= \frac{\cos \theta}{\pi}.\end{aligned}\tag{3.5.14}$$

Derivațiile ale ecuațiilor 3.5.13 și 3.5.14 se pot găsi în [3].

Am discutat în secțiunea 3.3.2 despre eşantionarea bazată pe importanță. În contextul de față, aceasta înseamnă alegerea unei direcții de ieșire care să contribuie cât mai mult la radianța observată. Acest lucru este realizat prin modelarea unei distribuții de eşantionare care să aproximeze cât mai bine distribuția BRDF-ului.

În cazul unui material Lambertian, definit de ecuația 3.5.2, observăm că distribuția BRDF-ului este constantă și are aceeași formă uniformă ca și eşantionarea uniformă. Astfel, am fi tentați să concluzionăm că putem folosi ecuațiile 3.5.13 pentru a genera direcții de ieșire. Totuși, am omis factorul de cos care apare în ecuația de randare 3.3.13. Așadar, distribuția este mai degrabă una ponderată de cosinus, și e mult mai bine să folosim ecuațiile 3.5.14. De fapt,

esantionarea uniformă este inutilă în aproape toate cazurile, iar rezultatele ei dezamăgitoare se pot observa în Figura ??.

În cazul unui material Phong definit de BRDF-ul 3.5.4, o distribuție bună este greu de calculat. Autorii remarcă faptul că partea speculară nu poate fi integrată analitic și că eșantionarea acesteia se face printr-un proces Monte Carlo. Voi omite detaliile matematice aici, pentru că nu prezintă interes; cititorul este îndrumat spre [20] pentru detalii.

Eșantionarea modelului Torrance-Sparrow este intuitivă. Deoarece factorul predominant este distribuția micronormalelor  $D(\omega_h)$ , eșantionarea se poate face fix pe această distribuție. În acest caz, se va reflecta raza de incidentă  $\omega_i$  în jurul normalei eșantionate pentru a obține direcția de ieșire  $\omega_o$ . Totuși, o metodă mult mai eficientă pentru unghiuri de incidentă mari o reprezintă eșantionarea normalelor vizibile. Reamintim că ecuația 3.5.7 trebuie să fie satisfăcută pentru a obține o distribuție corectă. Această ecuație descrie proporția microfațetelor vizibile sub un unghi  $\theta$  față de normala la suprafață. Putem rearanja ecuația pentru a obține distribuția micronormalelor într-o direcție  $\omega$ :

$$D_\omega(\omega_h) = \frac{G_1(\omega, \omega_h) \max(0, \cos \theta) D(\omega_h)}{\cos \theta_h}. \quad (3.5.15)$$

Un ultim aspect de luat în considerare în calculul probabilității de eșantionare este faptul că această distribuție reprezintă normalele în jurul micronormalei  $\omega_h$ , în timp ce BRDF-ul ține cont de direcția de incidentă  $\omega_i$ . Astfel, trebuie făcută o ajustare de schimbare de variabilă. Procesul este detaliat în [2]. Densitatea de probabilitate se modifică astfel cu un factor de  $\frac{1}{4(\omega_o \cdot \omega_h)}$ .

### 3.5.4 Next Event Estimation

Next Event Estimation (NEE) este o strategie de eșantionare bazată pe importanță multiplă (MIS) care presupune o combinație între eșantionarea BRDF-ului și a surselor de lumină. Aceasta reprezintă o îmbunătățire masivă a convergenței algoritmului de Path Tracing, deoarece multe dintre direcțiile generate de eșantionarea BRDF-ului în sine pot să nu ajungă să intersecteze o sursă de lumină și, implicit, nu vor contribui la radianța observată. În schimb, eșantionarea surselor de lumină la fiecare pas al recursivității ajută mult în acest sens. Astfel, eșantionarea luminii calculează iluminarea directă, în timp ce eșantionarea BRDF-ului calculează iluminarea indirectă. În final, aceste două contribuții sunt combinate probabilistic pentru a obține rezultatul final. Avantajele acestei metode se pot observa în Figura 26.

Idea de bază este de a combina cele două contribuții (directă și indirectă) cu o pondere în  $[0, 1]$ . Aceasta poate fi ori constantă (e.g., 0 sau 1) ori bazată pe o heuristică (precum cele studiate de Veach - balance sau power [35, 34]). Formula generală pentru a combina cele

---

<sup>19</sup>©[https://www.cg.tuwien.ac.at/sites/default/files/course/4411/attachments/08\\_next%20event%20estimation.pdf](https://www.cg.tuwien.ac.at/sites/default/files/course/4411/attachments/08_next%20event%20estimation.pdf). Accesat 24.06.2024.

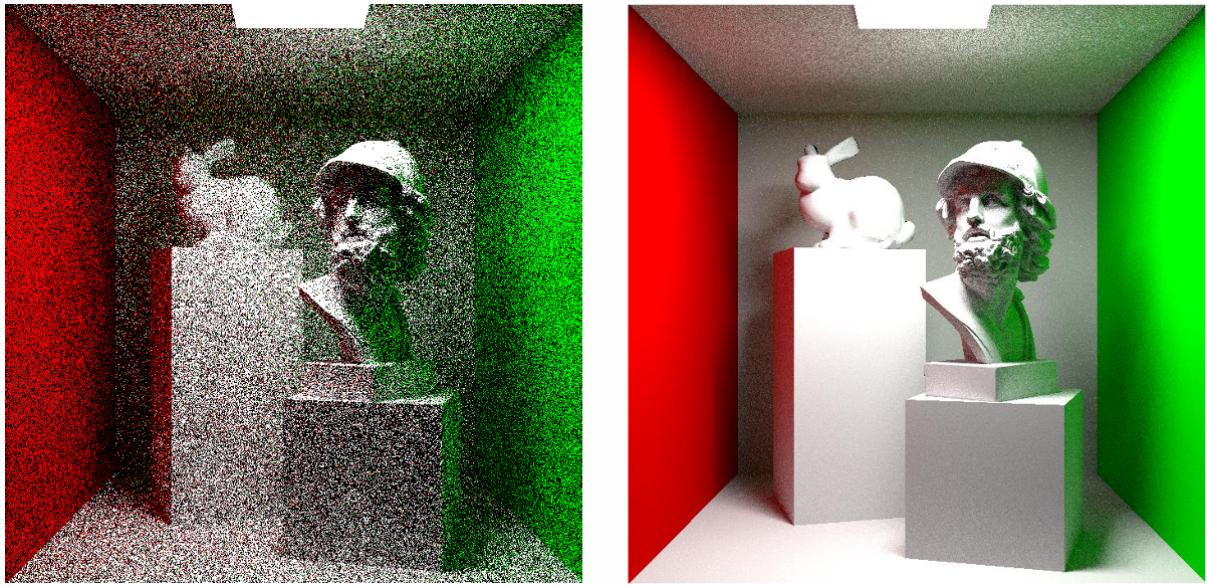


Figura 26: Comparație între eșantionare a BRDF-ului (stânga) și NEE (dreapta)<sup>19</sup>

două contribuții este:

$$L(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) = w \cdot f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) L_e(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o), \quad (3.5.16)$$

unde  $w$  este factorul de ponderare,  $f_r$  este BRDF-ul materialului și  $L_e$  este radianța emisă de sursa de lumină (normalizată cu probabilitatea de eșantionare).

## 3.6 Accelerare Hardware

Până acum am discutat despre aspectele teoretice ale domeniului. În practică, algoritmii de tip Monte Carlo precum Path Tracing sunt foarte costisitori din punct de vedere computațional. Prin natura lor, aceștia sunt algoritmi paraleli și pot beneficia de accelerare hardware precum GPU-urile, care sunt fundamental concepute în jurul unei arhitecturi SIMD. În mod tradițional, totuși, algoritmii offline folosiți în motoarele grafice de producție (Blender Cycles,<sup>20</sup> Autodesk Arnold,<sup>21</sup> Chaos V-Ray<sup>22</sup>) sunt rulați pe CPU-uri, în parte deoarece este mult mai facil de dezvoltat și extins un program care rulează pe CPU. De pildă, un framework multi-vendor, OpenCL,<sup>23</sup> nu a primit prea mult suport în motoarele grafice de producție precum Cycles sau Arnold (dar tool-uri noi precum HIP<sup>24</sup> încep să primească suport<sup>25</sup>). Povestea este puțin mai fericită în tabăra verde (Nvidia), care are suport mai răspândit pentru framework-ul CUDA.

<sup>20</sup><https://www.cycles-renderer.org/>. Accesat 24.06.2024.

<sup>21</sup><https://www.autodesk.co.uk/products/arnold/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. Accesat 24.06.2024.

<sup>22</sup><https://www.chaos.com/3d-rendering-software>. Accesat 24.06.2024.

<sup>23</sup><https://www.khronos.org/api/opencl>. Accesat 24.06.2024.

<sup>24</sup><https://github.com/ROCM/HIP>. Accesat 24.06.2024.

<sup>25</sup><https://code.blender.org/2021/11/next-level-support-for-amd-gpus/>. Accesat 24.06.2024.

Totuși, într-un context de randare în timp real, CUDA este o opțiune ce aduce un overhead sesizabil.

În industria real-time (specific jocurilor video), accelerarea hardware este esențială. Totodată, se preferă să se folosească un API cât mai aproape de driver și cu o amprentă cât mai mică asupra sistemului. De aceea, se folosesc API-uri precum Vulkan sau DirectX 12 în defavoarea CUDA sau OpenCL. Acestea din urmă sunt mai degrabă folosite în aplicații de tip offline, unde timpul de randare nu este atât de critic.

### 3.6.1 Vulkan

Vulkan a fost dezvoltat cu scopul de a fi un succesor al OpenGL și de a utiliza eficient hardware-ul modern, oferind uneltele de optimizare necesare pentru a distribui sarcini pe mai multe fire de execuție.<sup>26</sup> A fost adoptat la scară largă în industria jocurilor video<sup>27</sup> și continuă să se dezvolte spre a fi un standard în industrie. De remarcat că acest API oferă suport pentru Ray Tracing accelerat hardware.<sup>28</sup>

### 3.6.2 DirectX 12

DirectX 12 este cel mai popular API modern de grafică în industria jocurilor video.<sup>29</sup> dezvoltat de Microsoft pentru a fi folosit pe platformele Windows și Xbox.<sup>30</sup> Acesta oferă avantaje similare cu cele oferite de Vulkan, însă și acesta este un API de nivel scăzut, notoriu pentru dificultatea de a fi folosit la potențialul său maxim. Acesta oferă suport pentru Ray Tracing accelerat hardware prin intermediul extensiei DirectX Raytracing (DXR).<sup>31</sup> Acesta a devenit standardul în industrie pentru randarea în timp real și este adoptat în majoritatea noilor lansări AAA de pe piață.<sup>32</sup> Acest API, împreună cu extensia DXR, este folosit în acest proiect pentru a accelera randarea Path Tracing pe GPU (vezi capitolul 5).

---

<sup>26</sup><https://www.vulkan.org/>. Accesat 24.06.2024.

<sup>27</sup>[https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List\\_of\\_Vulkan\\_games](https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List_of_Vulkan_games). Accesat 24.06.2024.

<sup>28</sup>[https://docs.vulkan.org/guide/latest/extensions/ray\\_tracing.html](https://docs.vulkan.org/guide/latest/extensions/ray_tracing.html). Accesat 24.06.2024.

<sup>29</sup>[https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List\\_of\\_Direct3D\\_12\\_games](https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List_of_Direct3D_12_games). Accesat 24.06.2024.

<sup>30</sup><https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/direct3d12/what-is-directx-12->. Accesat 24.06.2024.

<sup>31</sup><https://devblogs.microsoft.com/directx/announcing-microsoft-directx-raytracing/>. Accesat 24.06.2024.

<sup>32</sup>[https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List\\_of\\_games\\_that\\_support\\_ray\\_tracing](https://www.pcgamingwiki.com/wiki/List_of_games_that_support_ray_tracing). Accesat 24.06.2024.

## 4 SOLUȚIA PROPUȘĂ

### 4.1 Comparație cu Ray Tracing Whitted

Proiectul de față dezvoltă un motor de randare bazat pe Ray Tracing Whitted și Path Tracing, cu suport pentru accelerare hardware folosind API-ul DirectX 12. Acesta este scris în C++20, iar algoritmii de Ray Tracing sunt implementați în cadrul HLSL. Proiectul a fost dezvoltat pornind de la un exemplu oferit public de Microsoft [24], care oferă un schelet bun de DirectX 12 și este un punct de plecare ce oferă majoritatea boilerplate-ului necesar pentru a începe dezvoltarea. A fost modificat acest cod suport pentru a extinde funcționalitatea cu încă un set de shadere pentru Path Tracing și a suporta noi tipuri de suprafețe (e.g., unghi solid - Figura 27). De asemenea, acesta a fost extins cu multe alte funcționalități, pe care le vom detalia în acest capitol.

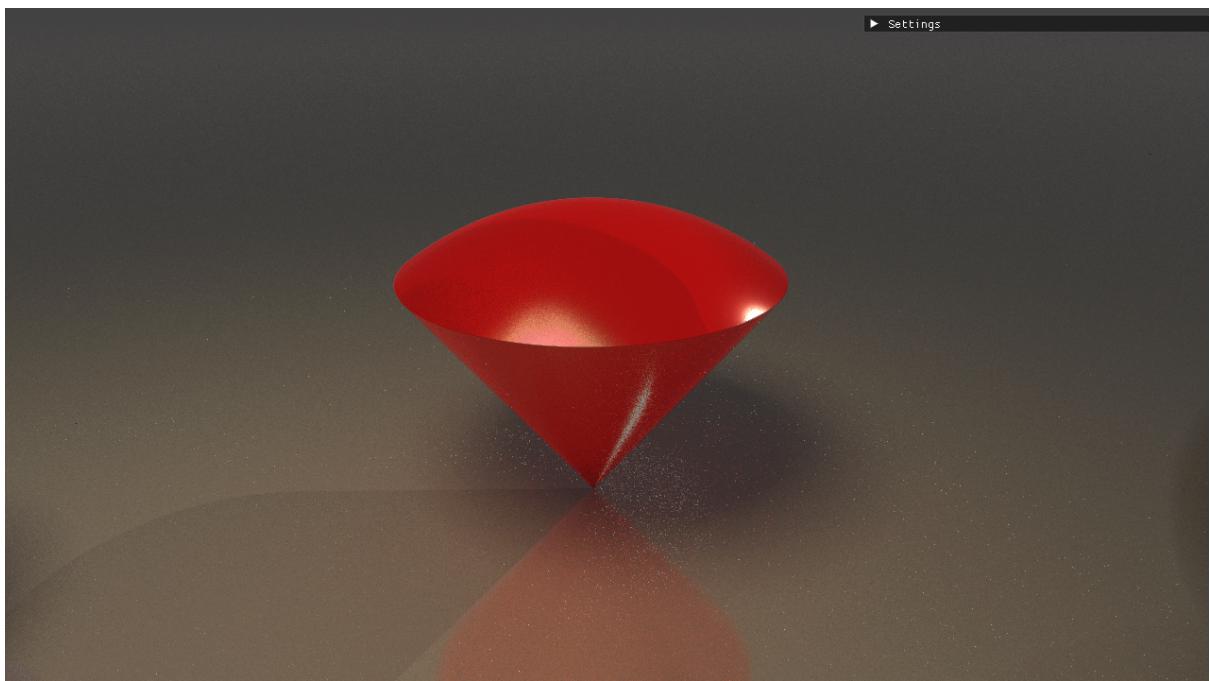


Figura 27: Unghi solid reprezentat drept câmp de distanță<sup>1</sup>

Algoritmul integrat deja în schelet este un Ray Tracer recursiv simplu, de tip Whitted, care folosește un model de iluminare Phong. Acesta nu suportă transmisie, iar reflexiile sunt perfect geometrice. O randare realizată cu acest algoritm se poate vedea în Figura 28. Torusul de tip inel și cele 3 sfere au un material ce simulează cromul și este reflectiv. Se pot observa și

<sup>1</sup>Formula câmpului a fost preluată de la adresa <https://www.shadertoy.com/view/Xds3zN>. Accesat 24.06.2024.

umbre geometrice, cauzate de două surse de lumină punctiforme. Aceeași scenă, dar randată

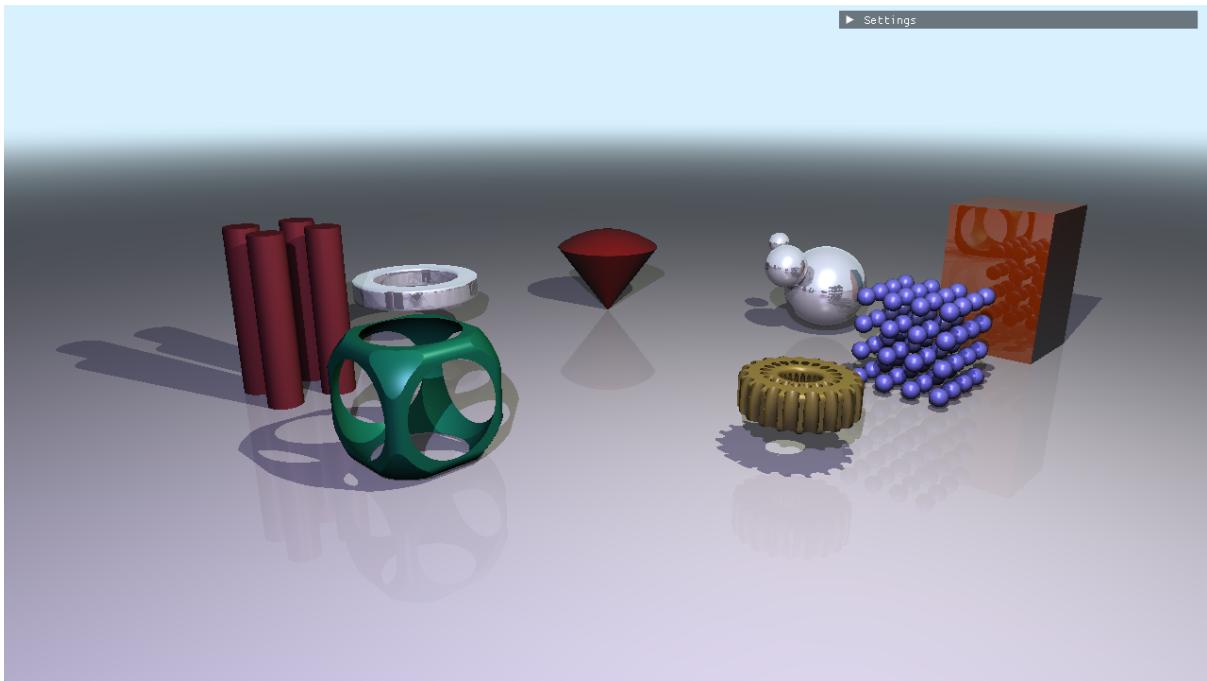


Figura 28: Randare folosind Ray Tracing Whitted

folosind Path Tracing, se poate vedea în Figura 29. Condițiile de iluminare nu pot fi replicate perfect. Observăm imediat o diferență majoră - această randare ține cont de iluminarea globală. Scena este iluminată conform fundalului, iar contribuția reflectanței fiecărui obiect este vizibilă pe podea. În acest caz, lumina nu este destul de puternică să lupte cu fundalul, de aceea umbrele sunt destul de puțin pronunțate. În randarea din Figura 30 culoarea de fundal a fost coborâtă - se observă astfel contribuțiiile celor două surse de lumină - una de tip suprafață și una direcțională. Umbrele lăsate de zonele obstrucționate din perspectiva luminii de suprafață au un aspect natural, cu penumbre ce tranziționează lin între umbra completă și lumina directă.

Așa cum este descris în secțiunea 4.4, sistemul de materiale folosit este physically based și modelează efecte complexe precum reflexii și refracții. Un exemplu de material care dă dovadă de ambele comportamente se află în figura Figura 31. Aceasta este un material dielectric, cu un indice de refracție de 1.5. Se observă refracții către obiectele din spate în zonele centrale ale sferelor și reflexii către mediul înconjurător către margini, unde unghiul de incidentă este mare. Acest comportament este consistent cu legile lui Fresnel.

## 4.2 Tehnici de accelerare a convergenței

Algoritmul de bază prezentat în pseudocodul 1 a fost augmentat cu mai multe tehnici de accelerare a convergenței, majoritatea fiind descrise în secțiunea 3.5. Multe dintre acestea sunt configurabile din meniu, iar unele sunt activate implicit.

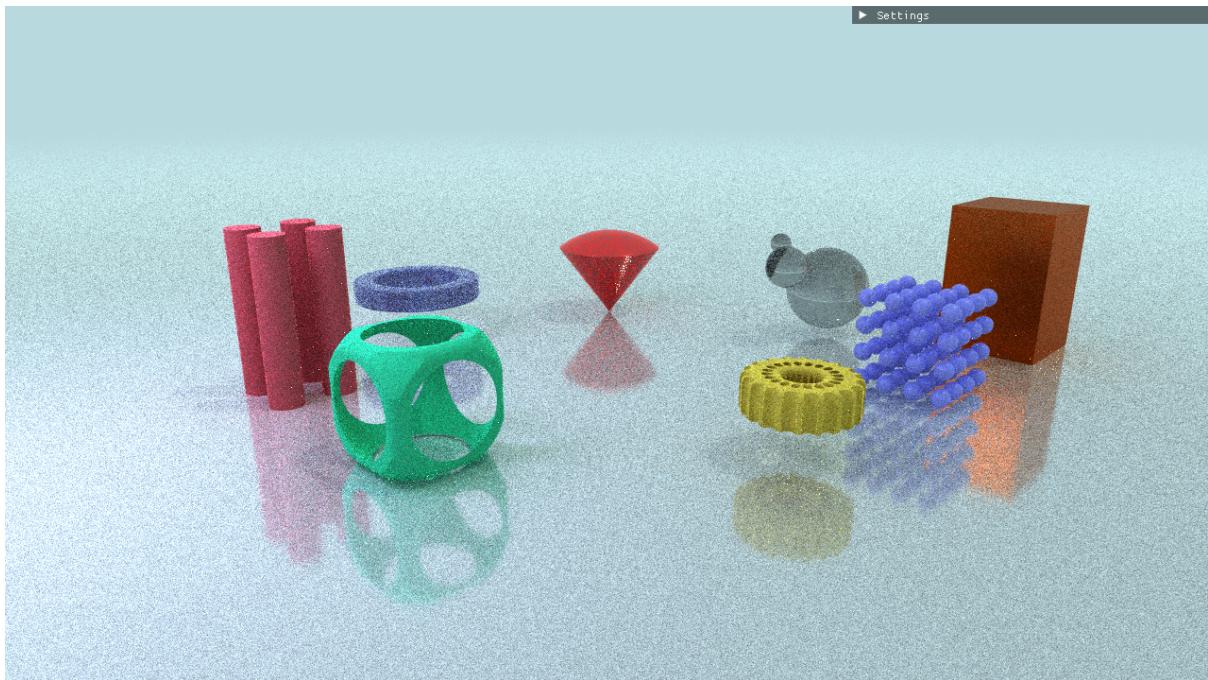


Figura 29: Randare folosind Path Tracing

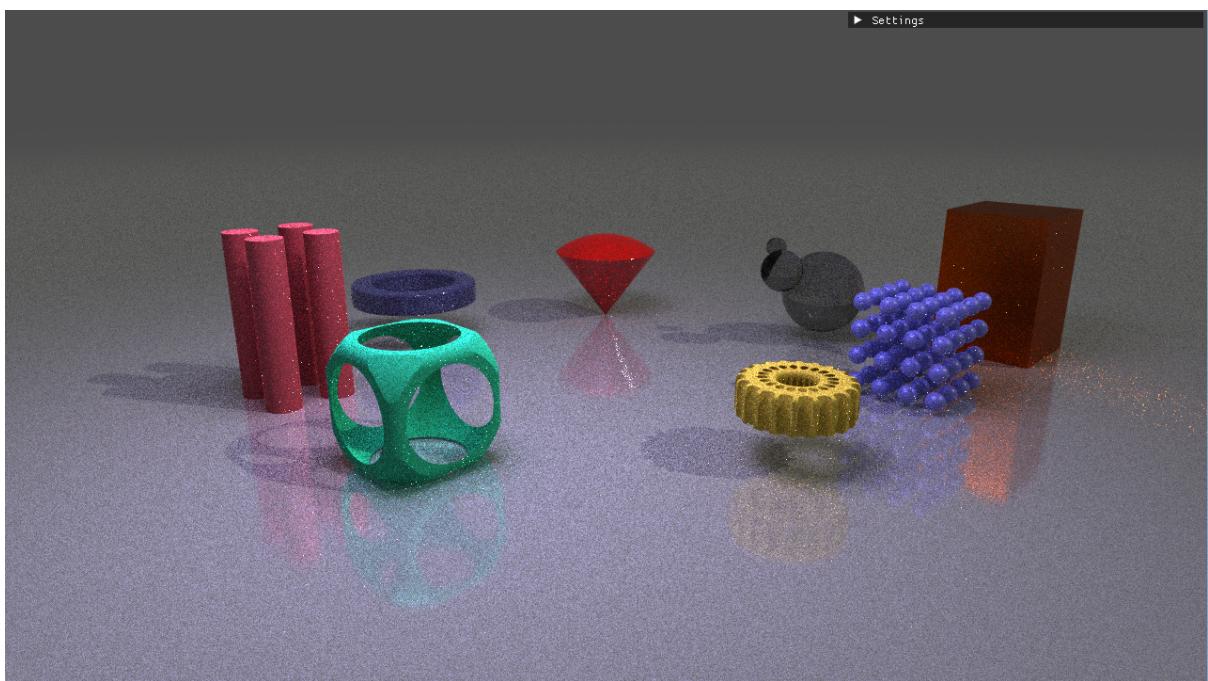


Figura 30: Randare folosind Path Tracing cu fundal mai întunecat

- **Next Event Estimation** - la fiecare pas se selectează o lumină (sau toate) din scenă și se eșantionează cu importanță multiplă contribuția directă și indirectă. În formula 3.5.16 s-a folosit pentru calculul ponderii  $w$  euristica puterii 2:

$$w = \frac{pdf_L^2}{pdf_f^2 + pdf_L^2}. \quad (4.2.1)$$

Această optimizare se efectuează implicit și nu este configurabilă.

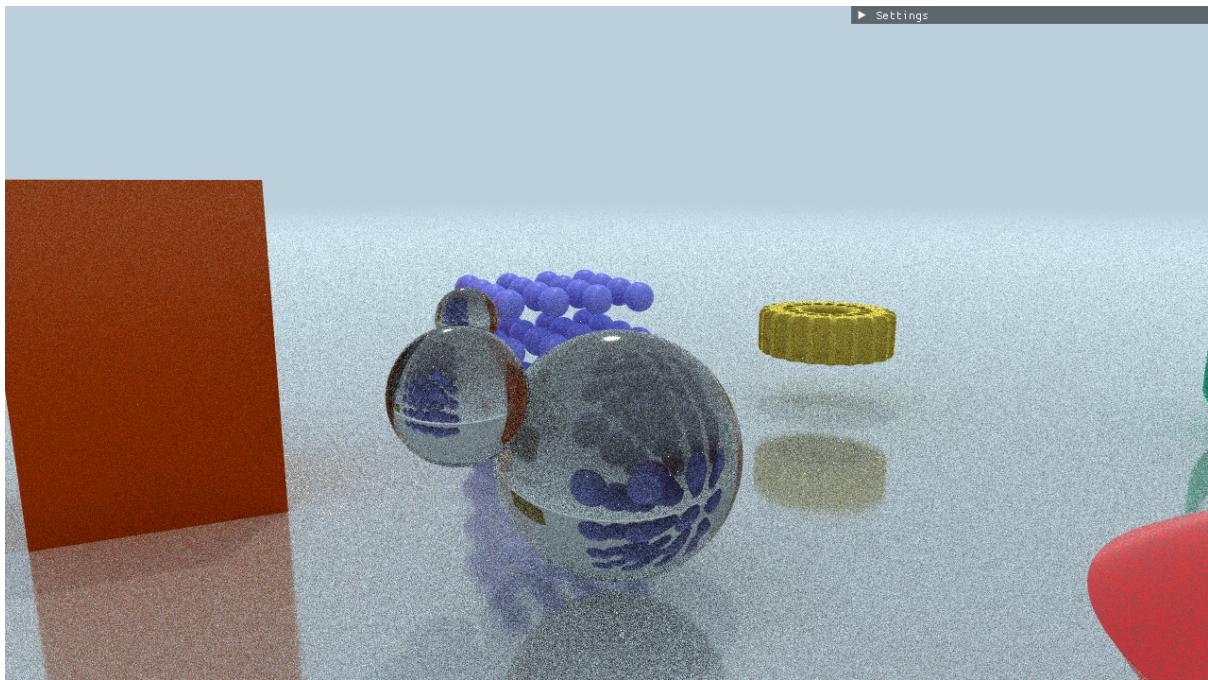


Figura 31: Randare folosind Path Tracing cu sticlă dielectrică

- **Eșantionare a unei singure lumiști** - pentru ca algoritmul să nu piardă performanță dramatic în cazul în care există multe surse de lumină, se poate alege aleator o singură sursă de lumină la fiecare pas pe care să se aplice NEE. Rezultatul final este ponderat apoi cu probabilitatea de eșantionare a sursei de lumină (în acest caz,  $1/N$ , unde  $N$  este numărul de surse de lumină). Această optimizare poate fi dezactivată din meniu (este activată implicit).
- **Eșantionare bazată pe importanță** - alegerea unei noi direcții de ieșire pentru pasul recursiv se face folosind o eșantionare concepută pentru a aproxima distribuția de probabilitate a normalelor microfațetelor (vezi sectiunile 3.3.2, 3.5.2 și 4.4). Această optimizare este activată implicit și poate fi schimbată cu alte două tehnici de eșantionare: uniformă sferică, respectiv ponderată de cosinusul unghiului de ieșire.
- **Ruleta rusească** - o tehnică unbiased care termină prematur recursitatea pentru a evita pierderea de timp în cazul în care contribuția pe o cale este foarte mică. Probabilitatea de eliminare este invers proporțională cu contribuția acumulată până la acel pas. Pentru a nu introduce bias din cauza energiei pierdute în terminarea prematură, contribuția acumulată se ponderează la fiecare pas cu probabilitatea de terminare. Această optimizare este activată implicit și poate fi configurată prin modificarea adâncimii de la care se aplică.

### 4.3 Suport pentru suprafete implice și analitice

Motorul grafic suportă, pe lângă suprafetele tradiționale definite prin primitive geometrice (e.g., triunghiuri), și suprafete definite implicit (vezi secțiunea 3.2) sau analitic. Acestea se

încadrează în AABB-uri care se folosesc în structura de accelerare BVH oferită de DXR. Astfel, API-ul se ocupă de intersecția cu aceste încadrări, iar mai departe se utilizează rutine specifice pentru a calcula intersecția precisă cu suprafața definită. Pentru cele implicate, se folosesc funcții de distanță cu semn și se aplică Ray Marching local (vezi secțiunea 3.2). Pentru suprafețele analitice, precum sferele și paralelipipedul, se folosesc formule analitice pentru a calcula intersecția. Rutinele de intersecție pentru suprafețele analitice sunt mult mai rapide decât cele de Ray Marching, dar nu oferă la fel de multă flexibilitate creativă.

Ofer credite lui Inigo Quilez [27] și Microsoft [24] pentru formulele care definesc aceste suprafețe. Exemple de cod pot fi găsite în capitolul 5.

## 4.4 Sistemul de materiale

Sistemul de materiale este un BSDF compus ce combină mai mulți lobi definiți de BRDF-uri și BTDF-uri. Modelul particular este denumit Disney Principled BSDF și a fost introdus de Burley în 2012 [7] ca un BRDF și extins în 2015 [14] cu o serie de îmbunătățiri, precum un lob de transmisie. Acesta este modelul care a fost folosit în producția cinematografică, începând cu filmul Wreck-It Ralph.

Modelul este principiat în sensul că deviază în mod subtil de la modelele fizice pentru a oferi un control și o intuiție mai bună artistului. Astfel, acesta expune o interfață simplă, cu parametri normalizați (în  $[0, 1]$ ) care să se coreleză cu proprietățile fizice ale materialelor, uneori alegând să nu aibă corespondență perfectă cu realitatea ci mai degrabă un impact artistic. O ilustrație a parametrilor disponibili în modelul din 2012 se poate vedea în Figura 33.

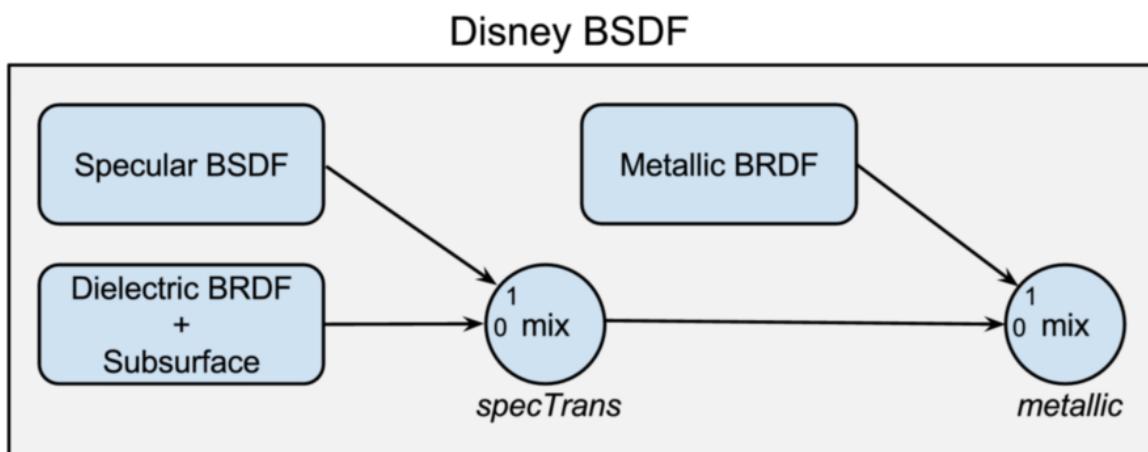


Figura 32: Compunerea BSDF-ului Disney Principled [14]

În lucrarea de față am ales să implementăm modelul din 2015, cu câteva modificări care să ușureze dezvoltarea. Câteva implementări de referință sunt [4, 30, 19]. Menționăm faptul că distribuțiile prezentate în continuare vor folosi calcule într-un sistem de coordonate local

$(\mathbf{t}, \mathbf{b}, \mathbf{n})$ , pe când în implementare se folosește un sistem de coordonate local  $(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ , unde  $\mathbf{t}$  este tangenta,  $\mathbf{n}$  este normala și  $\mathbf{b}$  este bitangenta la suprafață.

## Lobul difuz

Reprezintă un model empiric ce încearcă să modeleze efectele observate de Burley în setul de date MERL [23]: la unghiuri de incidentă mari, materialele lucioase au reflectanță scăzută, în timp ce materialele dure au reflectanță crescută față de unghiul normal de incidentă. Aceste observații sunt prezise de reflexia Fresnel, motiv pentru care modelul propus ține cont de aceasta:

$$f_d = \frac{\text{albedo}}{\pi} F_D(\omega_i, \omega_h) F_D(\omega_o, \omega_h), \quad (4.4.1)$$

unde  $F_D(\omega, \omega_h)$  este o modificare a aproximăției lui Schlick [29] a reflexiei Fresnel pentru direcția de incidentă  $\omega$  și micronormala  $\omega_h$

$$\begin{aligned} F_D(\omega, \omega_h) &= 1 + (F_{D90} - 1)(1 - |\omega \cdot \omega_h|)^5, \\ F_{D90} &= 0.5 + 2 \cdot \text{roughness} \cdot |\omega_o \cdot \omega_h|. \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

Această modificare ignoră indicele de refracție al materialului și presupune că nu există pierderi de energie incidentă la difuzie, ceea ce permite BRDF-ului să depindă direct de o culoare *albedo* specificată. De asemenea, termenul  $F_{D90}$  este ales astfel încât contribuția de tip retroreflexie să fie modulată, în funcție de *roughness*, între 0.5 (*roughness* = 1) și 2.5 (*roughness* = 0). Această modificare este strict empirică și, conform lui Burley, are un feedback pozitiv din partea artiștilor.

Versiunea din 2015 transformă  $f_d$  într-un BSDF cu componentă de dispersie sub suprafață, care este simulață prin Path Tracing Volumetric (introdusă prima oară de Lafourche și Willem [21]), dar acest algoritm este prea costisitor pentru randare în timp real. Așadar, rămânem la BRDF-ul 4.4.1 și îl complementăm cu o aproximare bazată pe legea Lommel-Seeliger,<sup>2</sup> așa cum este descris în [4]:

$$f_{ss} = \frac{1.25 \cdot \text{albedo}}{\pi} \left( F_{SS}(\omega_i, \omega_h) F_{SS}(\omega_o, \omega_h) \left( \frac{1}{|\omega_i \cdot \omega_h| + |\omega_o \cdot \omega_h|} - 0.5 \right) + 0.5 \right), \quad (4.4.3)$$

unde  $F_{SS}$  este aceeași aproximare folosită pentru  $F_D$  (4.4.2), dar cu o remapare  $F_{SS90} = \text{roughness} \cdot (\omega_o \cdot \omega_h)^2$ .

Într-un final, cele două componente sunt interpolate liniar de parametrul *subsurface*:

$$f_d = (1 - \text{subsurface}) \cdot f_d + \text{subsurface} \cdot f_{ss}. \quad (4.4.4)$$

---

<sup>2</sup>[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy\\_\\_Cosmology/Planetary\\_Photometry\\_\(Tatum\\_and\\_Fairbairn\)/03%3A\\_A\\_Brief\\_History\\_of\\_the\\_Lommel-Seeliger\\_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Planetary_Photometry_(Tatum_and_Fairbairn)/03%3A_A_Brief_History_of_the_Lommel-Seeliger_Law). Accesat 24.06.2024.

## Componenta de luciu (sheen)

Materialele textile precum catifeaua sau mătasea au un luciu pronunțat la unghiuri mari de incidentă, cauzat de retroreflexie. Pentru a compensa pentru acest efect, Burley a adăugat o componentă aditivă de luciu la BRDF-ul difuz (aceasta nu este evaluată ca un lob separat). La fel cum a procedat și la difuz, Burley a folosit un termen Fresnel modificat pentru a accentua retroreflexia:

$$\begin{aligned} f_{sheen} &= sheen \cdot C_{sheen}(1 - |\omega \cdot \omega_h|^5), \\ C_{sheen} &= (1 - sheenTint) + sheenTint \cdot C_{tint}, \\ C_{tint} &= albedo/luminance(albedo), \end{aligned} \quad (4.4.5)$$

unde *sheenTint* este un parametru care controlează contribuția culorii materialului la luciu. Reflexia speculară a unui dielectric este totuși acromatică, însă această componentă modelează structura complexă a textilei și deci este lăsată la latitudinea artistului cât de colorată să fie.

## Lobul de reflexie speculară

Reprezintă este un model BRDF de microfațete de tipul Torrance-Sparrow (vezi ecuația 3.5.10):

$$f_{sp} = \frac{D(\omega_h)G(\omega_i, \omega_o)F(\omega_o)}{4|\omega_i \cdot \mathbf{n}| |\omega_o \cdot \mathbf{n}|}, \quad (4.4.6)$$

Pentru distribuția microfațelor *D*, Burley folosește distribuția anizotropică GGX [36]:

$$D_{specular} = \frac{1}{\pi \alpha_x \alpha_y \left( \frac{h_x^2}{\alpha_x^2} + \frac{h_y^2}{\alpha_y^2} + h_z^2 \right)^2}, \quad (4.4.7)$$

unde  $\mathbf{h} = (h.x, h.y, h.z)$  este normala microfațetei proiectată în planul de referință tangent, iar  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$  sunt parametri de modelare a anizotropiei. Burley i-a definit cu o mapare în funcție de parametrii materialului *roughness* și *anisotropic*:

$$\begin{aligned} aspect &= \sqrt{1 - 0.9 \cdot anisotropic}, \\ \alpha_x &= \max(0.0001, roughness^2 / aspect), \\ \alpha_y &= \max(0.0001, roughness^2 \cdot aspect). \end{aligned} \quad (4.4.8)$$

Această mapare asigură un raport de aspect maxim de 10:1 și nu lasă rugozitatea să ajungă la 0 (în fel material este invizibil).

Pentru funcția de mascare și umbrire *G*, Burley folosește varianta separabilă cu funcția Smith G1 (vezi ecuația 3.5.6) derivată pentru distribuția GGX, care implică următoarea expresie a funcției  $\Lambda$ :

$$\Lambda(\omega, \omega_h) = \frac{\sqrt{1 + \frac{(w'.x \cdot \alpha_x)^2 + (w'.y \cdot \alpha_y)^2}{w'.z^2}}}{2}, \quad (4.4.9)$$

unde  $w' = (w'.x, w'.y, w'.z)$  este proiecția lui  $\omega$  pe planul tangent.

Pentru termenul specular  $F$ , trebuie să modelăm și din perspectiva materialelor dielectrice dar și a celor conductoare. Pentru partea conductoare o să folosim aproximarea lui Schlick, dar pentru parte dielectrică Burley a propus folosirea ecuației exacte a lui Fresnel, deoarece aproximarea introducea erori semnificative pentru indecși de refracție foarte mici. În contrast, ecuația lui Fresnel pentru conductoare este mai complexă și depinde de parametri neintuitivi, de aceea s-a decis să se rămână la aproximarea lui Schlick folosită în 2012.

Pentru completitudine, definim ecuația lui Fresnel pentru dielectrice:

$$F_{dielectric}(\theta_i, \theta_t, \eta) = 0.5 * \left( \left( \frac{\cos \theta_i - \eta \cos \theta_t}{\cos \theta_i + \eta \cos \theta_t} \right)^2 + \left( \frac{\cos \theta_t - \eta \cos \theta_i}{\cos \theta_t + \eta \cos \theta_i} \right)^2 \right), \quad (4.4.10)$$

unde  $\eta$  este indicele de refracție relativ al materialului, iar  $\theta_i$  și  $\theta_t$  sunt unghiurile de incidentă și transmisie, respectiv. Trebuie avută grijă la cazul de reflexie totală, când legea lui Snell nu are soluție reală pentru  $\theta_t$ , i.e.,  $\sin \theta_t > 1$ . În acest caz, se consideră  $F_{dielectric} = 1$ .

Aproximarea lui Schlick se definește astfel:

$$F_{Schlick}(\theta, n_1, n_2) = F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta)^5, \quad (4.4.11)$$

unde  $F_0 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$  este reflectanța la unghiul normal de incidentă. Remarcăm faptul că în această aproximare  $\theta$  se măsoară relativ la micronormala  $\omega_h$ .

Acum că avem definiții termenii necesari, putem defini funcția de mixaj a reflexiei speculare pentru dielectrice și conductoare:

$$F_{mix} = (1 - metallic) \cdot F_{dielectric} + metallic \cdot F_{Schlick}, \quad (4.4.12)$$

Reflectanța obținută este acromatică, ceea ce este reprezentativ pentru dielectrice, însă conductoarele au o reflexie speculară influențată de culoarea materialului. Totuși, factorul  $F_{mix}$  este acromatic, fiind scalar. Așadar, pentru a introduce culoarea în reflexie, Burley a propus un amestec similar celui folosit pentru componenta de luciu 4.4.5:

$$specularColor = (1 - metallic) \cdot f_{sheen} \cdot F_0 + metallic \cdot albedo. \quad (4.4.13)$$

În concluzie, termenul Fresnel al reflexiei speculare este:

$$F_{specular} = F_{mix} + (1 - F_{mix}) \cdot specularColor, \quad (4.4.14)$$

unde termenul liber  $F_{mix}$  este de fapt o culoare cu toate componente egale cu valoarea  $F_{mix}$ .

## Lobul de transmisie speculară

Acesta este un lob modificat cu multiple corectii care să țină cont de schimbările care au loc la transmisie. Vom enunța formula lui Burley, cu observația că se omite un factor de  $\frac{1}{\eta^2}$  care să

anuleze creșterea luminozității excesive când observatorul este plasat într-un mediu cu indice de refracție diferit de al aerului (e.g. în apă):

$$f_t = \frac{D(\omega_{ht})G(\omega_i, \omega_o)(1 - F(\omega_o))|\omega_i \cdot \omega_{ht}| |\omega_o \cdot \omega_{ht}| \cdot \eta^2}{((\omega_o \cdot \omega_{ht}) + \eta(\omega_i \cdot \omega_{ht}))|\omega_i \cdot \mathbf{n}| |\omega_o \cdot \mathbf{n}|}, \quad (4.4.15)$$

unde  $\omega_{ht}$  este normala microfațetelor refractată:

$$\omega_{ht} = -\frac{\omega_i + \eta\omega_o}{\|\omega_i + \eta\omega_o\|}. \quad (4.4.16)$$

## Lobul de clearcoat

Este tot un BRDF de tipul Torrance-Sparrow (4.4.6). Acesta modelează un strat subțire de material transparent și lucios, cu index de refracție 1.5 (reprezentativ poliuretanului), care acoperă materialul principal. Totuși, formularea acestui model nu este fizică, așa că funcțiile de distribuție și mascare/umbră sunt alese ad-hoc.

Pentru termenul de distribuție  $D$ , Burley a ales următoarea distribuție, care are coada mai largă decât cea folosită la lobul de reflexie speculară:

$$D_{clearcoat} = \frac{a^2 - 1}{\pi \log(a^2) \cdot (1 + (a^2 - 1)(\omega_h \cdot \mathbf{n})^2)}, \quad (4.4.17)$$

unde  $a$  este o măsură de rugozitate care remapează parametrul  $clearcoatGloss$  invers proporțional:

$$a = (1 - clearcoatGloss) \cdot 0.1 + clearcoatGloss \cdot 0.001. \quad (4.4.18)$$

Lobul folosește același termen de mascare și umbră ca și lobul de reflexie speculară (vezi 3.5.6 și 4.4.9), însă termenii  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$  sunt fixați la valoarea empirică 0.25.

## 5 DETALII DE IMPLEMENTARE

//TODO

În plus fata de capitolul precedent acesta conține elemente specifice ale rezolvării problemei care au presupus dificultăți deosebite din punct de vedere tehnic. Pot fi incluse configurații, secvențe de cod, pseudo-cod, implementări ale unor algoritmi, analize ale unor date, scripturi de testare. De asemenea, poate fi detaliat modul în care au fost utilizate tehnologiile introduse în capitolul 3.

Criterii pentru calificativul *Bine*:

- Descrierea detaliată a algoritmilor/structurilor utilizati; Prezentarea etapizată a dezvoltării, inclusiv cu dificultăți de implementare întâmpinate, soluții descoperite; (dacă este cazul) demonstrarea corectitudinii algoritmilor utilizati.

### 5.1 Indicații formatare tabele

Se recomandă utilizarea tabelelor de forma celui de mai jos. Font size : 9. Orice tabel prezent în teză va fi referit în text; exemplu: a se vedea Tabel 1.

Tabela 1: Sumarizare criterii

Calificativ	Criteriu	Observații
<b>Nesatisfacator</b>	Sunt prezentate pe scurt scheme și pseudo-cod	
<b>Satisfacator</b>	Descriere sumară a implementării, prezentarea unor secvențe nerelevante de cod, scheme, etc.	
<b>Bine</b>	Descrierea detaliată a algoritmilor/structurilor utilizati; Prezentarea etapizată a dezvoltării, inclusiv cu dificultăți de implementare întâmpinate, soluții descoperite; (dacă este cazul) demonstrarea corectitudinii algoritmilor utilizati.	Pot fi incluse configurații, secvențe de cod, pseudo-cod, implementări ale unor algoritmi, analize ale unor date, scripturi de testare.

## 6 EVALUARE

//TODO

Acest capitol trebuie să răspundă, în principiu, la 2 întrebări și să se încheie cu o discuție a rezultatelor obținute. Cele două întrebări la care trebuie să se răspundă sunt:

1. **Merge corect?** (Conform specificațiilor extrase în capitolul 2); Evaluarea dacă merge corect se face pe baza cerințelor identificate în capitolele anterioare.
2. Cât de *Bine* merge / cum se compară cu soluțiile existente? (pe baza unor metrii clare). Evaluarea cât de *Bine* merge trebuie să fie bazată pe procente, timpi, cantitate, numere, **comparativ cu soluțiile prezentate în capitolul 3**. Poate fi vorba de performanță, overhead, resurse consumate, scalabilitate etc.

În realizarea discuției, se vor utiliza tabele cu procente, rezultate numerice și grafice. În mod obișnuit, aici se fac comparații și teste comparative cu alte proiecte similare (dacă există) și se extrag puncte tari și puncte slabe. Se ține cont de avantajele menționate și se demonstrează viabilitatea abordării / aplicației, de dorit prin comparație cu alte abordări (dacă acest lucru este posibil). Cuvântul cheie la evaluare este "metrică": trebuie să aveți noțiuni măsurabile și cuantificabile. În cadrul procesului de evaluare, explicați datele, tabelele și graficele pe care le prezentați și insistați pe relevanța lor, în următorul stil: "este de preferat ... deoarece ..."; explicați cititorului nu doar datele ci și semnificația lor și cum sunt acestea interpretate. Din această interpretare trebuie să rezulte poziționarea proiectului vostru printre alternativele existente, precum și cum poate fi acesta îmbunătățit în continuare.

Criterii pentru calificativul *Bine*:

- [Dezvoltare de produs] Teste unitare și de integrare, instrumente de punere în funcțiune (deployment) utilizate și care arată lucru constant de-a lungul semestrului, lucrare validată cu clienții / utilizatorii, produs în producție.
- [Cercetare] Componentele și soluția în ansamblu au fost evaluate din punct de vedere al performanței, folosind seturi de date standard și cu o interpretare corectă a rezultatelor.
- [Ambele] Discuție cu prezentarea calitativă și cantitativă a rezultatelor, precum și a relevanței acestor rezultate printr-o comparație complexă cu alte sisteme similare.

## **7 CONCLUZII**

//TODO

În acest capitol este sumarizat întreg proiectul, de la obiective, la implementare, și la relevanța rezultatelor obținute. În finalul capitolului poate exista o subsecțiune de "Dezvoltări ulterioare".

Criterii pentru calificativul *Bine*:

- Concluziile sunt corelate cu conținutul lucrării, și se oferă o imagine precisa asupra relevantei și calității rezultatelor obținute în cadrul proiectului.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Deriving lambertian brdf from first principles. <https://sakibsaikia.github.io/graphics/2019/09/10/Deriving-Lambertian-BRDF-From-First-Principles.html>. Accesat 24.06.2024.
- [2] Sampling reflection functions. [https://pbr-book.org/3ed-2018/Light\\_Transport\\_I\\_Surface\\_Reflection/Sampling\\_Reflection\\_Functions#MicrofacetDistribution::Pdf](https://pbr-book.org/3ed-2018/Light_Transport_I_Surface_Reflection/Sampling_Reflection_Functions#MicrofacetDistribution::Pdf). Accesat 24.06.2024.
- [3] Sampling the hemisphere. <https://ameye.dev/notes/sampling-the-hemisphere/>. Accesat 24.06.2024.
- [4] Ucsd cse 272 assignment 1: Disney principled bsdf. <https://cseweb.ucsd.edu/~tzli/cse272/wi2023/homework1.pdf>. Accesat 24.06.2024.
- [5] Arthur Appel. Some techniques for shading machine renderings of solids. In *Proceedings of the April 30–May 2, 1968, Spring Joint Computer Conference*, AFIPS '68 (Spring), page 37–45, New York, NY, USA, 1968. Association for Computing Machinery.
- [6] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 11(2):192–198, jul 1977.
- [7] Brent Burley. Physically-based shading at disney. 2012.
- [8] Petrik Clarberg, Simon Kallweit, Craig Kolb, Paweł Kozłowski, Yong He, Lifan Wu, and Edward Liu. Research Advances Toward Real-Time Path Tracing. Game Developers Conference (GDC), March 2022.
- [9] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1):7–24, jan 1982.
- [10] John H. Halton. A retrospective and prospective survey of the monte carlo method. *SIAM Rev.*, 12(1):1–63, jan 1970.
- [11] J. M. Hammersley and David Handscomb. Monte carlo methods. 1964.
- [12] John C Hart. Sphere tracing: A geometric method for the antialiased ray tracing of implicit surfaces. *The Visual Computer*, 12(10):527–545, 1996.
- [13] Eric Heitz. Understanding the masking-shadowing function in microfacet-based brdfs. *Journal of Computer Graphics Techniques*, 3(2):32–91, 2014.

- [14] Stephen Hill, Stephen McAuley, Brent Burley, Danny Chan, Luca Fascione, Michał Iwanicki, Naty Hoffman, Wenzel Jakob, David Neubelt, Angelo Pesce, and Matt Pettineo. Physically based shading in theory and practice. In *ACM SIGGRAPH 2015 Courses*, SIGGRAPH '15, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [15] David S. Immel, Michael F. Cohen, and Donald P. Greenberg. A radiosity method for non-diffuse environments. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):133–142, aug 1986.
- [16] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):143–150, aug 1986.
- [17] Alexander Keller, Timo Viitanen, Colin Barré-Brisebois, Christoph Schied, and Morgan McGuire. Are we done with ray tracing? In *ACM SIGGRAPH 2019 Courses*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [18] Jack P. C. Kleijnen, Ad A. N. Ridder, and Reuven Y. Rubinstein. *Variance Reduction Techniques in Monte Carlo Methods*, pages 1598–1610. Springer US, Boston, MA, 2013.
- [19] knightcrawler25. Glsl-pathtracer. <https://github.com/knightcrawler25/GLSL-PathTracer>. Accesat 24.06.2024.
- [20] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Using the modified phong reflectance model for physically based rendering. Report CW 197, Departement Computerwetenschappen, KU Leuven, Celestijnenlaan 200A, 3001 Heverlee, Belgium, November 1994.
- [21] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Rendering participating media with bidirectional path tracing. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, page 91–100, Berlin, Heidelberg, 1996. Springer-Verlag.
- [22] J.H. Lambert. *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. sumptibus viduae E. Klett, typis C.P. Detleffsen*, 1760.
- [23] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):759–769, July 2003.
- [24] Microsoft. D3d12 raytracing procedural geometry sample. <https://github.com/microsoft/directx-graphics-samples/blob/master/Samples/Desktop/D3D12Raytracing/src/D3D12RaytracingProceduralGeometry/>. Accesat 24.06.2024.
- [25] Fred E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Appl. Opt.*, 4(7):767–775, Jul 1965.
- [26] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317, jun 1975.
- [27] Inigo Quilez. Personal blog. <https://iquilezles.org/>. Accesat 24.06.2024.

- [28] Katja Rogers, Sukran Karaosmanoglu, Maximilian Altmeyer, Ally Suarez, and Lennart E. Nacke. Much realistic, such wow! a systematic literature review of realism in digital games. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [29] Christophe Schlick. An inexpensive brdf model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, 13(3):233–246, 1994.
- [30] Joe Schutte. Rendering the moana island scene part 1: Implementing the disney bsdf. <https://schuttejoe.github.io/post/disneybsdf/>. Accesat 24.06.2024.
- [31] B. Smith. Geometrical shadowing of a random rough surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 15(5):668–671, 1967.
- [32] Gustavo F. Tondello and Lennart E. Nacke. Player characteristics and video game preferences. In *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '19, page 365–378, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [33] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces\*. *J. Opt. Soc. Am.*, 57(9):1105–1114, Sep 1967.
- [34] Eric Veach. *Robust monte carlo methods for light transport simulation*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 1998. AAI9837162.
- [35] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Optimally combining sampling techniques for monte carlo rendering. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '95, page 419–428, New York, NY, USA, 1995. Association for Computing Machinery.
- [36] Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, and Kenneth E. Torrance. Microfacet models for refraction through rough surfaces. In *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, EGSR'07, page 195–206, Goslar, DEU, 2007. Eurographics Association.
- [37] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 13(2):14, aug 1979.

## **ANEXE**

## **A FIGURI**

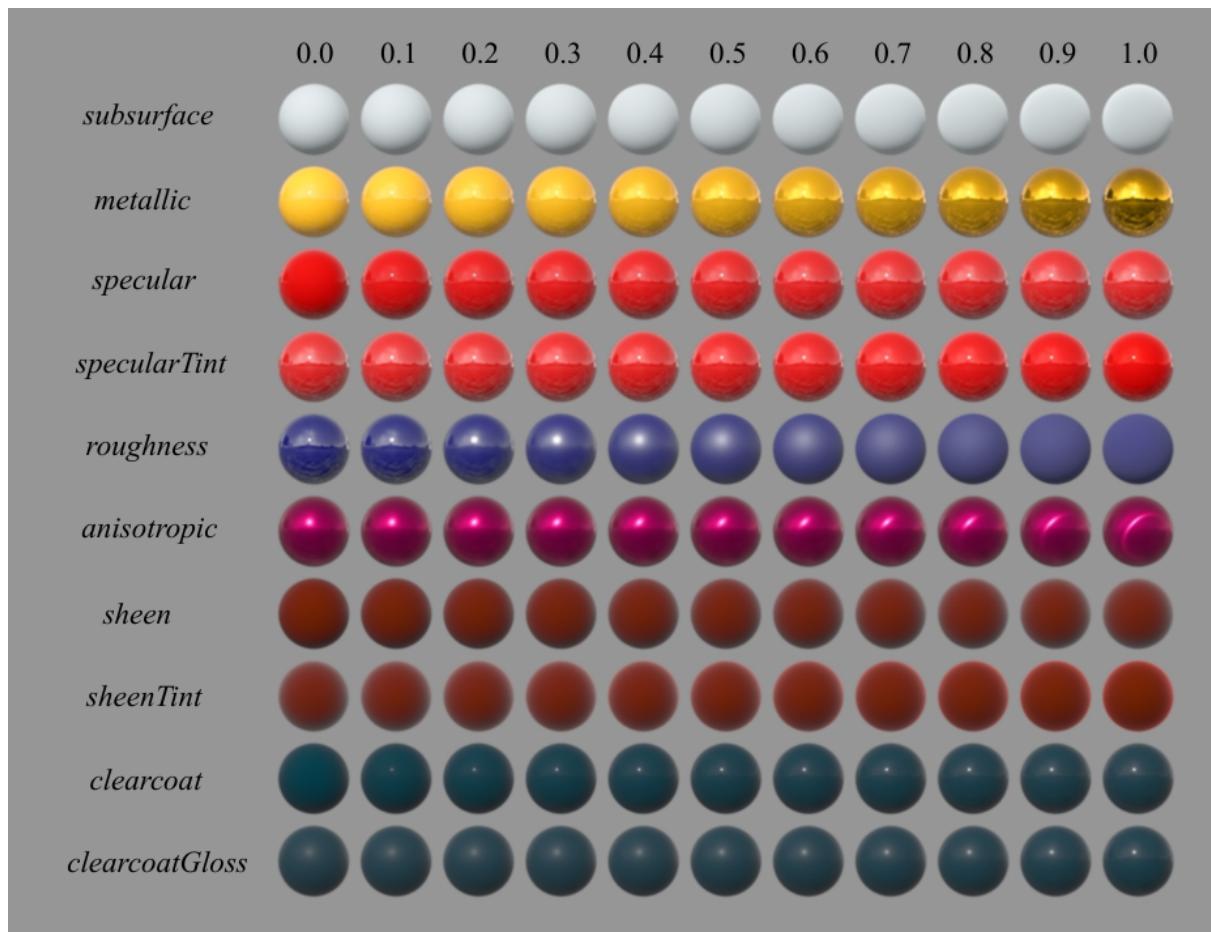


Figura 33: Parametrii modelului Disney Principled BRDF [7]

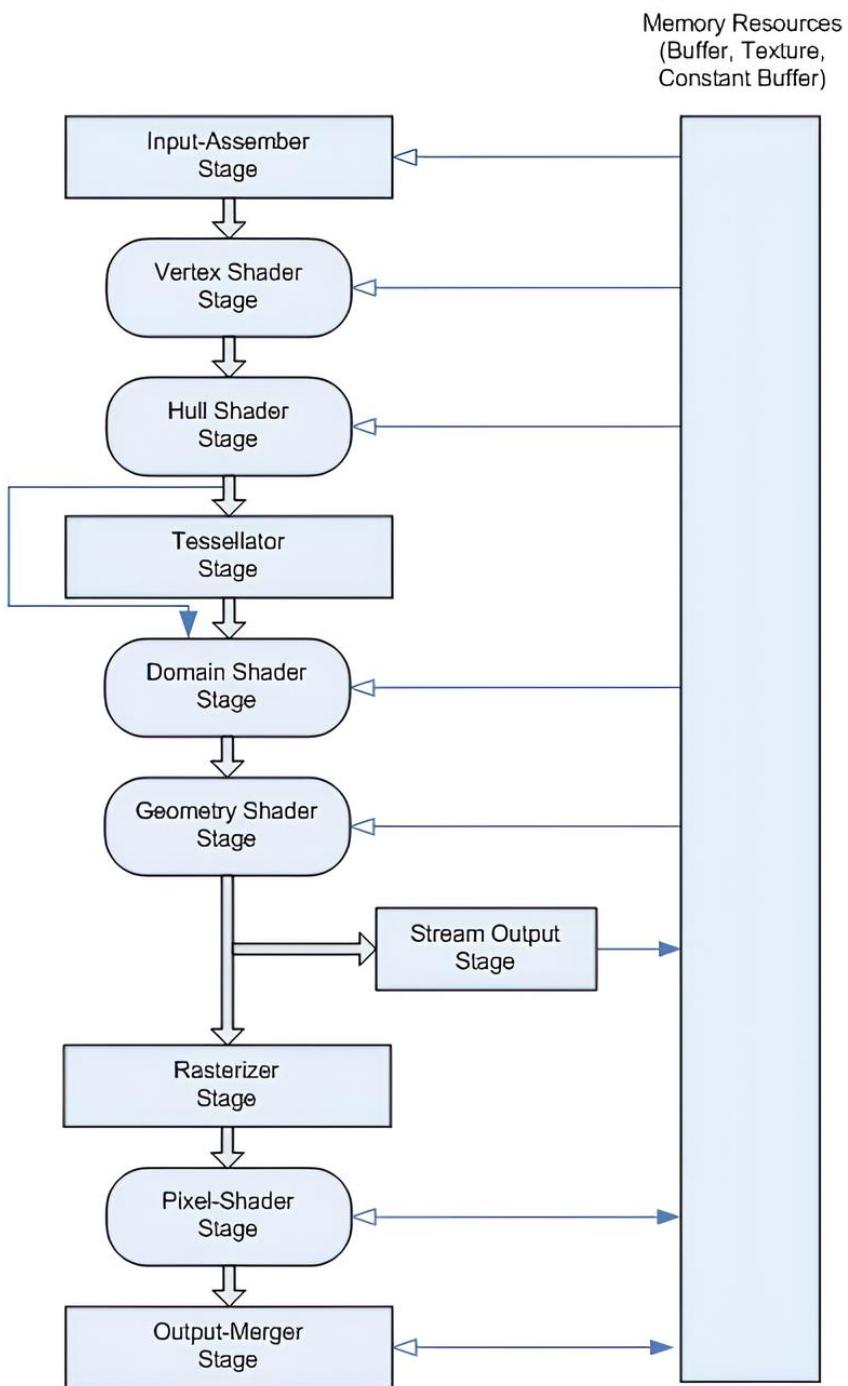


Figura 34: Pipeline-ul de randare Direct3D 11. ©Microsoft, <https://learn.microsoft.com/>. Accesat 19.06.2024.

## **B EXTRASE DE COD**

...