

La photométrie aujourd'hui



Apparence des objets : modéliser la propagation lumineuse



Mathieu Hébert



**LABORATOIRE
HUBERT CURIEN**

UMR • CNRS • 5516 • SAINT-ETIENNE

Une question cruciale pour de nombreux secteurs d'activité...



... mais un problème scientifique complexe.

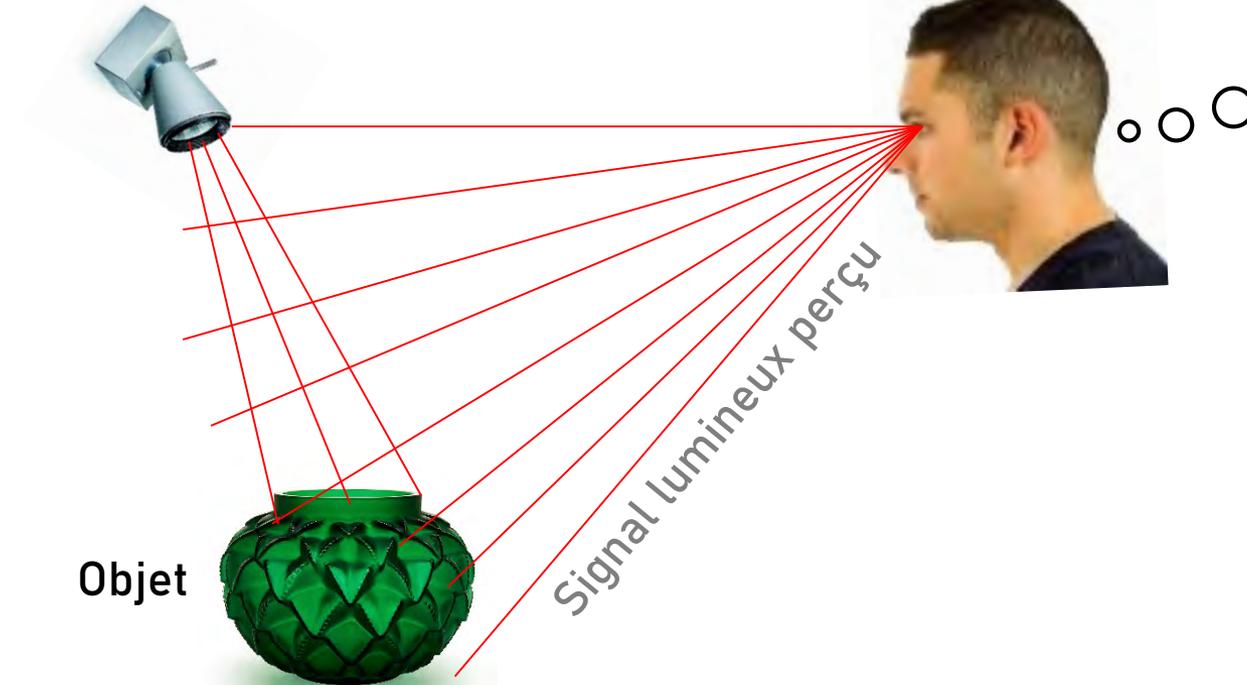
L'apparence - qu'est ce que c'est ?

3

Un ensemble de sensations visuelles issues d'une interprétation par le cerveau humain du signal lumineux émanant de l'objet et de son environnement

Eclairage

Observateur



*vert,
translucide*

*...
verre dépoli*

*...
beau
émouvant...*

Attributs visuels
Reconnaissance d'objet
Attributs sensibles

Un ensemble de sensations visuelles issues d'une **interprétation par le cerveau humain** du signal lumineux émanant de l'objet et de son environnement

Eclairage

Observateur

Objet

Signal lumineux perçu

Sciences perceptuelles

*vert,
translucide*

...
verre dépoli

...
*beau
émouvant...*

Attributs visuels
Reconnaissance d'objet
Attributs sensibles

Un ensemble de sensations visuelles issues d'une interprétation par le cerveau humain du signal lumineux émanant de l'objet et de son environnement

Eclairage

Camera

Objet

Signal lumineux perçu

Sciences de l'image

*vert,
translucide*

...
verre dépoli

...
*beau
émouvant...*

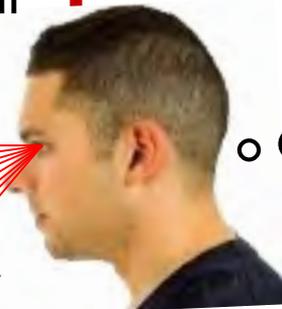
Attributs visuels
Reconnaissance d'objet
Attributs sensibles

Un ensemble de sensations visuelles issues d'une interprétation par le cerveau humain du **signal lumineux** émanant de l'objet et de son environnement

Photométrie

Eclairage

Observateur



Objet



Signal lumineux perçu

*vert,
translucide*

...
verre dépoli

...
*beau
émouvant...*

Attributs visuels
Reconnaissance d'objet
Attributs sensibles

L'apparence - qu'est ce que c'est ?

7

Un ensemble de sensations visuelles issues d'une interprétation par le cerveau humain du **signal lumineux** émanant de l'objet et de son environnement

Photométrie

Eclairage



Objet



Signal lumineux

Le mesurer
Le prédire

Caractériser
le matériau

Ses variations spectrales

Couleur

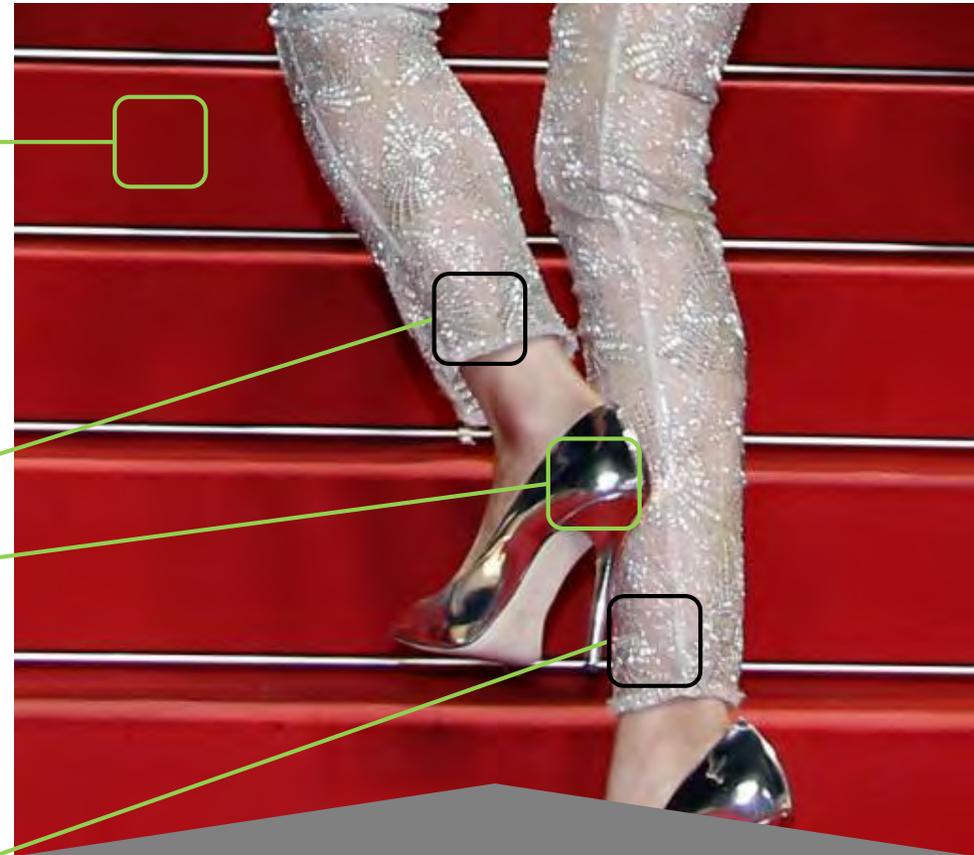
Ses variations géométriques

Translucidité

Brillant

Ses variations spatiales

Texture



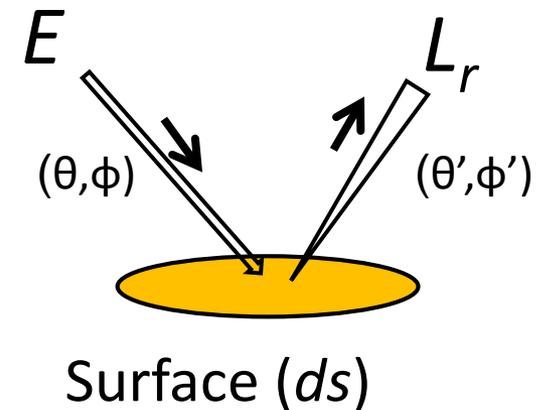
Propriétés optiques des matériaux / éclairage

Le signal émanant d'une surface se caractérise par une fonction bi-angulaire:

Bi-directional Reflectance Distribution Function

$$f_r(\theta, \phi, \theta', \phi', x, y, \lambda, \rho) = \frac{L_r(\theta', \phi', x, y, \lambda, \rho)}{E(\theta, \phi, x, y, \lambda, \rho)}$$

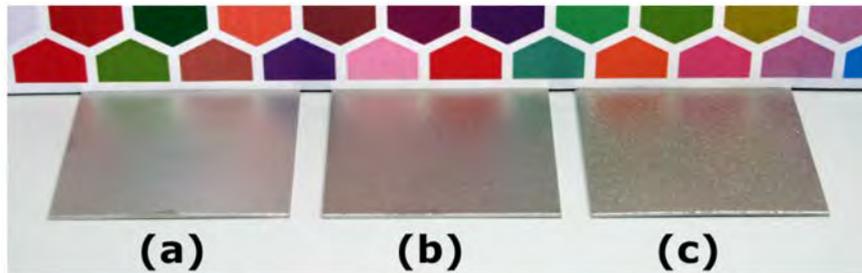
(in sr^{-1})



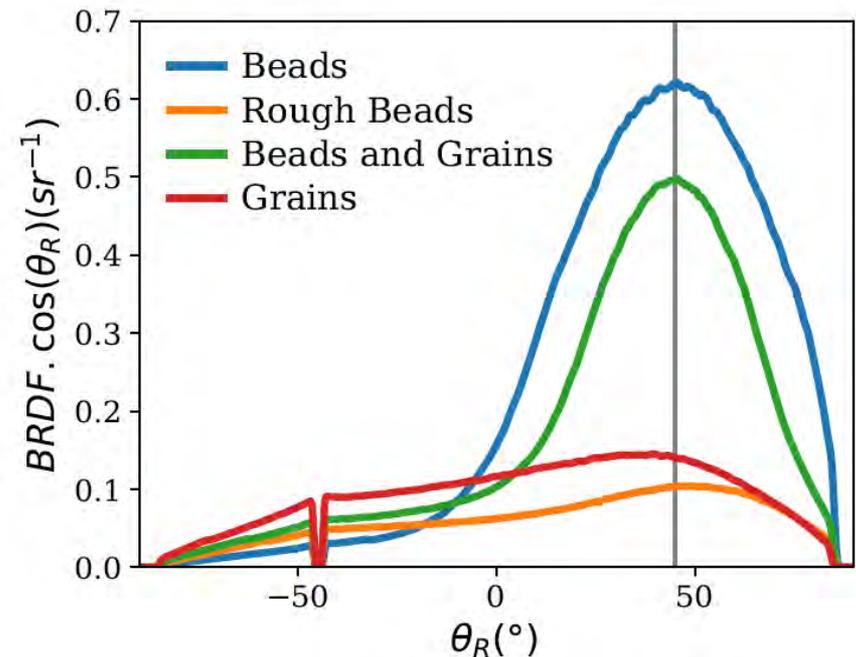
La BRDF de mesure avec un **goniospectrophotomètre**

Exemple de BRDF mesurées

Surface métalliques sablées

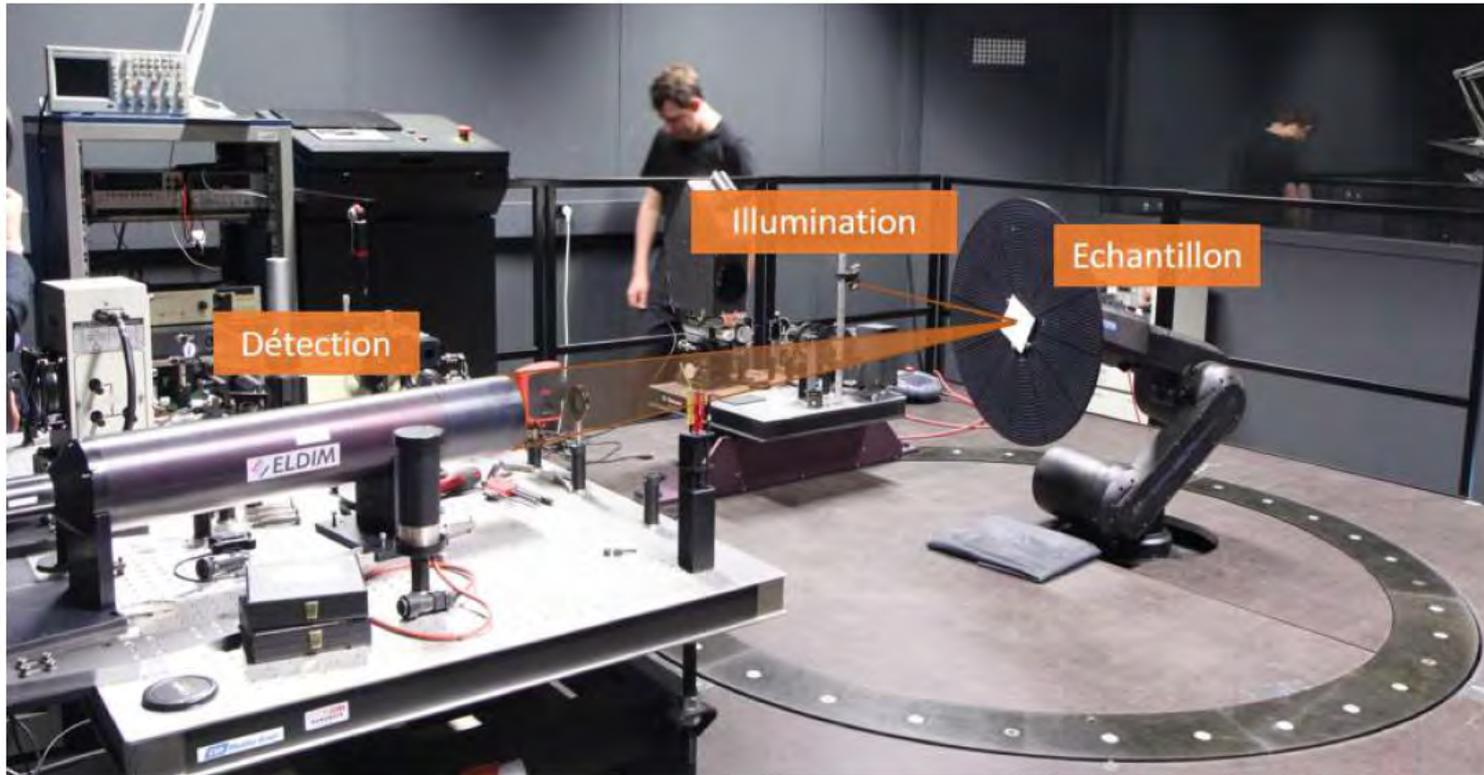


OMS4 (Ansys)



➔ Thèse de Colette Turbil (2018)
Lab. Surfaces du Verre et Interfaces

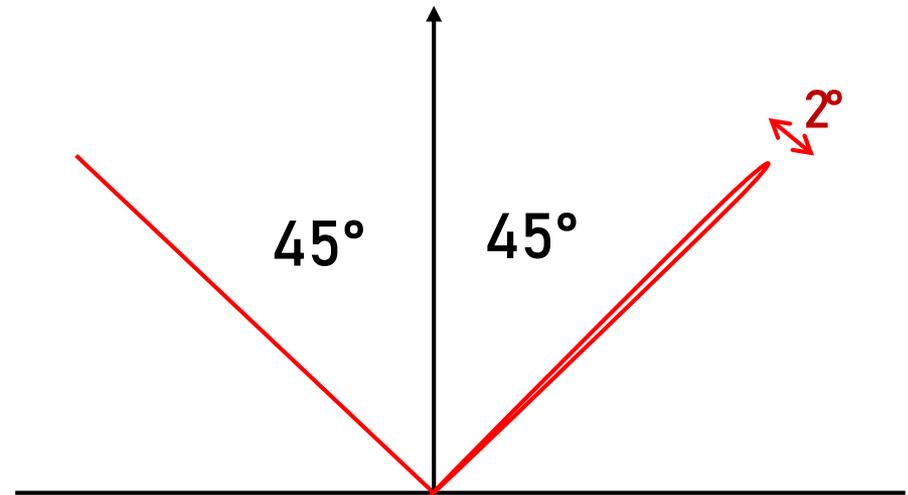
Mesure de BRDF à très haute résolution angulaire



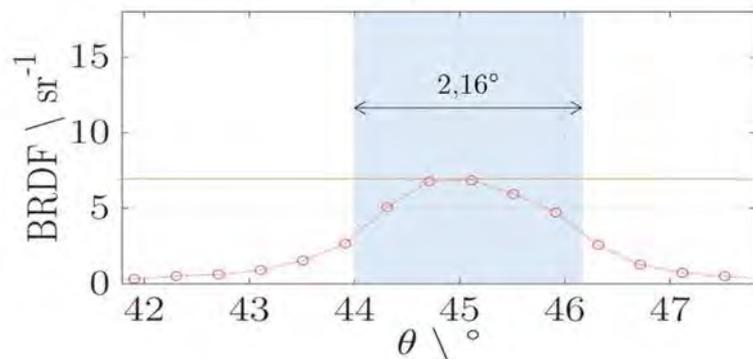
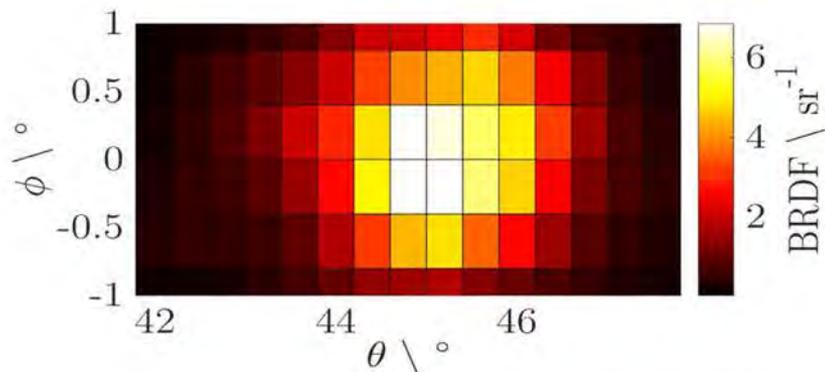
Goniophotomètre ConDOR au LNE-CNAM.

Mesure de BRDF à très haute résolution angulaire

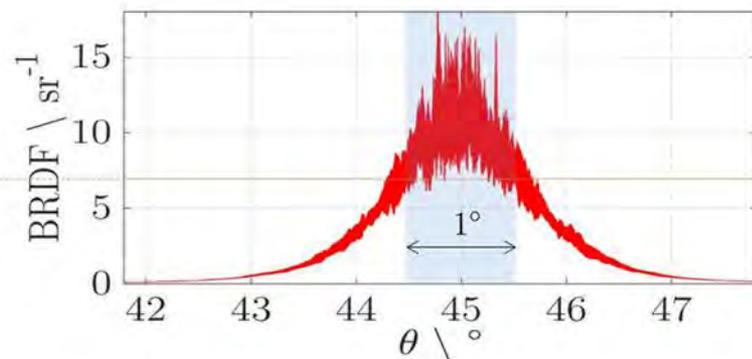
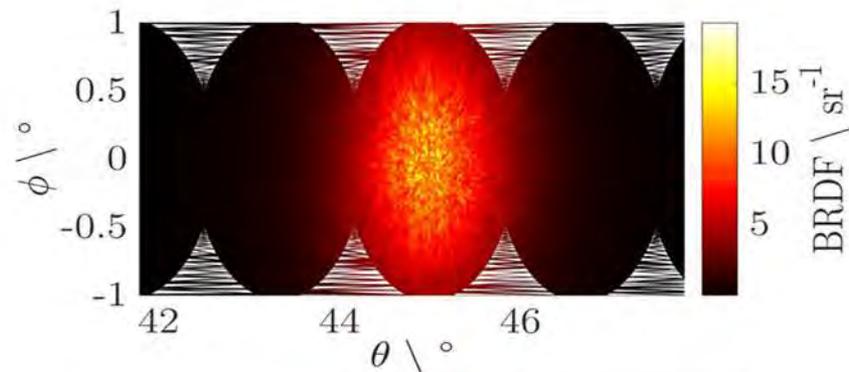
Exemple autour du pic spéculaire d'une surface brillante



EZContrast 80
Résolution : $0,4^\circ$
3C2 - 75 GU



ConDOR
Résolution : $0,0143^\circ$
NCS6 - 75 GU



Signal granulaire: speckle
→ Redéfinir la BRDF...



Thèses de Guillaume GED (2017) et Thomas Labardens (2022)
CNAM



Propriétés photométriques

Même luminance spectrique réfléchié dans toutes les directions
quelle que soit la géométrie d'éclairage (surface « Lambertienne »)

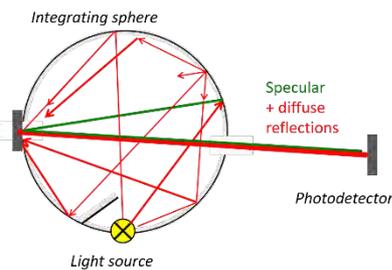
BRDF = fonction de la longueur d'onde seulement



Instrument de mesure

Spectrophotomètre

Mesure un facteur spectral de réflexion
(plusieurs géométries possibles)



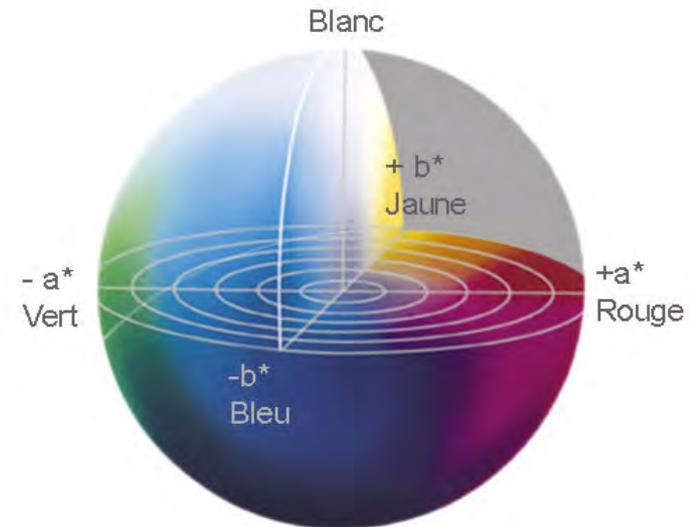


Attribut visuel principal

La couleur

Reflectance spectrale
Illuminant
Surface blanche de référence

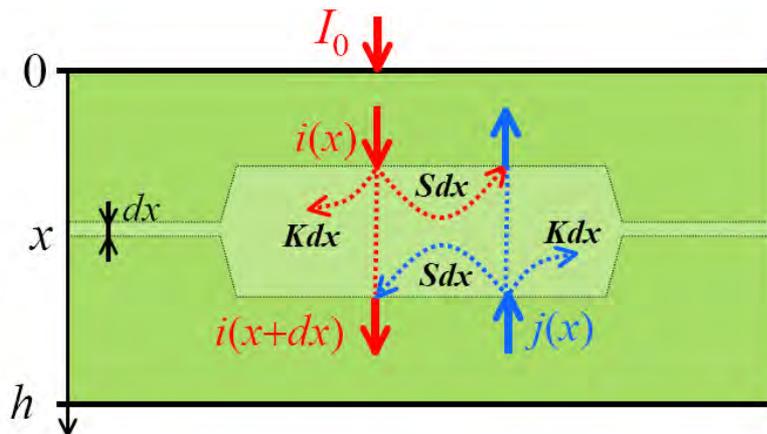
CIE 1964 $L^*a^*b^*$





Modèle prédictif

Théorie à deux flux (Kubelka-Munk)



$$R_h = \frac{\sinh(bSh)}{a \sinh(bSh) + b \cosh(bSh)}$$

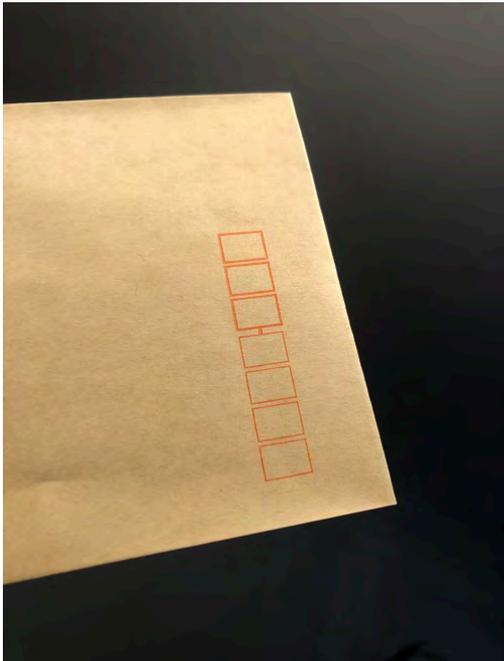
$$T_h = \frac{b}{a \sinh(bSh) + b \cosh(bSh)}$$



Quelques problèmes...

Ces surfaces sont-elles vraiment lambertiennes ?

→ Non, pas à incidence rasante.



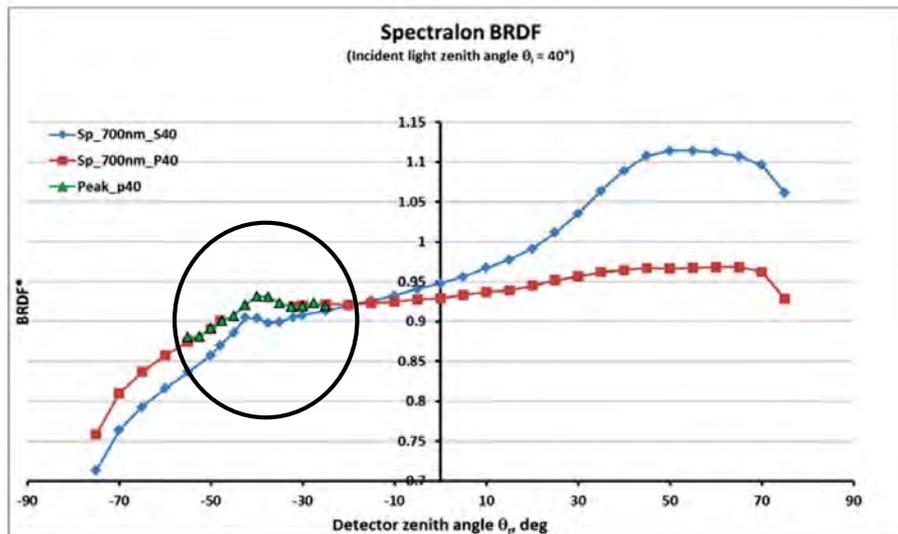


Quelques problèmes...

Ces surfaces sont-elles vraiment lambertiennes ?

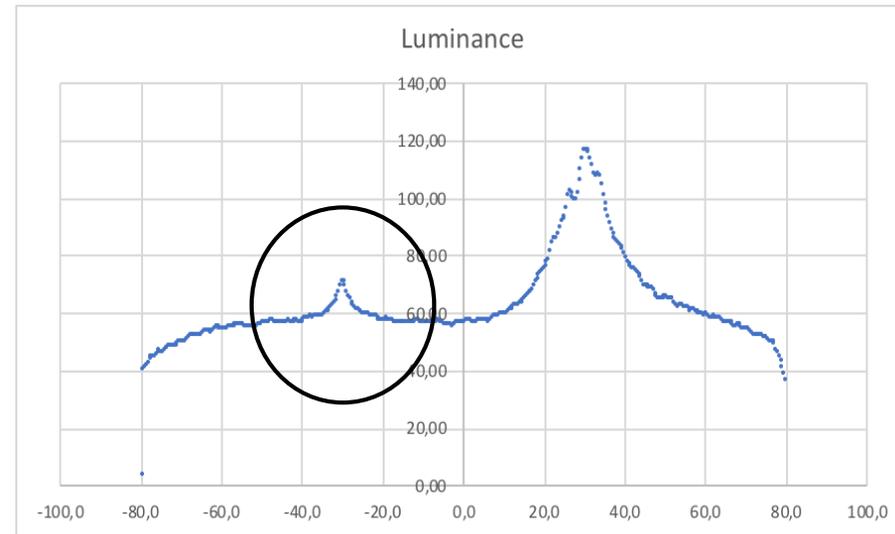
→ Pic de rétro-diffusion cohérente

Spectralon



© M Lévesque et al. Valcarier Research Centre

Papier semi-mat



© G Obein. CNAM

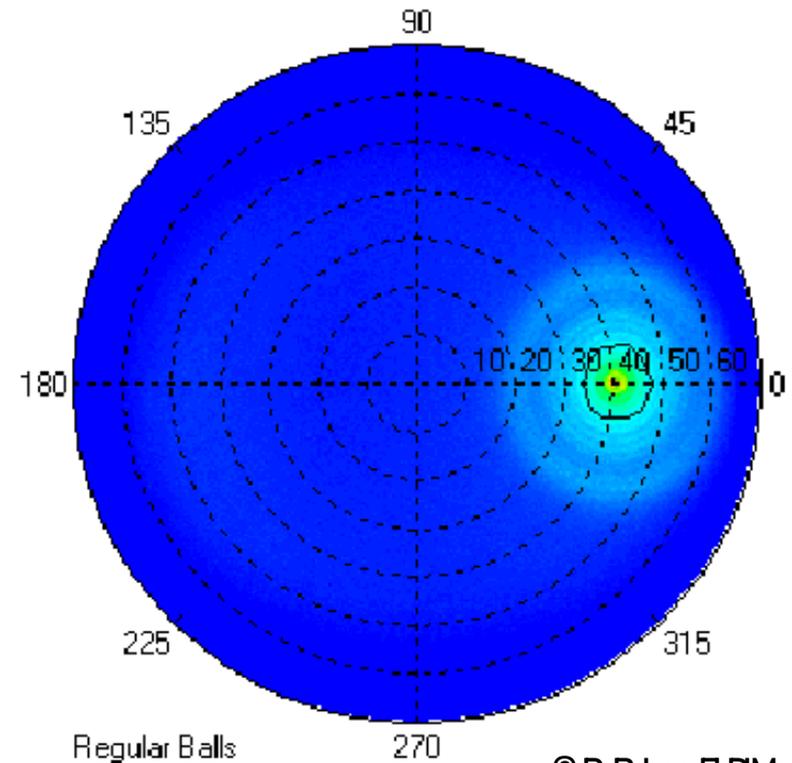


Quelques problèmes...

Ces surfaces sont-elles vraiment lambertiennes ?

→ Pic de rétro-diffusion cohérente

Poudres



Thèse de Morgane Gerardin (2022)
Laboratoire Jean Kuntzmann



Quelques problèmes...

Et lorsque la surface n'est pas homogène ?

Exemple des imprimés en demi-tons



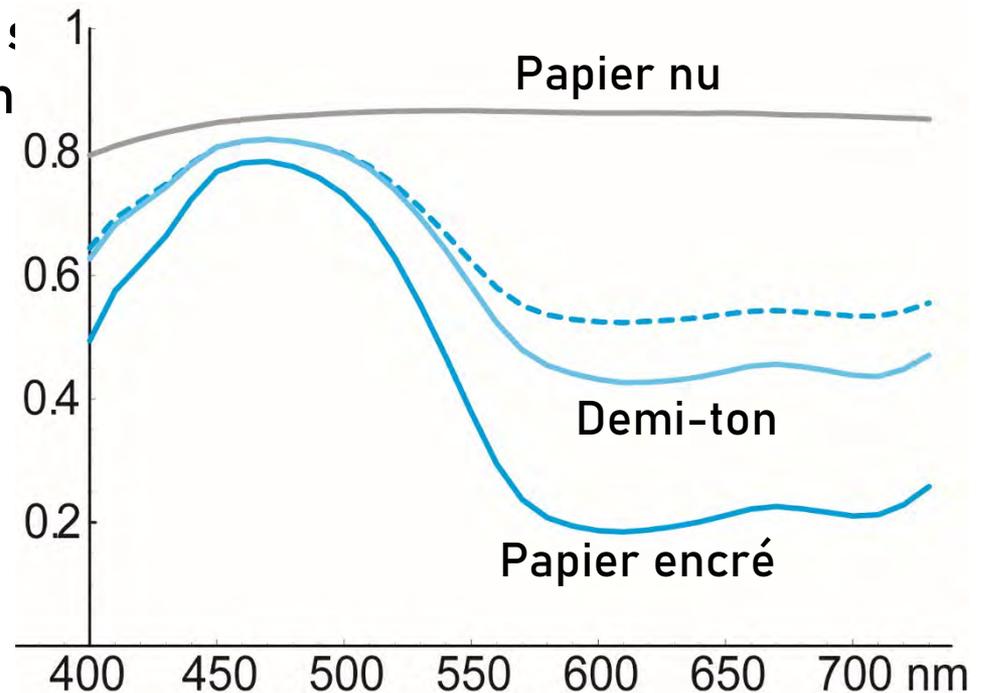
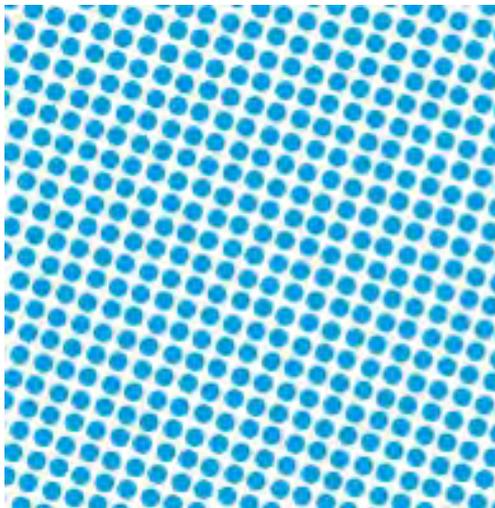


Quelques problèmes...

Et lorsque la surface n'est pas homogène ?

Exemple des imprimés en demi-tons

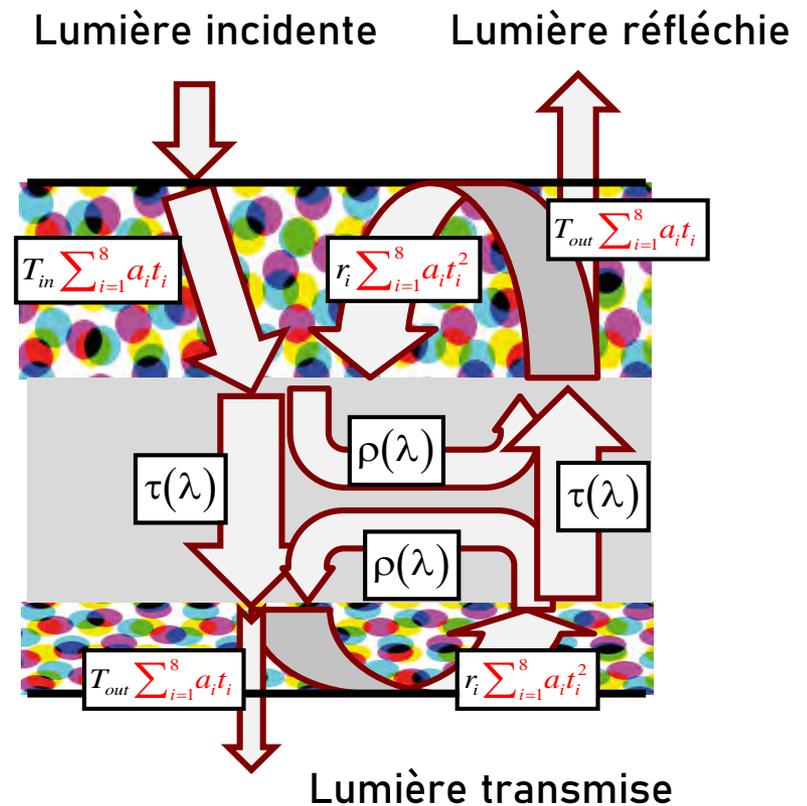
La diffusion lumineuse dans le papier nu et dans le papier encré (engraissement du point)



Modéliser la propagation lumineuse dans des couches non-homogènes

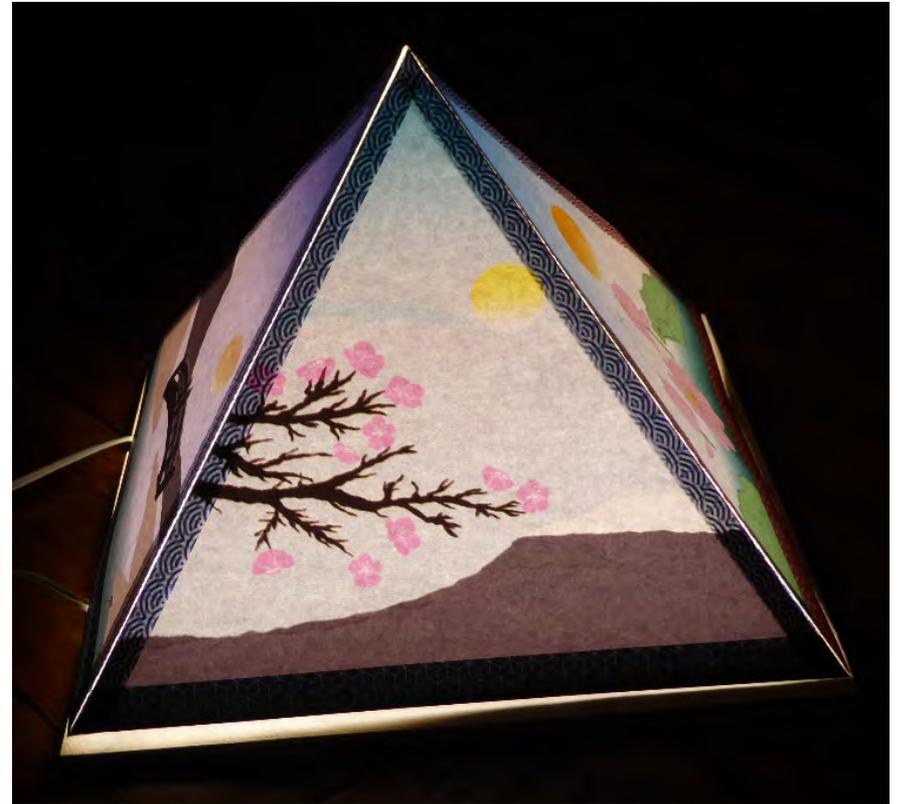
Modèles à transferts de flux

➔ Thèse de Serge Mazauric (2016)
Laboratoire Hubert Curien



Modéliser la propagation lumineuse dans des couches non-homogènes

Par approche inverse, concevoir des imprimés recto-verso



Modéliser la propagation lumineuse dans des couches non-homogènes

Par approche inverse, concevoir des imprimés recto-verso





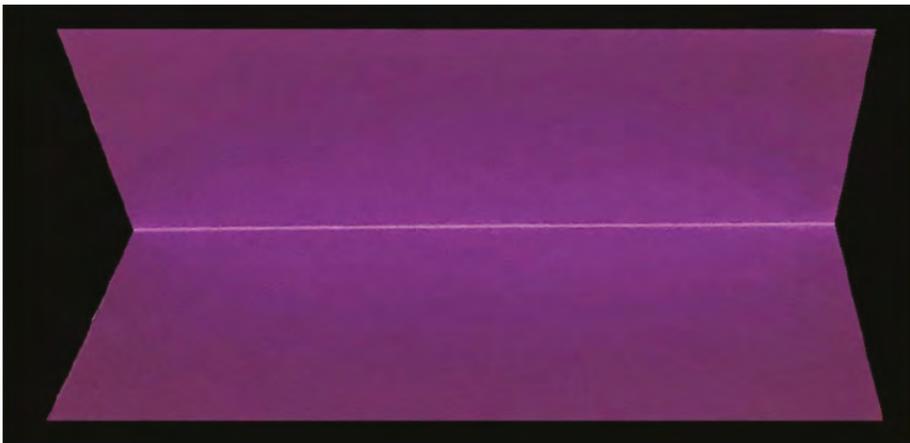


Quelques problèmes...

Et lorsque la surface n'est pas plane ?

Des dégradés de couleur apparaissent : inter-réflexions lumineuses

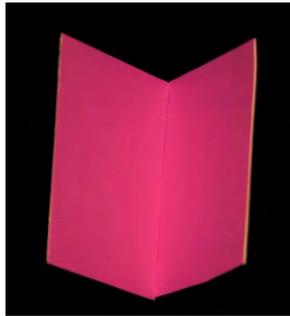
Sous éclairage direct frontal



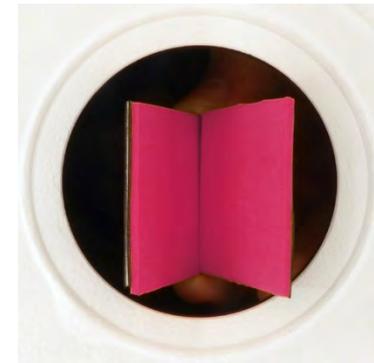
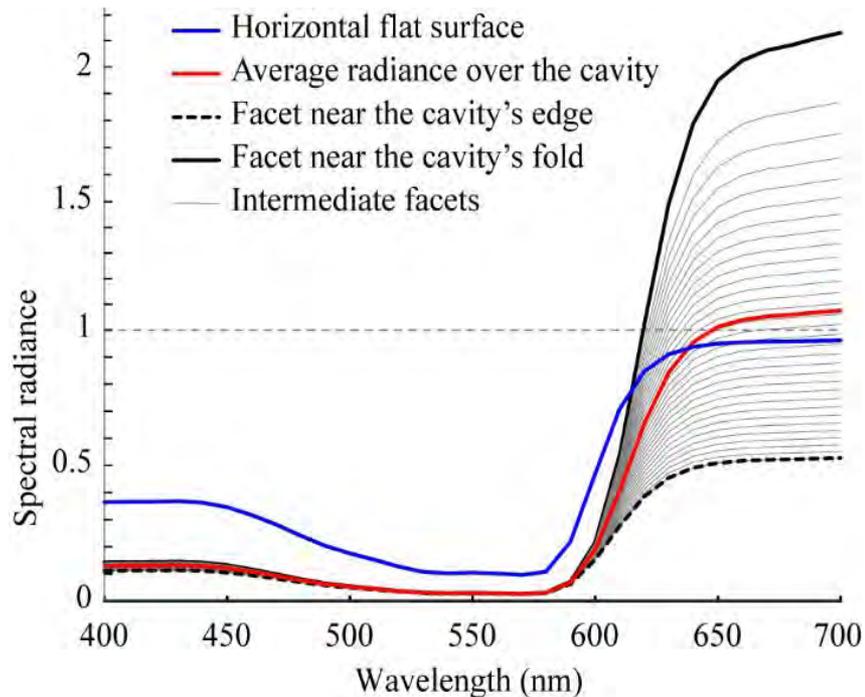
Sous éclairage diffus



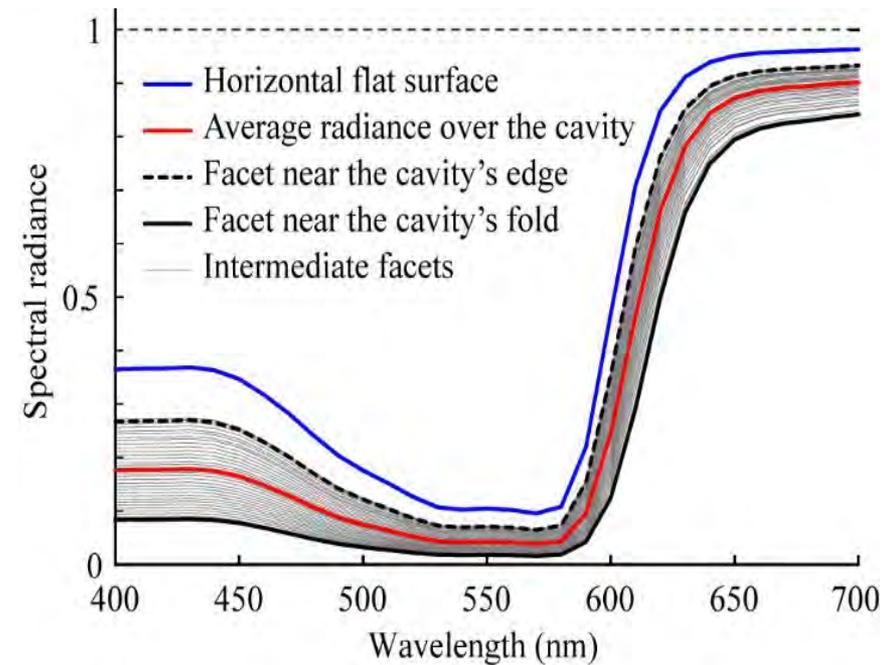
Thèse de Rada Deeb (2018) et Dorian Saint-Pierre (2020)
Laboratoire Hubert Curien



Sous éclairage direct

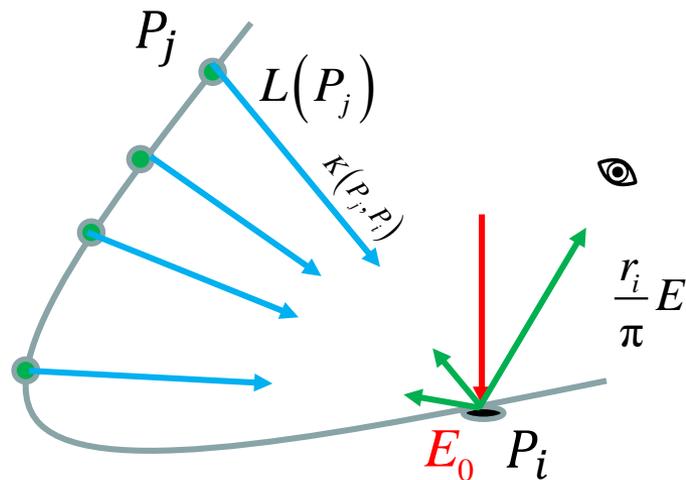


Sous éclairage diffus



L'équation d'inter-réflexions

Elle décrit la luminance reçue en chaque point de la surface

 E_0

Koenderink et al. *J. Opt. Soc. Am* (1983).

Mise sous forme discrète :

$$\mathbf{L} = \frac{r_i}{\pi} \left(\mathbf{I} - \frac{r_i}{\pi} \mathbf{K} \right)^{-1} \mathbf{E}_0$$

Luminance captée

$$\mathbf{L} = \frac{1}{\pi} \left(\mathbf{I} - \frac{1}{\pi} \mathbf{R} \mathbf{K} \right)^{-1} \mathbf{R} \mathbf{E}_0$$

Réflectance de la surface

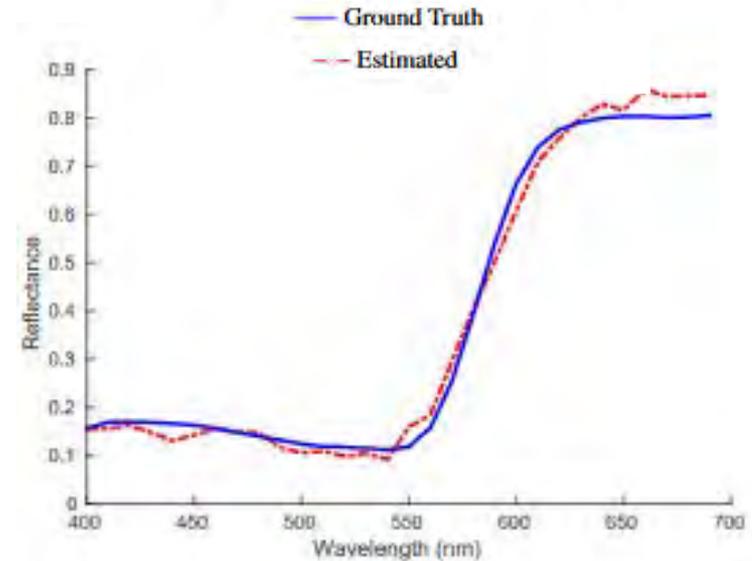
Forme de l'objet

Eclairement

Photo RGB



Surface Spectral Reflectance

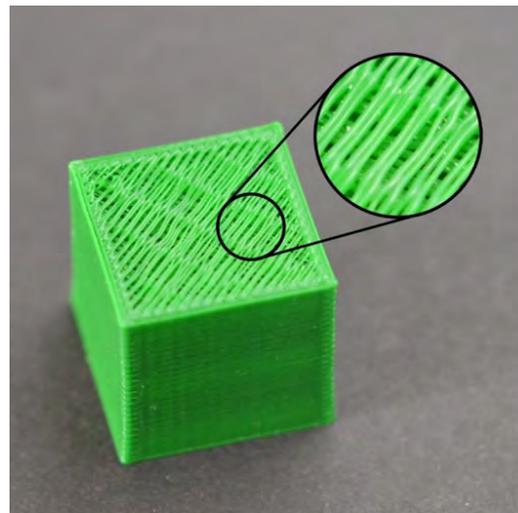


Elles sont partout
à toutes les échelles

Textile



Impression 3D



Surfaces rugueuses



Un exemple : la peau du visage



Thèse de Lou Gevaux (2019)
Laboratoire Hubert Curien

Acquisition par
camera hyperspectrale



Color image (D65)
before calibration



White surface

Calibration →



Hypercube: data scroll from 410 to 700 nm

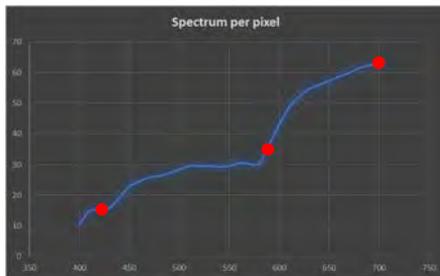


Color image (D65) after irradiance
calibration

Un exemple : la peau du visage



Thèse de Lou Gevaux (2019)
Laboratoire Hubert Curien



$\lambda=420$ nm



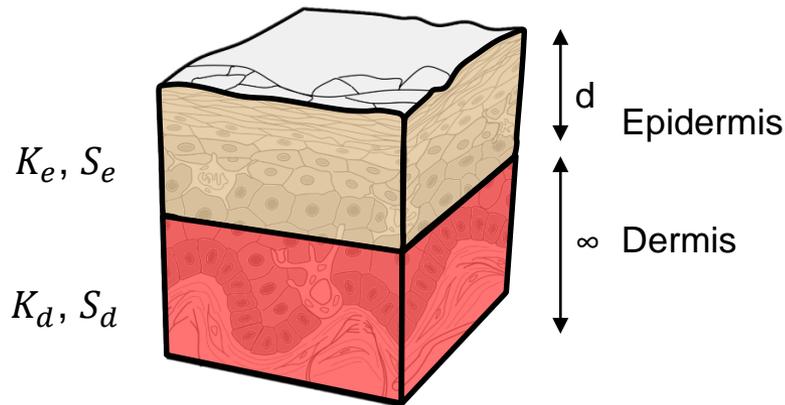
$\lambda=590$ nm



$\lambda=700$ nm

Un exemple : la peau du visage

Modèle de propagation lumineuse dans la peau



➔ Thèse de Lou Gevaux (2019)
Laboratoire Hubert Curien

① Kubelka formula:

$$R_{skin} = \rho_{epi} + \frac{\tau_{epi}^2 \rho_{derm}}{1 - \rho_{epi} \rho_{derm}}$$

② Kubelka-Munk theory:

$$\rho_{epi} = \frac{\sinh(bS_e d)}{b \cosh(bS_e d) + a \sinh(bS_e d)}$$
$$\tau_{epi} = \frac{\sinh(bS_e d)}{b \cosh(bS_e d) + a \sinh(bS_e d)}$$
$$a = (K_e + S_e)/S_e ; b = \sqrt{a^2 - 1}$$

$$\rho_{derm} = \frac{K_d + S_d - \sqrt{K_d(K_d + 2S_d)}}{S_d}$$

③ Beer-Lambert-Bouguer laws:

$$K_e = C_{mel} K_{mel} + (1 - C_{mel}) K_{baseline}$$

$$K_d = C_{Hb} K_{Hb} + C_{HbO2} K_{HbO2} + C_{baseline} K_{baseline} + \dots$$

Un exemple : la peau du visage

➔ Thèse de Lou Gevaux (2019)
Laboratoire Hubert Curien

Approche inverse :
Extraire des concentrations de chromophores à partir des spectres mesurés en chaque pixel

① Kubelka formula:

$$R_{skin} = \rho_{epi} + \frac{\tau_{epi}^2 \rho_{derm}}{1 - \rho_{epi} \rho_{derm}}$$

② Kubelka-Munk theory:

$$\rho_{epi} = \frac{\sinh(bS_e d)}{b \cosh(bS_e d) + a \sinh(bS_e d)}$$
$$\tau_{epi} = \frac{b}{b \cosh(bS_e d) + a \sinh(bS_e d)}$$
$$a = (K_e + S_e)/S_e ; b = \sqrt{a^2 - 1}$$
$$\rho_{derm} = \frac{K_d + S_d - \sqrt{K_d(K_d + 2S_d)}}{S_d}$$

③ Beer-Lambert-Bouguer laws:

$$K_e = C_{mel} K_{mel} + (1 - C_{mel}) K_{baseline}$$
$$K_d = C_{Hb} K_{Hb} + C_{HbO2} K_{HbO2} + C_{baseline} K_{baseline} + \dots$$

Un exemple : la peau du visage



Thèse de Lou Gevaux (2019)
Laboratoire Hubert Curien



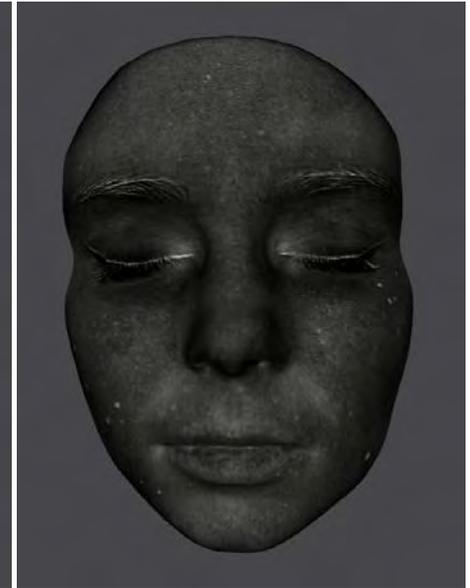
Couleur



Taux d'oxygénation



Concentration sanguine



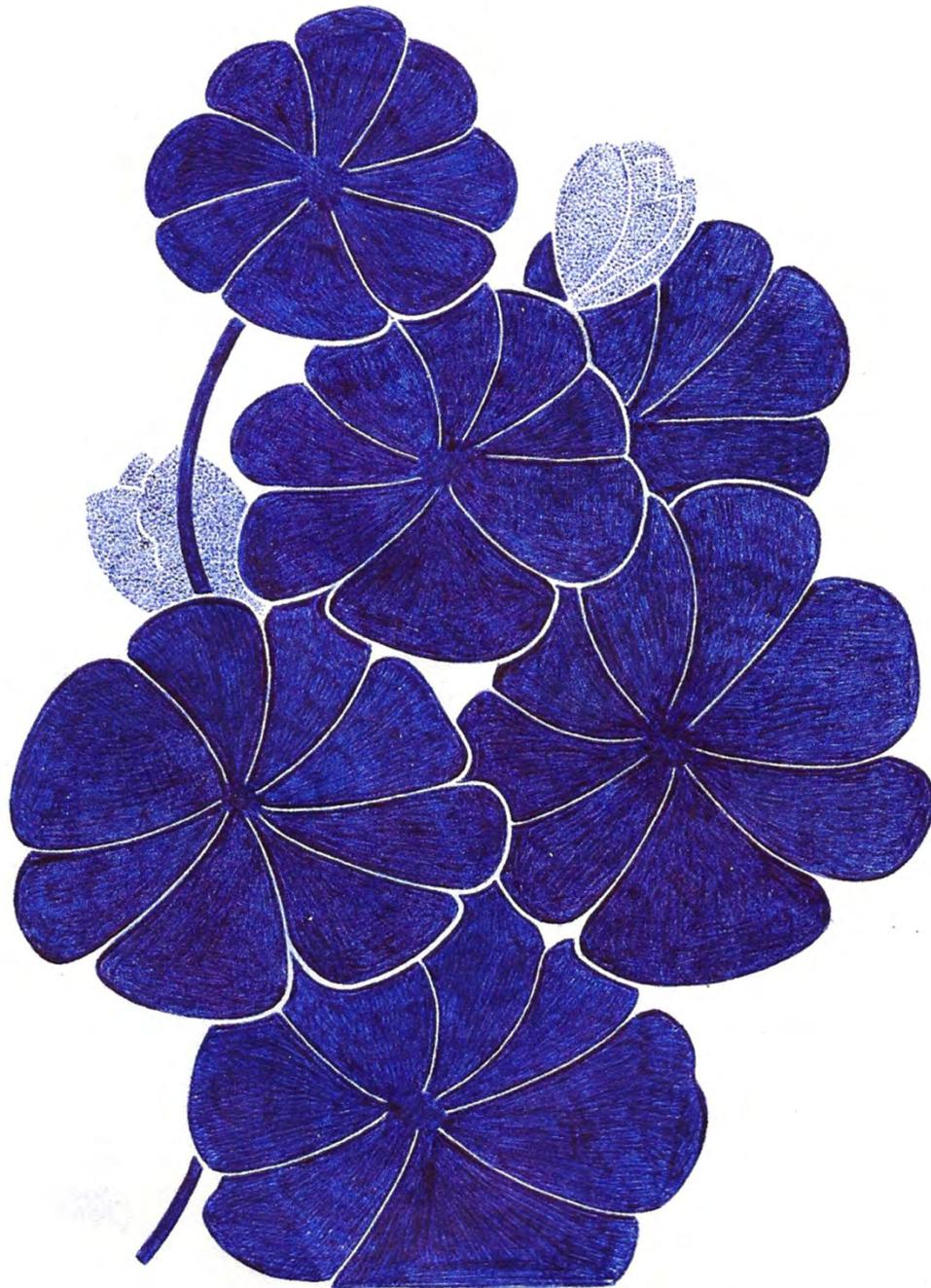
Mélanine

L'apparence des matériaux : une problématique scientifique émergente.

La lumière et les méthodes pour la mesurer sont essentielles

Prédire l'apparence par les modèles optiques: progrès spectaculaires de l'image de synthèse

Caractériser les objets réels : il reste encore beaucoup à faire.



La photométrie aujourd'hui



Merci

mathieu.hebert@univ-st-etienne.fr