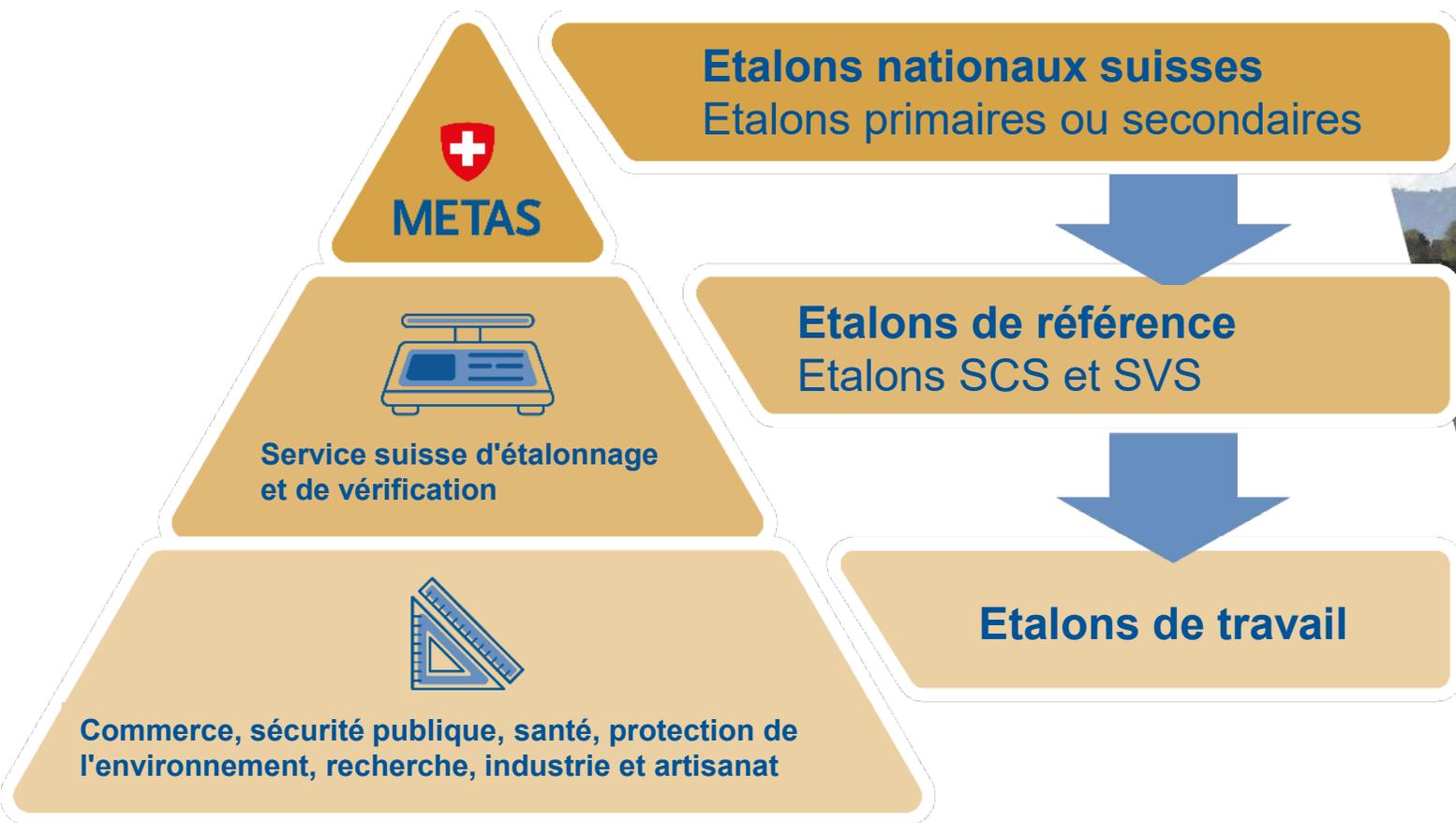


Caractérisation des aspects d'apparences de surface

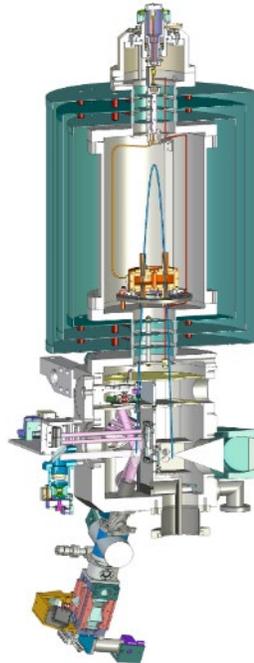
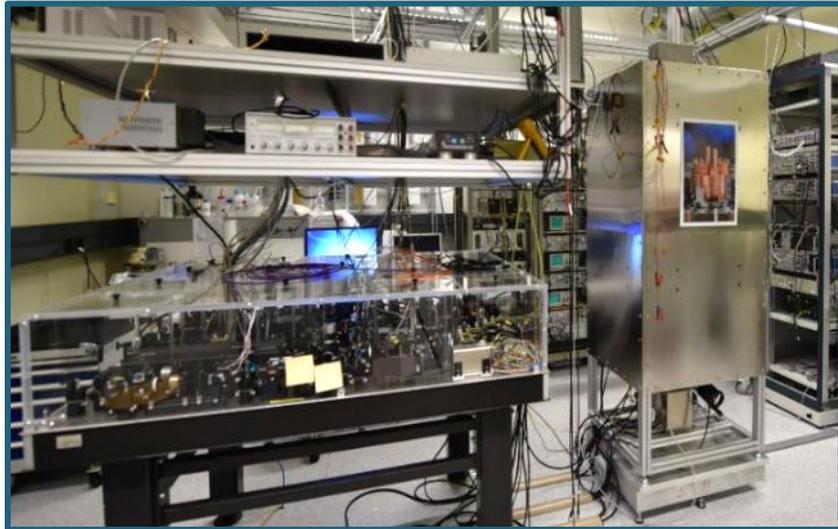
Dr. Peter Blattner (Chief Metrology Officer), Dr. Nina Basic (Scientific Expert)

13.09.2023

METAS: Votre Référence.



Votre référence de Temps et Fréquences



Rendez-vous Bundesplatz, Bern , 2014

Swiss Continuous Caesium (Cs) Fountain Clock *FoCS-2*

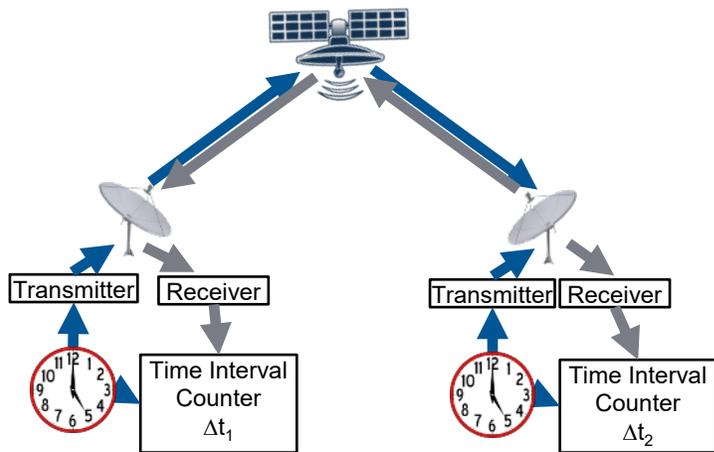
Unique horloge à fontaine continue à Cs (Swiss Made)

Incertitude relative sur la fréquence : $2 * 10^{-15}$ (déviation de 1 seconde tous les 16 millions d'années)

Contribue régulièrement à l'étalonnage du Temps Atomique International (TAI)

Distribution de temps et fréquences

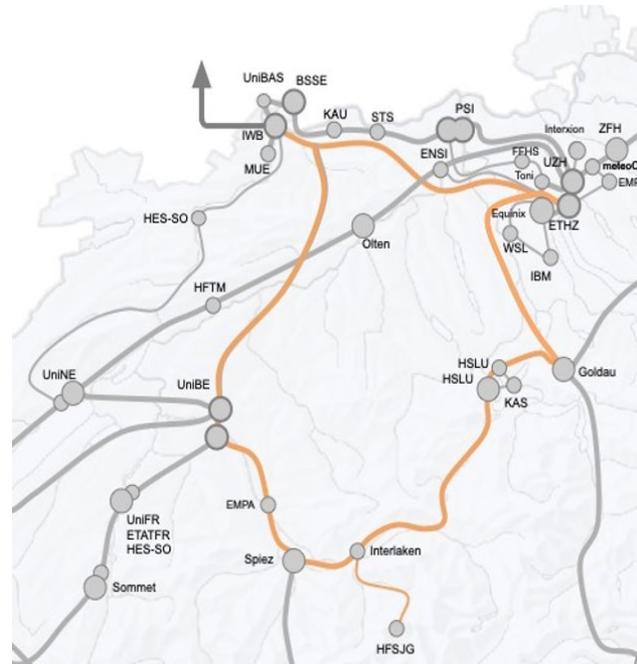
Par satellite: Two Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT)



METAS

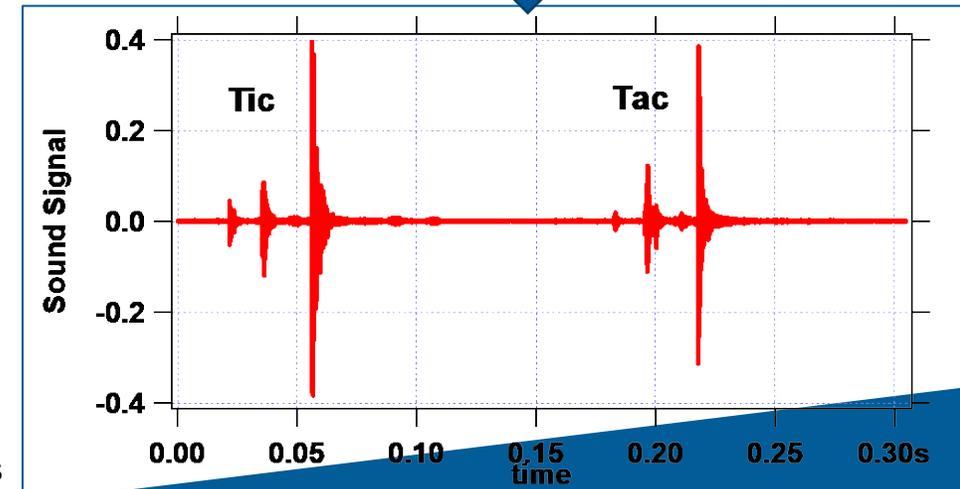
Par internet: ntp11.metas.ch

Par fibre optique:



METAS Project TDIS: Diffusion d'une échelle de temps de haute précision: nanosecondes (sur 500 km) avec une synchronicité < 100 ps

- Au laboratoire: Étalonnage de simulateurs d'horloges acoustiques

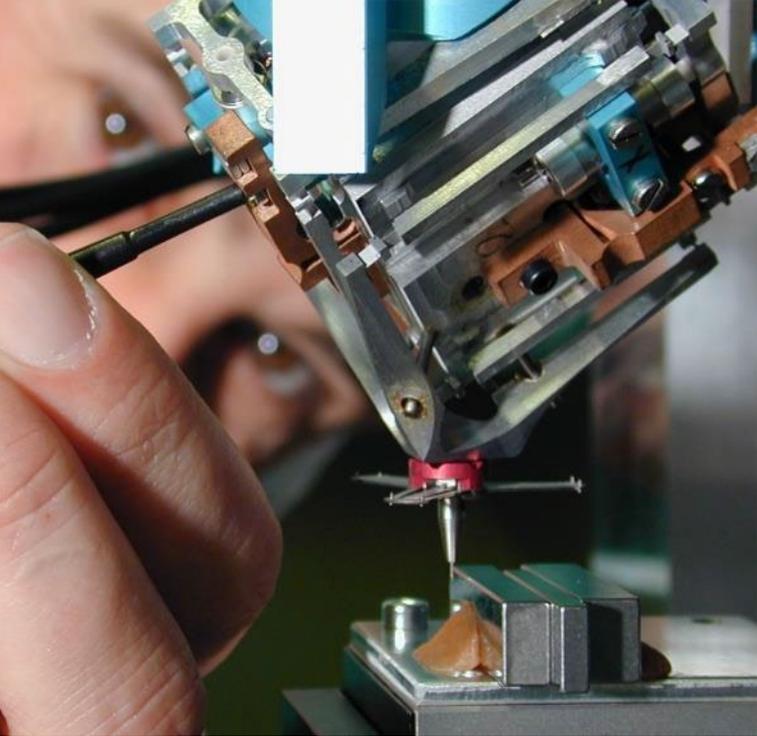


Métrologie dimensionnelle



μ CMM

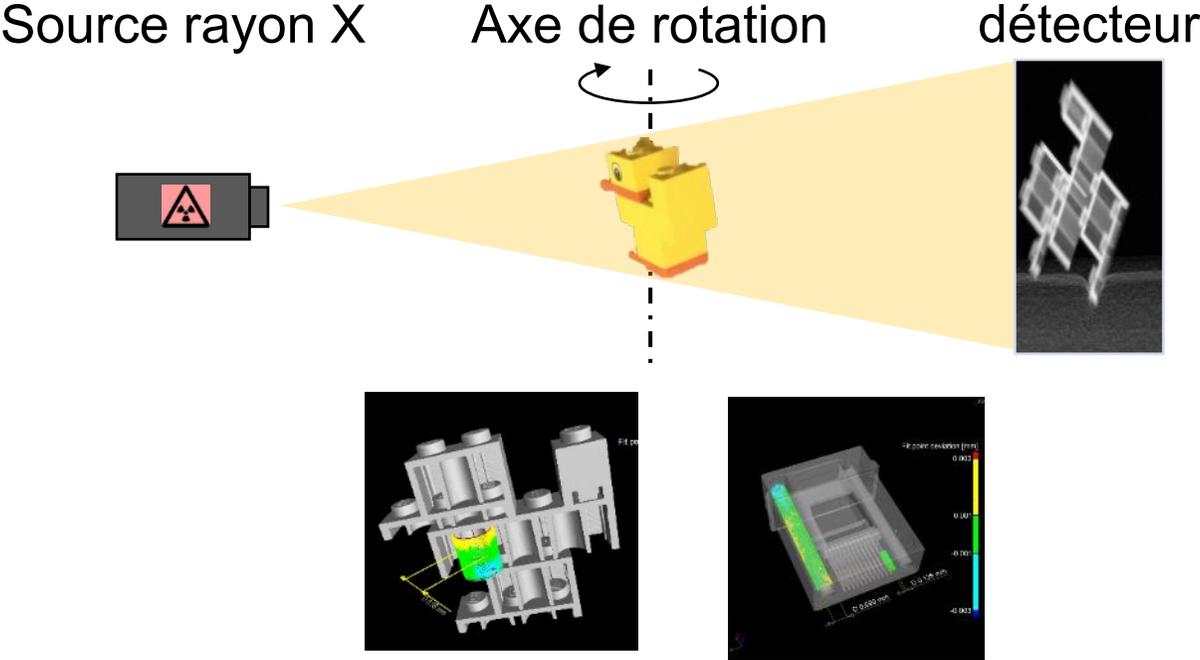
machines à mesurer tridimensionnelles



Diamètre du palpeur: 0.125mm
EMT ISO 10360-2: <80 nm (90 mm x 90 mm x 38 mm)

μ CT

tomodensitométrie



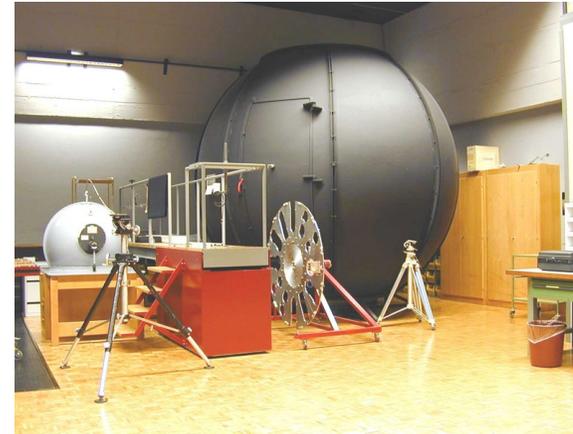
->prestations METAS

Laboratoire Optique



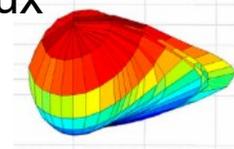
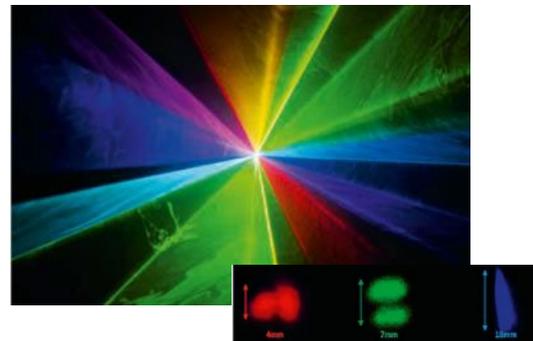
Radiométrie
Laser, UV...

Photométrie
Lampes, Luminaires



Evaluation des dangers
liés aux sources
optiques (Laser, UV,
LED,)

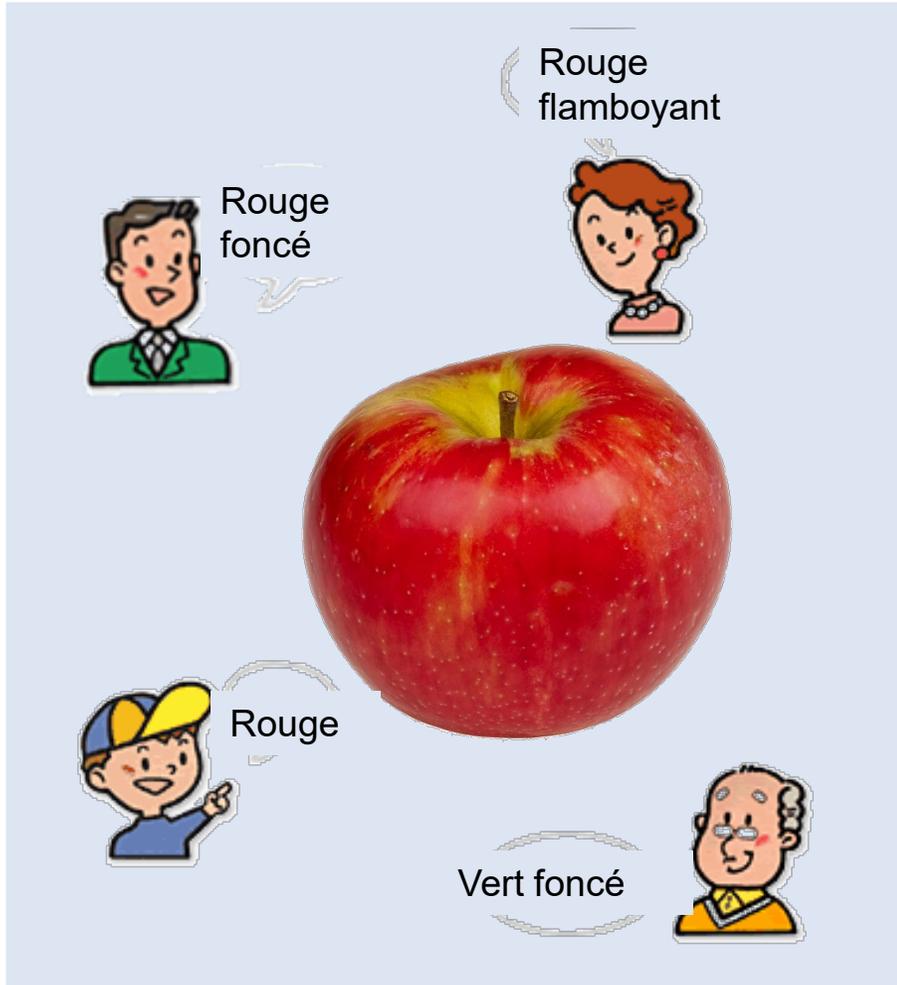
Apparence des matériaux



Evaluation et mesurages photométriques

->prestations METAS

Quelle est la couleur de cette pomme ?

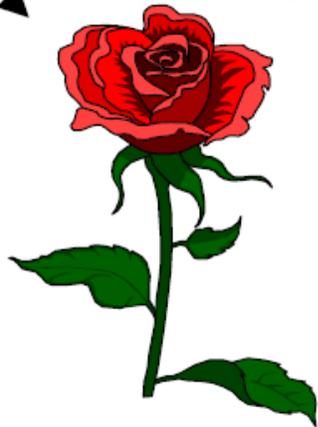


Métrologie

- > mettre l'apparence «en chiffre»
- > métriques
(définitions de grandeurs)
- > système de mesure
- > étalons
- > évaluation d'incertitude de mesure

Apparence

source

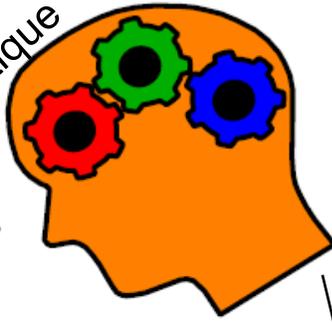


objet

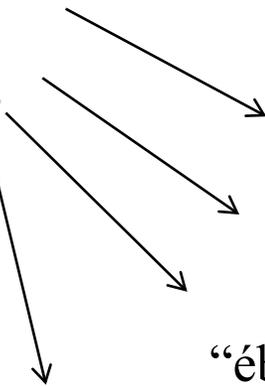
rayonnement optique



observateur

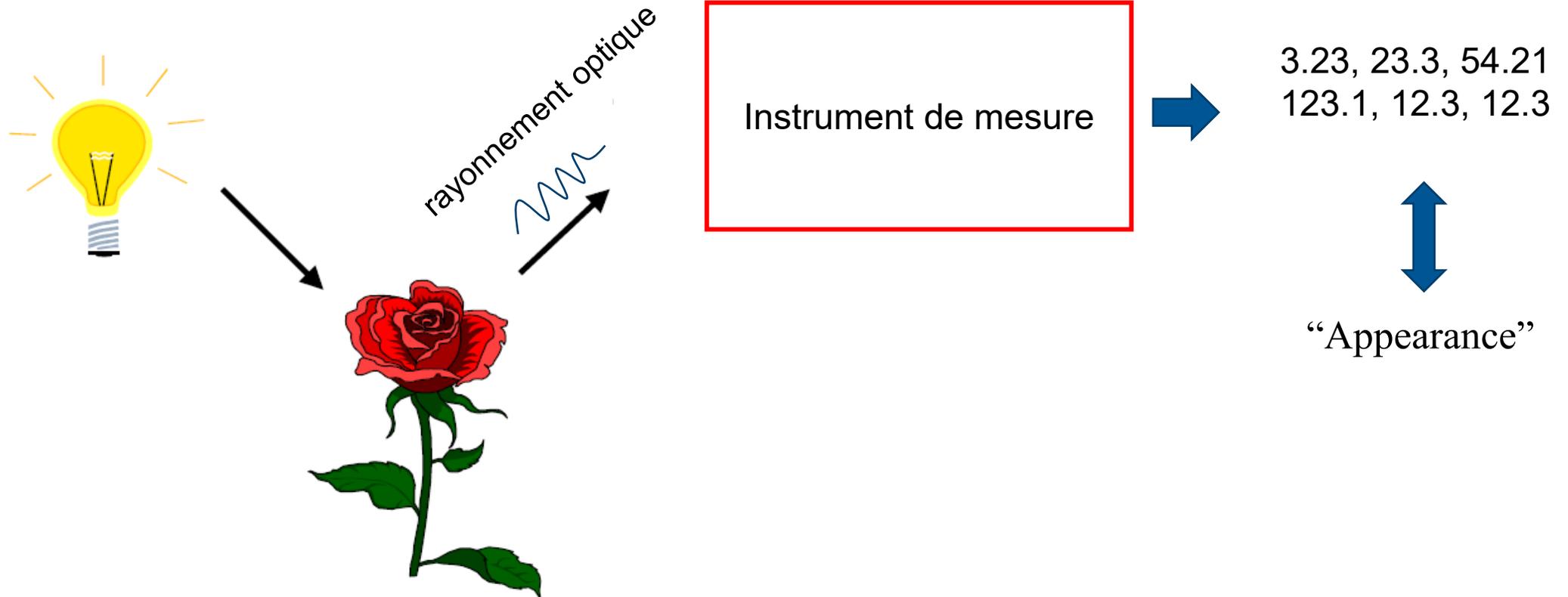


photorécepteurs, neurotransmetteurs ..

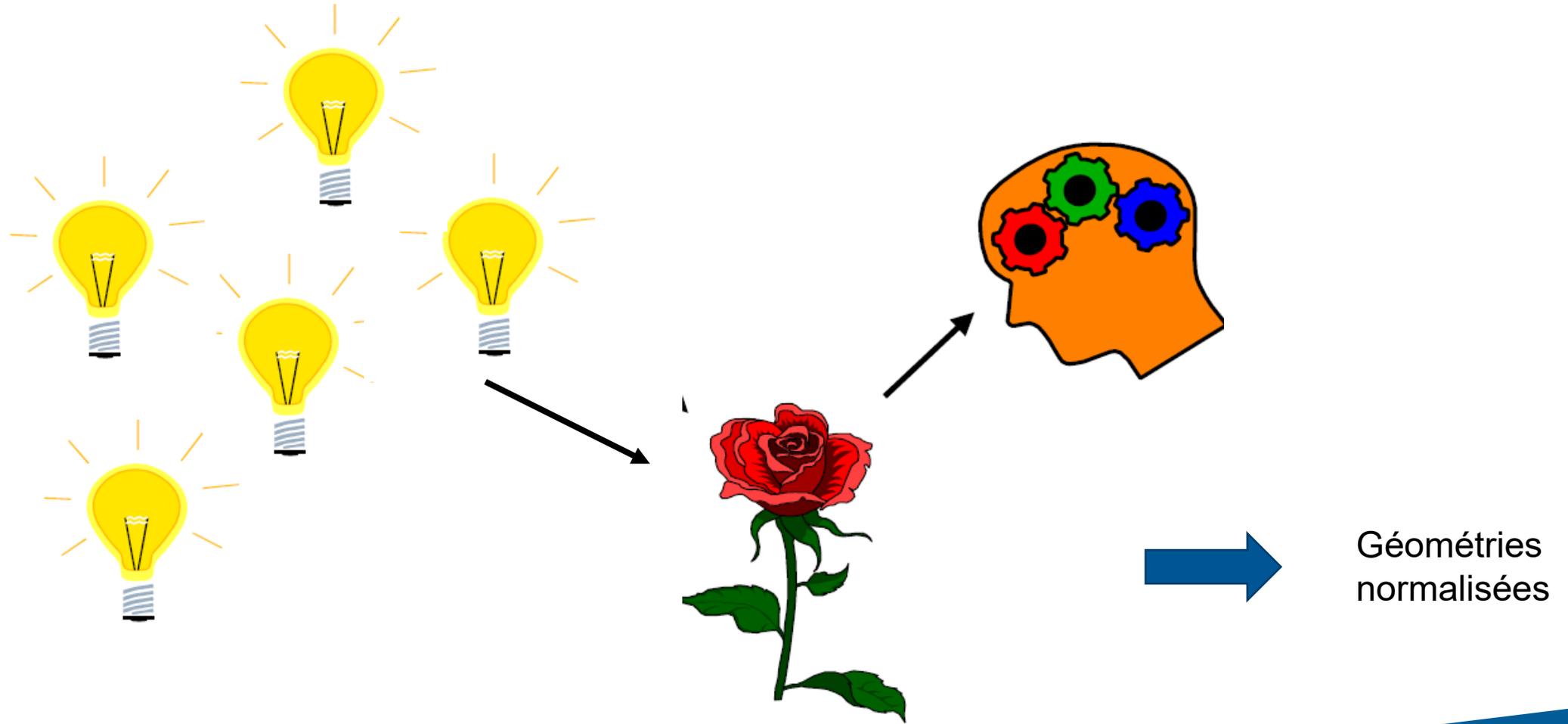


“vision”
“couleurs”...
“éblouissement”
effets non-visuels

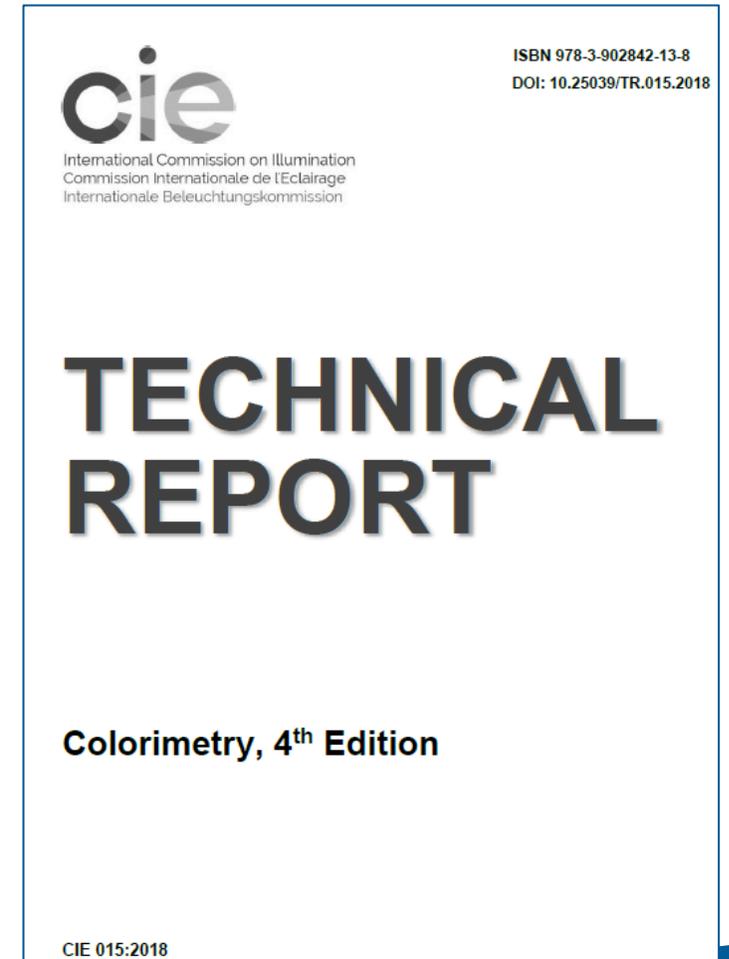
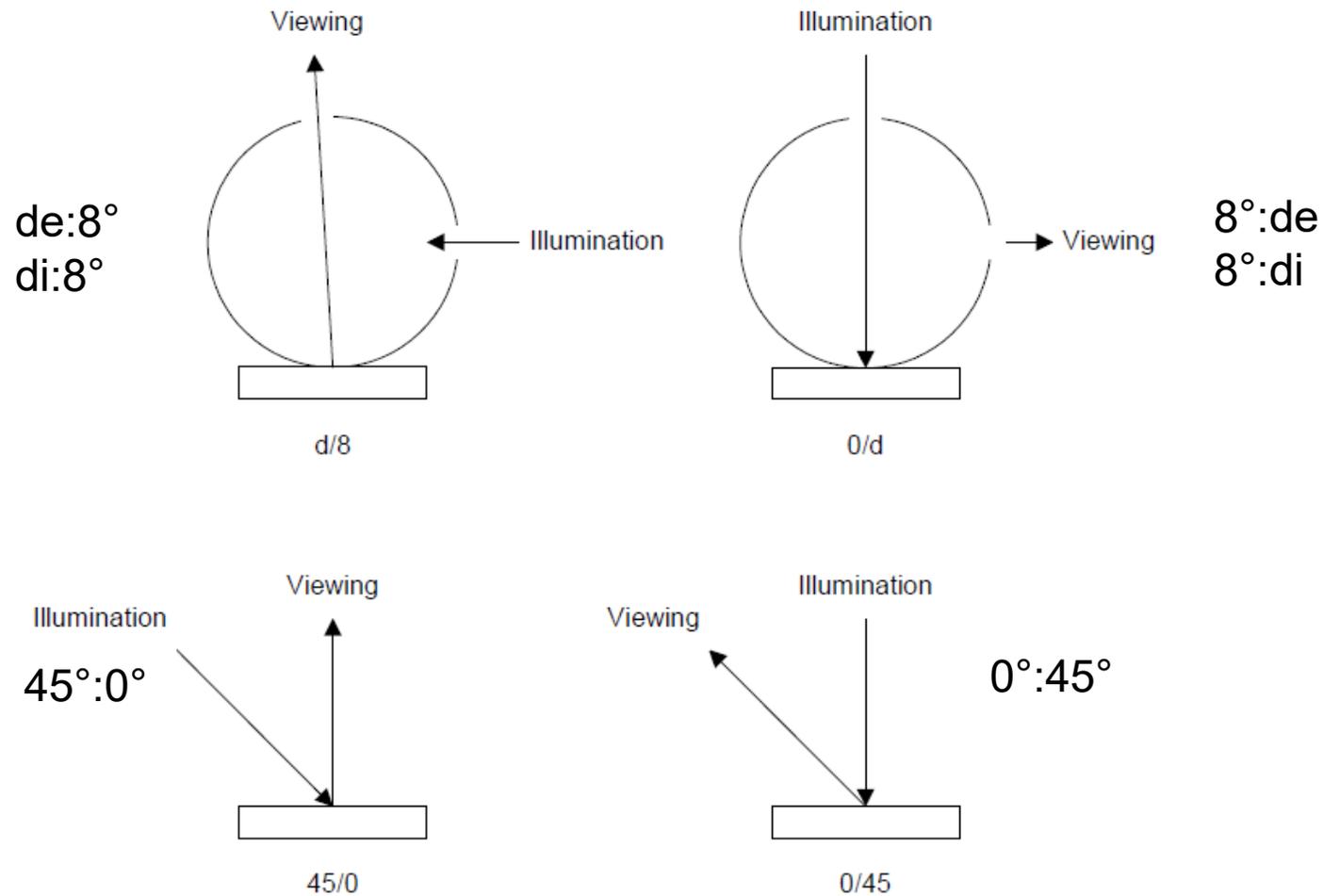
Idée : transformer l'apparence en un ensemble de nombres



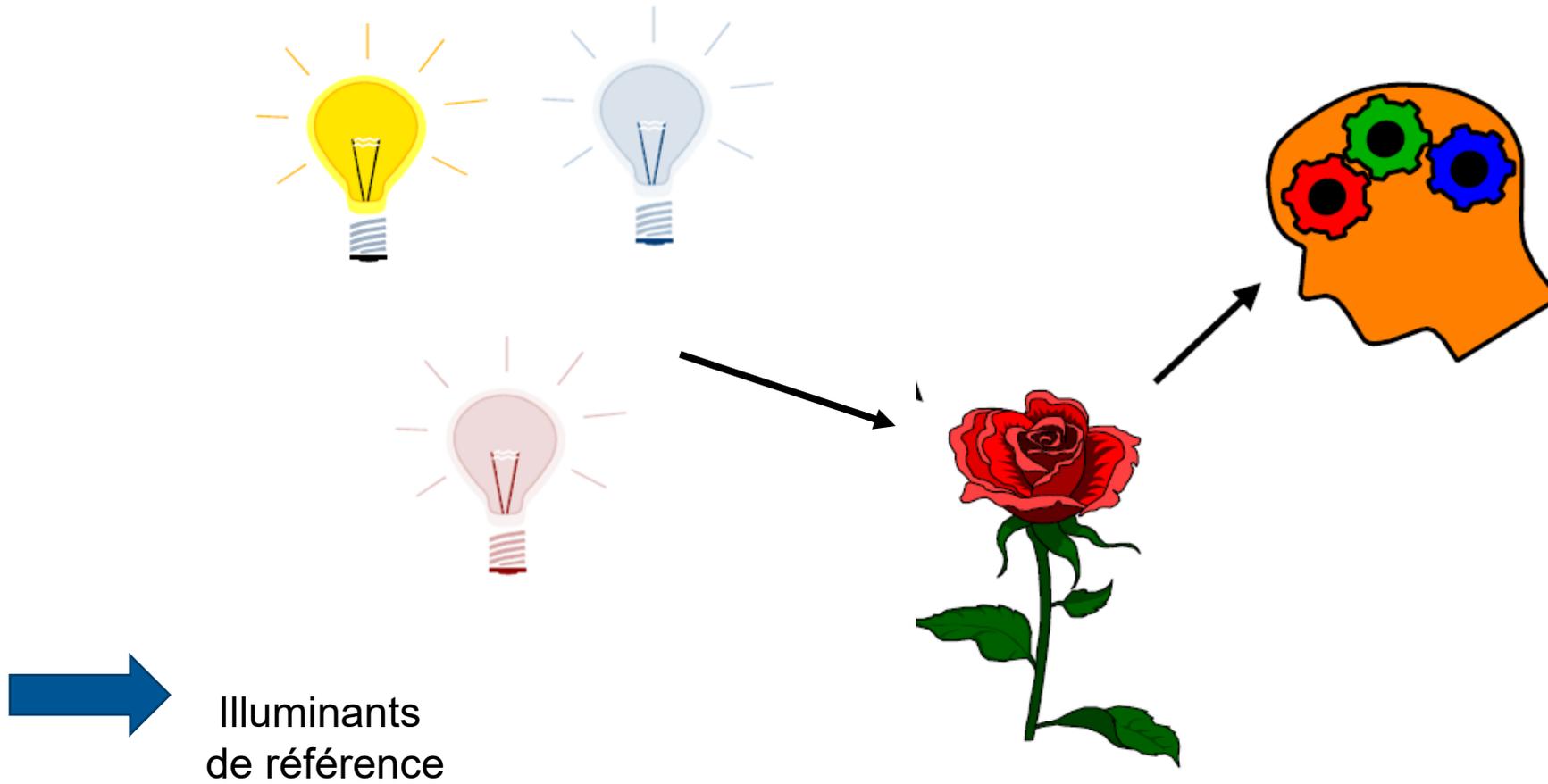
Effets spatiaux de la source



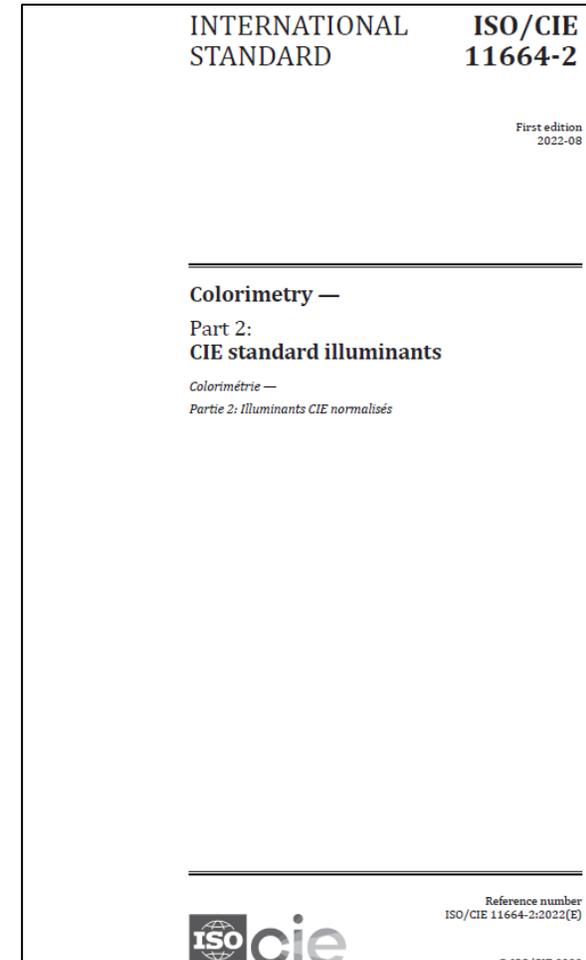
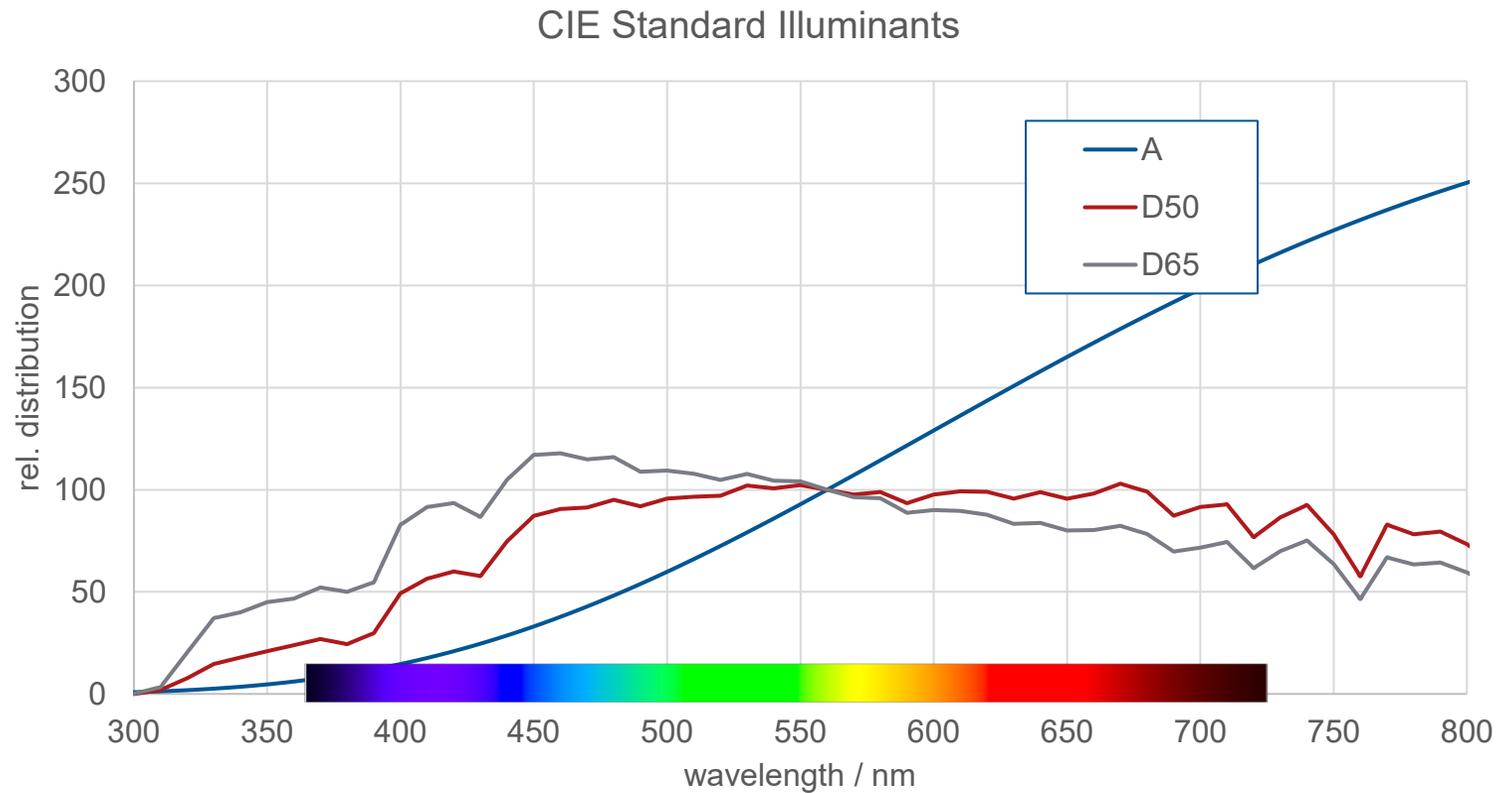
Géométries normalisées : CIE 015:2018



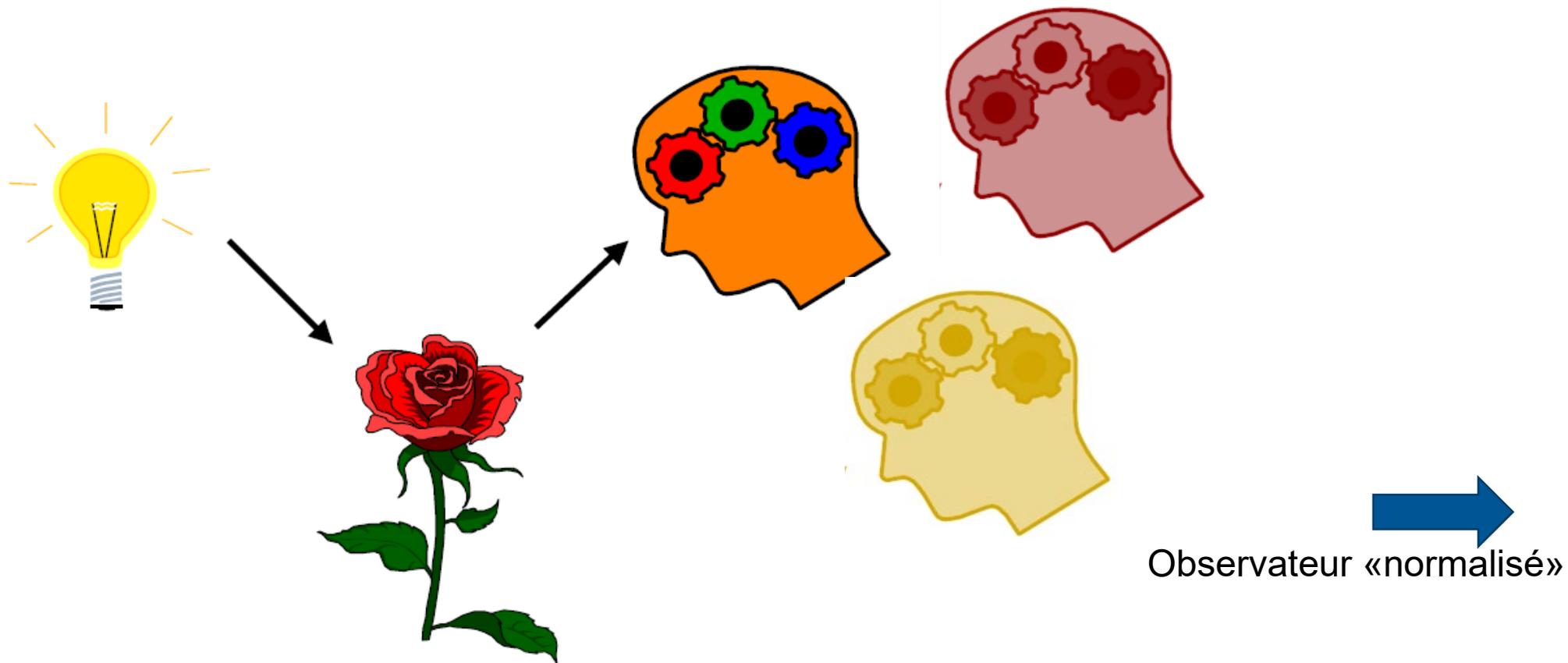
effets spectraux de la source



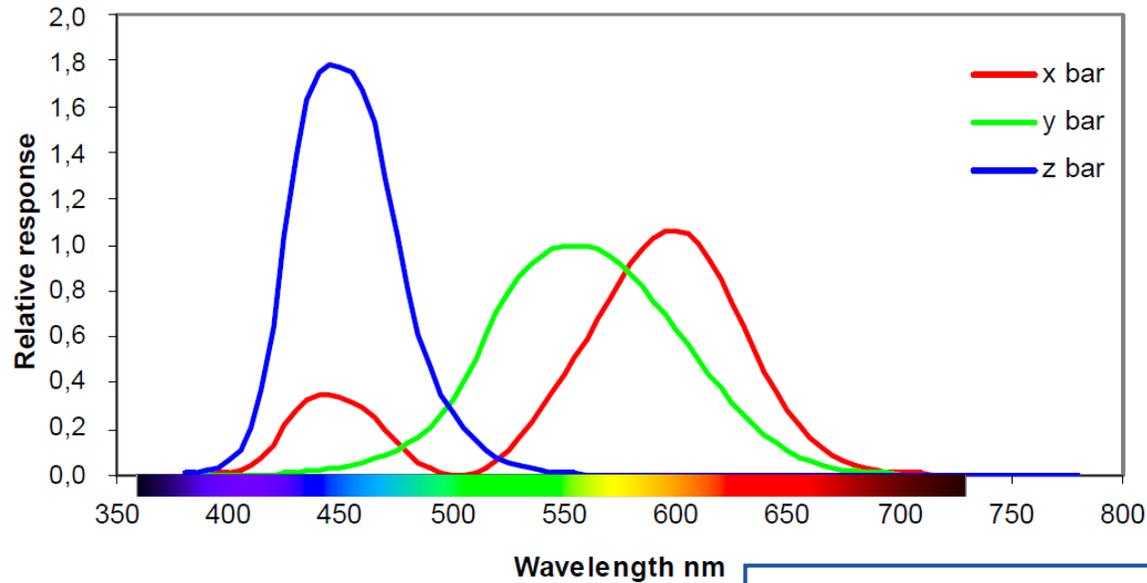
Illuminants de référence: ISO/CIE 11664-2



observateurs



Observateur «normalisé»: ISO/CIE 11664-1, ISO/CIE 11664-4

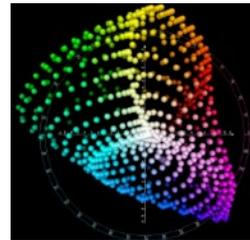


$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

CIE Colour Coordinates:

L^*, a^*, b^*

3D space



INTERNATIONAL STANDARD
ISO/CIE 11664-1

First edition
2019-06

Colorimetry —
Part 1:
CIE standard colorimetric observers

Colorimétrie —
Partie 1: Observateurs CIE de référence pour la colorimétrie

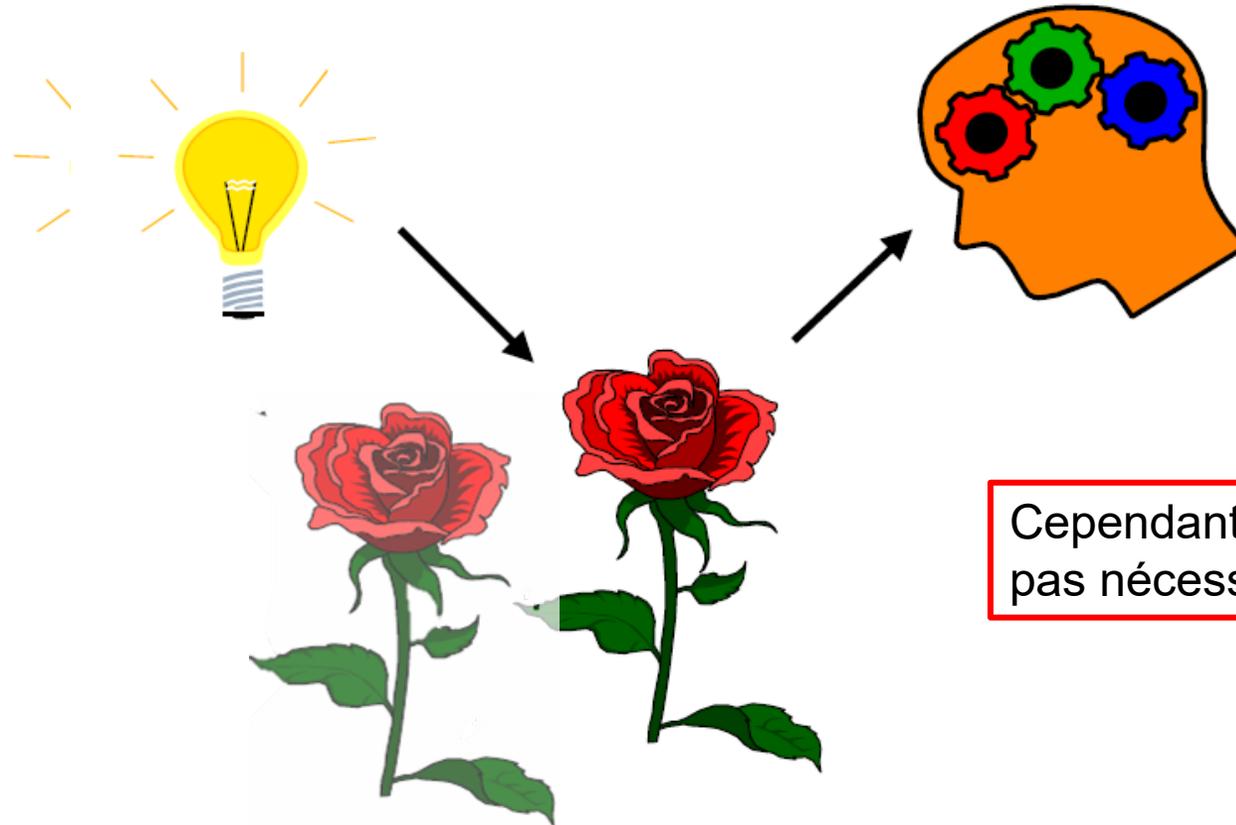


Reference number
ISO/CIE 11664-1:2019(E)

© ISO/CIE 2019

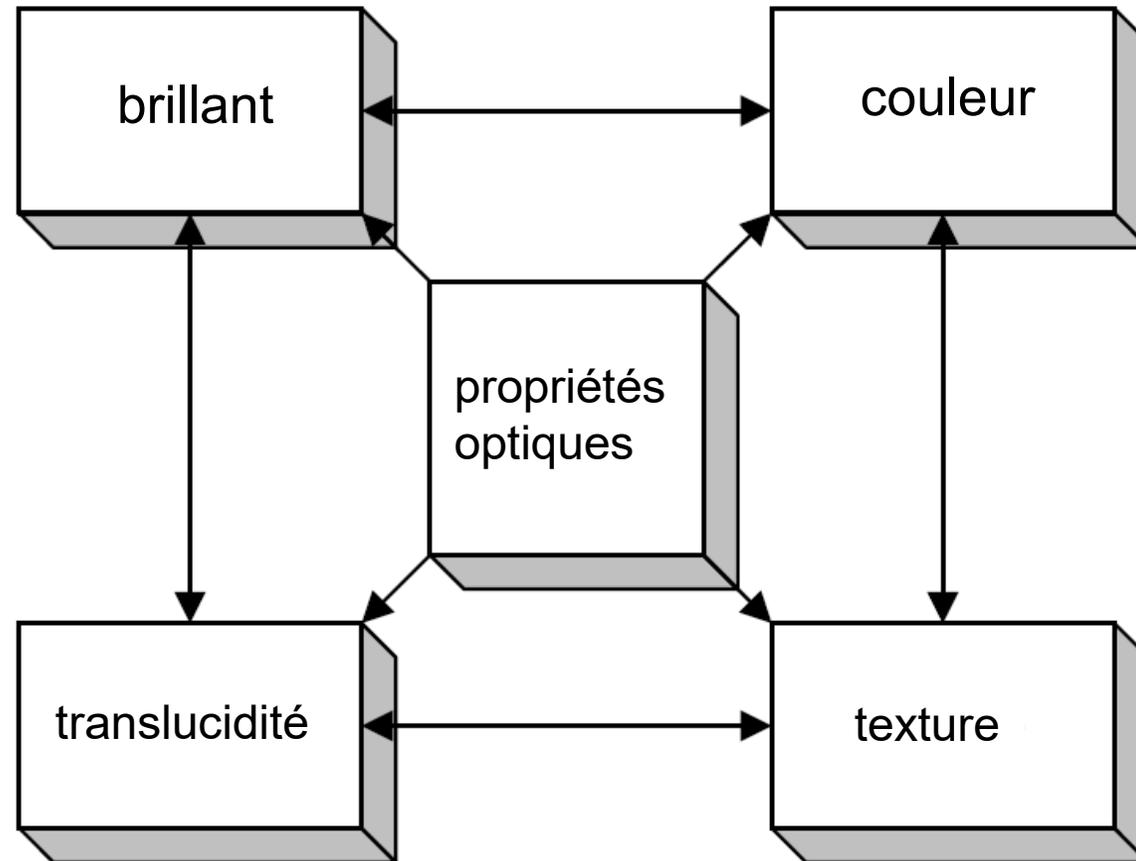
Colorimétrie classique (XX siècle)

Géométrie fixe, observateur fixe, source fixe

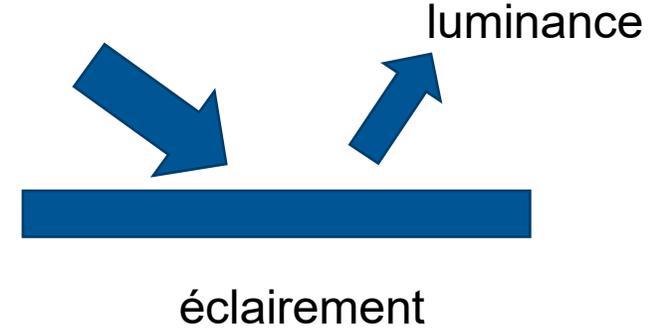


Cependant, les mêmes valeurs ne conduisent pas nécessairement à la même "apparence"

Modèle classique d'apparence (CIE 175)



Modèle complet de «coefficient de luminance» d'une surface



$$f = \frac{\text{luminance}}{\text{éclairage}} \quad [f] = \text{sr}^{-1}$$

$$f = f(\underbrace{\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r}_{\text{directionnel}}, \underbrace{\lambda_i, \lambda_r}_{\text{spectral}}, \underbrace{x, y, z}_{\text{spatial}}, \underbrace{\vec{p}}_{\text{de polarisation}}, \underbrace{t, L_\lambda}_{\substack{\text{temporel} \\ \text{Non-linéaire (i.e.} \\ \text{phosphorescence)}}})$$

Effet

directionnel

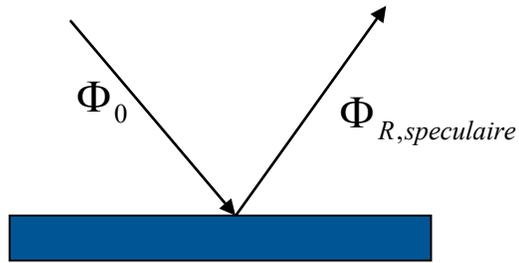
spectral

spatial

de polarisation

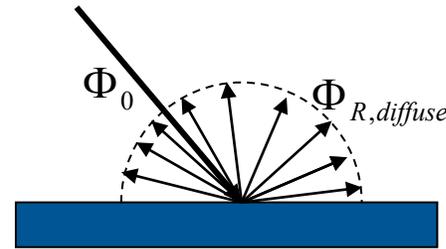
Instrument de mesure ???

Effet directionnel: type de réflexion



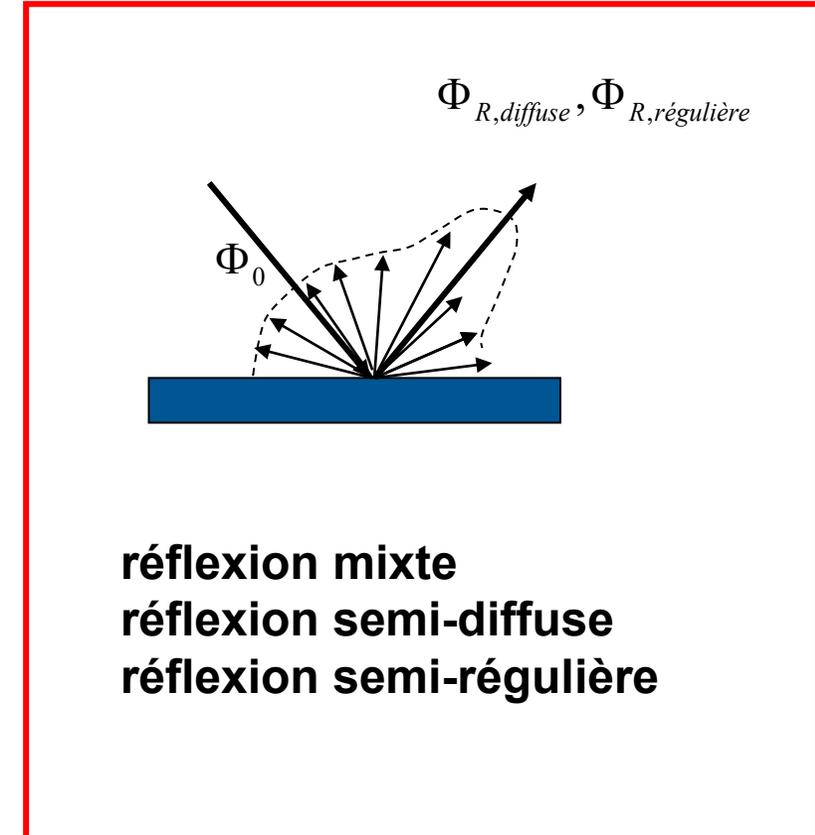
réflexion régulière
réflexion spéculaire

réflexion obéissant aux lois de l'optique géométrique, sans diffusion



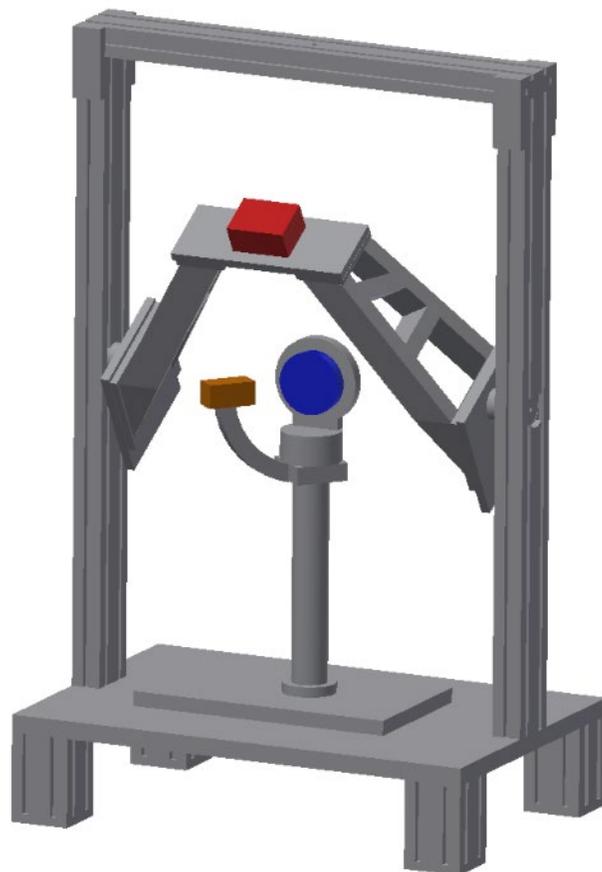
réflexion diffuse isotrope
réflexion diffuse uniforme

luminance constante dans toute les directions

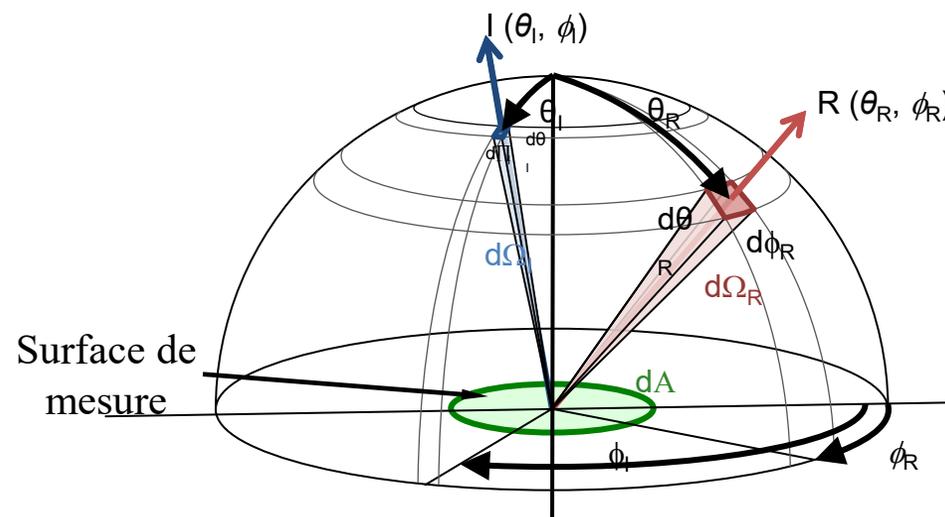


réflexion mixte
réflexion semi-diffuse
réflexion semi-régulière

Effet directionnel: fonction de distribution bi-directionnelle du coefficient de luminance BRDF



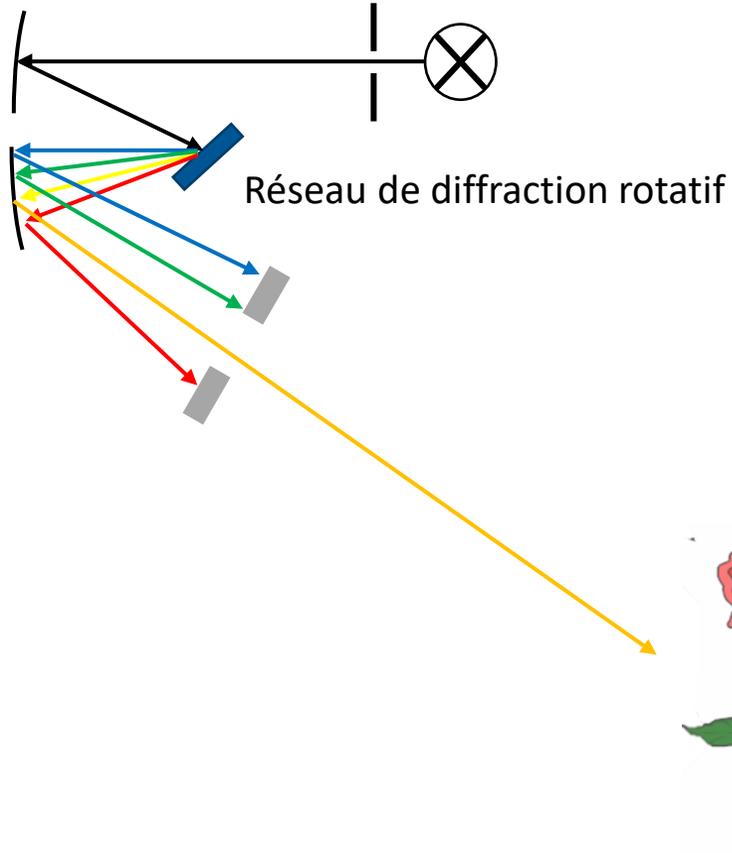
Goniomètre à 4 axes



CIE TC 2-85 Recommendation on the geometrical parameters for the measurement of the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Effet spectral: matériaux non-fluorescents

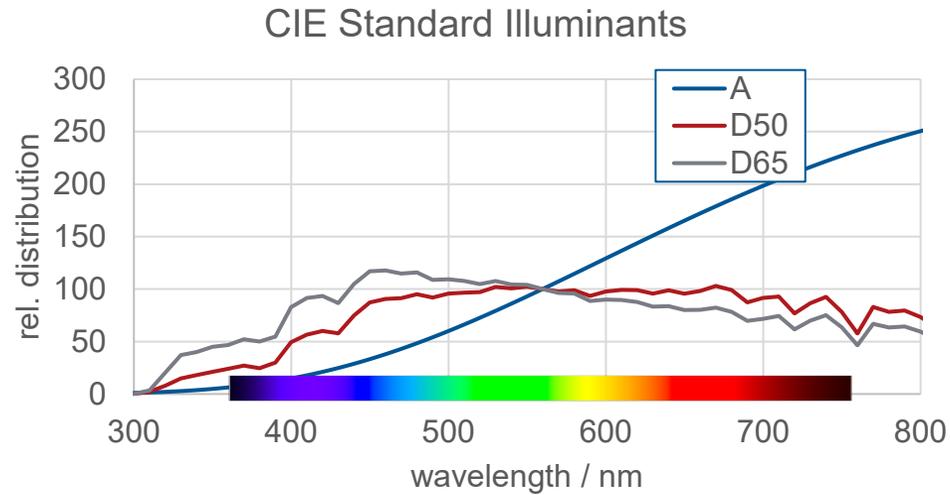
Source monochromatique,
accordable



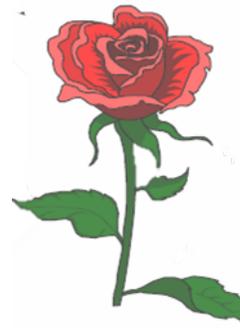
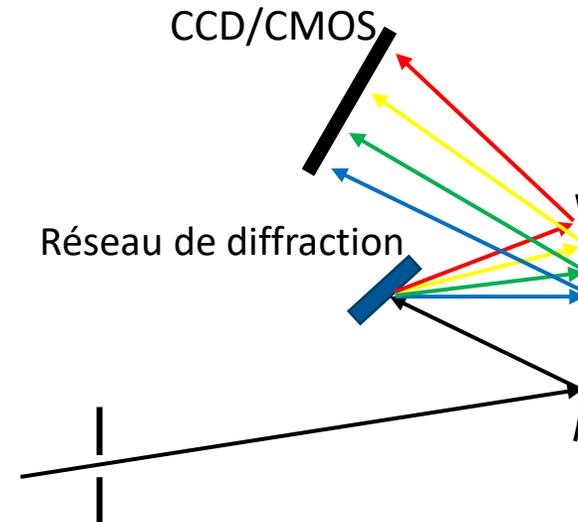
radiomètre



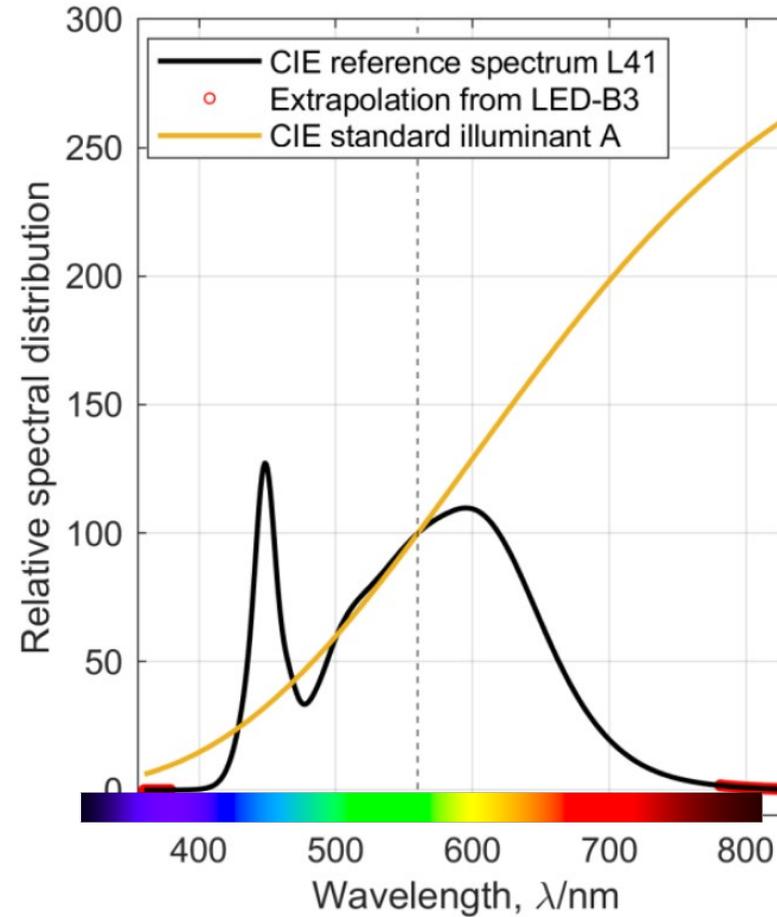
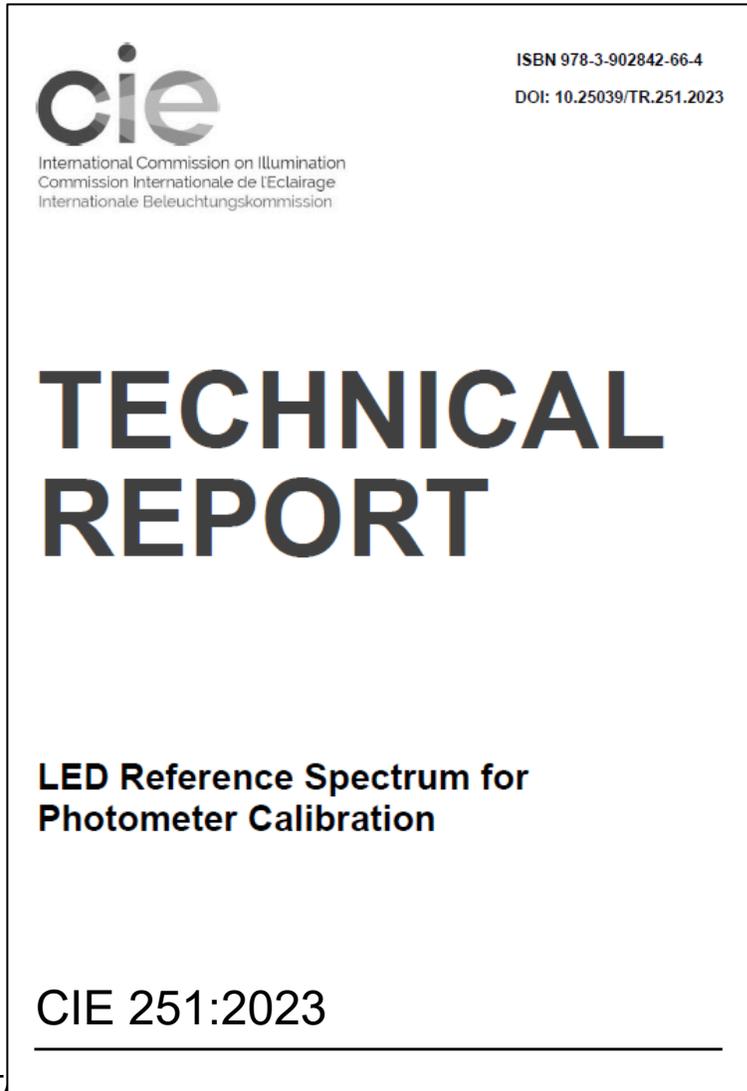
Effet spectral: matériaux non-fluorescents



spectroradiomètre



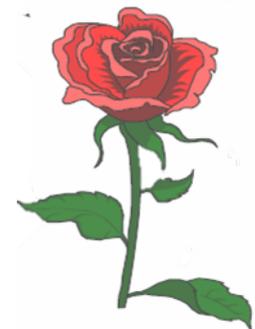
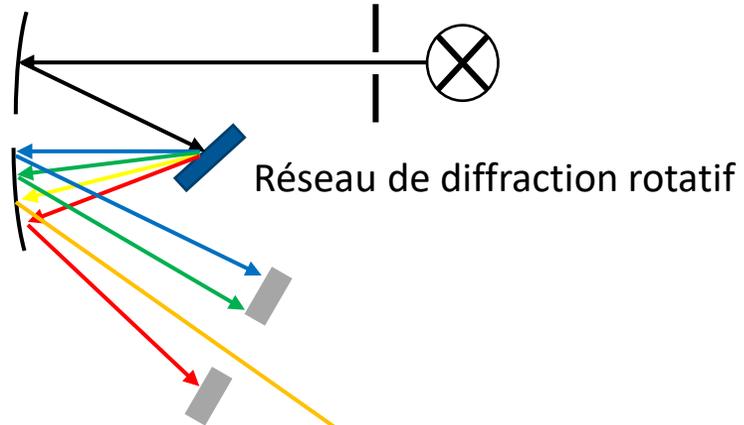
Nouveau spectre de référence (LED)



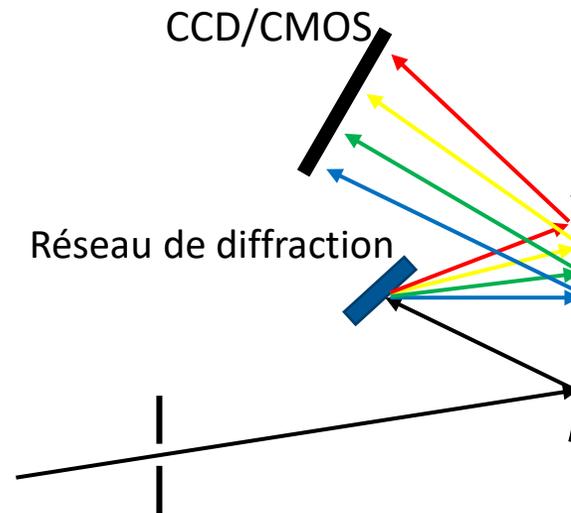
+12 spectres LED
CIE 015:2018

Effet spectral: matériaux fluorescents

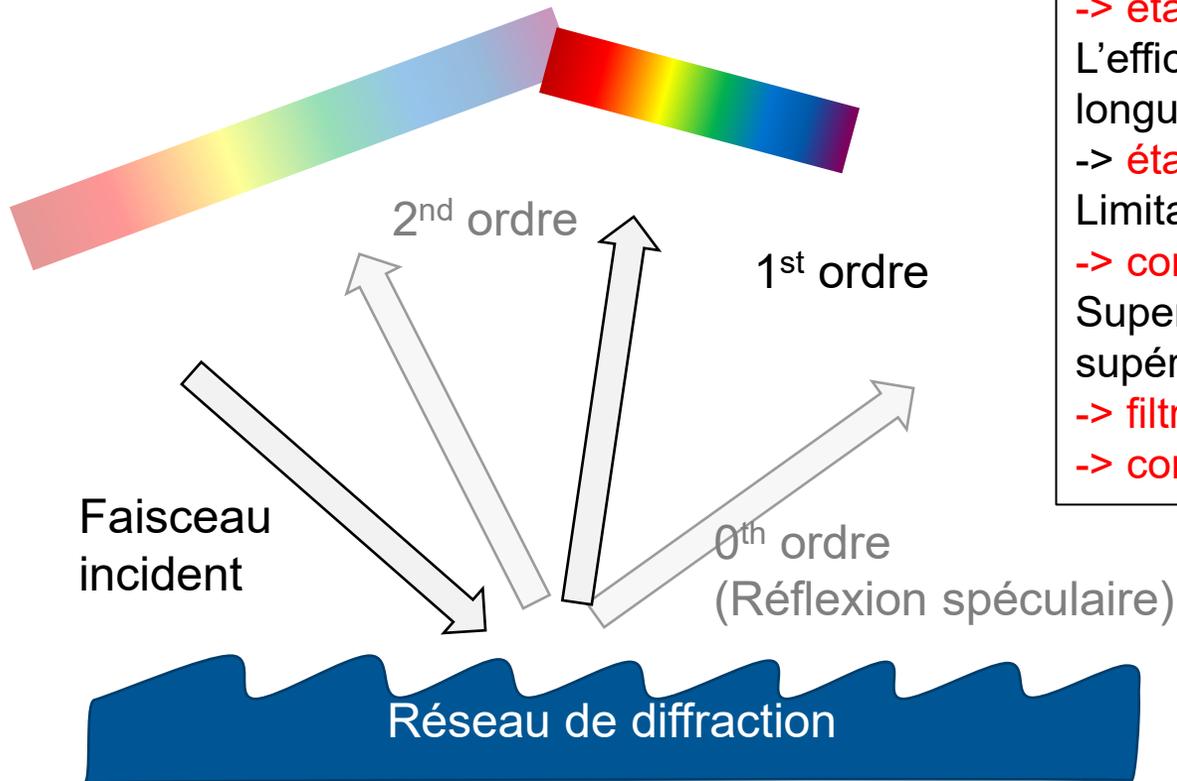
Source monochromatique,
accordable



spectroradiomètre



Spectroradiomètre : Principes de base



Propriétés:

Relation non linéaire entre longueur d'onde et angle

-> étalonnage de longueur d'onde

L'efficacité changeante avec longueur d'onde

-> étalonnage de la réponse spectrale

Limitation de la plage d'angle d'entrée

-> correction bande passante

Superposition d'ordre zéro et d'ordres supérieurs

-> filtres d'ordres supérieurs

-> correction de la lumière parasite

CIE 233:2019

cie
International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Éclairage
Internationale Beleuchtungskommission

Enquiry Draft
Sent to BA/D2 for commenting: 2018-10-22
Deadline for BA/D2 commenting: 2018-12-22
Corrected 2019-03-01 (V.2)

TECHNICAL REPORT

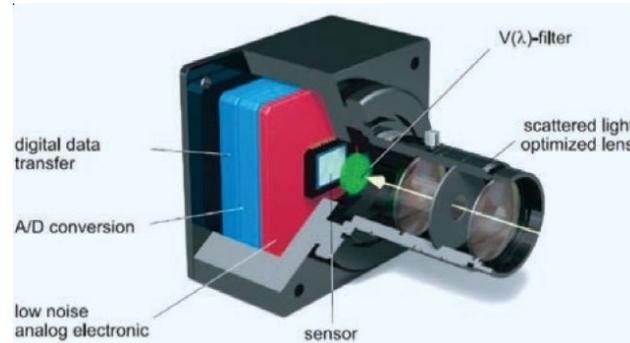
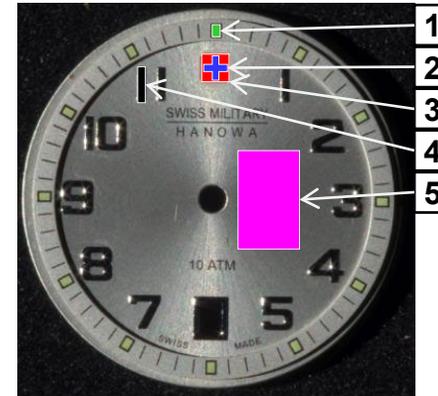
Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers

CIE 233:2019

UDC: 535.24
535.243

Descriptor: Photometry
Spectrophotometry

Effets spatiaux: caméra de luminance/ caméra trichromatique (X,Y,Z)

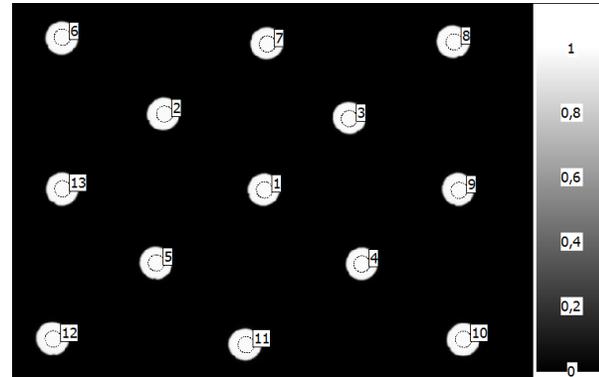


Plusieurs régions d'intérêt peuvent être sélectionnées

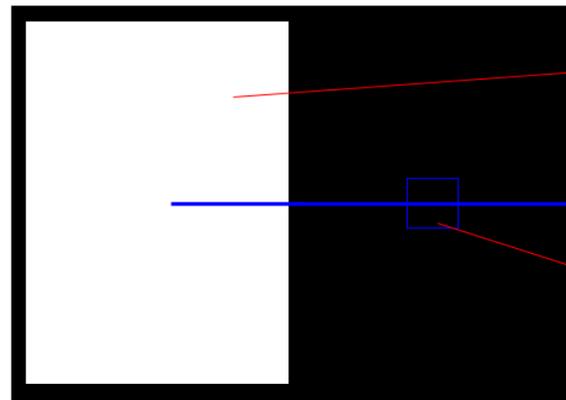
CIE 244 : Indices de qualité des caméras

Mesures d'uniformité de luminance

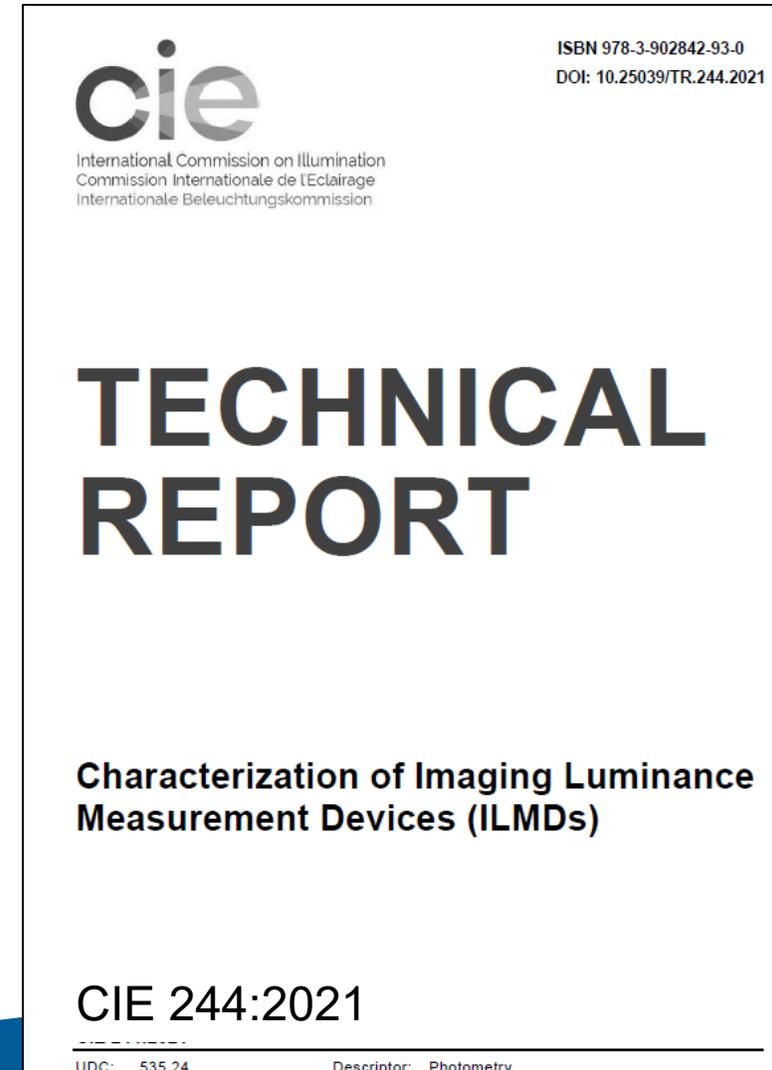
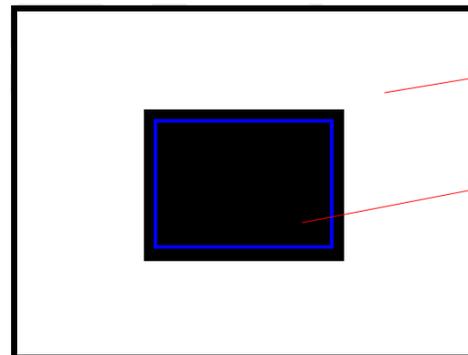
Symbol	Description
f_{12}	Responsivity uniformity for flat field
f_{22}	Responsivity uniformity for spots
f_{23}	Effect of surrounding field
f_{24}	Stray light influence for negative contrast
f_{25}	Edge function
f_{26}	Influence of smear
f_{27}	Shutter repeatability
f_{28}	Aperture repeatability
f_{29}	Size-of-source effect



Effet du champ environnant



Effet de bord



Goniomètre & source accordable & caméra (x, y, z) -> METAS : μ BRDF



Source:

- n'importe quel angle d'éclairage
- accordable en longueur d'onde (300 nm à 830 nm)

Detection:

- n'importe quel angle de détection
- caméra CMOS 14 bits, étalonnée « en absolu »
- acquisition hi-dynamique
- résolution de 16 à 30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$

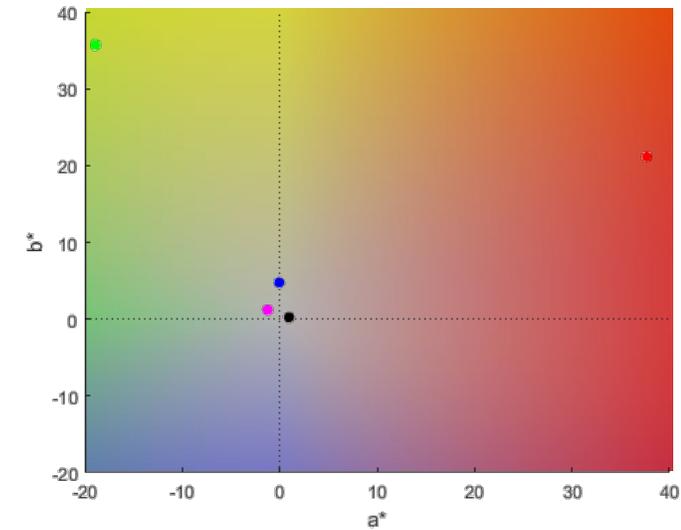
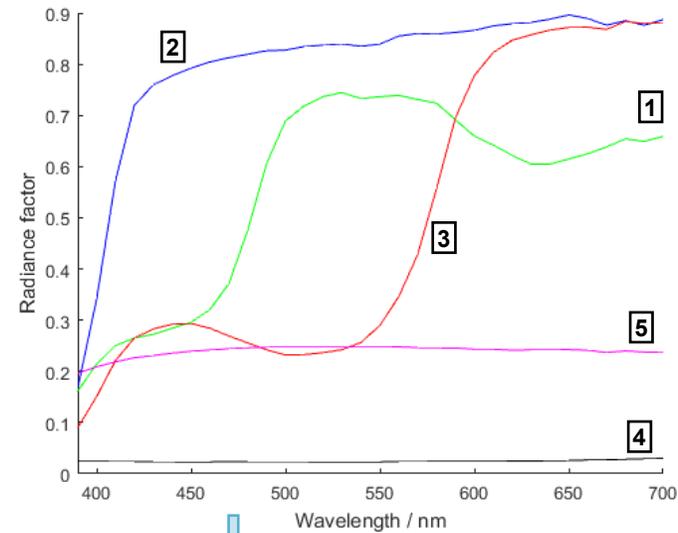
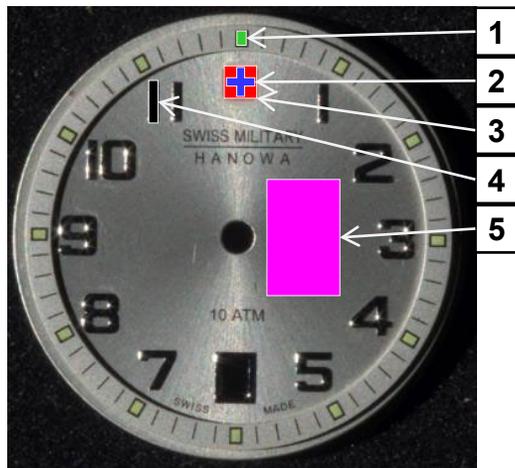
Avantages:

- polyvalent
- instrument de référence

Inconvénient:

- grands ensembles de données
- de longs temps de mesure

Mesure d'objets hétérogènes

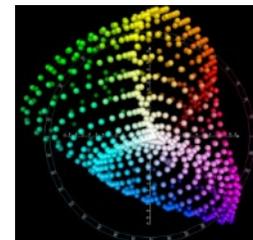


Représentation 2D

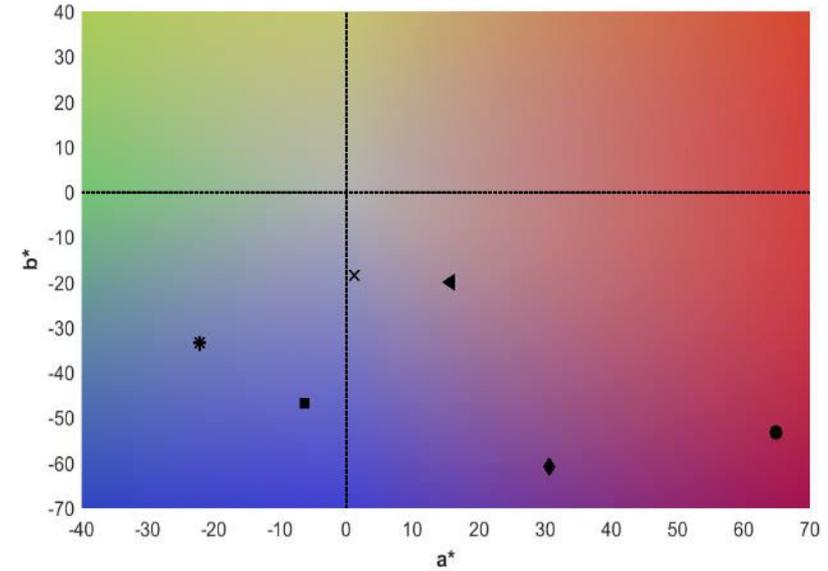
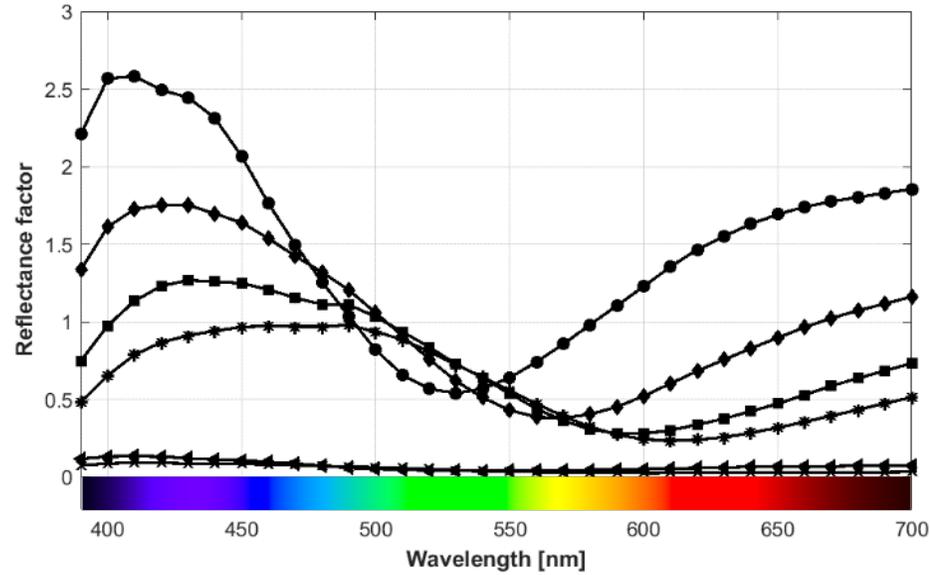
CIE Colour Coordinates:

L^* , a^* , b^*

3D space



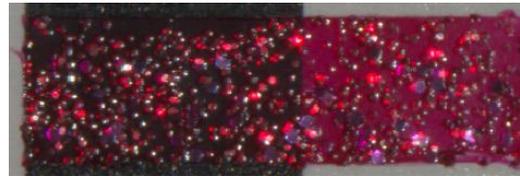
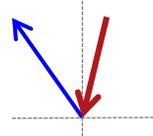
Mesure d'objets goniochromatiques



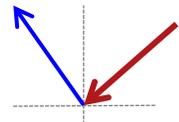
Mesure de sparkle

- Sparkle - Taches lumineuses sur un entourage plus sombre
- Les spots changent de position avec l'angle d'éclairage

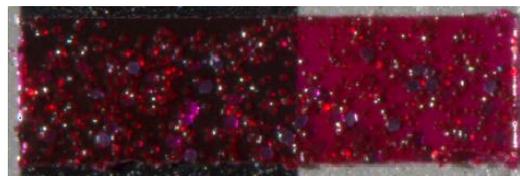
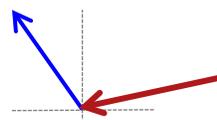
15° : -30°



45° : -30°

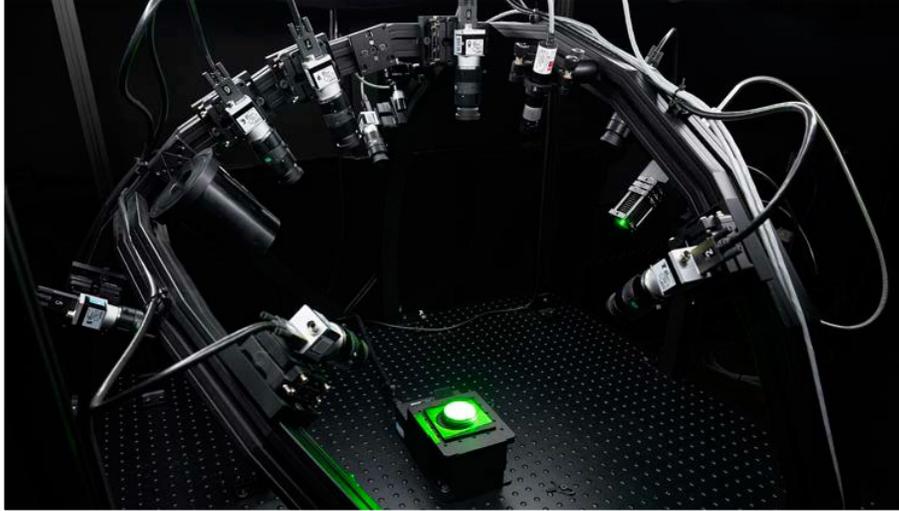


75° : -30°



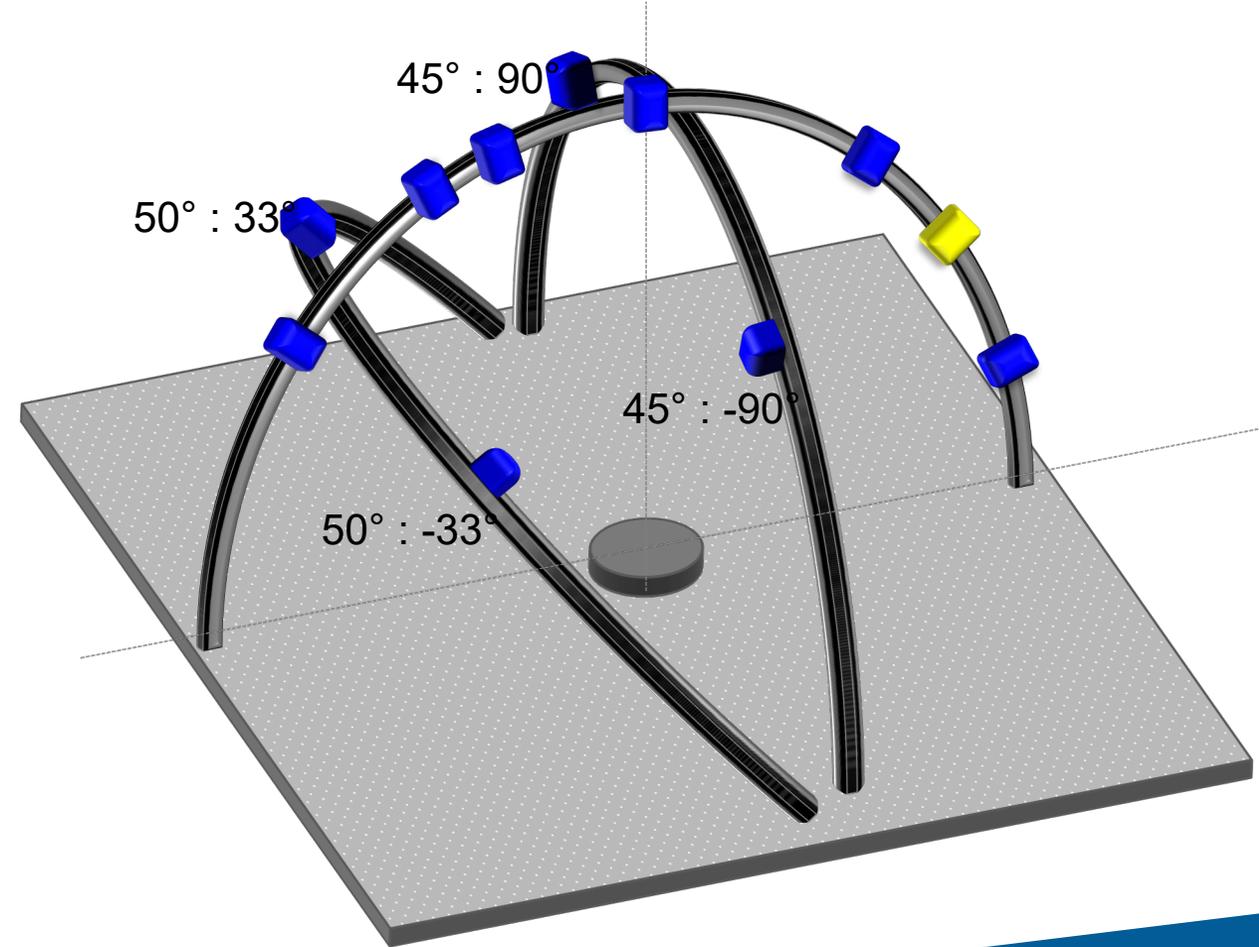
20 mm

Multi-angle Reflectance Setup – MARS

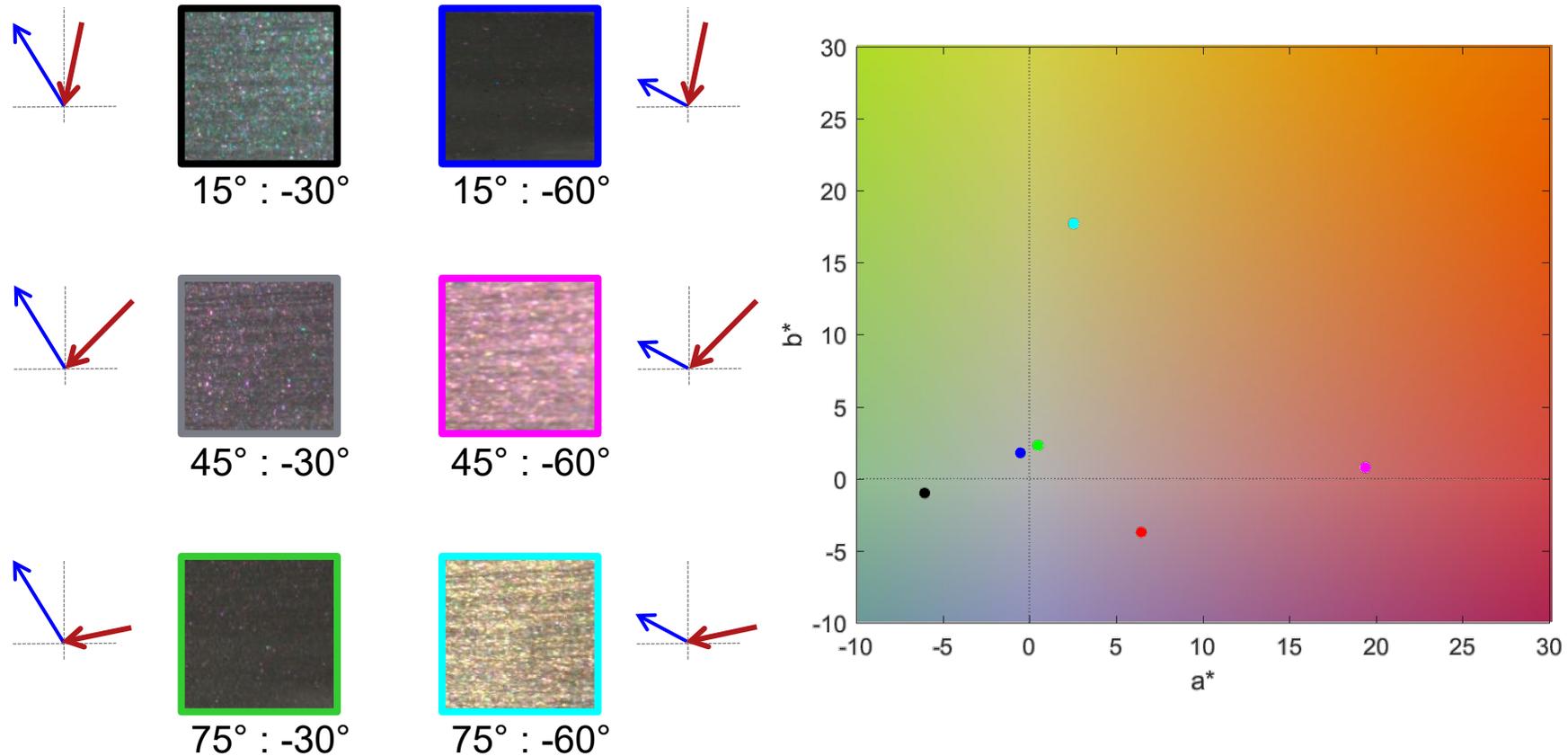


Mesures de réflectance multi-angles
résolues spatialement et spectralement

- Coefficient de luminance spectrale à 29 géométries
- Taille maximale de l'échantillon de ~30 mm
- Haute résolution spatiale (42 μm /pixel)

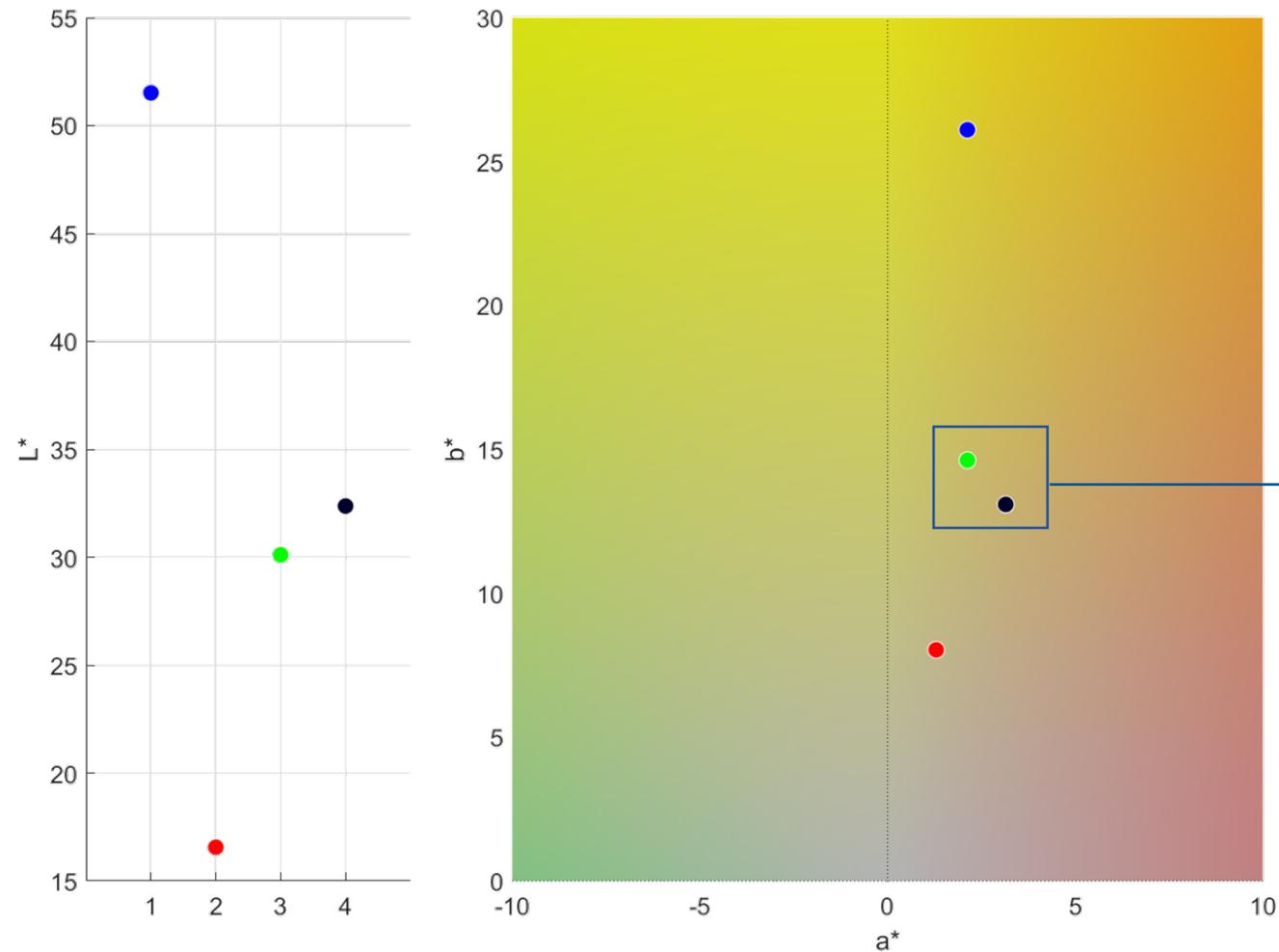
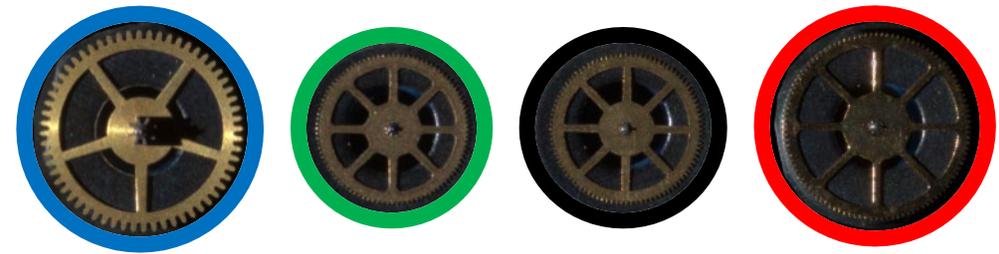


Mesure d'échantillons goniochromatiques

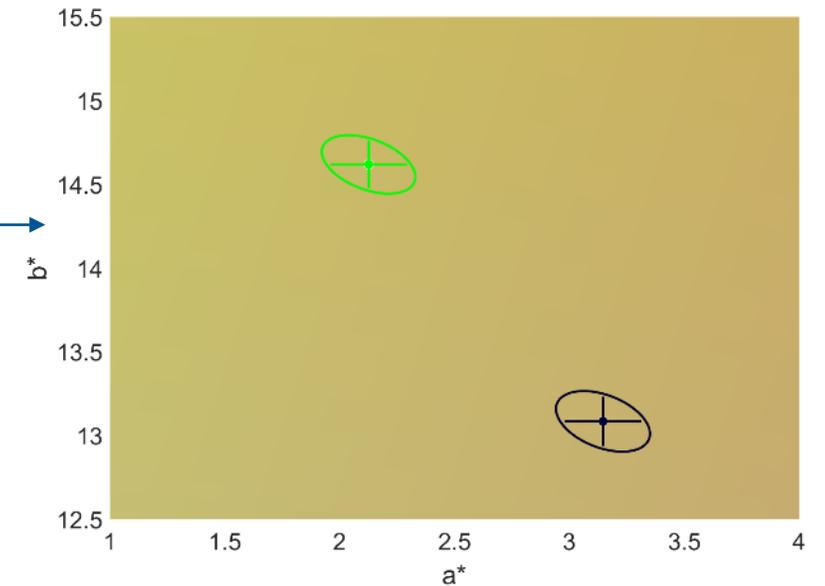


Le vernis à ongles goniochromatique change de couleur avec l'angle de vision et d'éclairage.

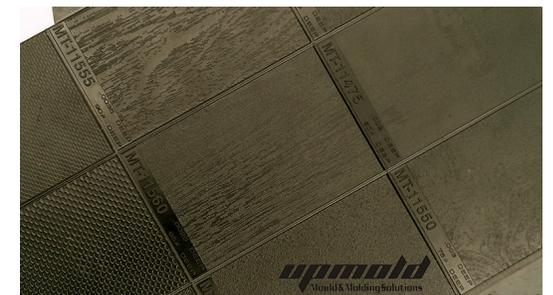
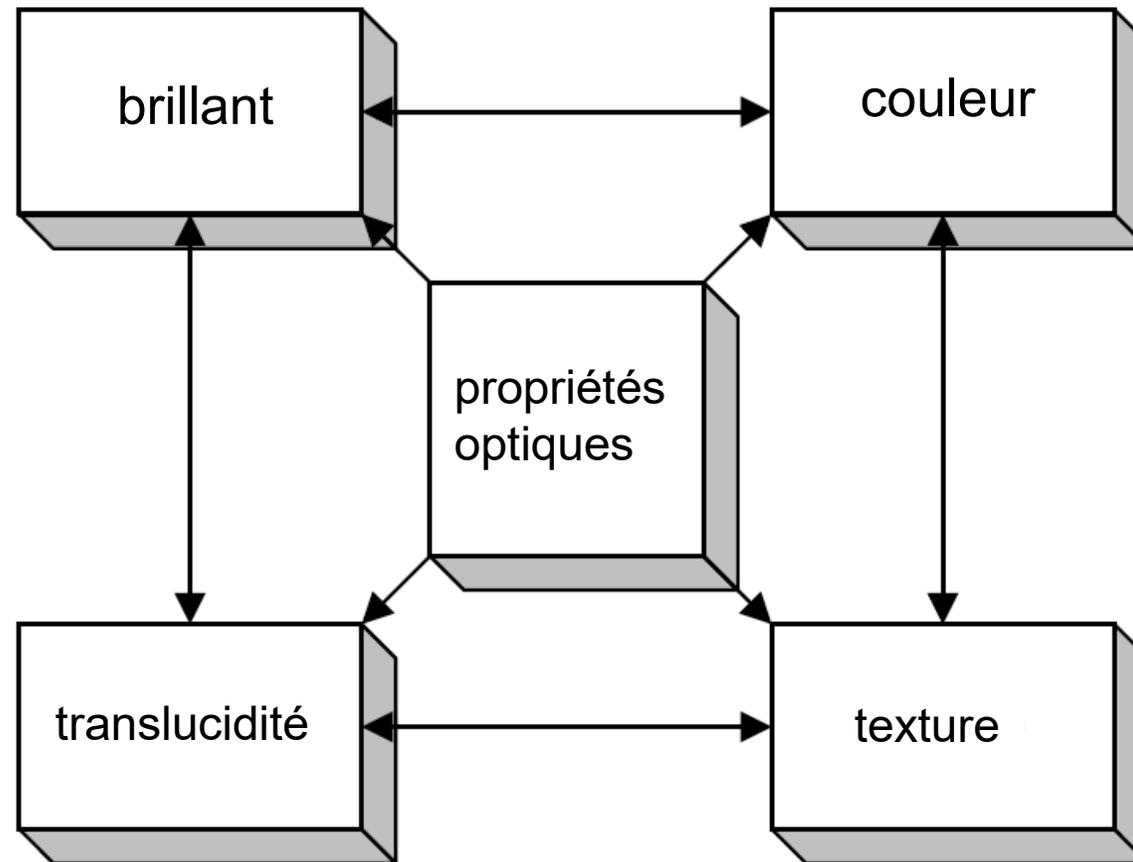
Mesure de petits objets



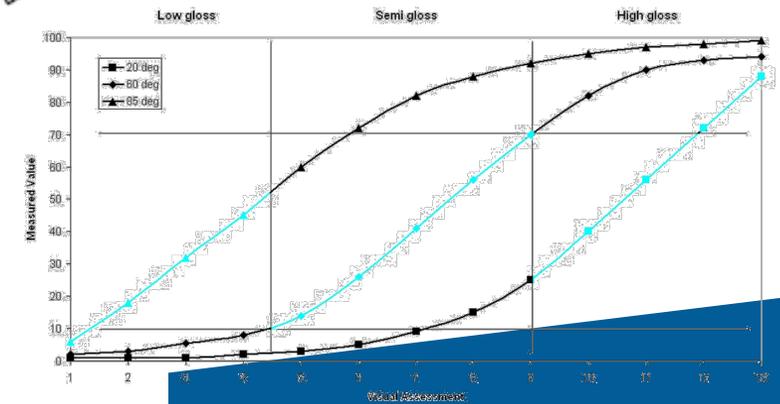
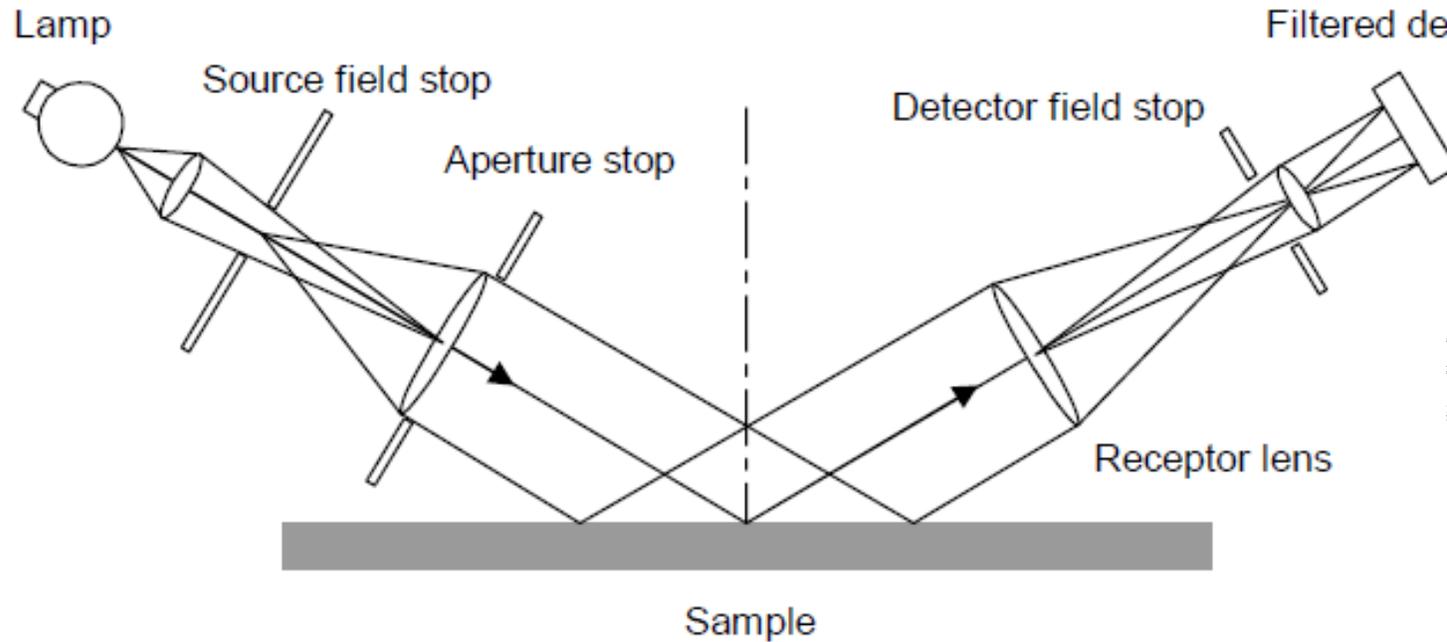
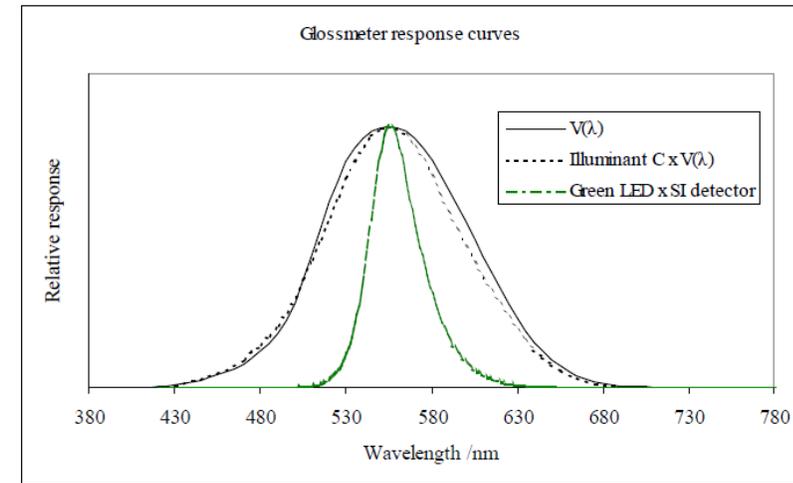
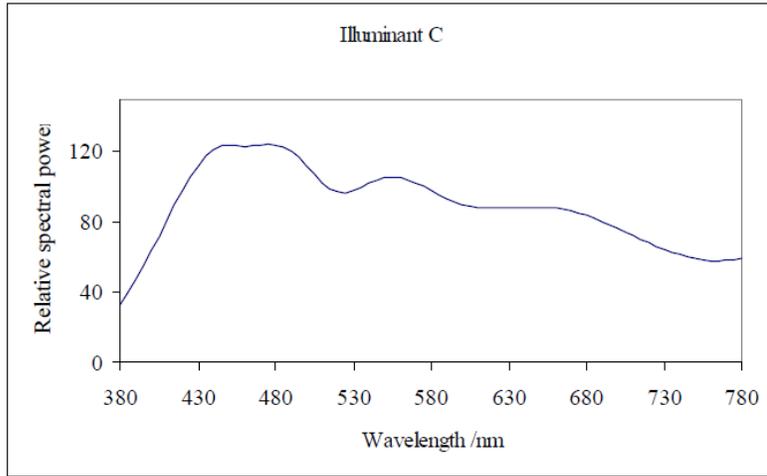
Analyse de l'incertitude de mesure :



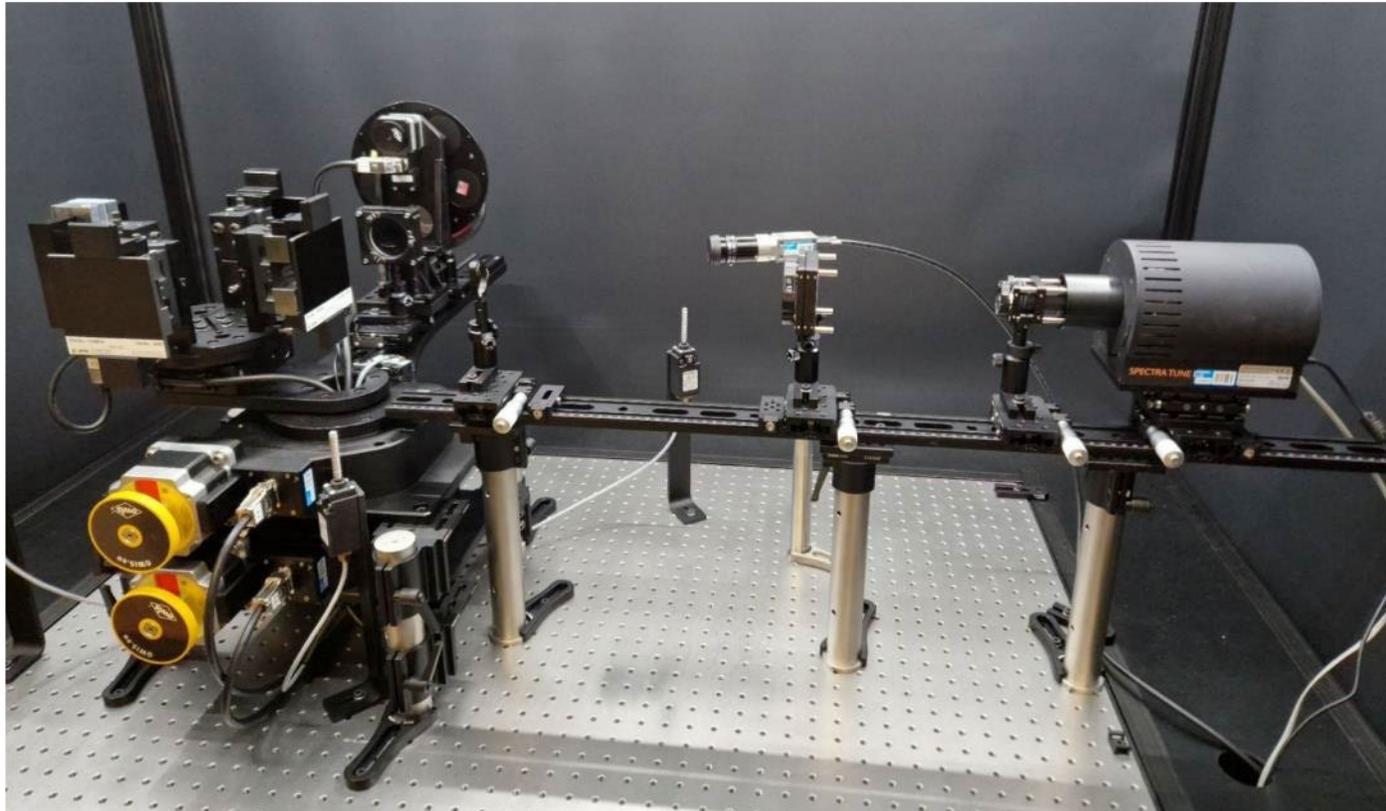
Modèle classique « apparence » (CIE 175)



Brilliant

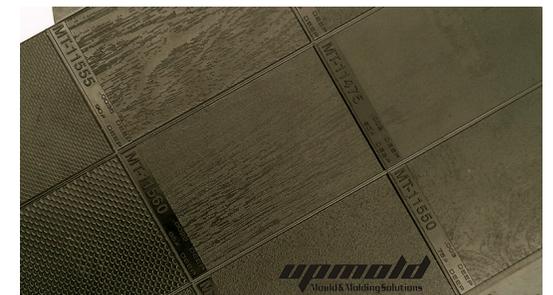
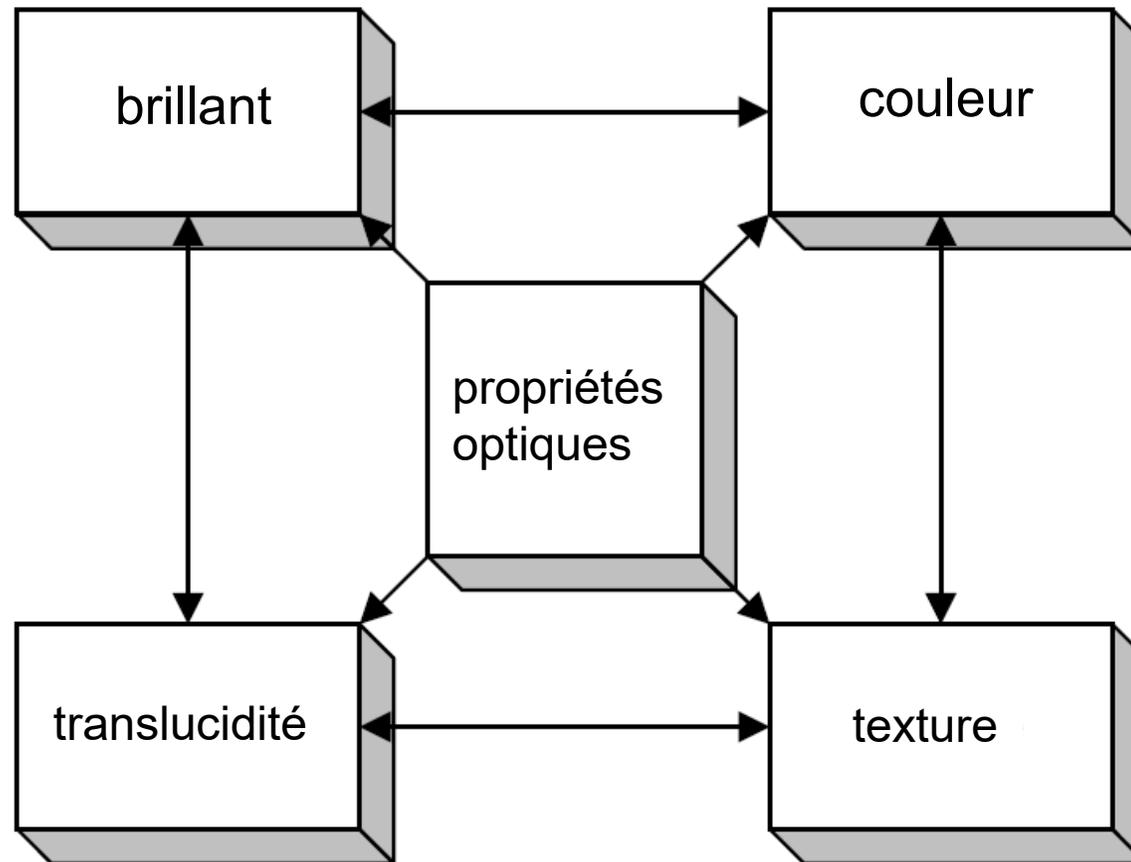


Mesure de la brillance

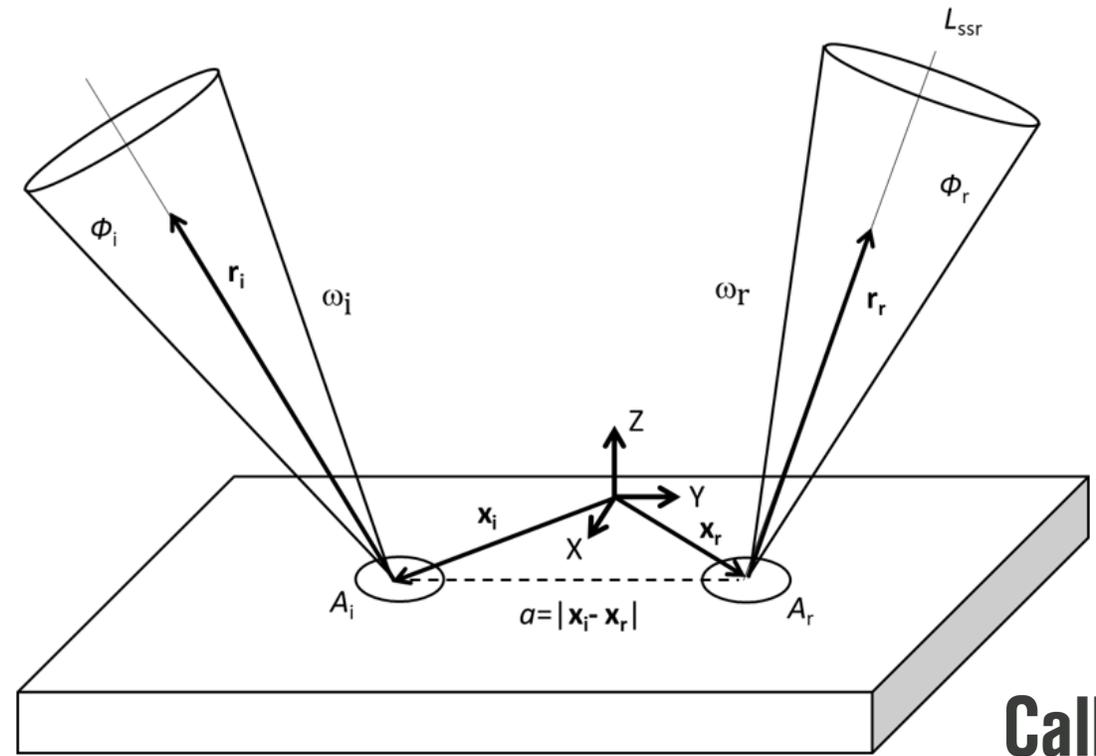


- Instrument de référence pour les mesures de brillance spéculaire (réalisation primaire)
- Haute flexibilité angulaire « in-plane »
- Configuration collimatée ou convergente des faisceaux
- brillance spéculaire selon
 - ISO 2813
 - ASTM D523-14
 - ASTM D2457-13
 - Tappi T 480 om-15
 - Tappi T 653 om-07
- Calcul complet de l'incertitude de mesure

Modèle classique « apparence » (CIE 175)



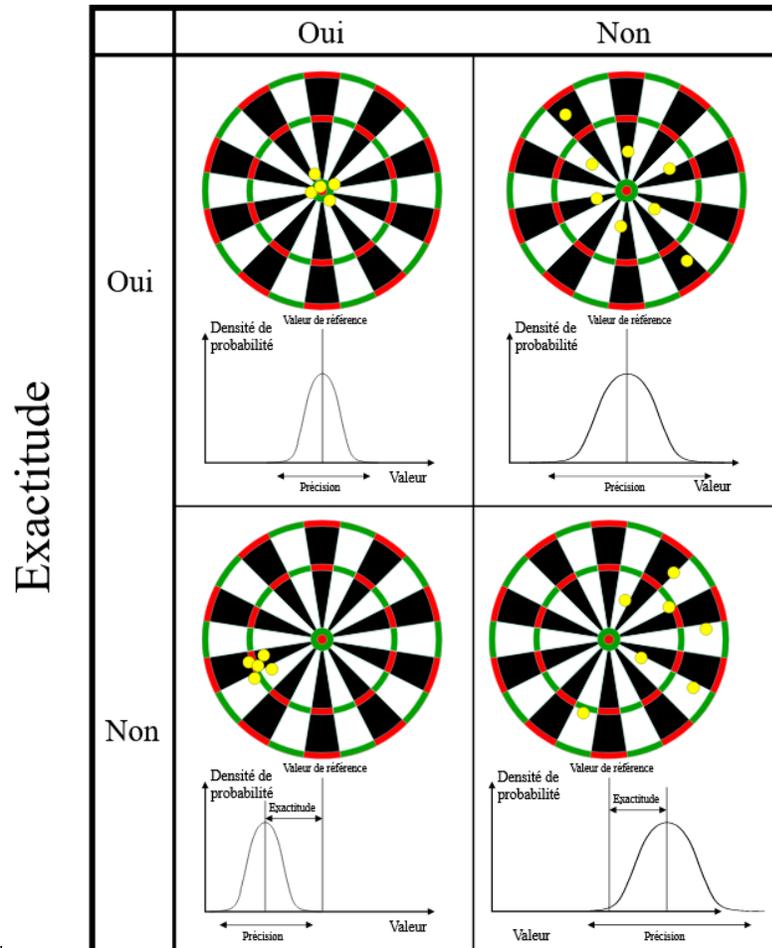
Translucidité : Mesure BSSRDF



METAS

Comment avoir confiance dans les données mesurées ?

Précision

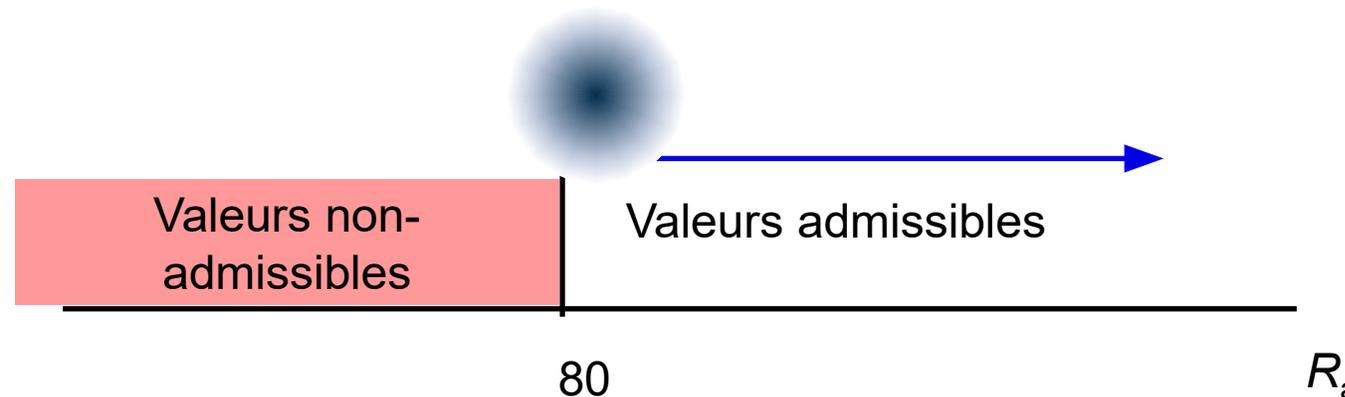


- Traçabilité au SI (étalonnage)
- Caractérisez votre instrument, c'est-à-dire déterminez l'incertitude de mesure
- Incertitude de mesure:
 - C'est plus que la répétabilité ou le bruit
 - Tenir compte des contributions de l'étalonnage, de l'instrument, des conditions environnementales et de l'échantillons
- Formations METAS

Pourquoi les incertitudes sont-elles importantes?

Evaluation et déclaration de conformité

Indice général de rendu des couleurs $R_a \geq 80$



Sans tenir compte de l'incertitude de mesure : « Oui » : le produit remplit la condition

Prise en compte de l'incertitude de mesure : « Peut-être » -> probabilité de conformité

Comment faire l'analyse d'incertitude pour la BRDF

$$L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1) = L_x(\lambda, t_1, g_1) - L_{0,x}(t_1, g_1)$$

$$L_{x,corrected}(\lambda, t_1, g_1) = L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1)$$

$$L_{x,corrected}(\lambda, t_1, g_1) = L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1) \cdot (p_1 \cdot L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1) + p_2)$$

$$L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1) \leq 1500$$

$$L_{x,DS}(\lambda, t_1, g_1) > 1500$$

$$L_{x,HDR}(\lambda) = HDR(L_{x,gain\ corrected}(\lambda))$$

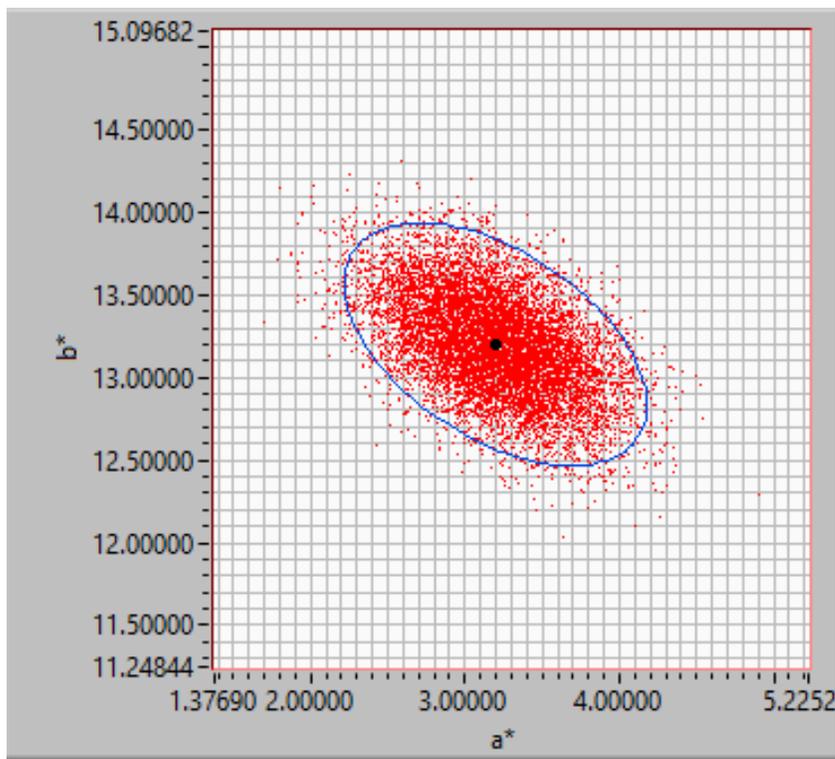
Modèle complet avec tous les paramètres
« Digital Twin »

+ Simulations Monte Carlo

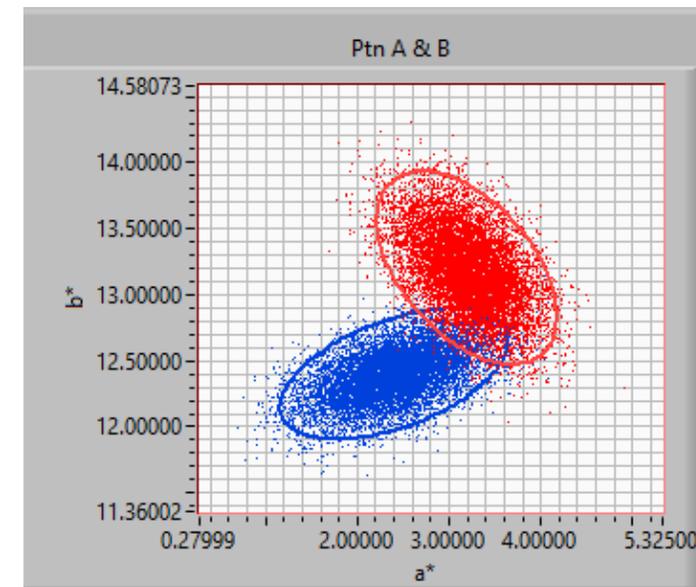
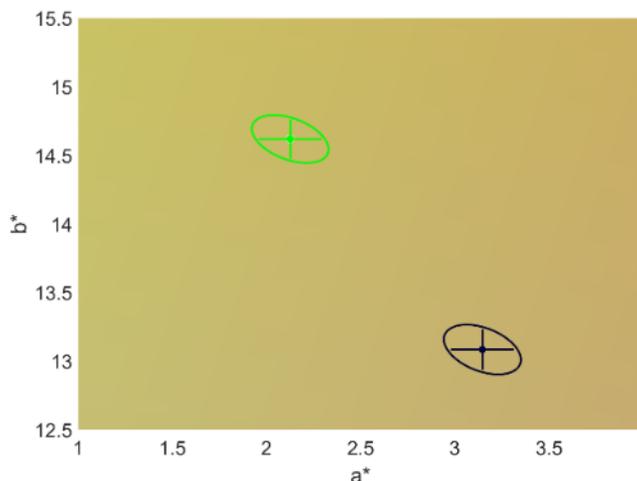
Résultat de mesure
avec incertitude:

$$E_v = (432.2 \pm 2.4) \text{ lx}$$

Comment signaler les incertitudes pour les grandeurs multidimensionnelles ?

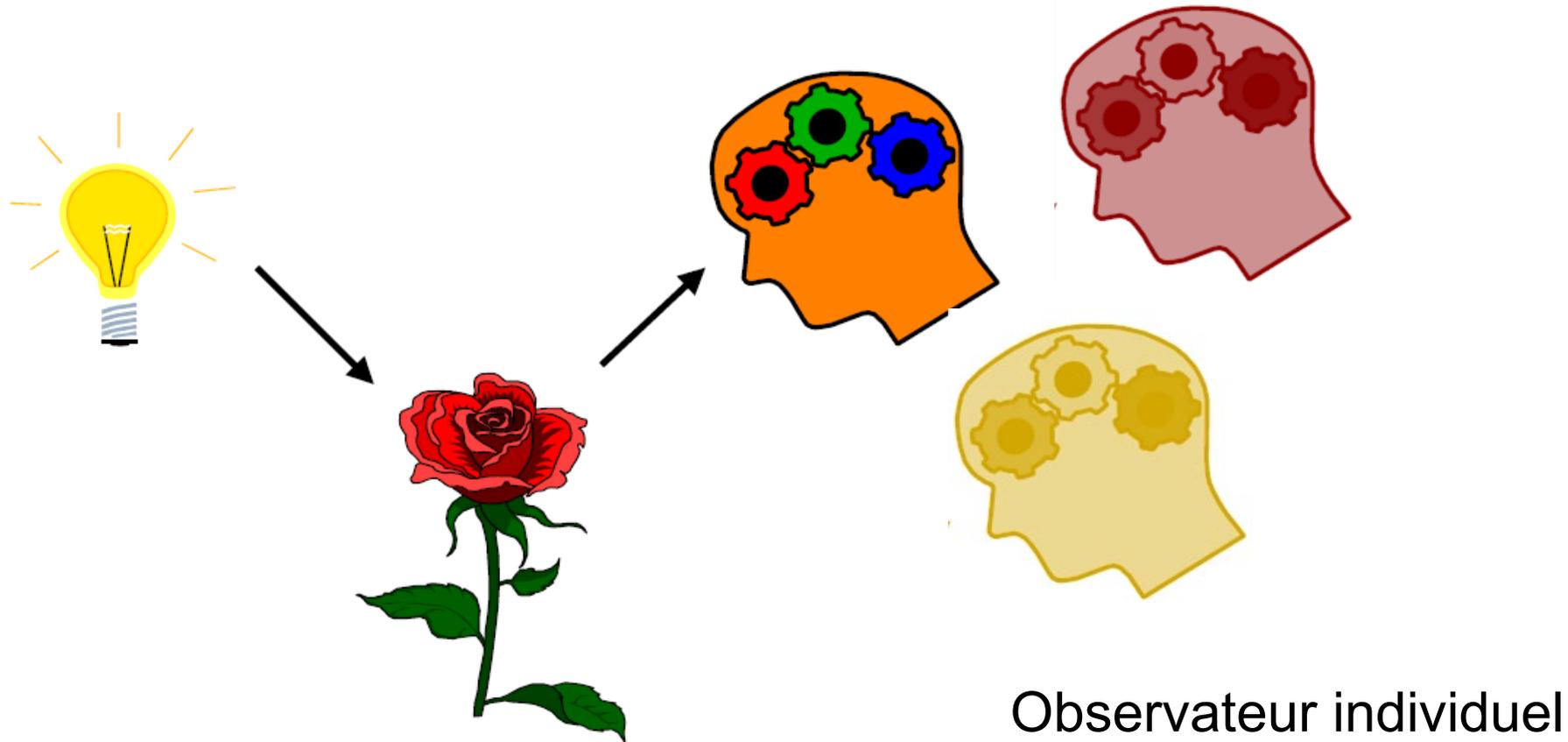


Corrélations!!!



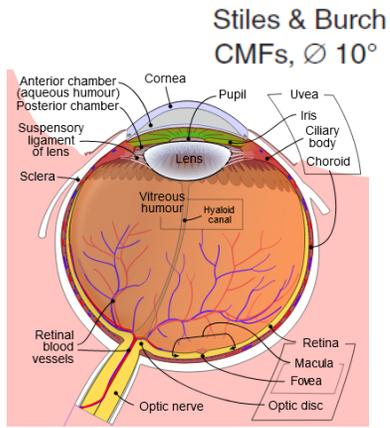
Comparaison entre deux valeurs mesurées

Colorimétrie : perspectives

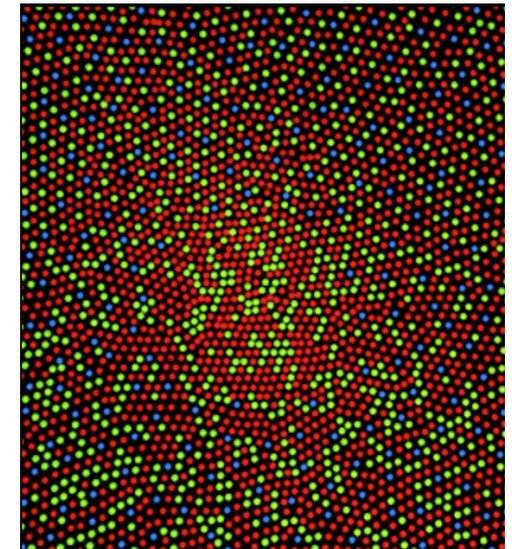
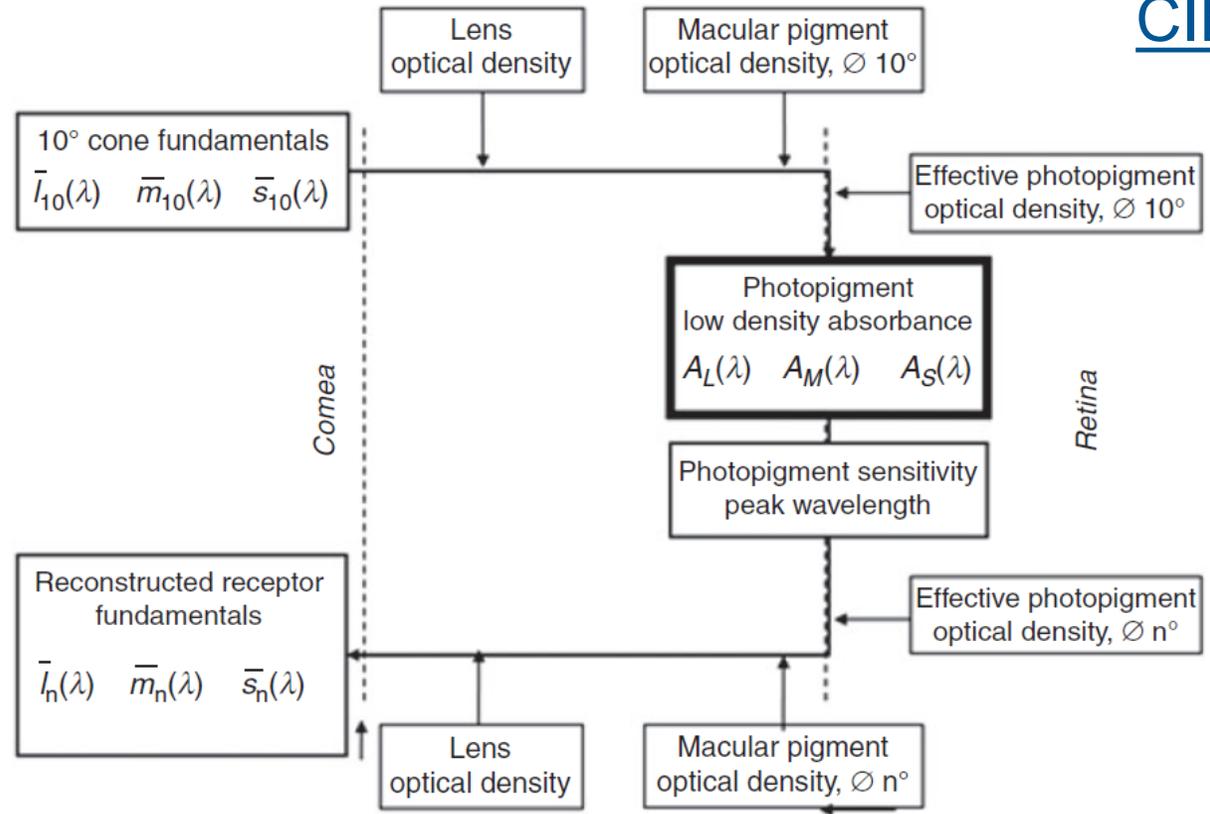


Principes fondamentaux des cônes : modélisation physiologique

CIE 170-1:2006
CIE 170-2:2015



Stiles & Burch
CMFs, $\varnothing 10^\circ$

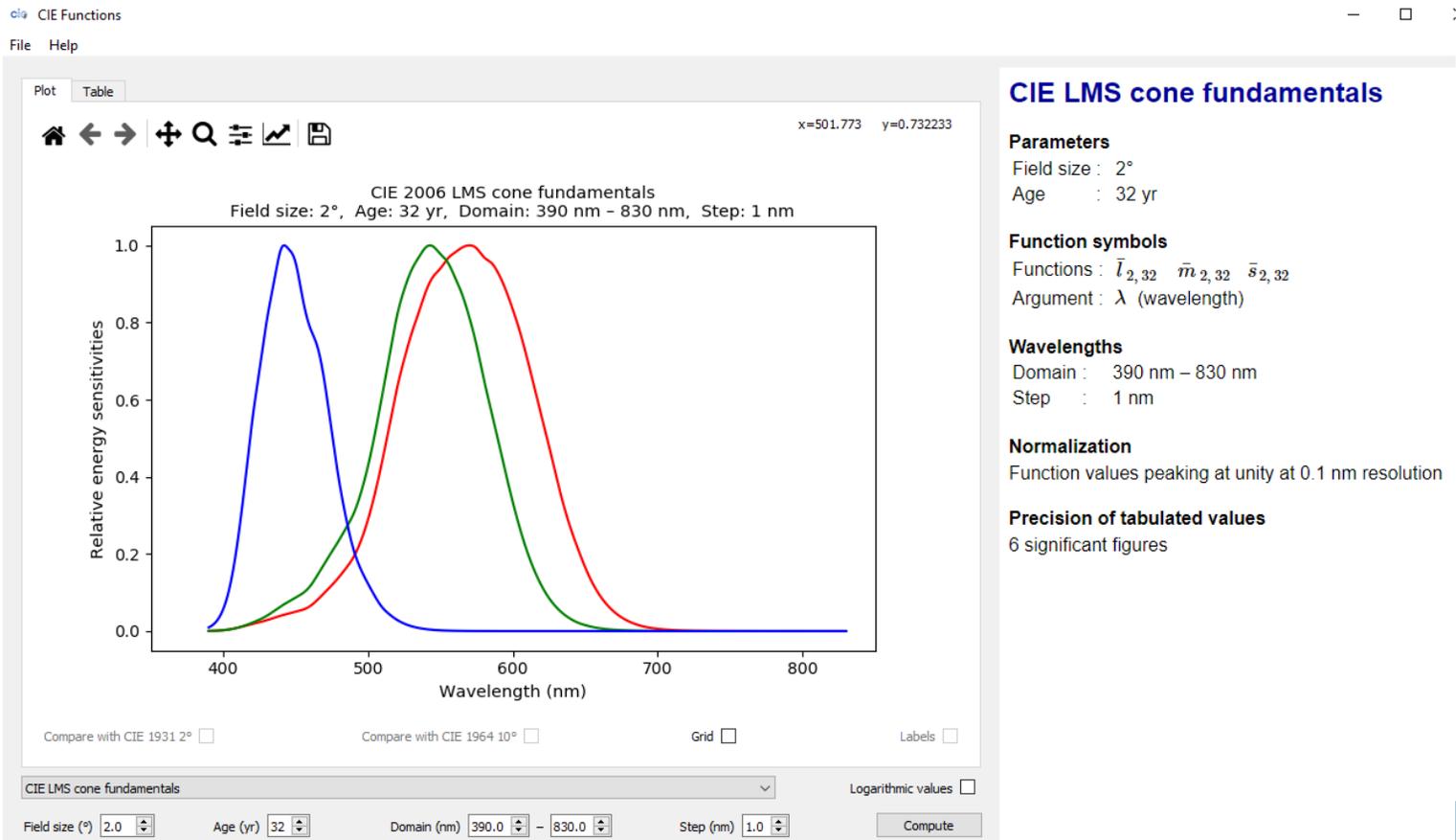


©Mark Fairchild

The CIE 2006 cone fundamental framework for reconstructing cone fundamentals, for any viewing field.

CIE TC 1-97 Age- and Field-Size-Parameterised Calculation of Cone-Fundamental-Based Spectral Tristimulus Values

<https://github.com/ifarup/ciefunctions>



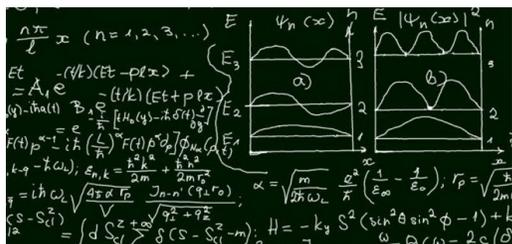
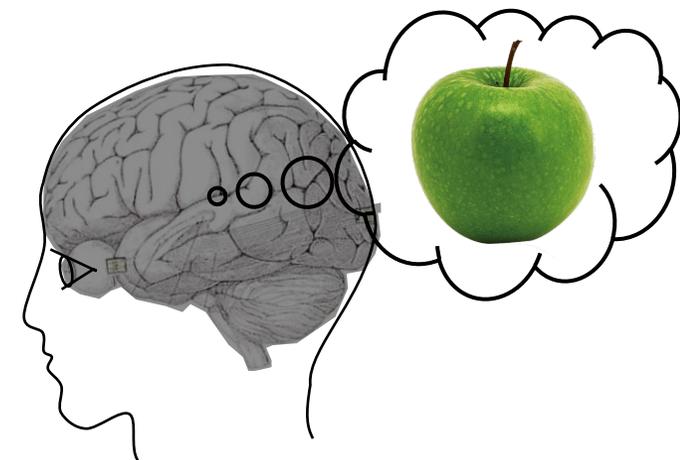
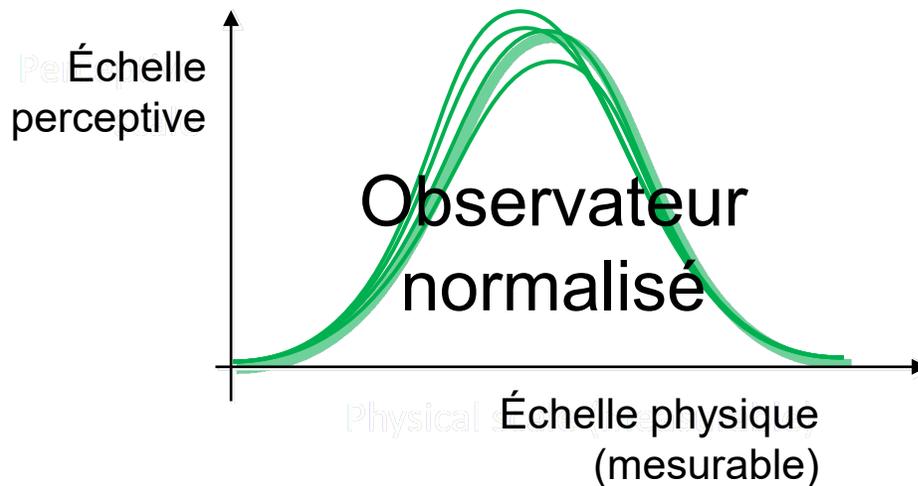
Mesure des grandeurs d'apparence

Méthodes actuelles



Radiométrie et spectrophotométrie

Expériences
Psychophysiques



Modèles de perception

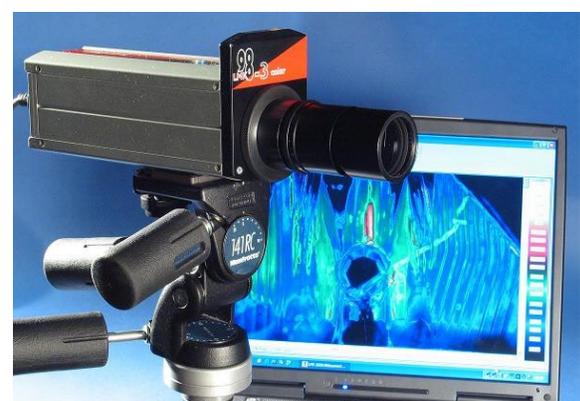
Activités de normalisation

METAS



Mesure des grandeurs d'apparence

Méthodes du future



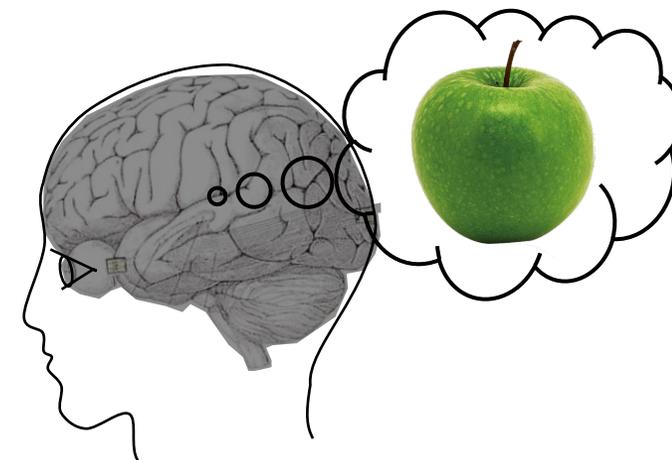
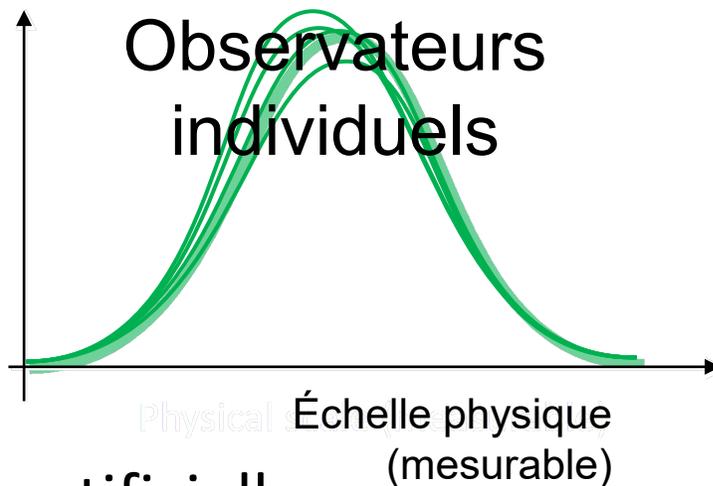
Radiométrie basée sur l'image

Machine Learning



Échelle
perceptive

Observateurs
individuels



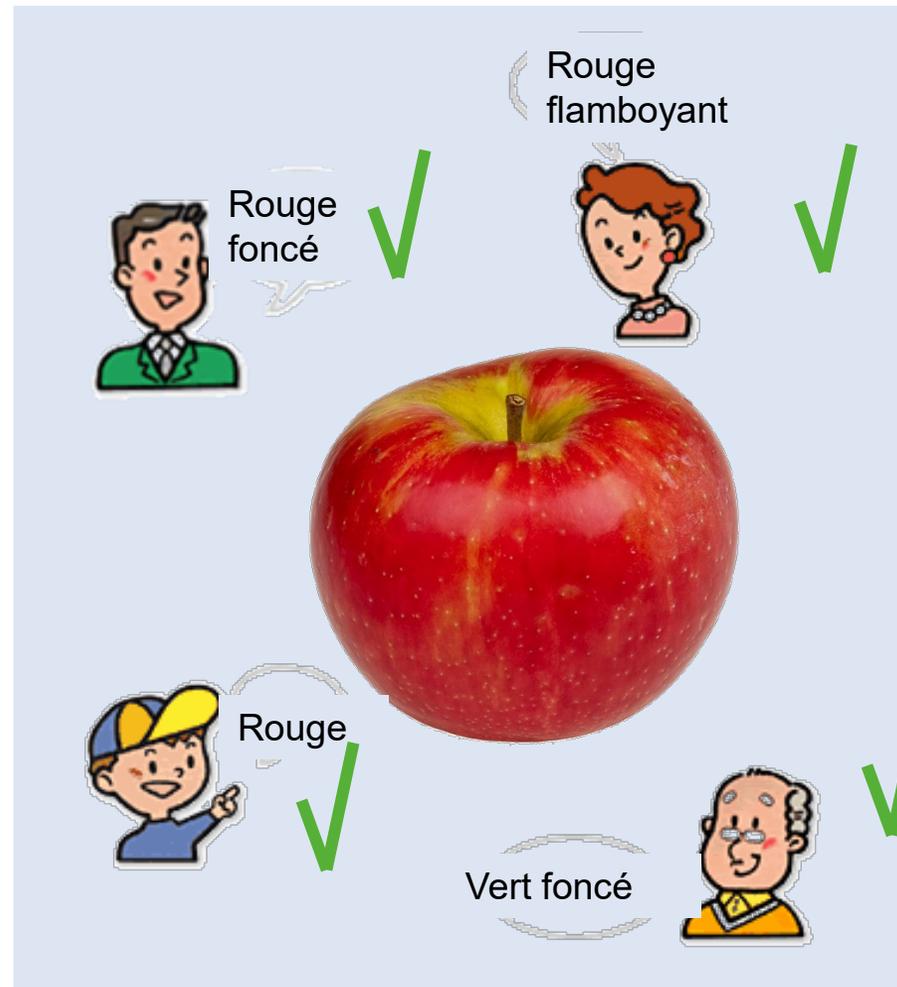
Intelligence artificielle

Activités de
normalisation

METAS



Quelle est la couleur de cette pomme ?



Merci de votre attention



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS