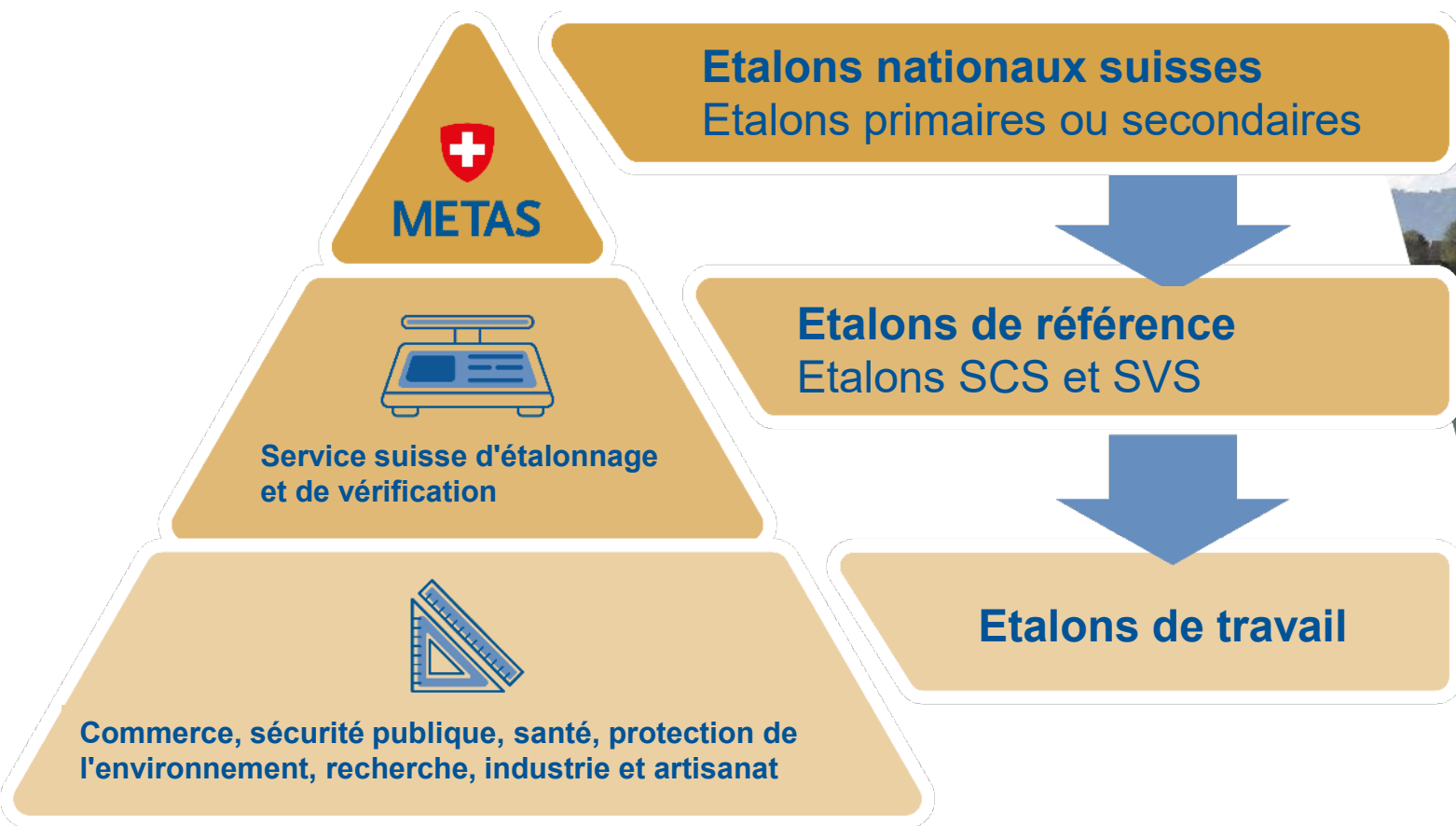


# Caractérisation des aspects d'apparences de surface

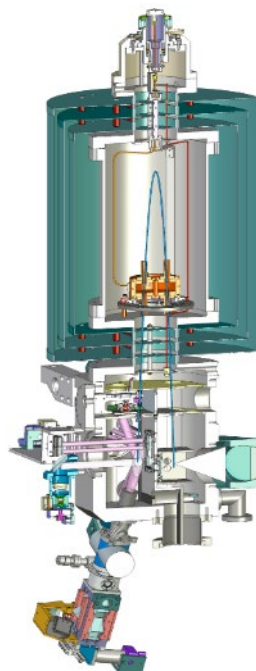
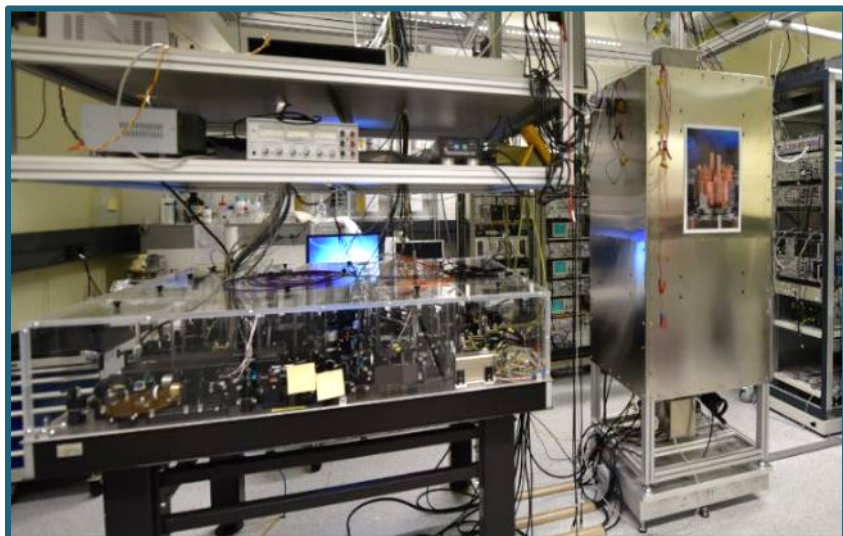
Dr. Peter Blattner (Chief Metrology Officer), Dr. Nina Basic (Scientific Expert)

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*

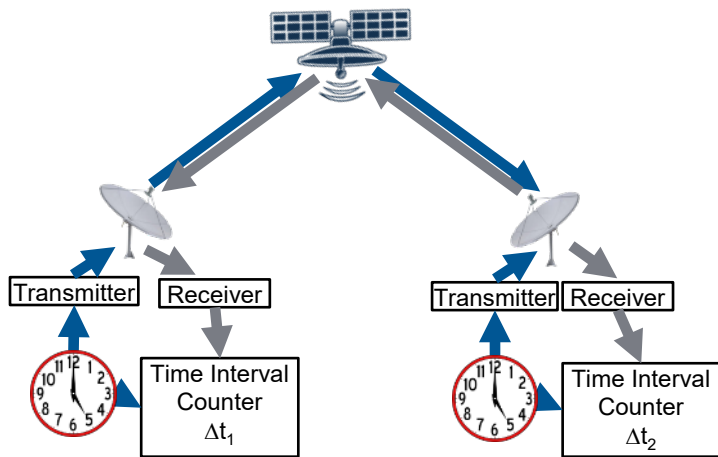
Unique horloge à fontaine continue à Cs (Swiss Made)

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

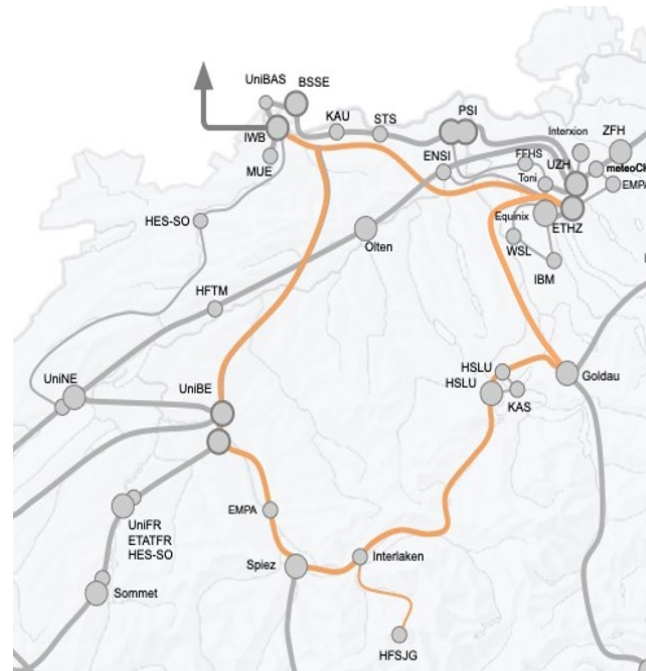
Par satellite: Two Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT)



METAS

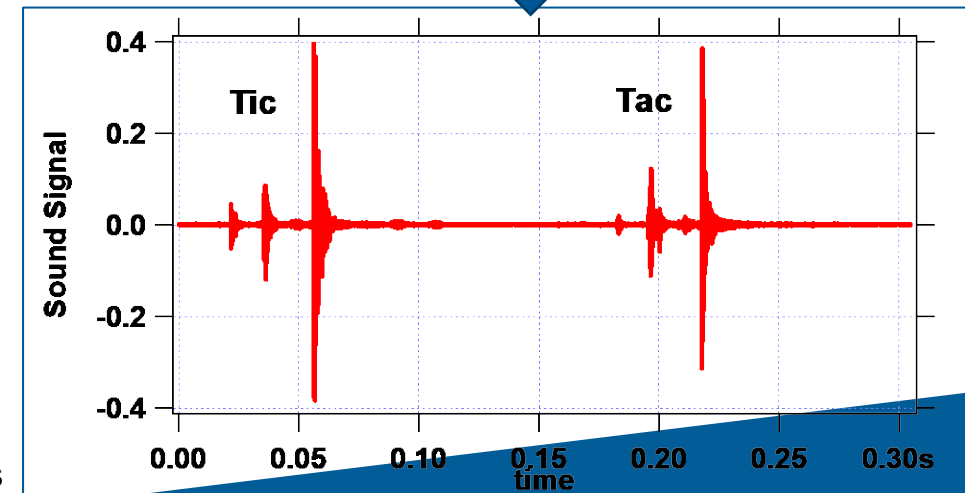
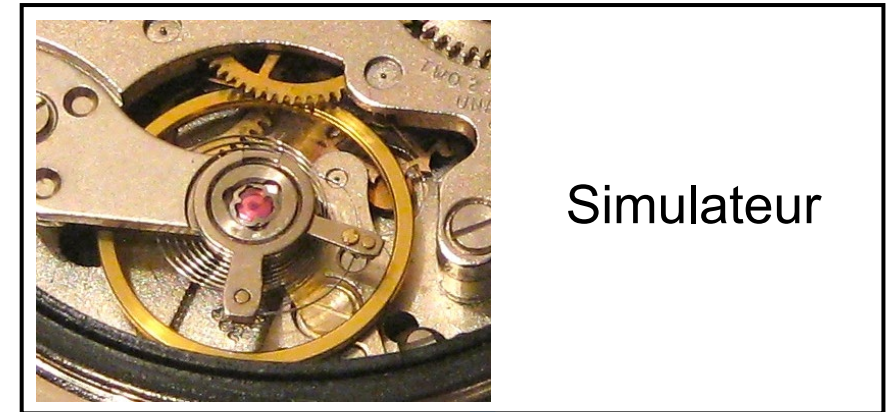
Par internet: ntp11.metas.ch

Par fibre optique:



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

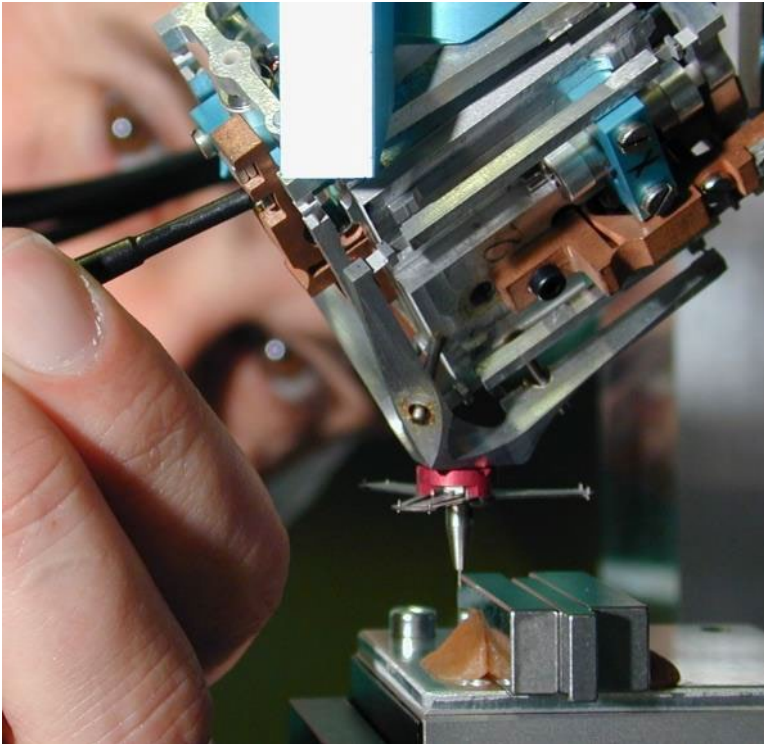
- Au laboratoire: Étalonnage de simulateurs d'horloges acoustiques



# Métrologie dimensionnelle

$\mu$ CMM

machines à mesurer tridimensionnelles



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

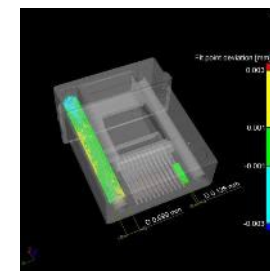
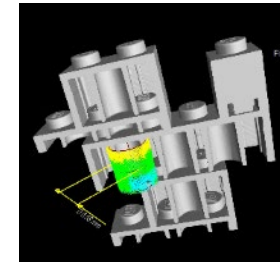
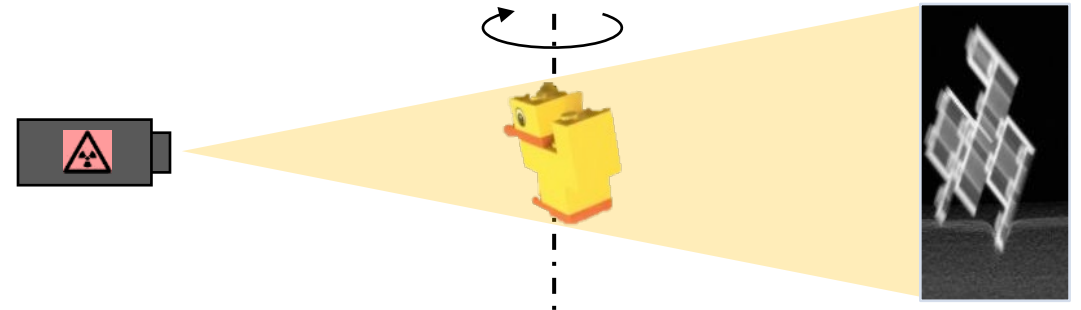
$\mu$ CT

tomodensitométrie

Source rayon X

Axe de rotation

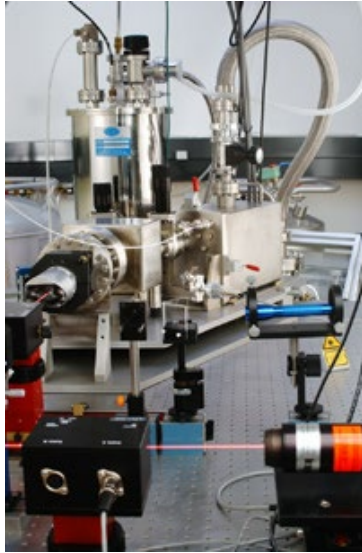
détecteur



Dimensions + incertitudes

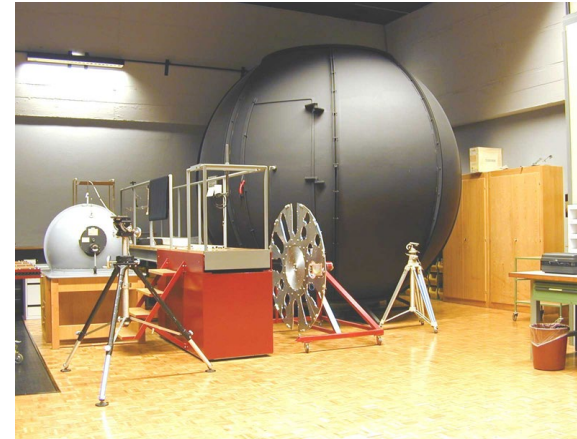
->prestations METAS

# Laboratoire Optique



Radiométrie  
Laser, UV...

Photométrie  
Lampes, Luminaires

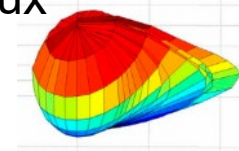
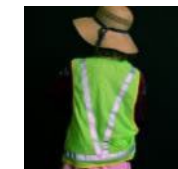
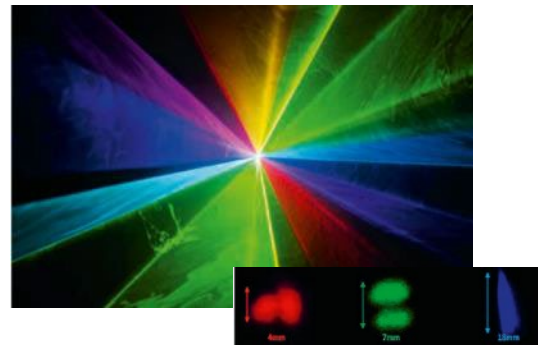


Evaluation des dangers  
liés aux sources  
optiques (Laser, UV,  
LED, ....)

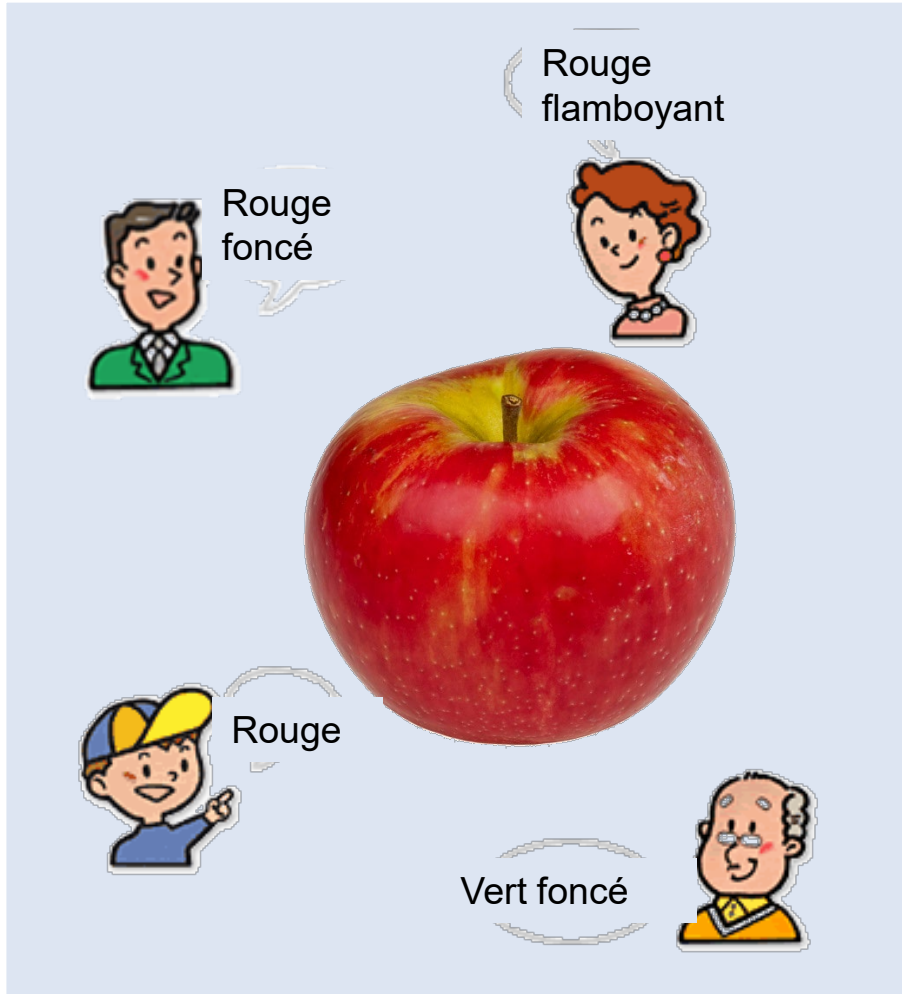


Evaluation et mesurages photométriques

Apparence des matériaux



# 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

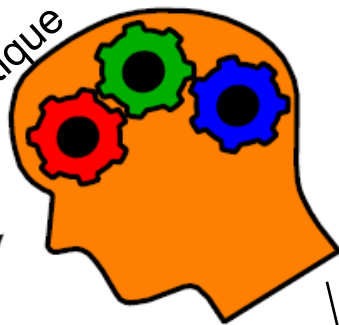
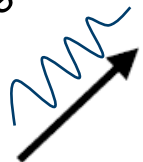
# Apparence

source



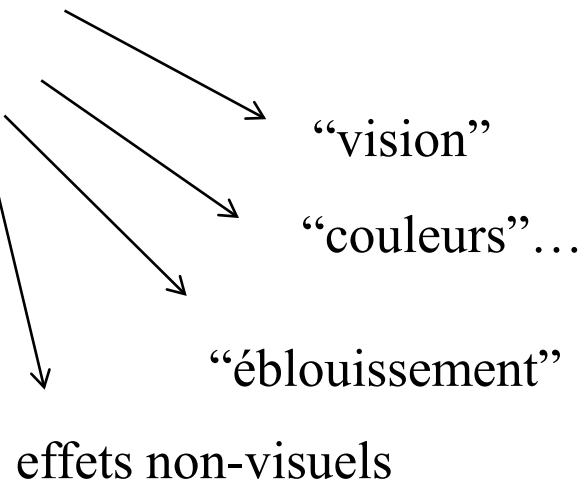
objet

rayonnement optique



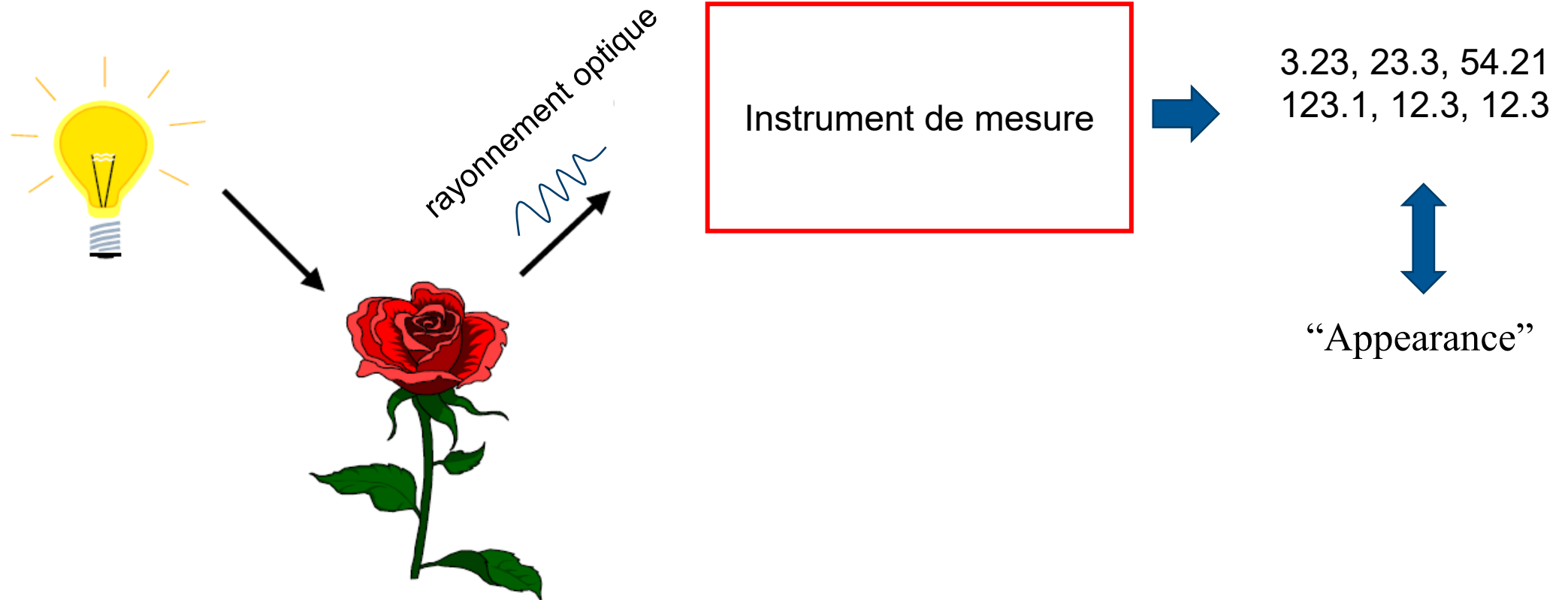
observateur

photorécepteurs, neurotransmetteurs ..

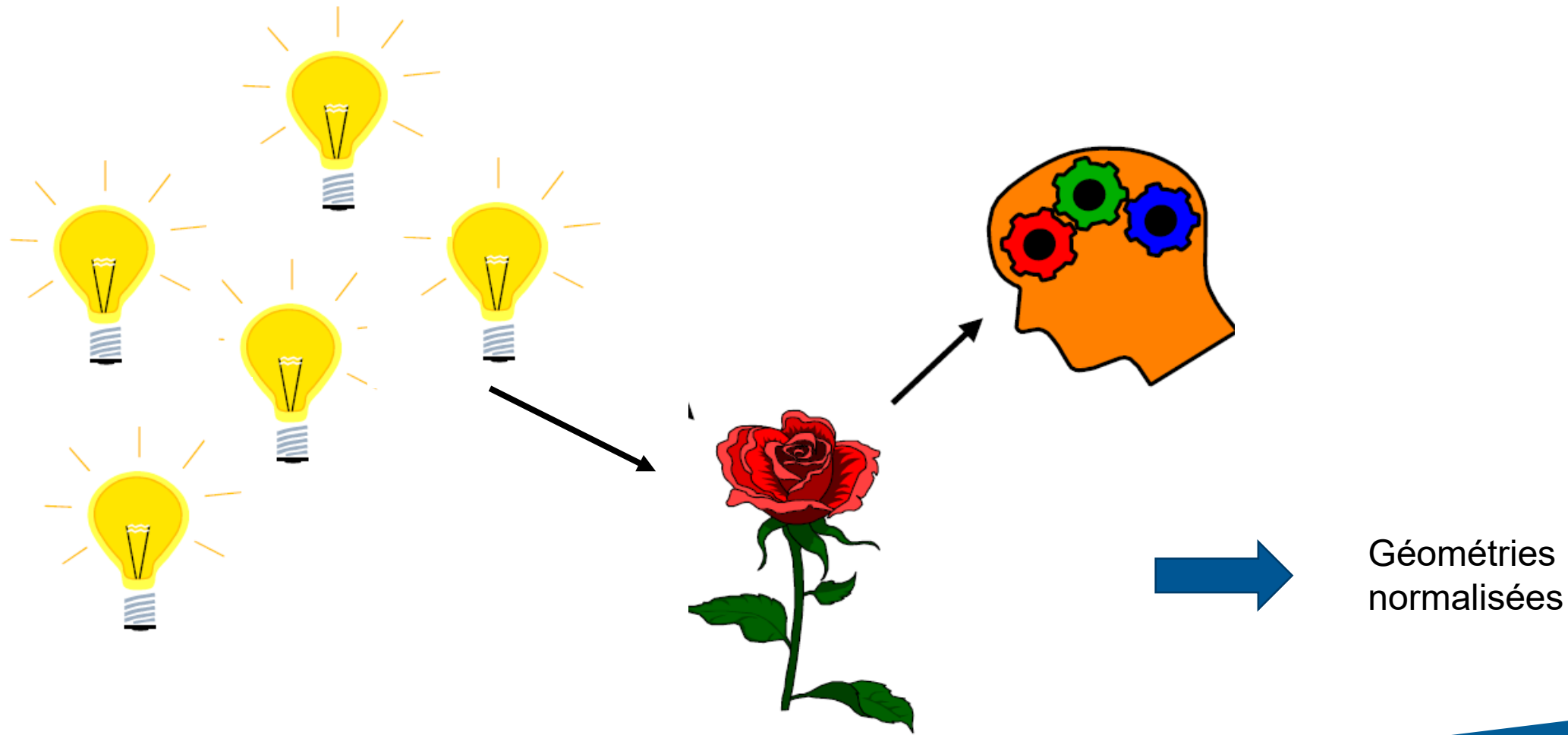




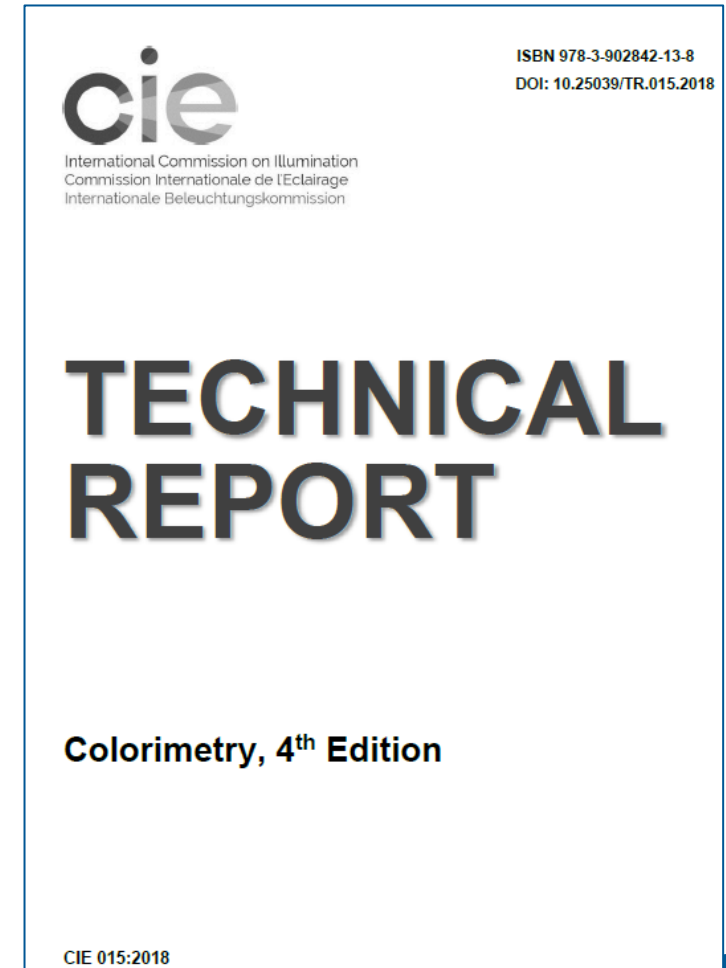
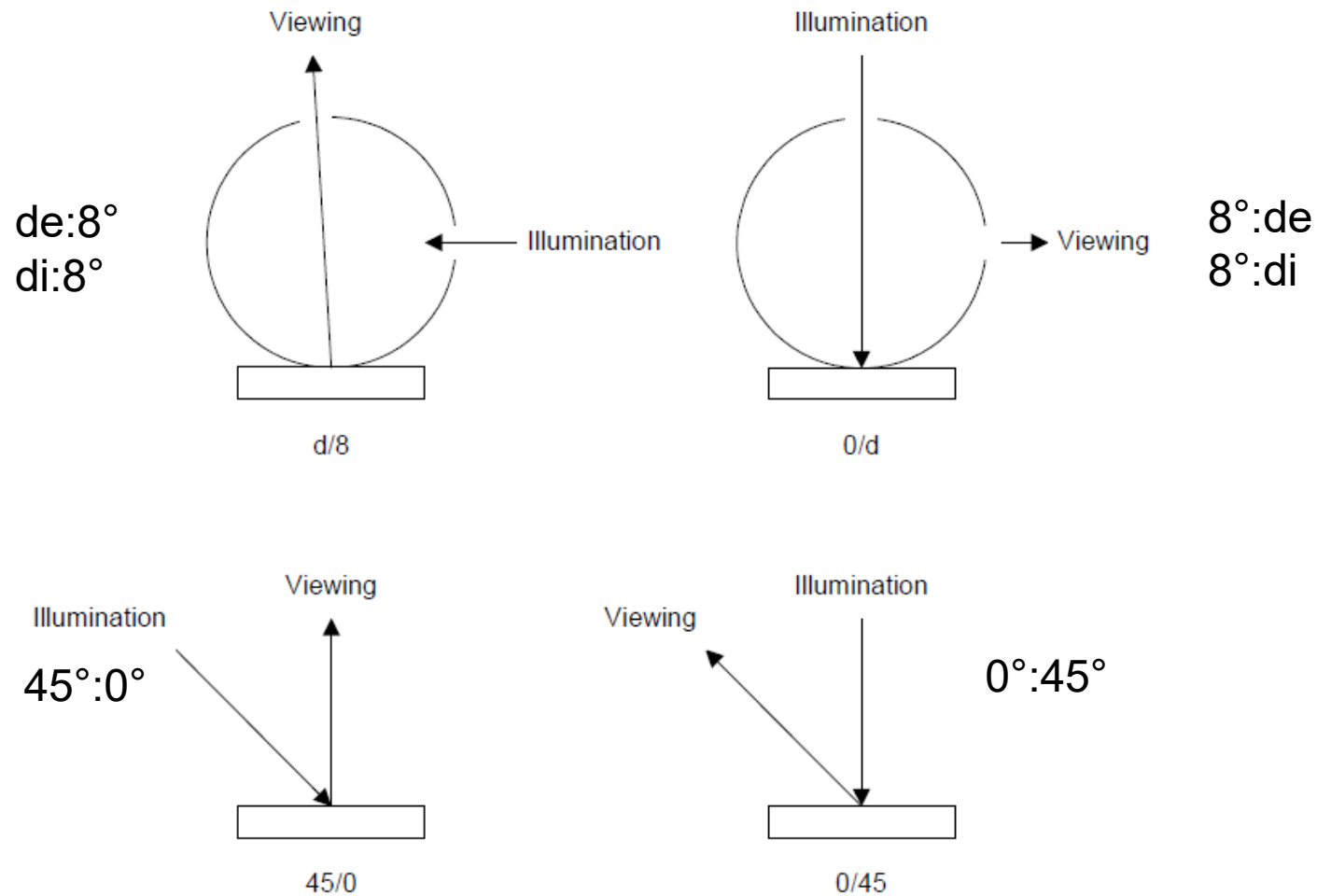
# Idée : transformer l'apparence en un ensemble de nombres



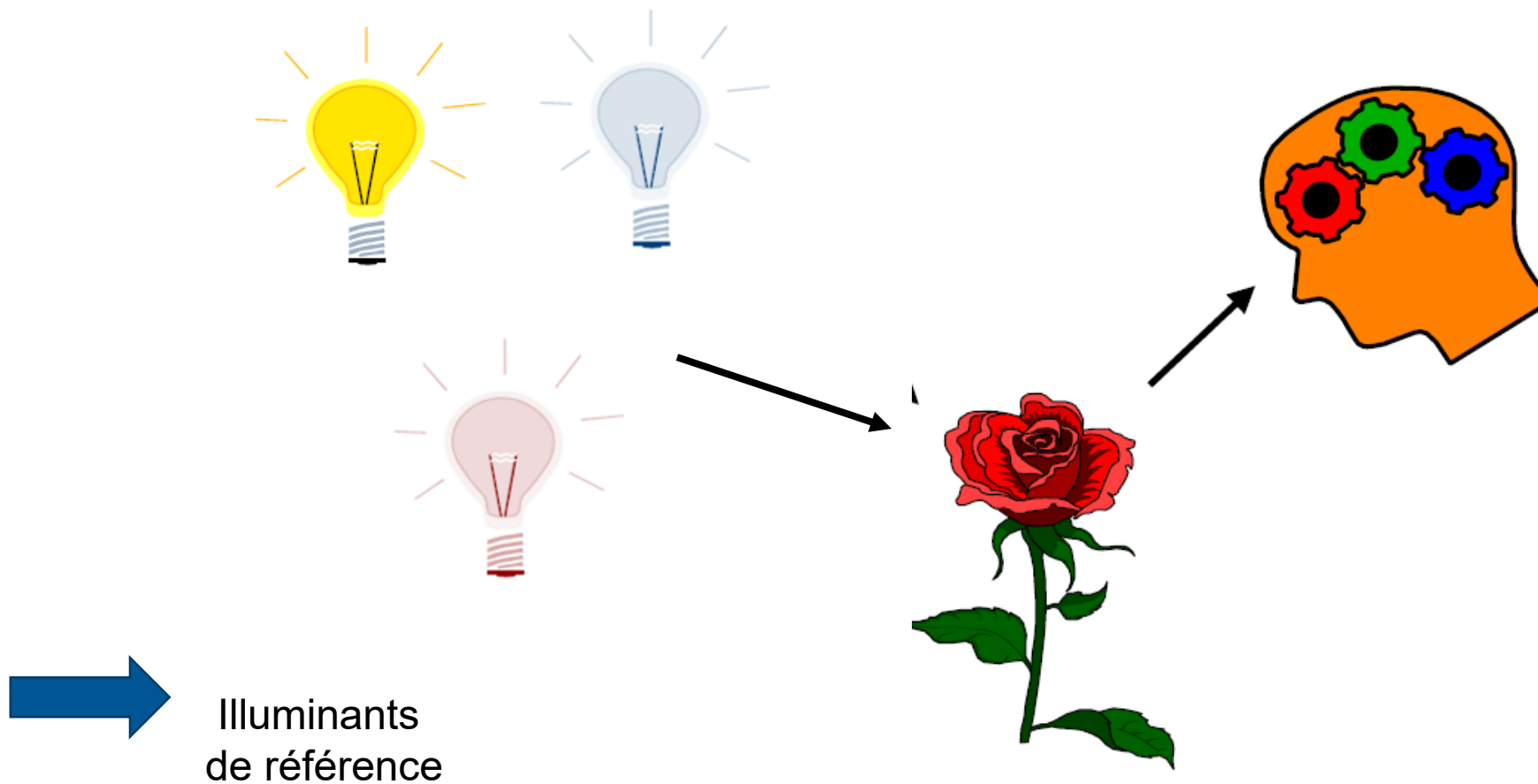
# Effets spatiaux de la source



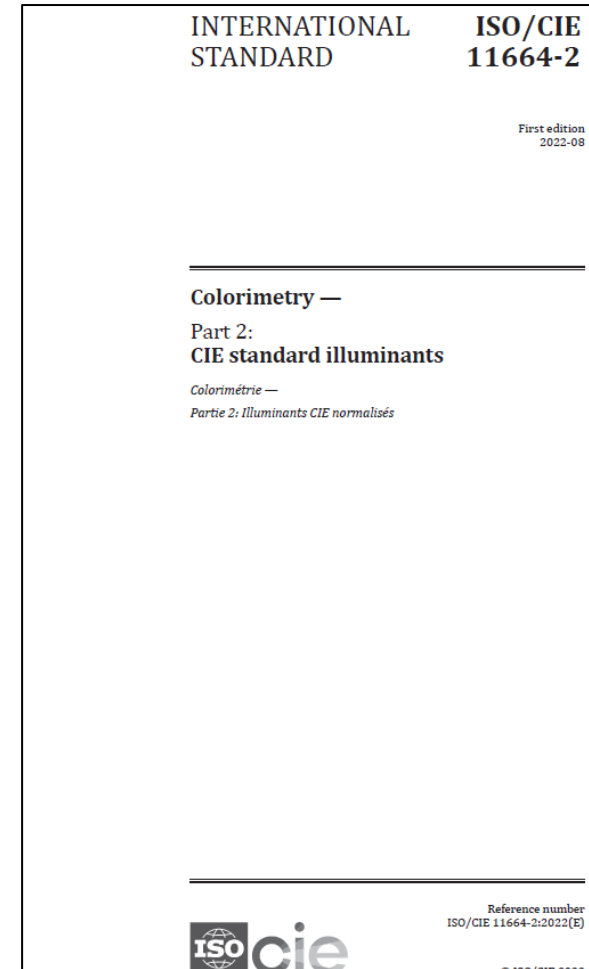
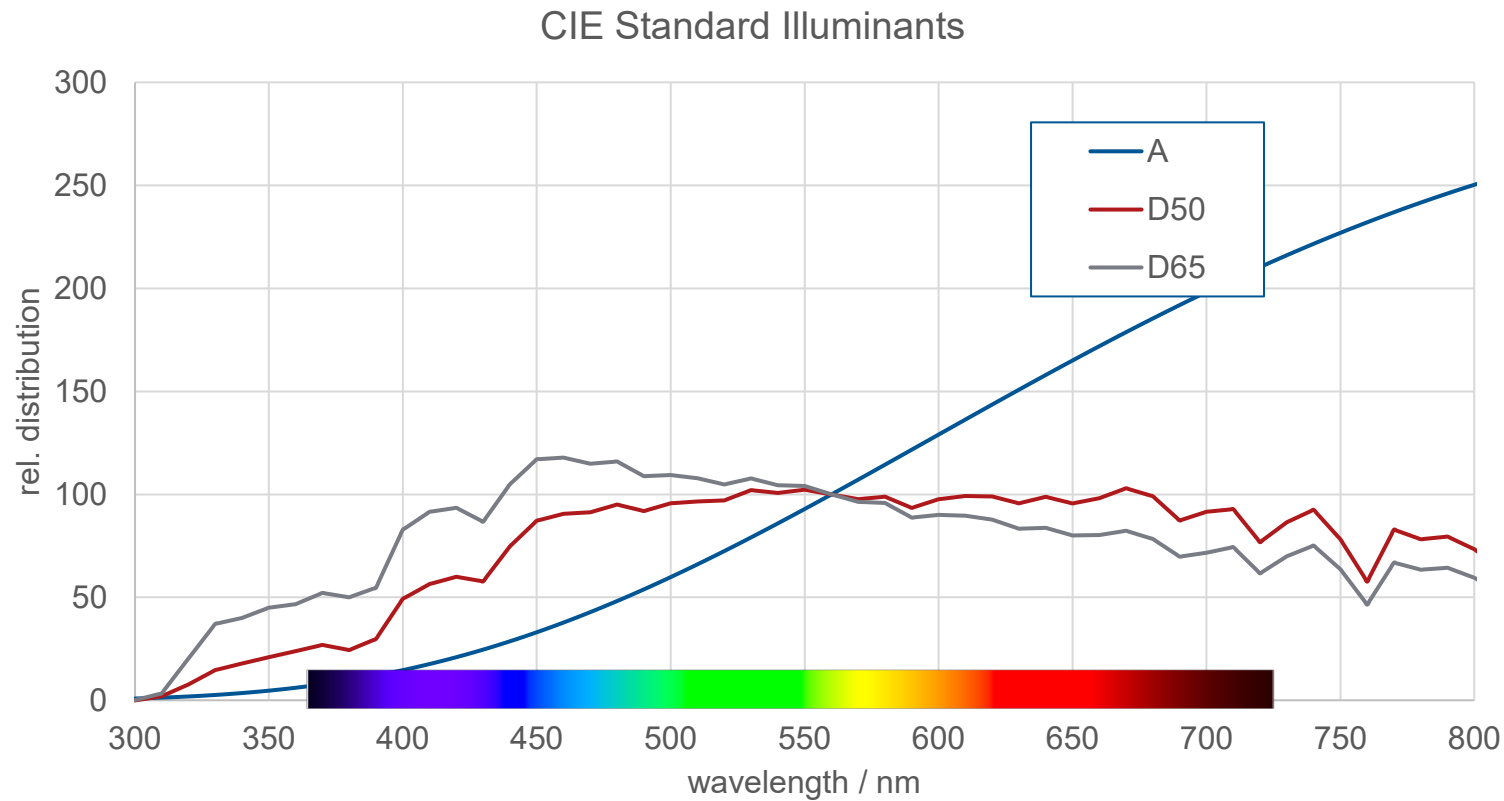
# Géométries normalisées : CIE 015:2018



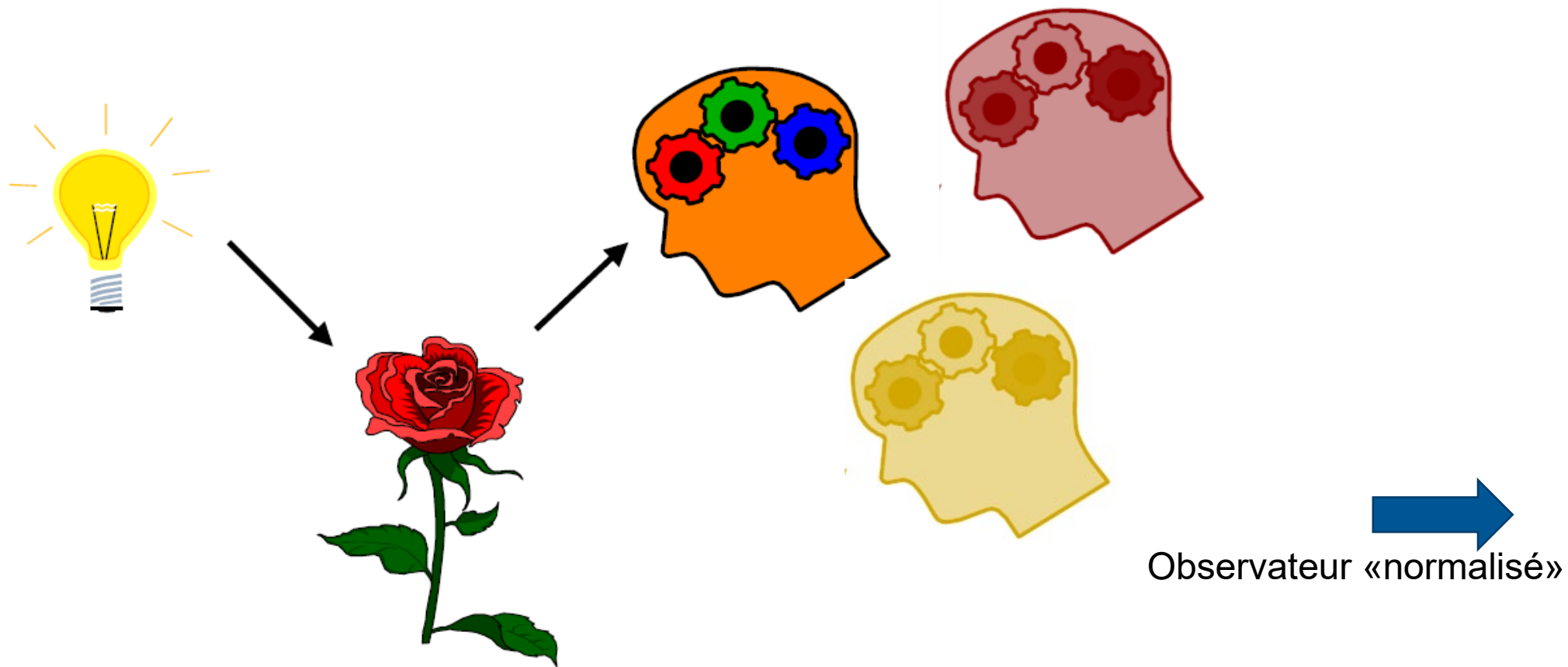
# effets spectraux de la source



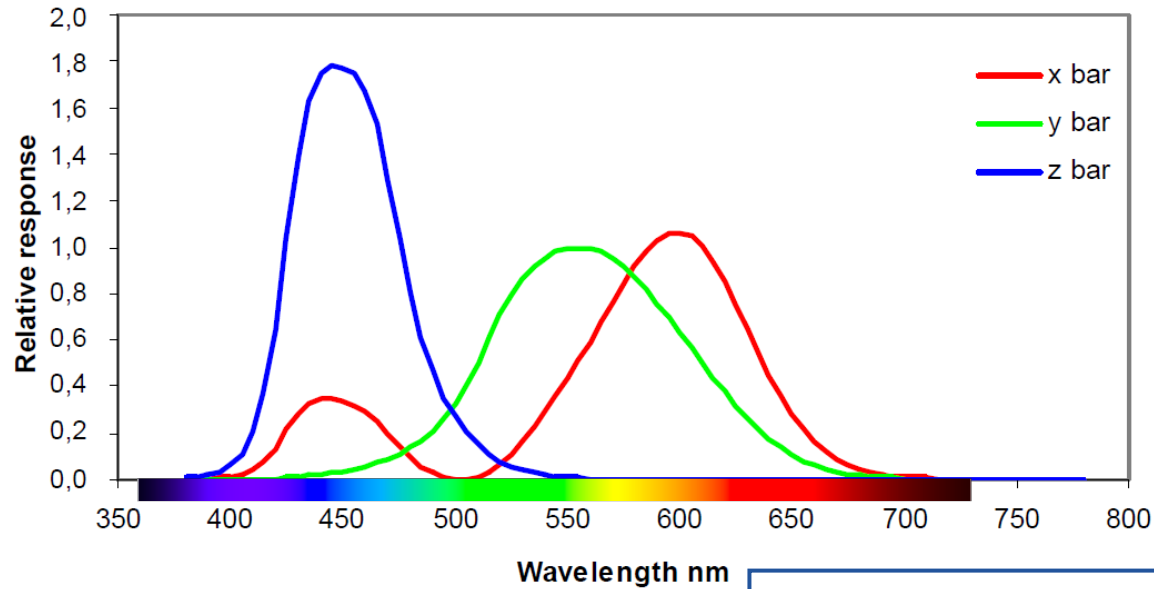
# Illuminants de référence: ISO/CIE 11664-2



# observateurs



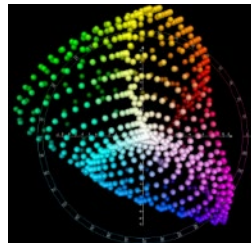
# Observateur «normalisé»: ISO/CIE 11664-1, ISO/CIE 11664-4



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

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

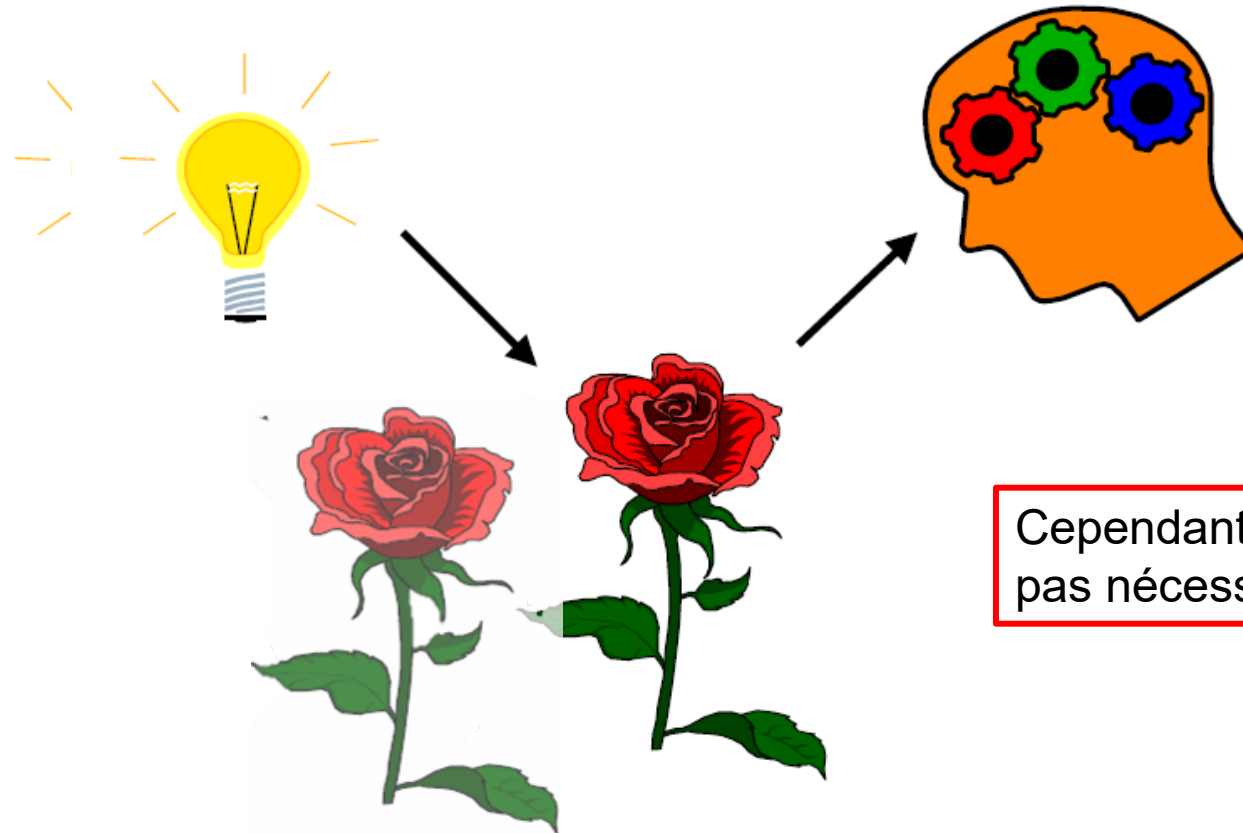


Reference number  
ISO/CIE 11664-1:2019(E)

© ISO/CIE 2019

# Colorimétrie classique (XX siècle)

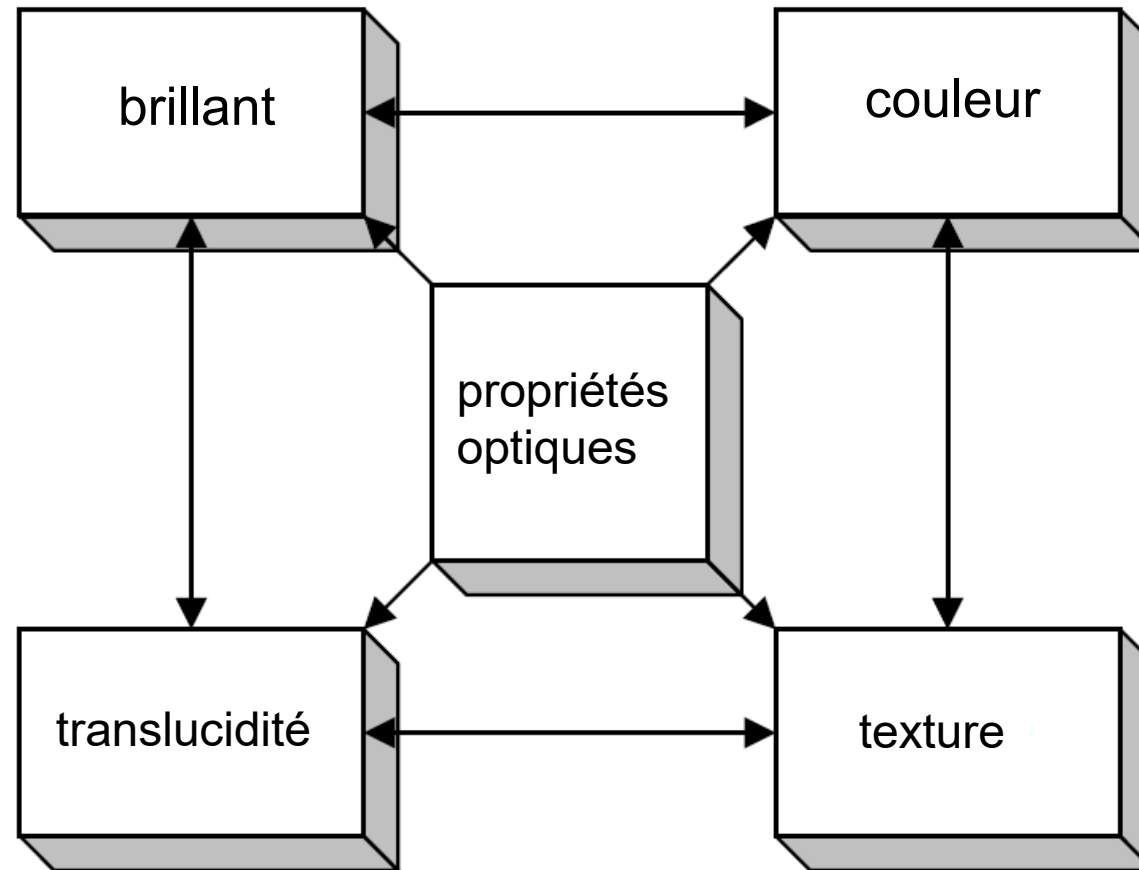
Géométrie fixe, observateur fixe, source fixe



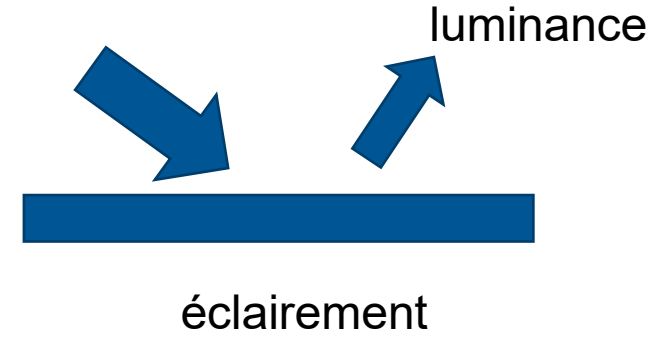
Cependant, les mêmes valeurs ne conduisent pas nécessairement à la même "apparence"



# 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

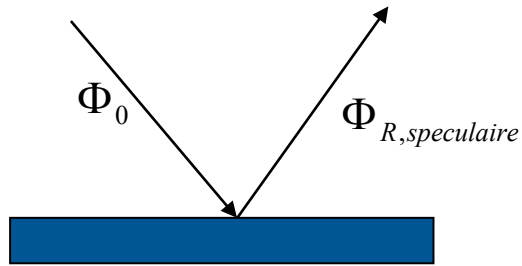
spectral

spatial

de polarisation

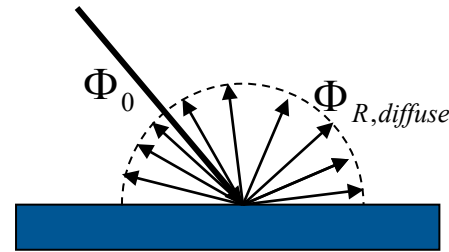
**Instrument de mesure ???**

# Effet directionnel: type de réflexion



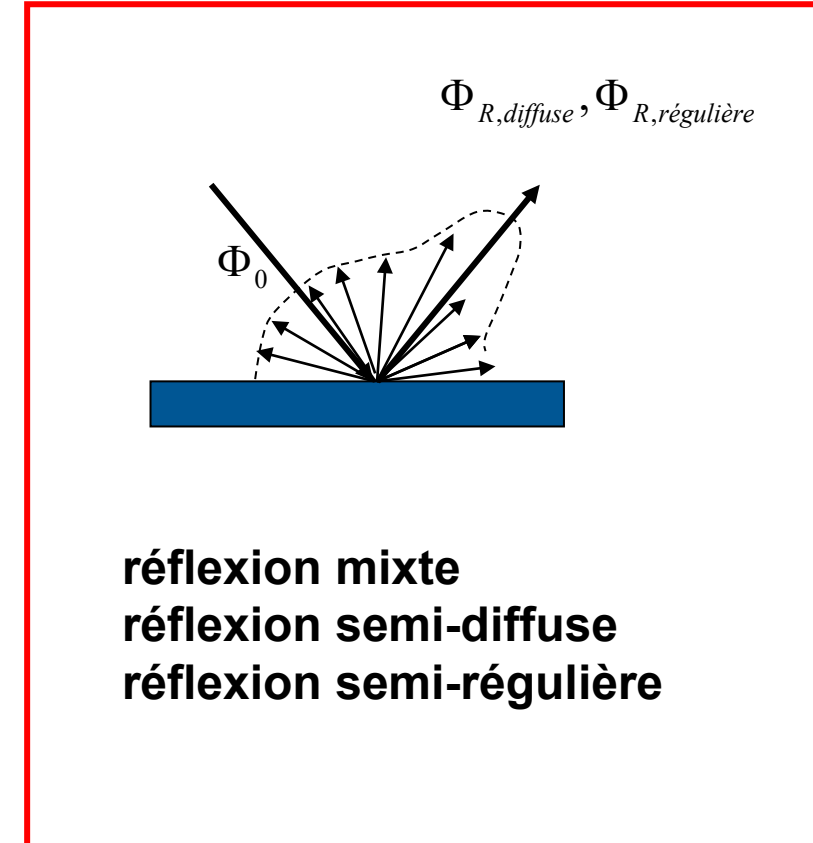
**réflexion régulière**  
**réflexion spéculaire**

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



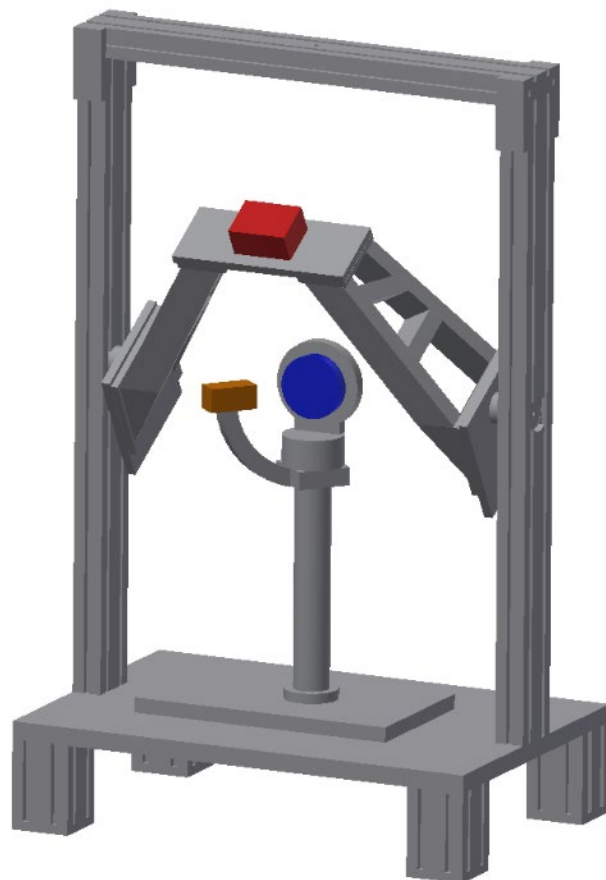
**réflexion diffuse isotrope**  
**réflexion diffuse uniforme**

luminance constante dans toute les directions

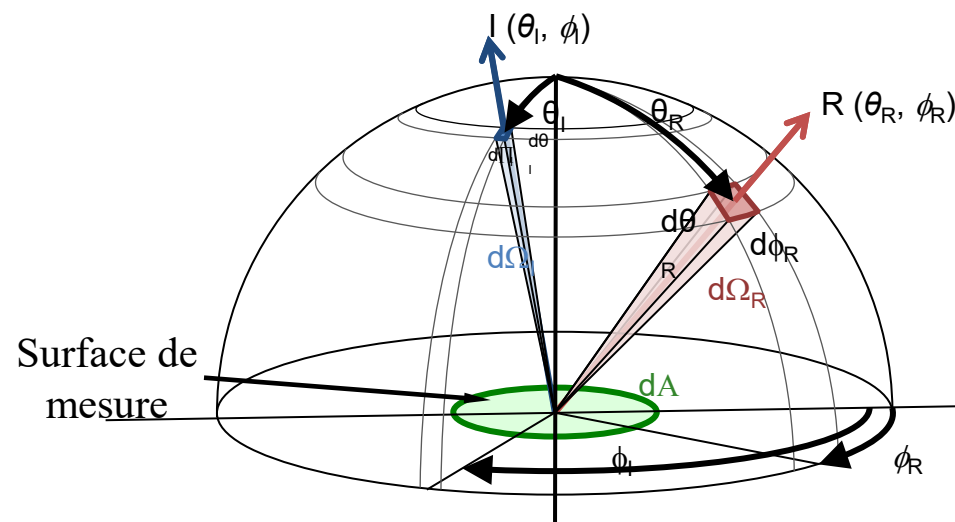


**réflexion mixte**  
**réflexion semi-diffuse**  
**réflexion semi-régulière**

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



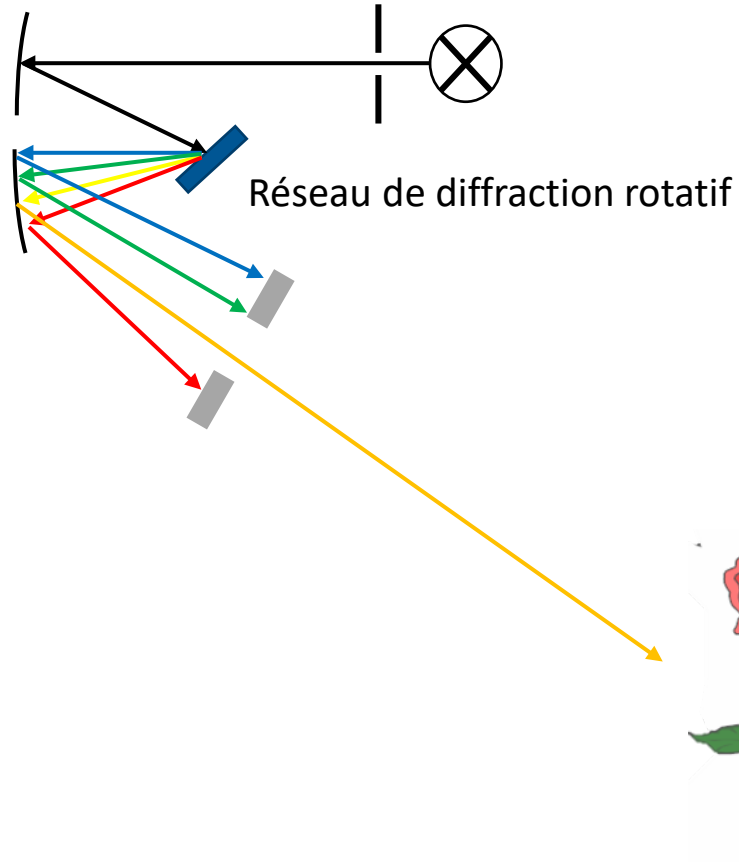
Goniomètre à 4 axes



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

# Effet spectral: matériaux non-fluorescents

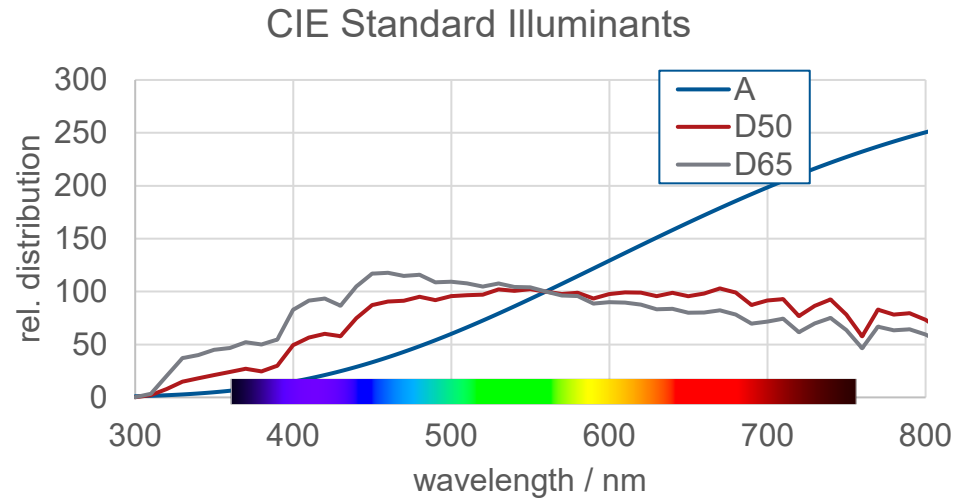
Source monochromatique,  
accordable



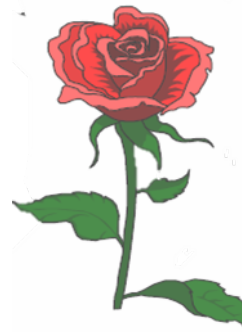
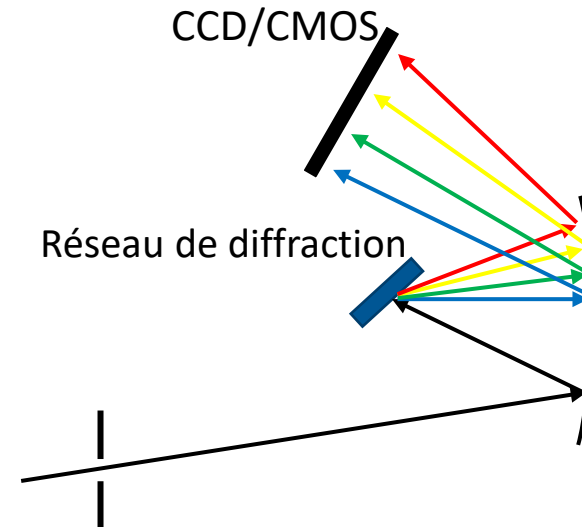
radiomètre



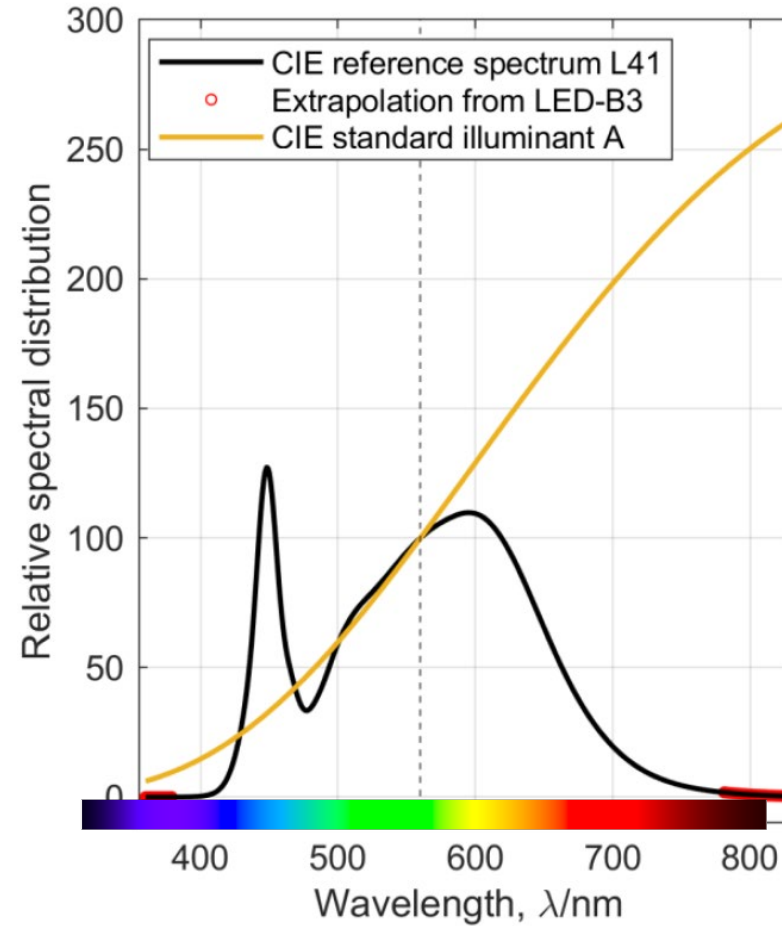
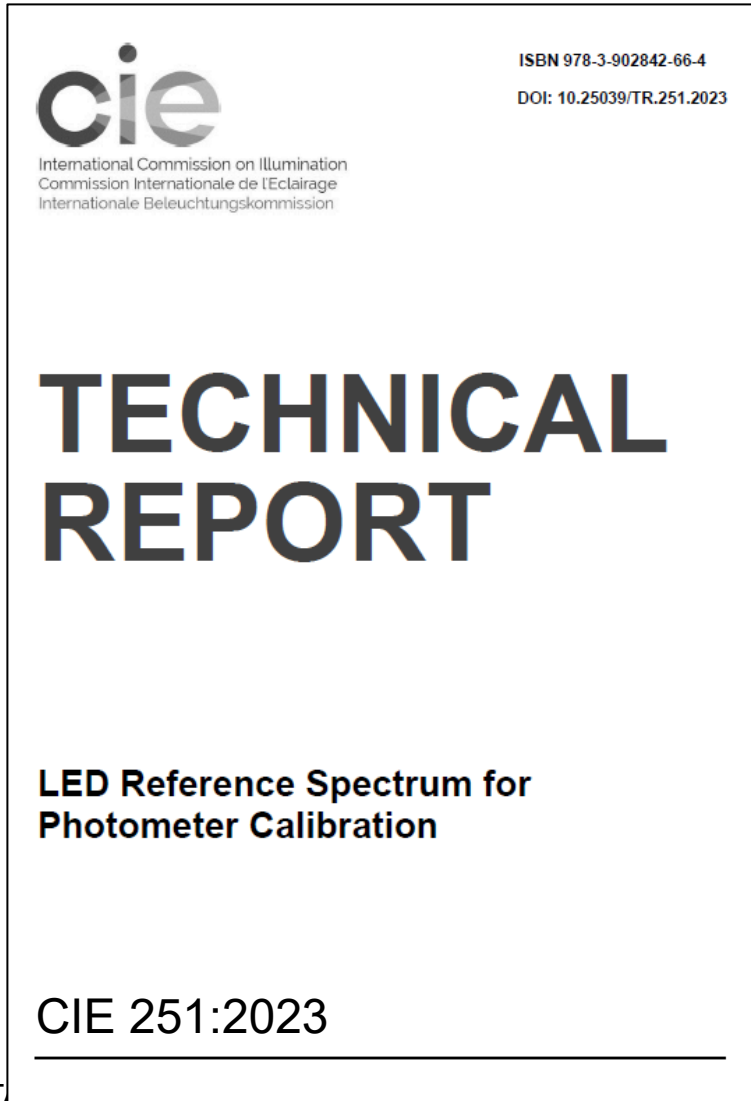
# Effet spectral: matériaux non-fluorescents



spectroradiomètre



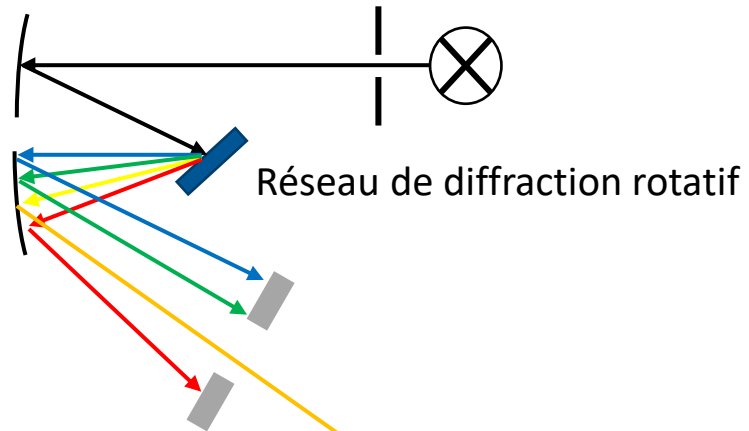
# Nouveau spectre de référence (LED)



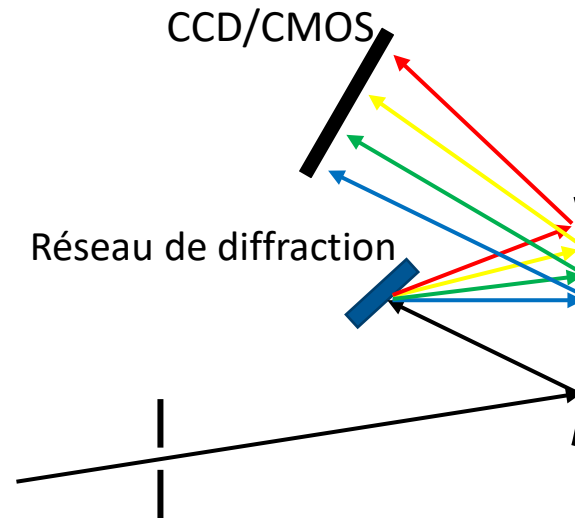
+12 spectres LED  
CIE 015:2018

# Effet spectral: matériaux fluorescents

Source monochromatique,  
accordable

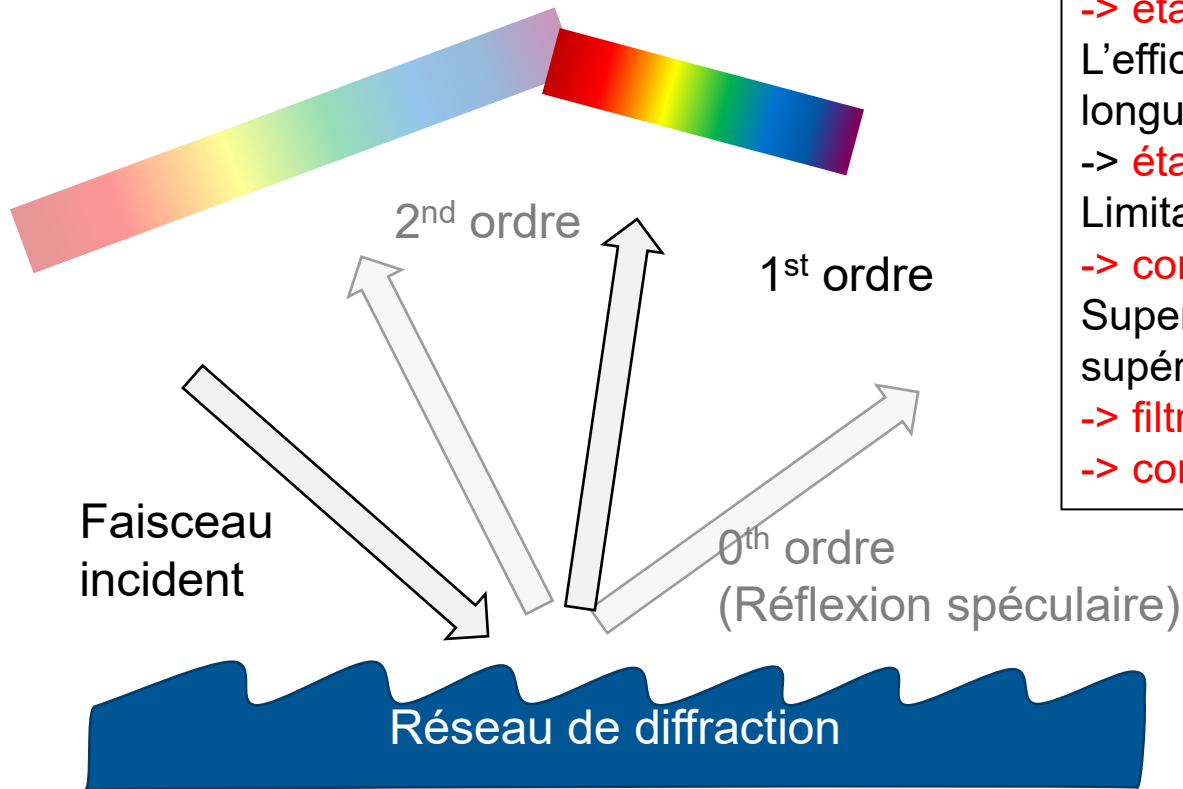


spectroradiomètre





# 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

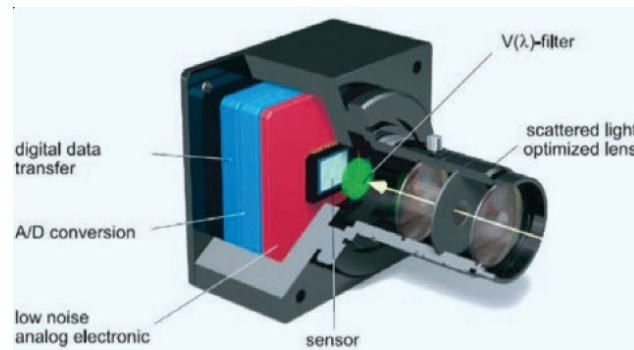
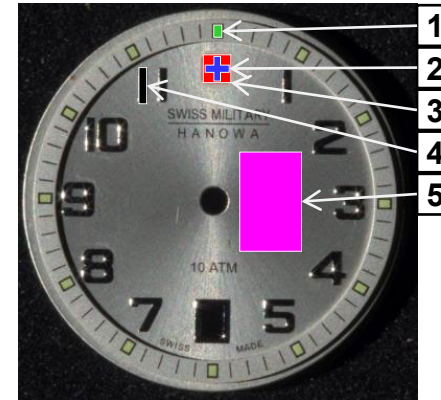
Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers

CIE 233:2019

UDC: 535.24  
535.243

Descriptor: Photometry  
Spectrophotometry

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

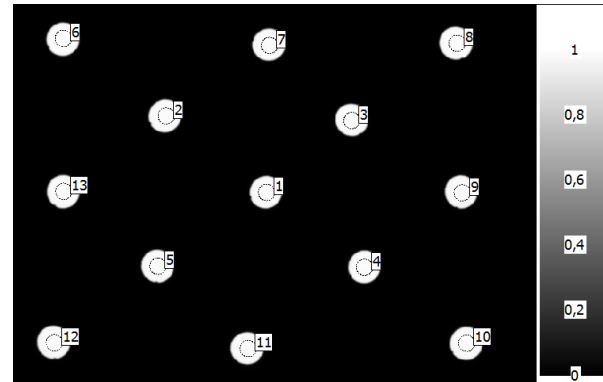


Plusieurs régions d'intérêt peuvent être sélectionnées

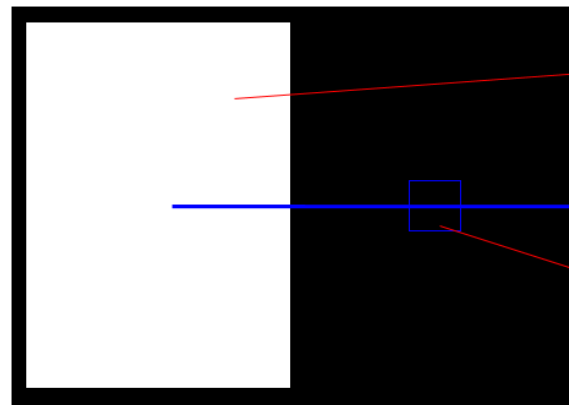
# CIE 244 : Indices de qualité des caméras

## Mesures d'uniformité de luminance

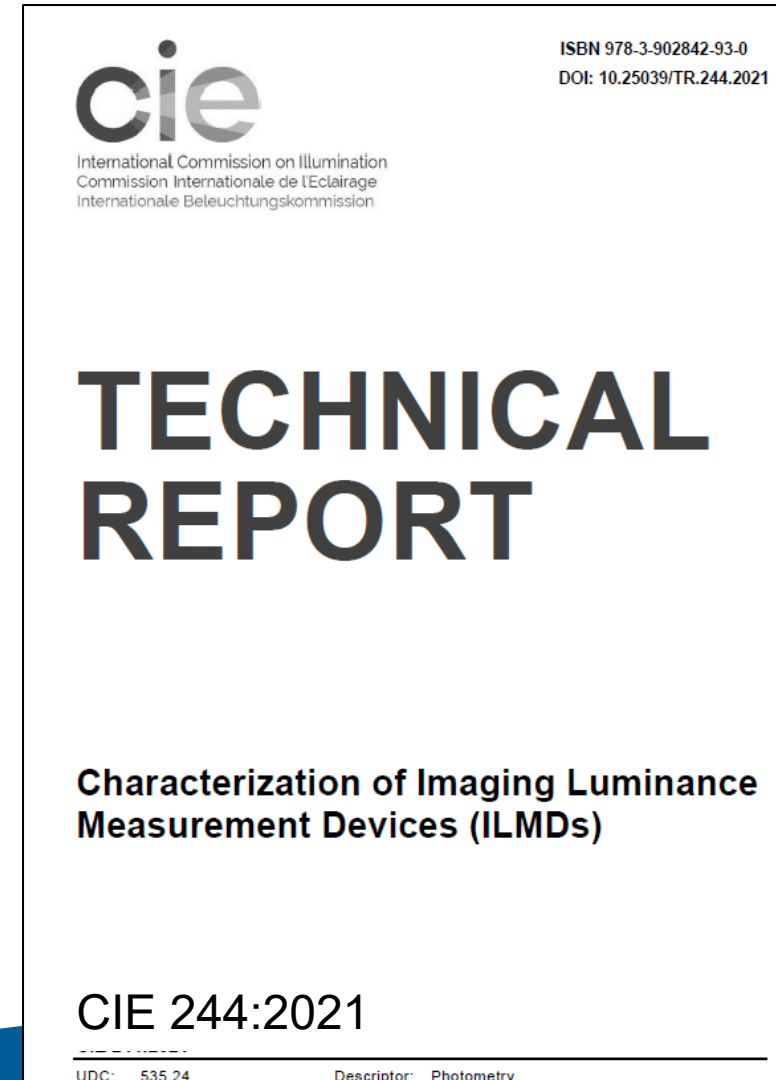
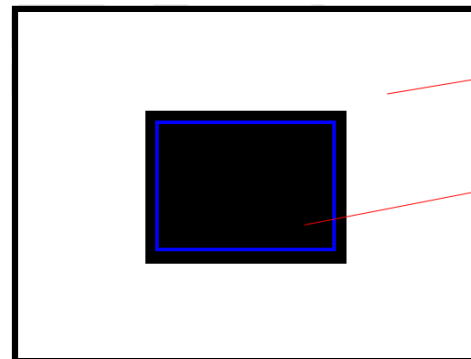
Symbol	Description
$f_{12}$	Responsivity uniformity for flat field
$f_{22}$	Responsivity uniformity for spots
$f_{23}$	Effect of surrounding field
$f_{24}$	Stray light influence for negative contrast
$f_{25}$	Edge function
$f_{26}$	Influence of smear
$f_{27}$	Shutter repeatability
$f_{28}$	Aperture repeatability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



Effet du champ environnant



Effet de bord



# Goniomètre & source accordable & caméra (x, y, z) -> METAS : $\mu$ 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  $\mu\text{m}/\text{pixel}$

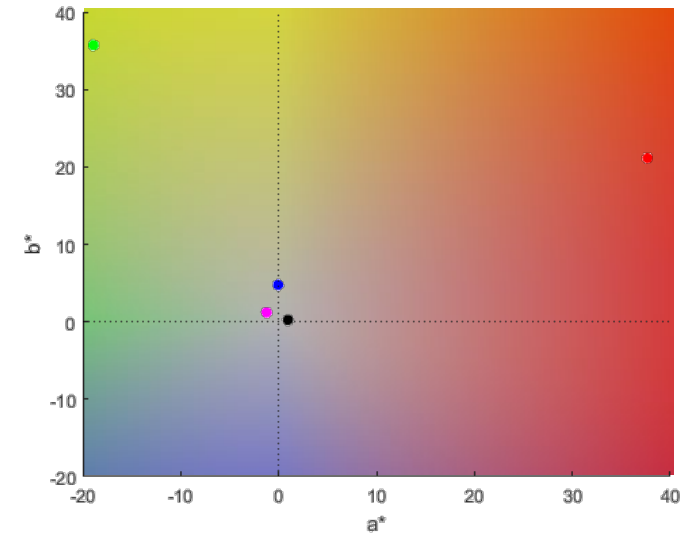
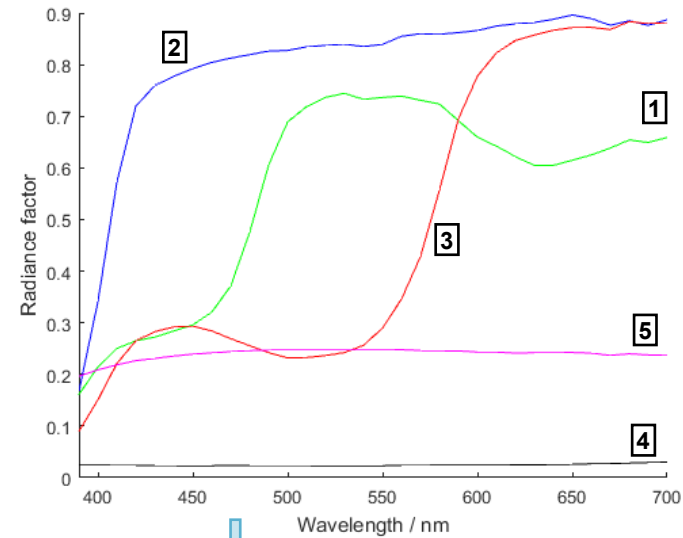
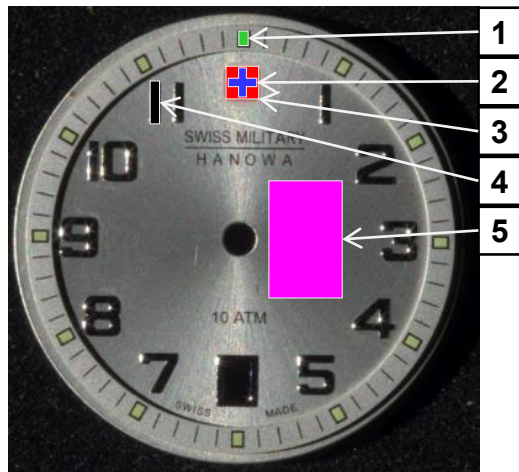
## Avantages:

- polyvalent
- instrument de référence

## Inconvénient:

- grands ensembles de données
- de longs temps de mesure

# Mesure d'objets hétérogènes

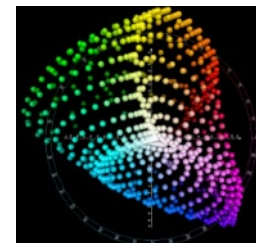


Représentation 2D

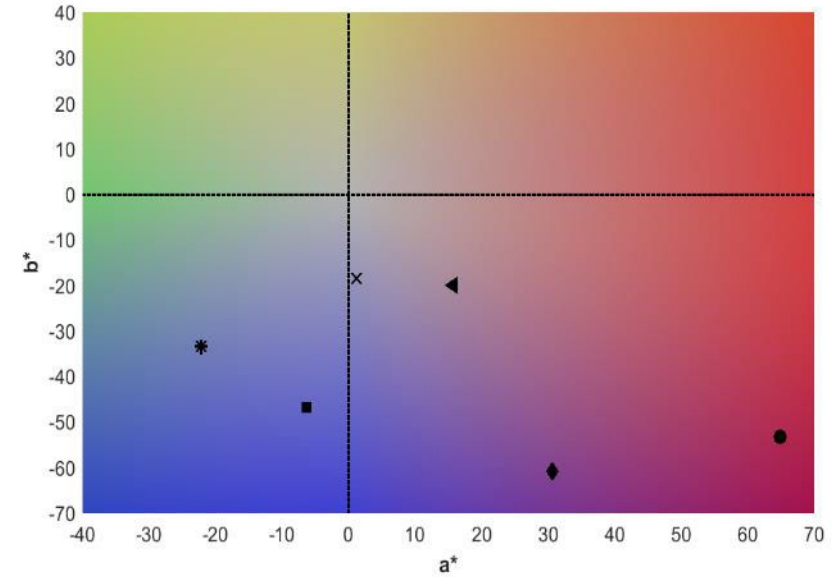
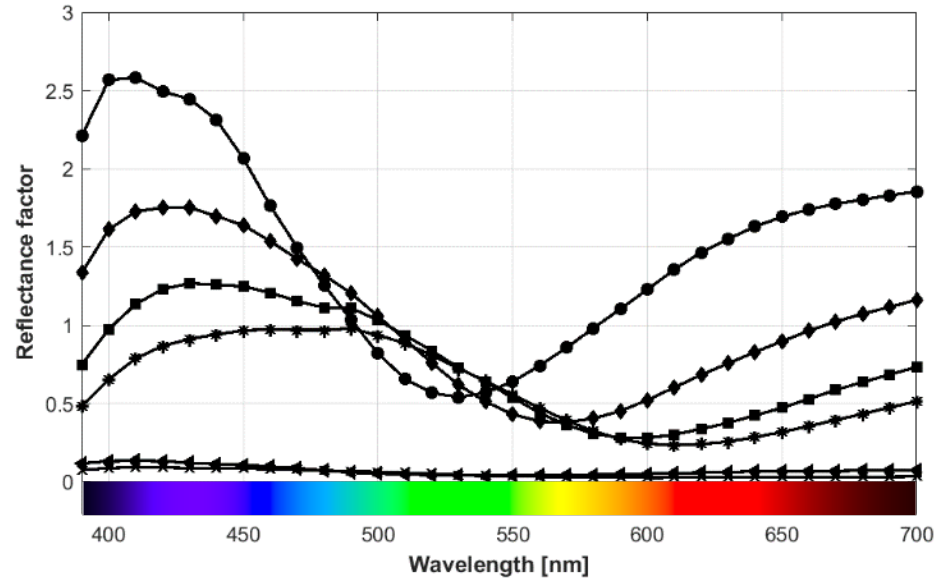
CIE Colour Coordinates:

$L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$

3D space



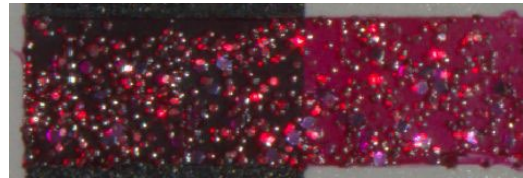
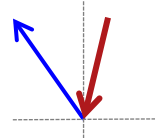
# Mesure d'objets goniochromatiques



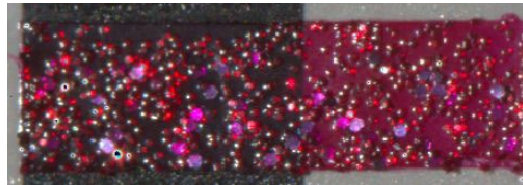
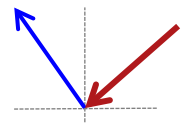
# Mesure de sparkle

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

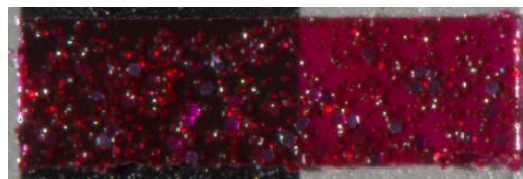
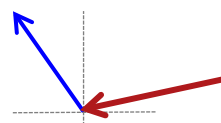
15° : -30°



45° : -30°



75° : -30°



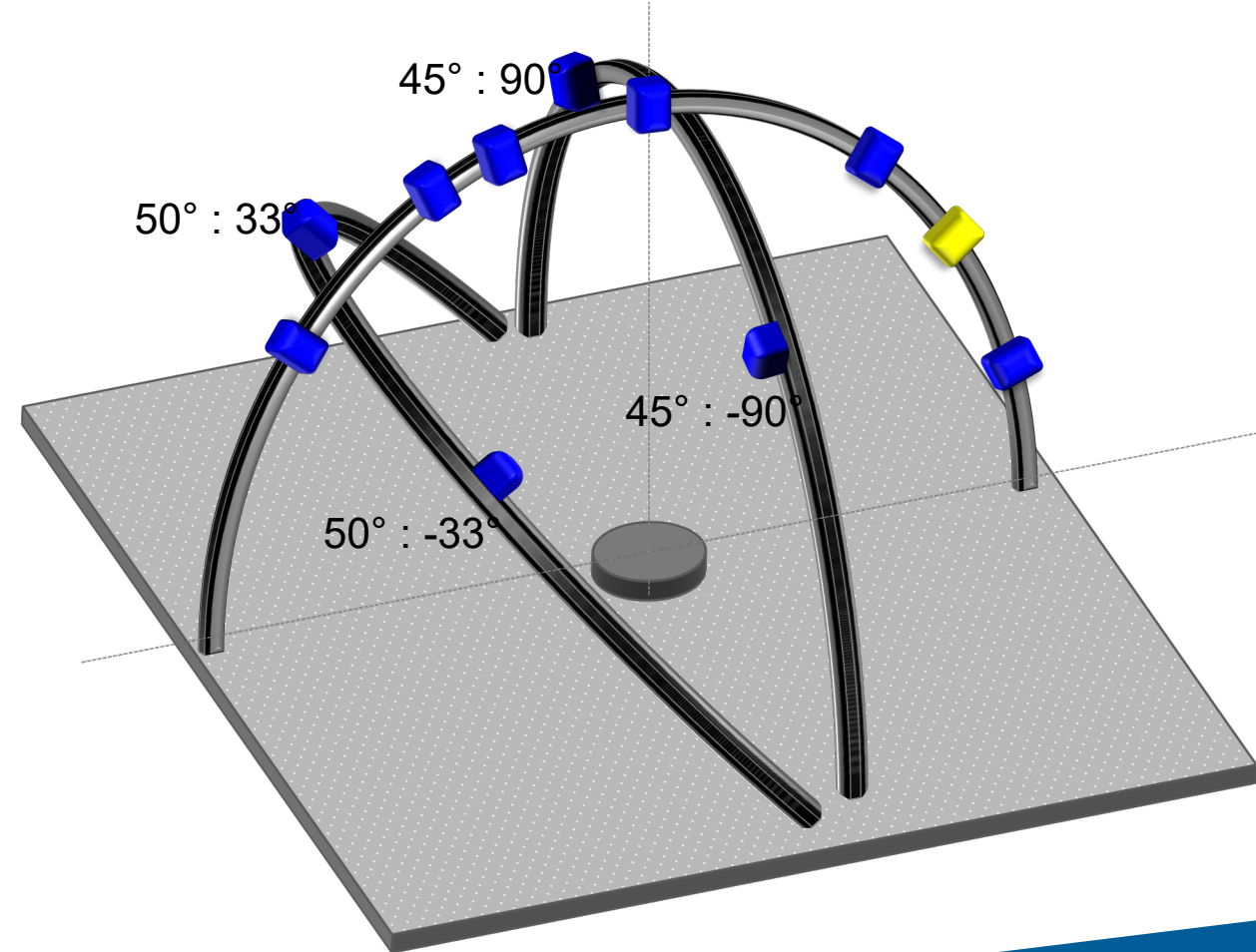
20 mm

# Multi-angle Reflectance Setup – MARS



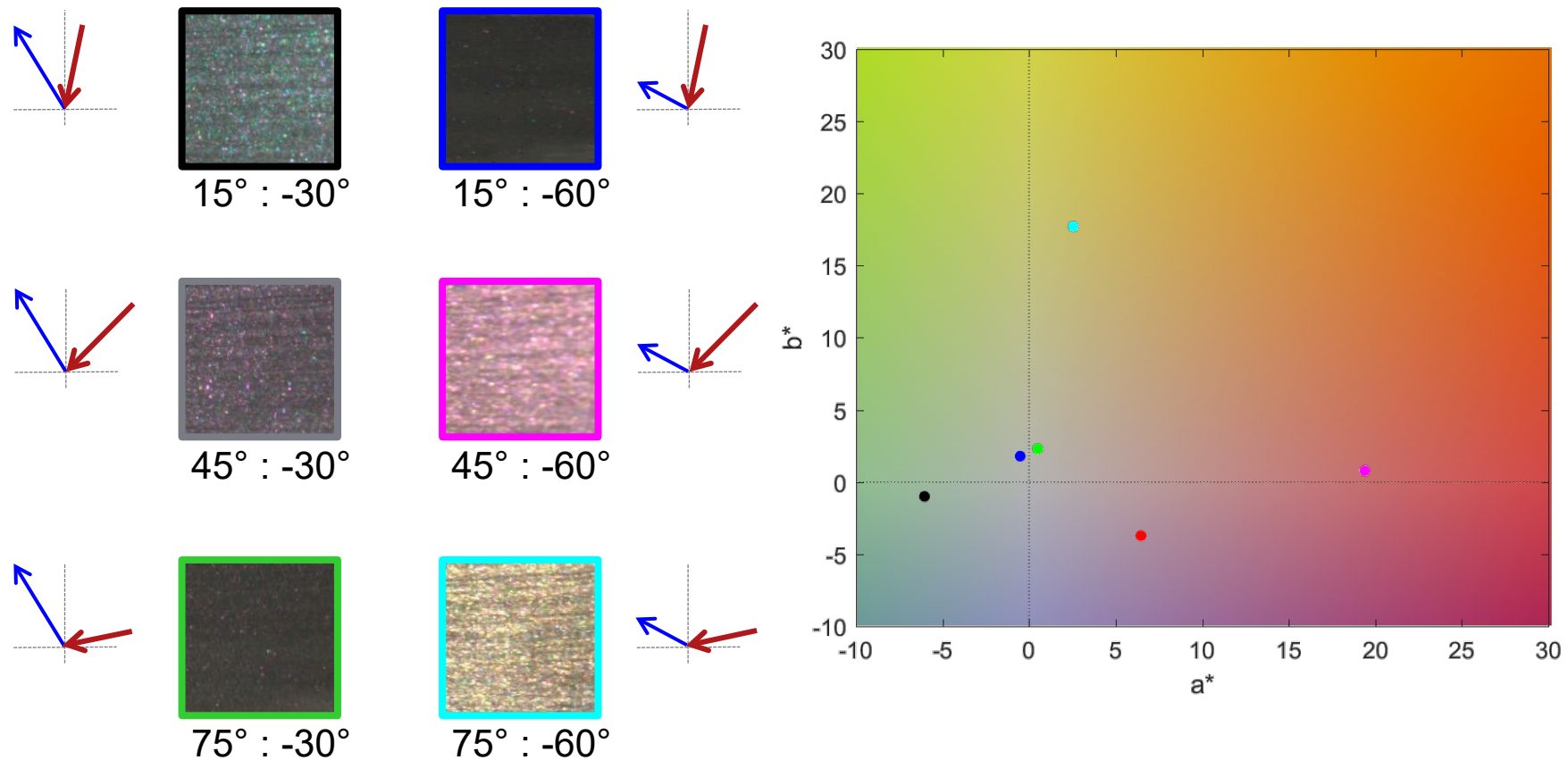
Mesures de réflectance multi-angles  
résolues spatialement et spectralement

- Coefficient de luminance spectrale à 29 géométries
- Taille maximale de l'échantillon de ~30 mm
- Haute résolution spatiale (42  $\mu\text{m}$ /pixel)



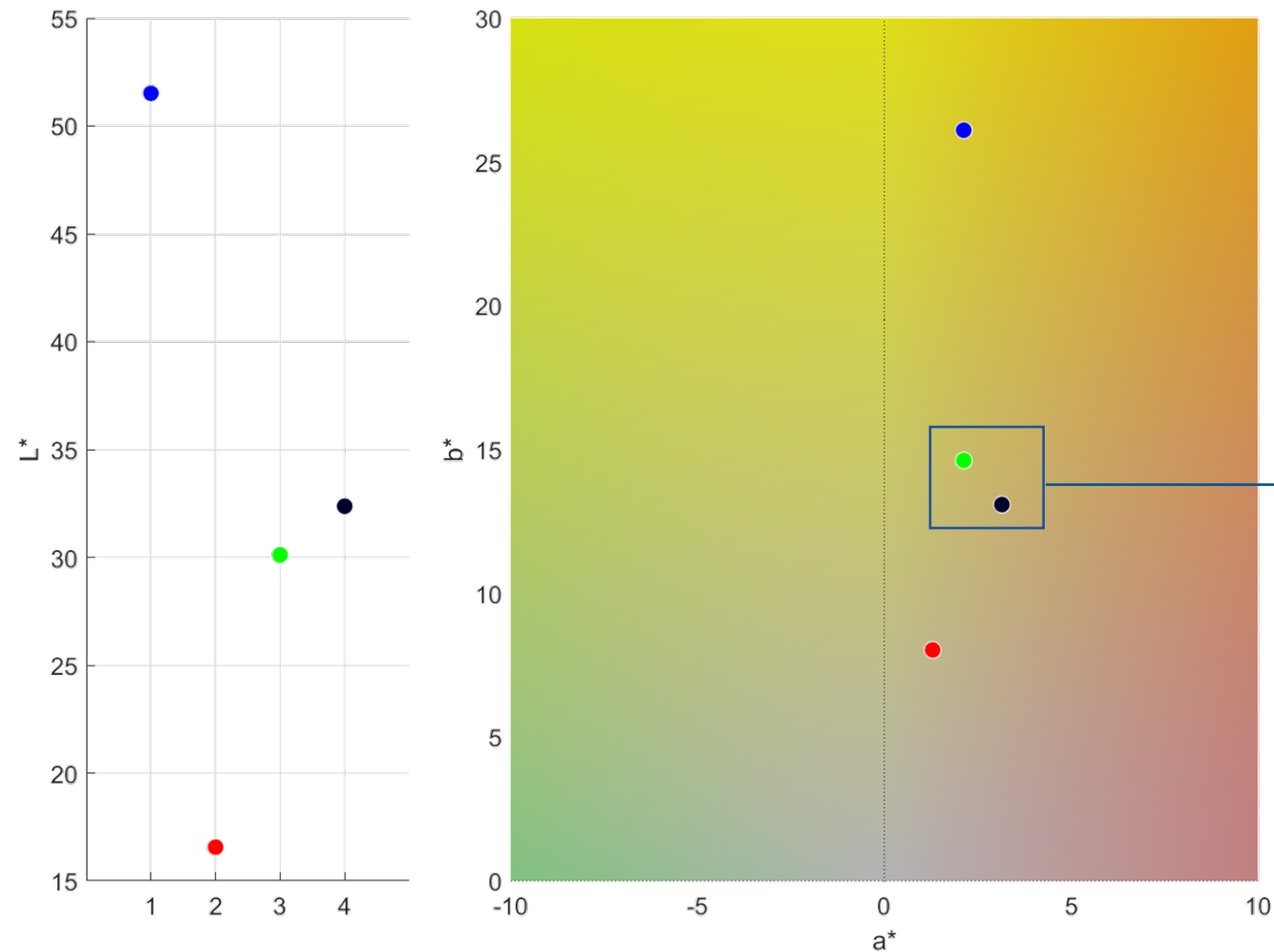
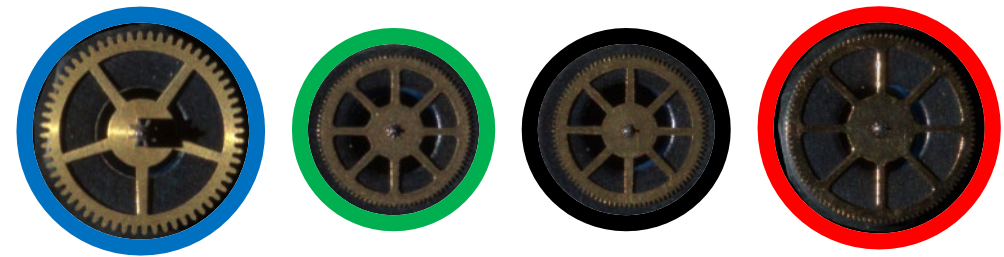


# Mesure d'échantillons goniochromatiques

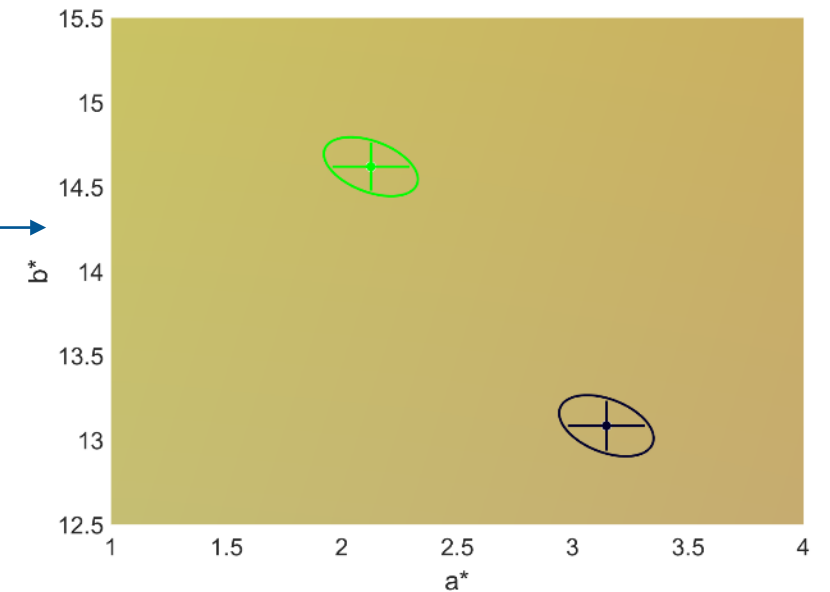


Le vernis à ongles goniochromatique change de couleur avec l'angle de vision et d'éclairage.

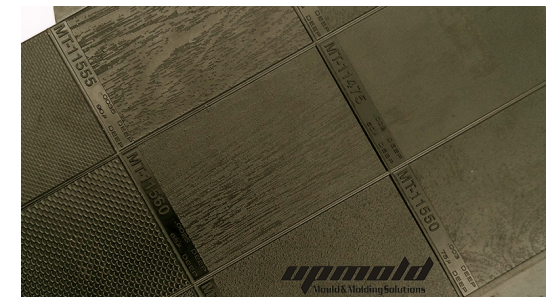
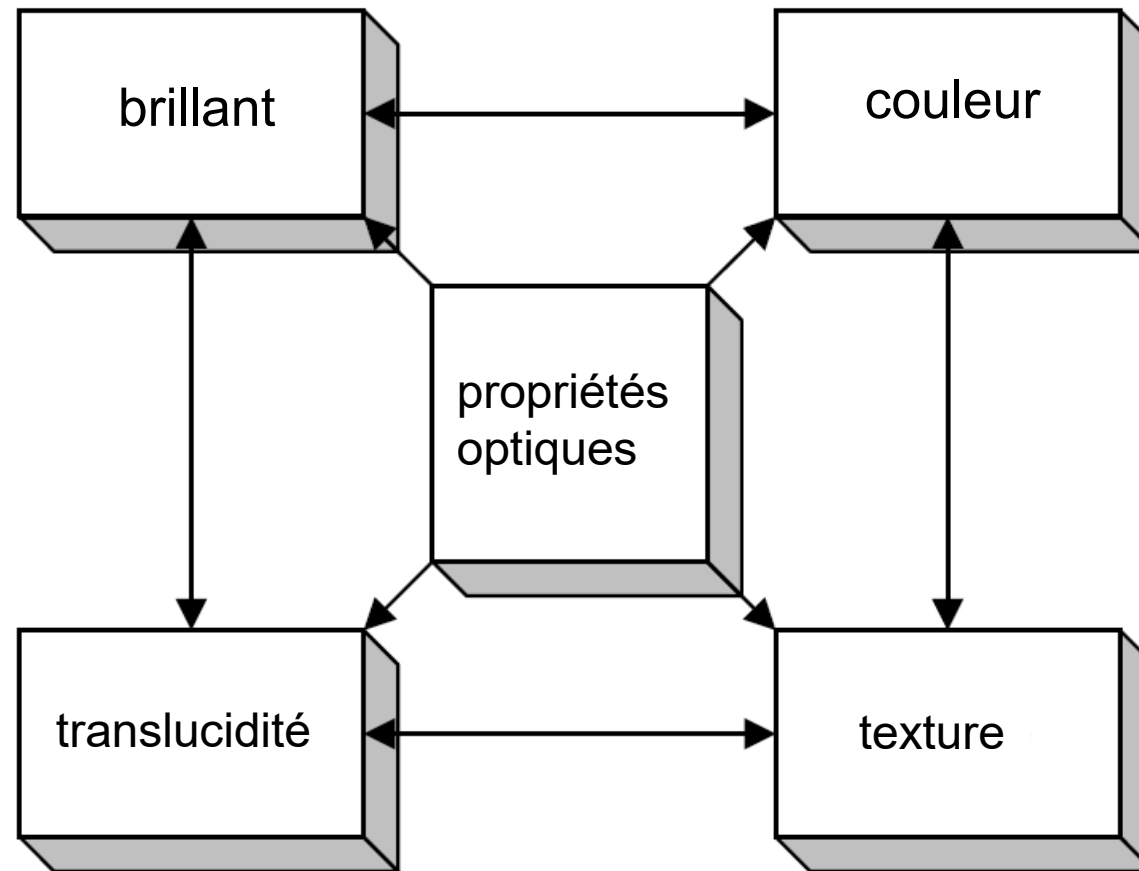
# Mesure de petits objets



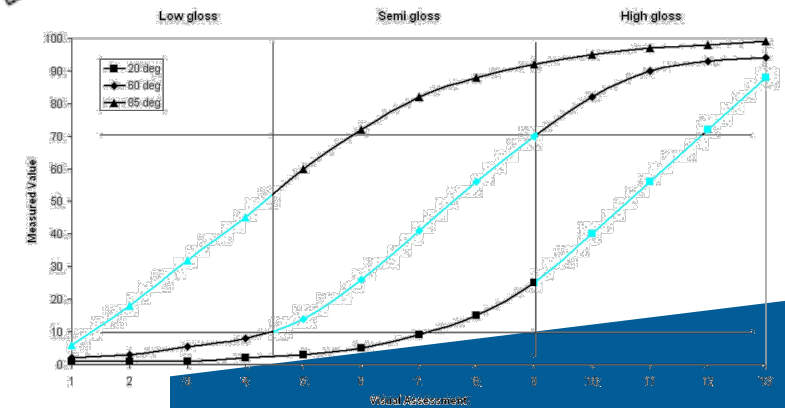
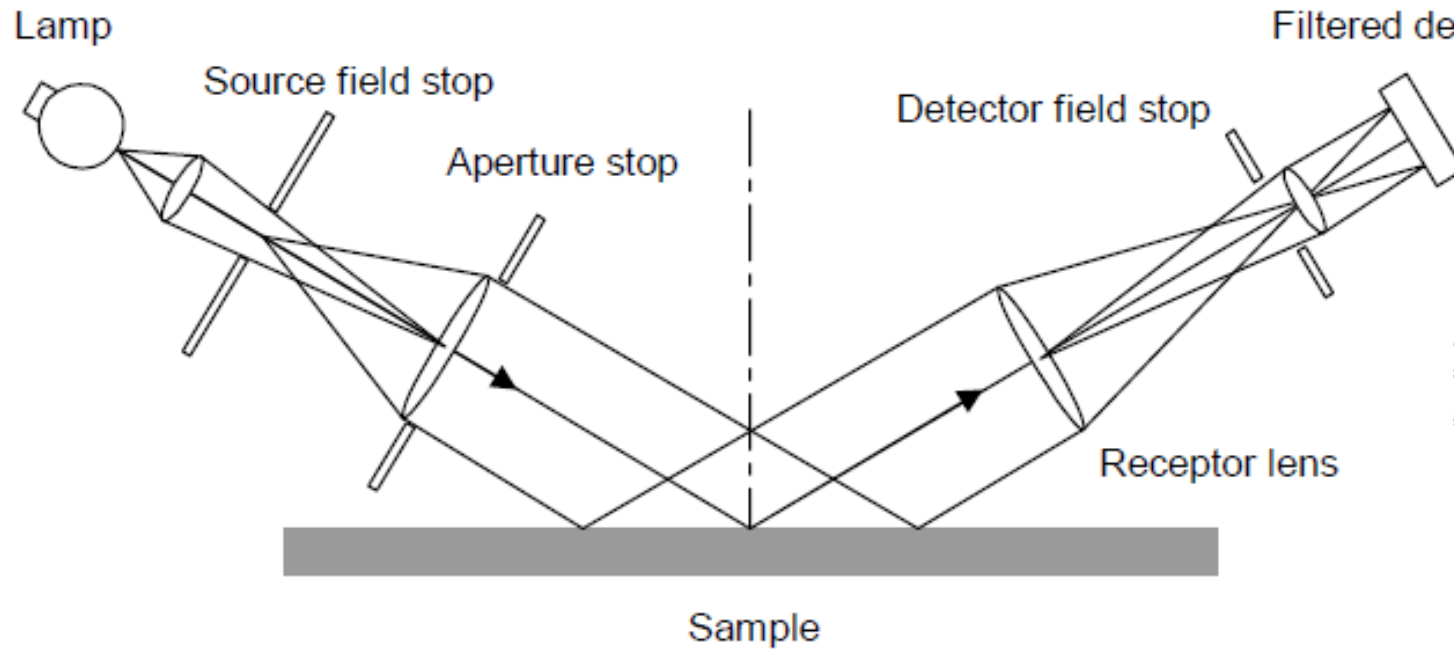
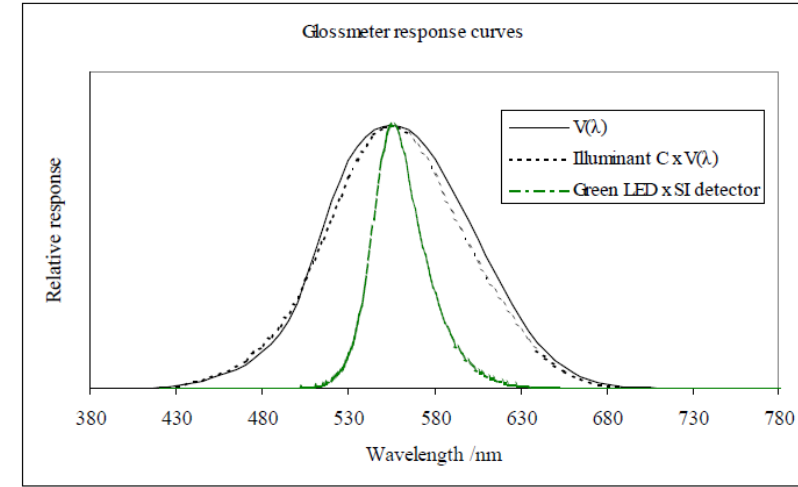
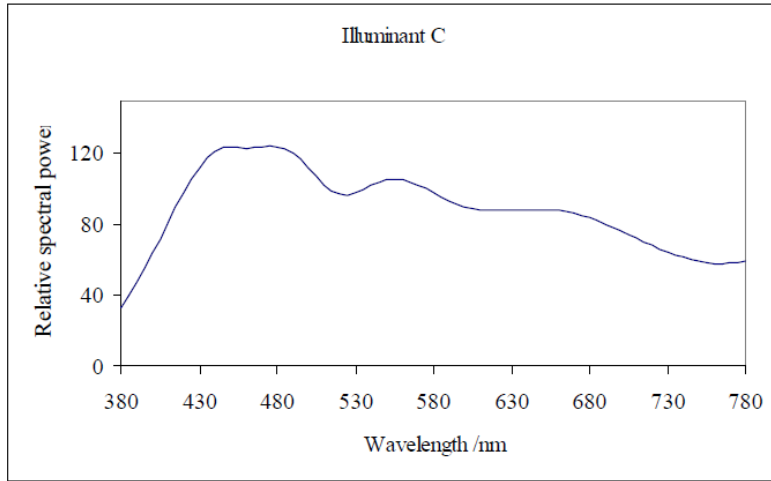
Analyse de l'incertitude de mesure :



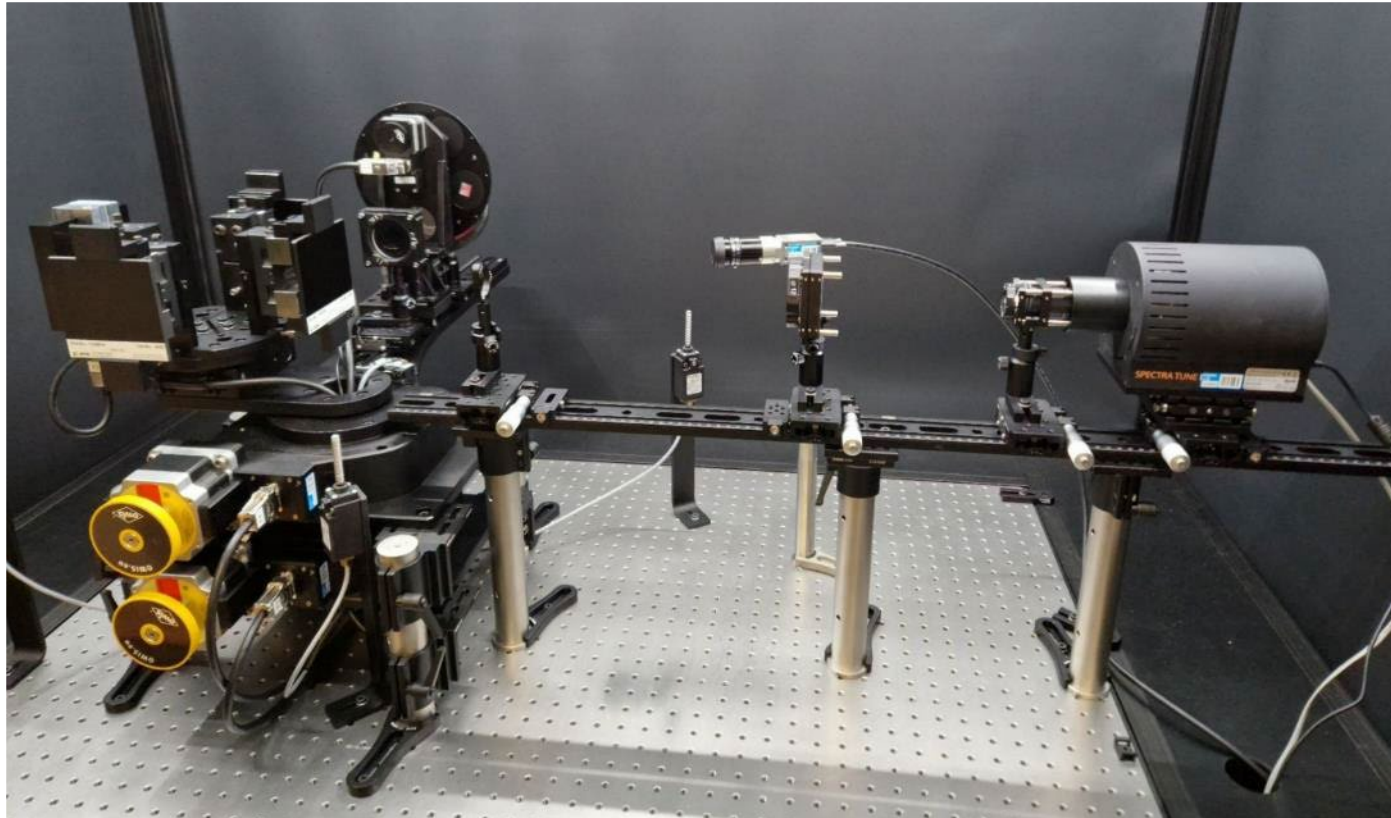
# Modèle classique « apparence » (CIE 175)



# Brilliant

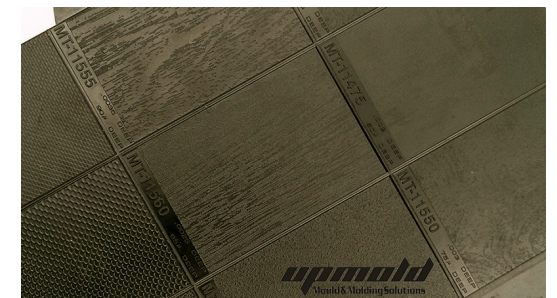
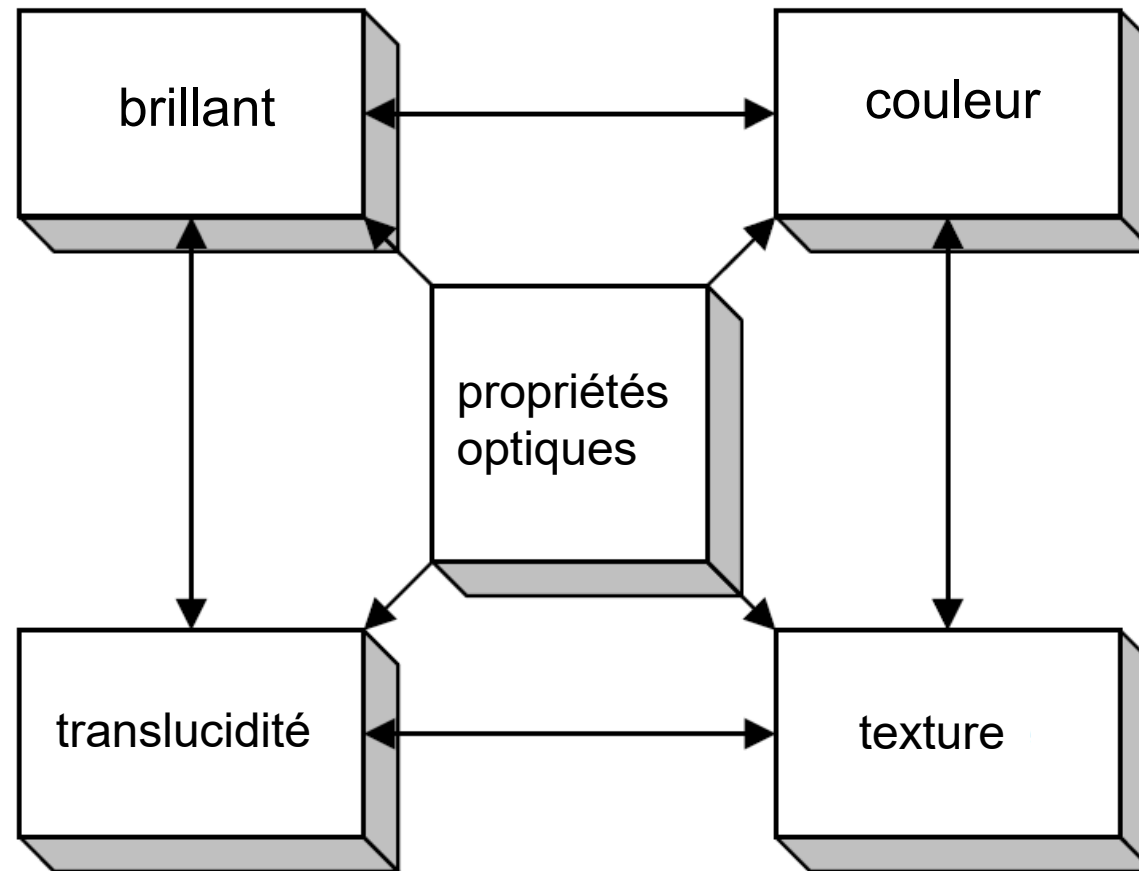


# Mesure de la brillance

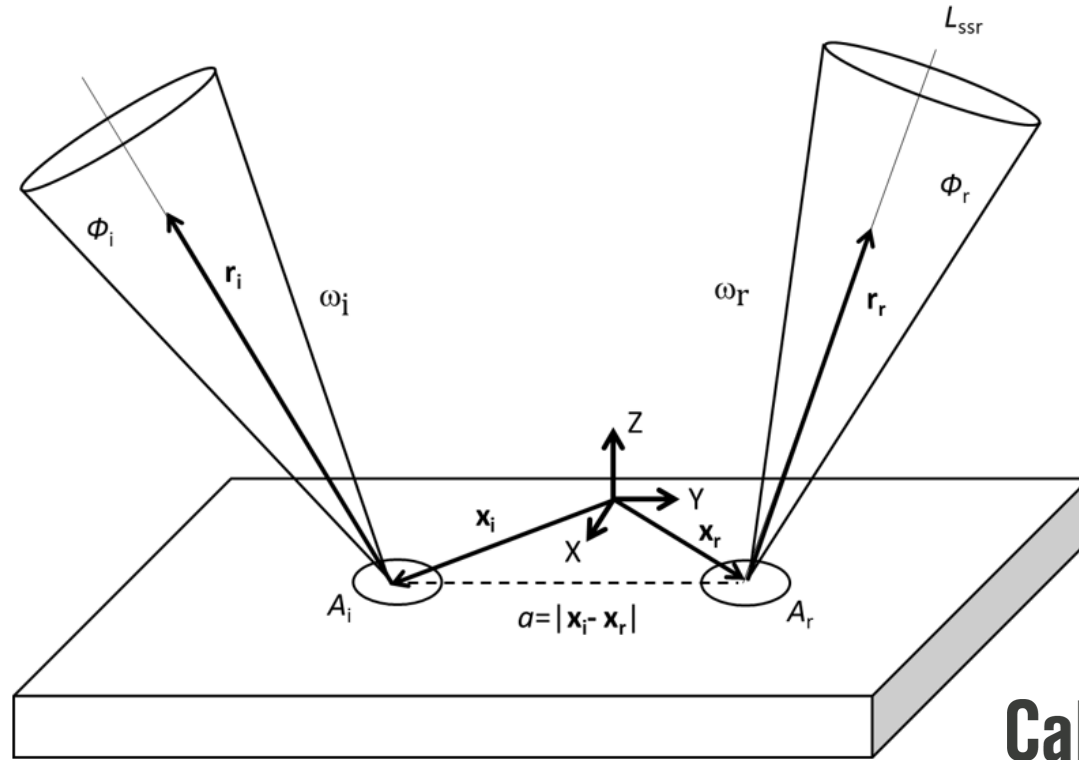


- Instrument de référence pour les mesures de brillance spéculaire (réalisation primaire)
- Haute flexibilité angulaire « in-plane »
- Configuration collimatée ou convergente des faisceaux
- brillance spéculaire selon
  - ISO 2813
  - ASTM D523-14
  - ASTM D2457-13
  - Tappi T 480 om-15
  - Tappi T 653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

# Modèle classique « apparence » (CIE 175)



# Translucidité : Mesure BSSRDF



METAS

INNVENTIA

KATHOLIEKE UNIVERSITEIT

LEUVEN

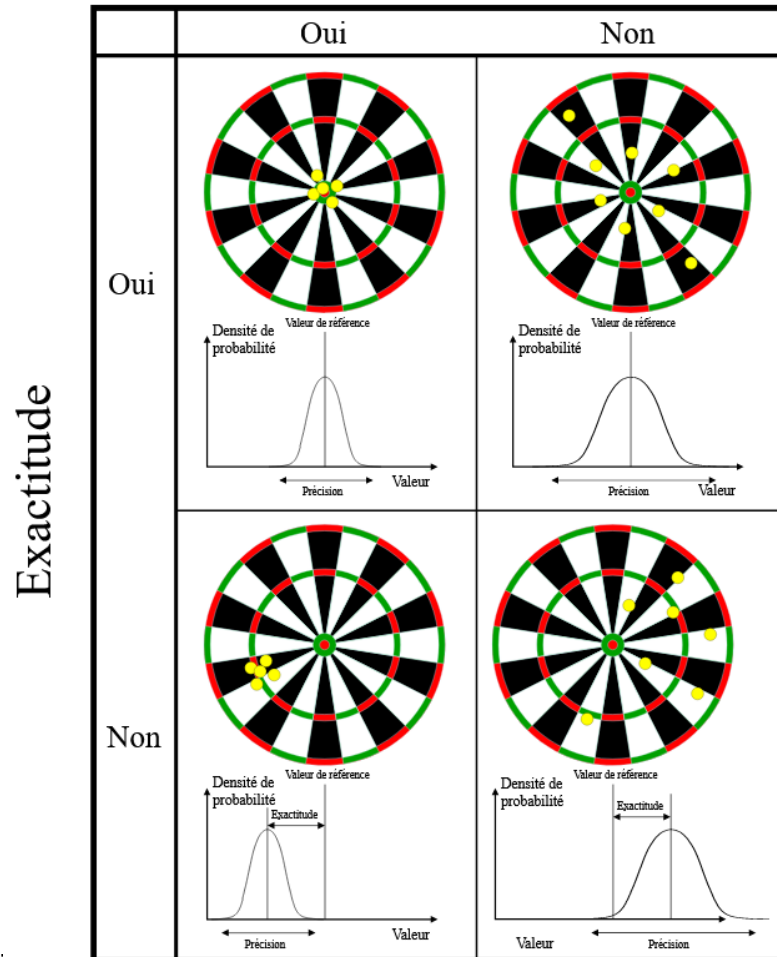
insight creating advantage

NATURAL COLOUR SYSTEMS

SAINT-GOBAIN

# Comment avoir confiance dans les données mesurées ?

## Précision



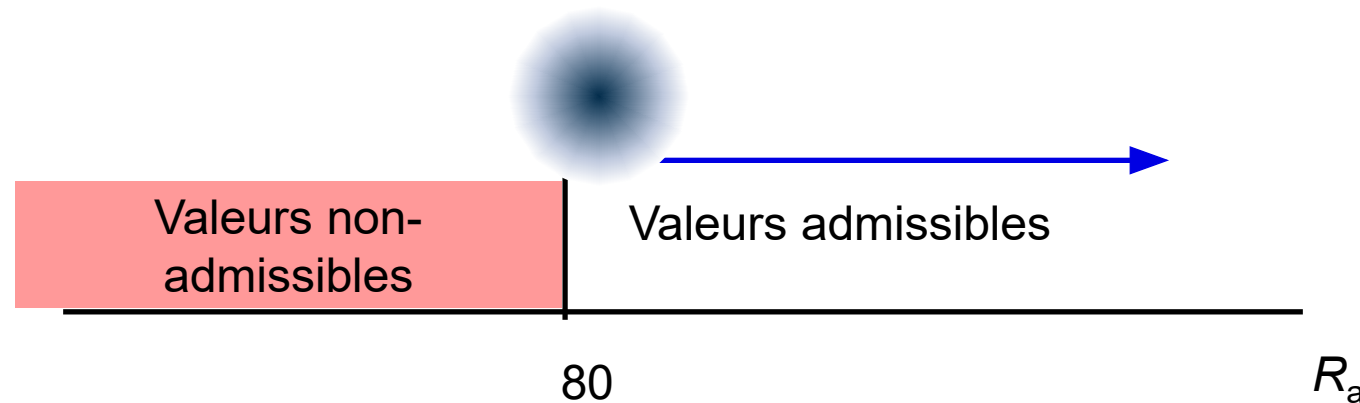
- Traçabilité au SI (étalonnage)
- Caractérisez votre instrument, c'est-à-dire déterminez l'incertitude de mesure
- Incertitude de mesure:
  - C'est plus que la répétabilité ou le bruit
  - Tenir compte des contributions de l'étalonnage, de l'instrument, des conditions environnementales et de l'échantillons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

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

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

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

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

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

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

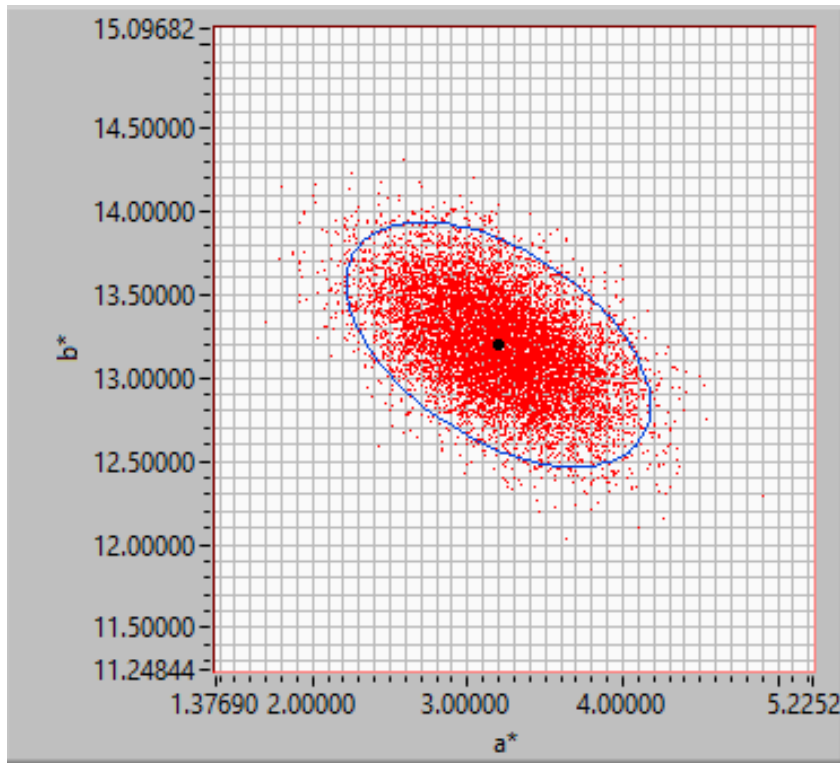
Modèle complet avec tous les paramètres  
« Digital Twin »

+ Simulations Monte Carlo

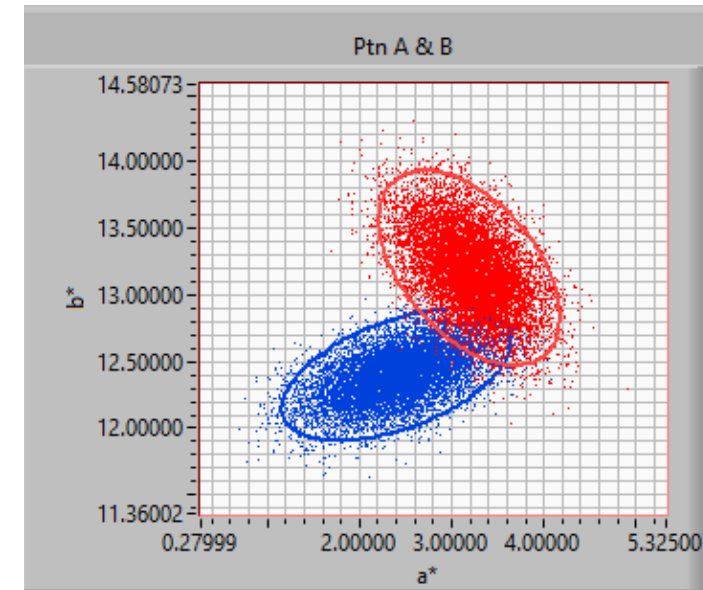
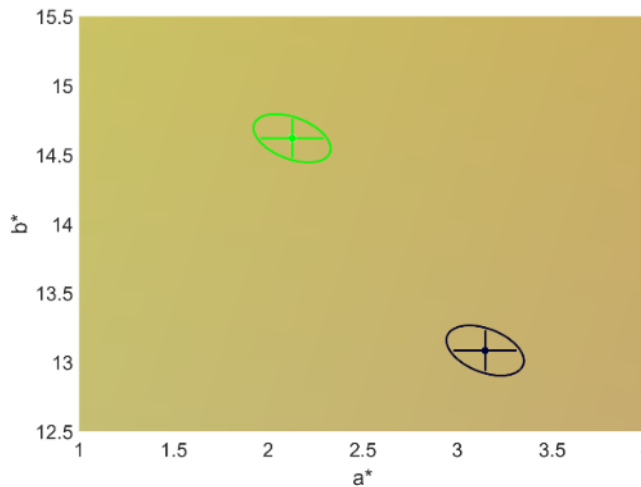
Résultat de mesure  
avec incertitude:

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

# Comment signaler les incertitudes pour les grandeurs multidimensionnelles ?

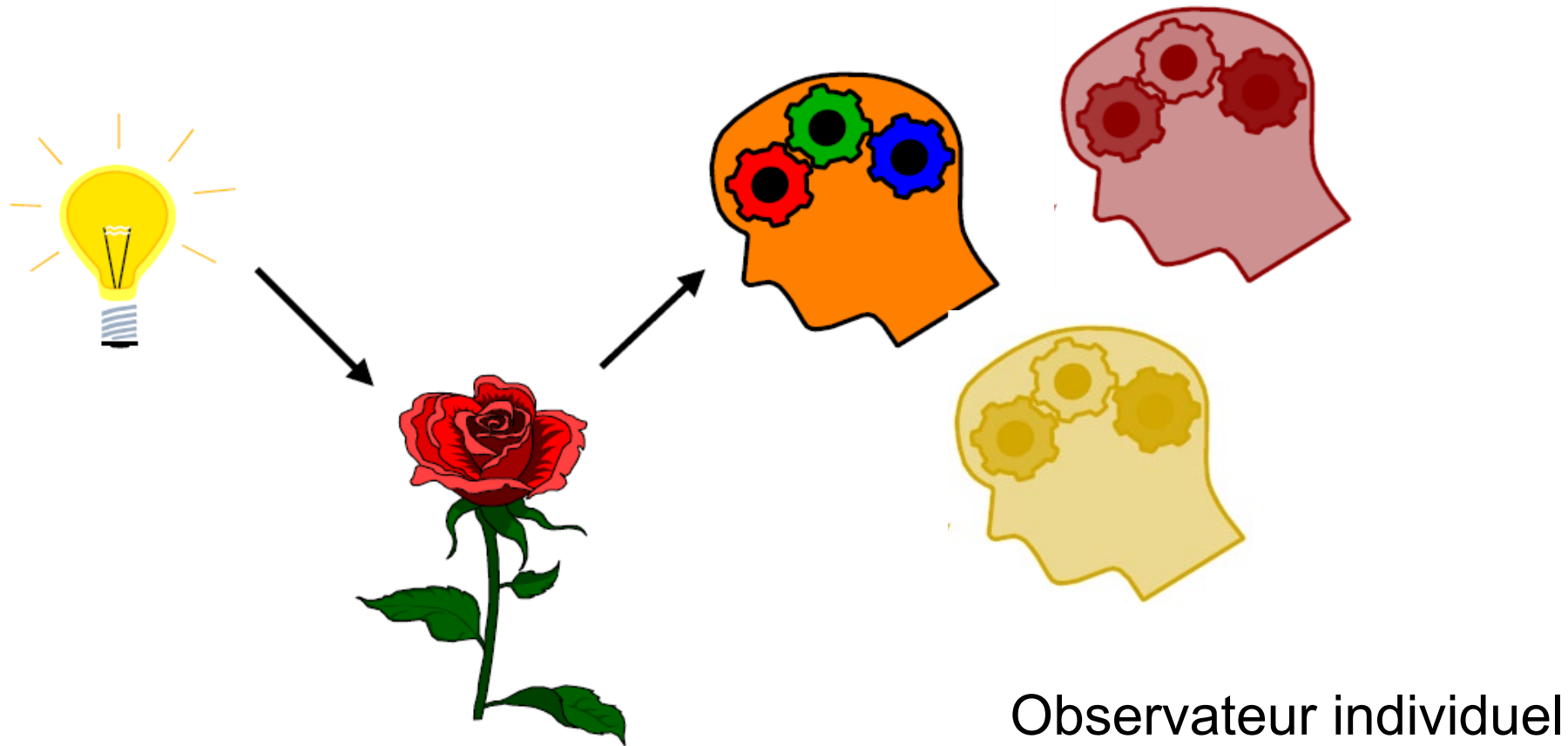


Corrélations!!!



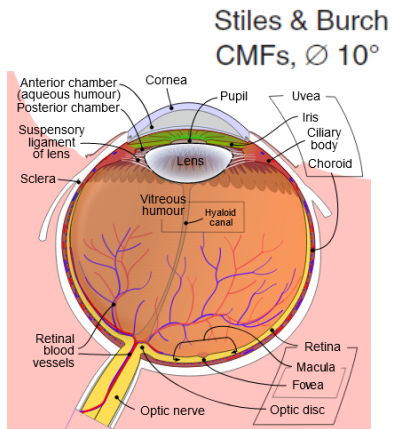
Comparaison entre deux valeurs mesurées

# Colorimétrie : perspectives

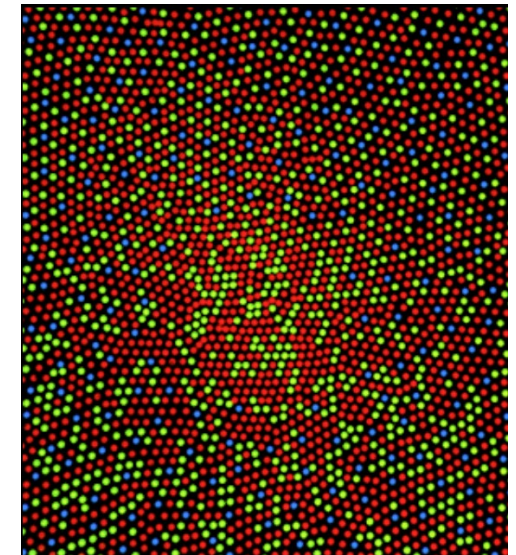
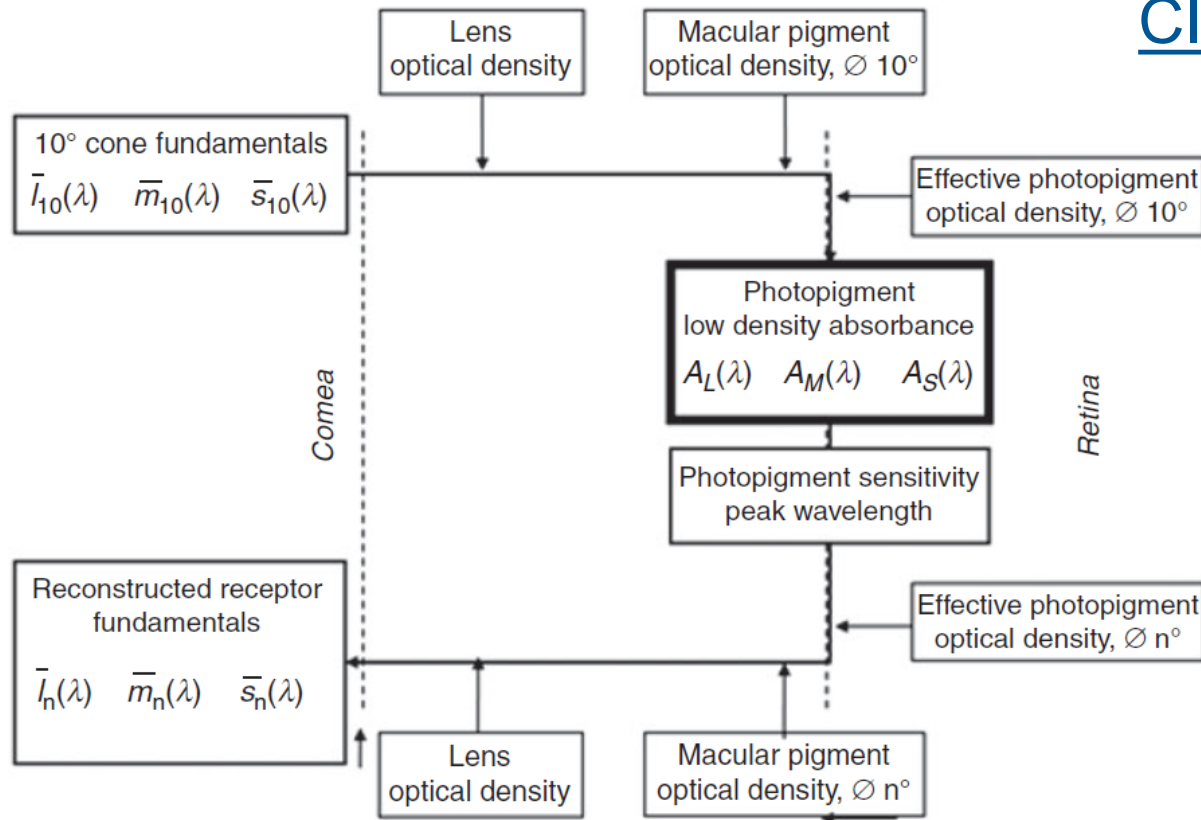


# Principes fondamentaux des cônes : modélisation physiologique

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



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

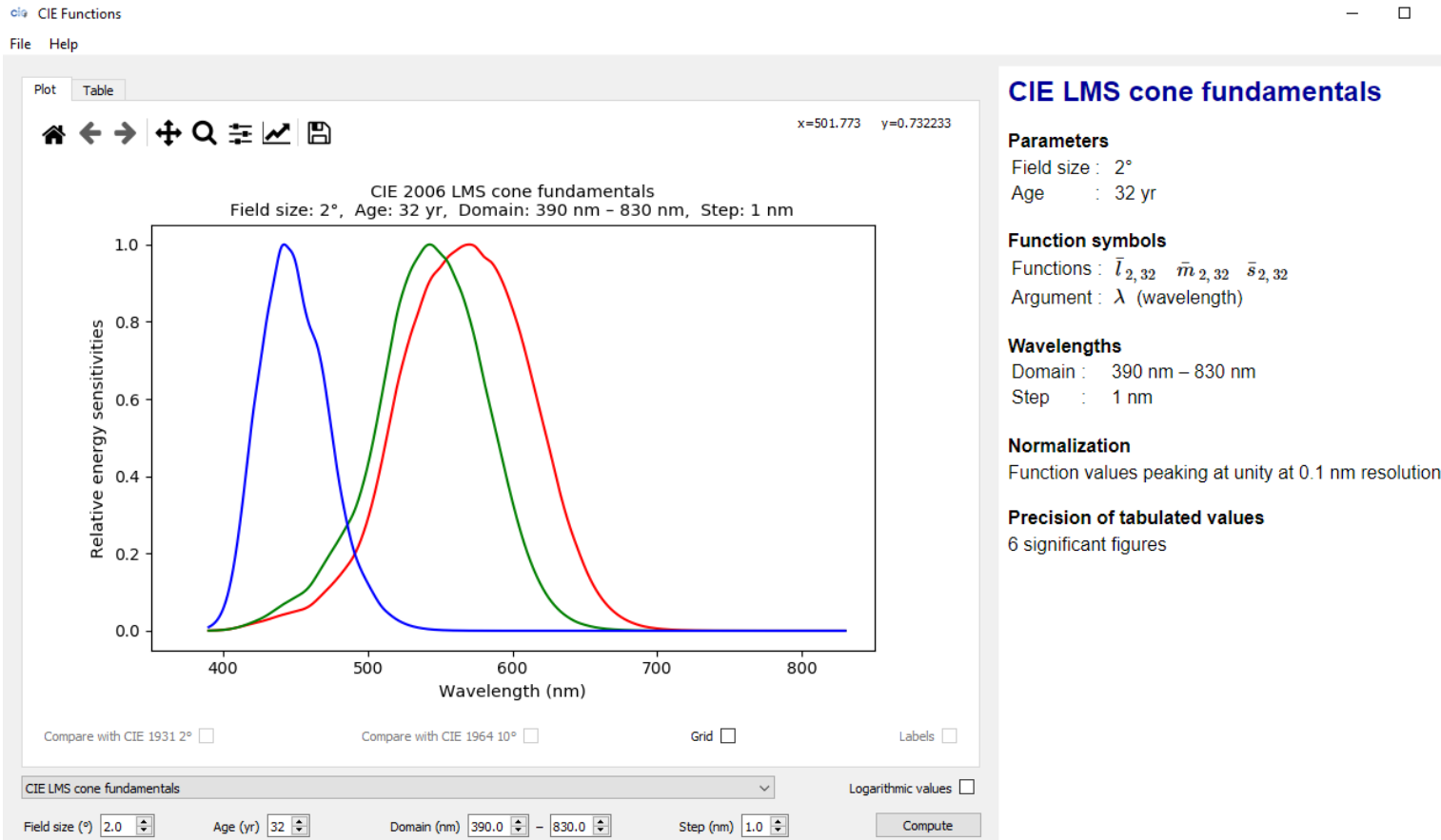


©Mark Fairchild

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



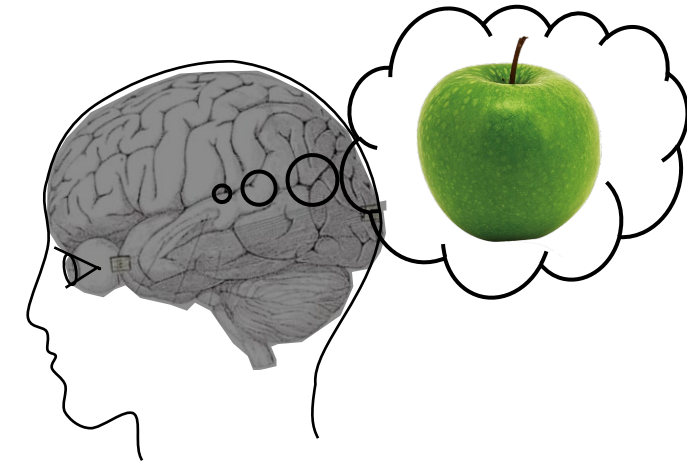
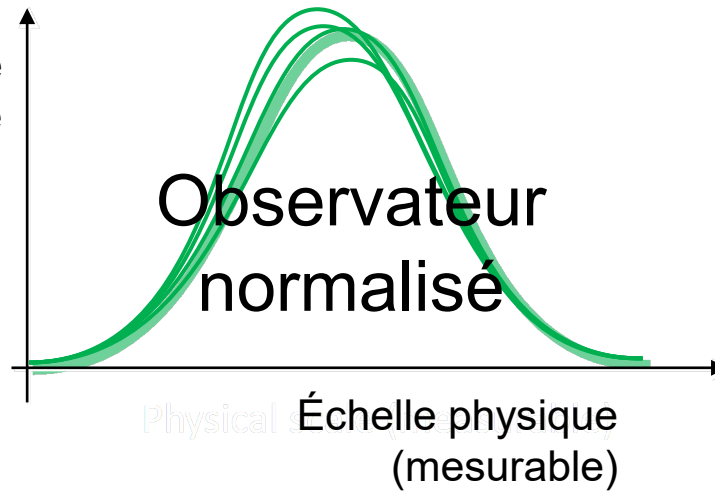
Radiométrie et spectrophotométrie



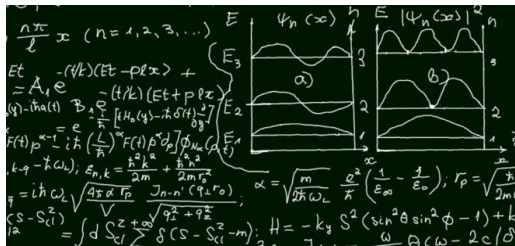
Expériences  
Psychophysiques



Échelle  
perceptive



Activités de  
normalisation



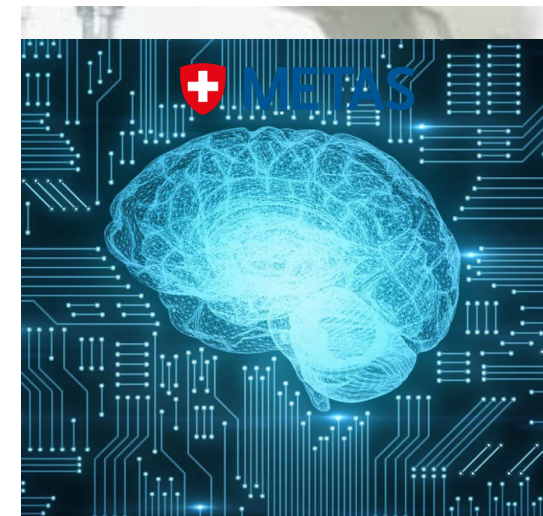
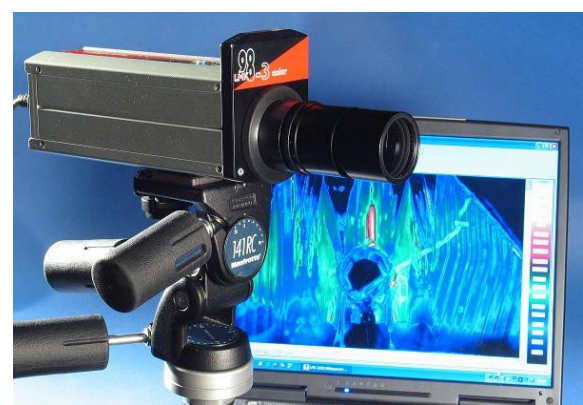
Modèles de  
perception

METAS



# Mesure des grandeurs d'apparence

## Méthodes du future



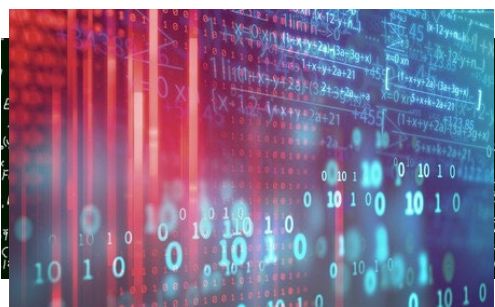
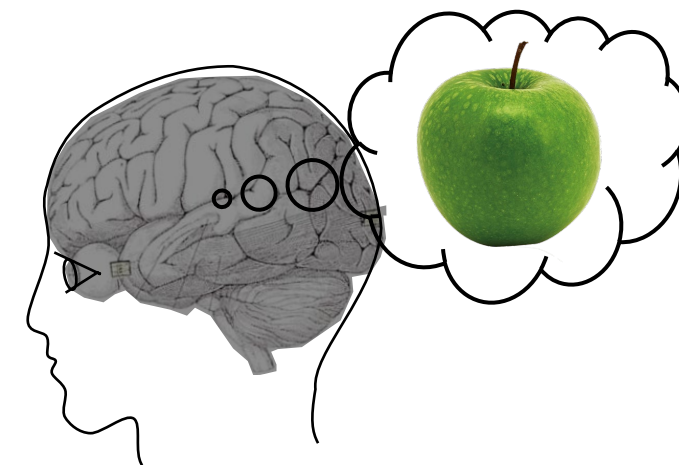
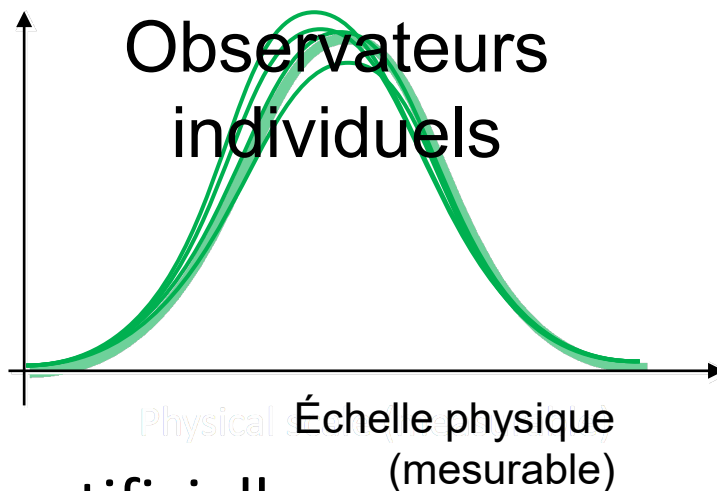
Radiométrie basée sur l'image

Machine Learning



Échelle  
perceptive

Observateurs  
individuels



Intelligence artificielle

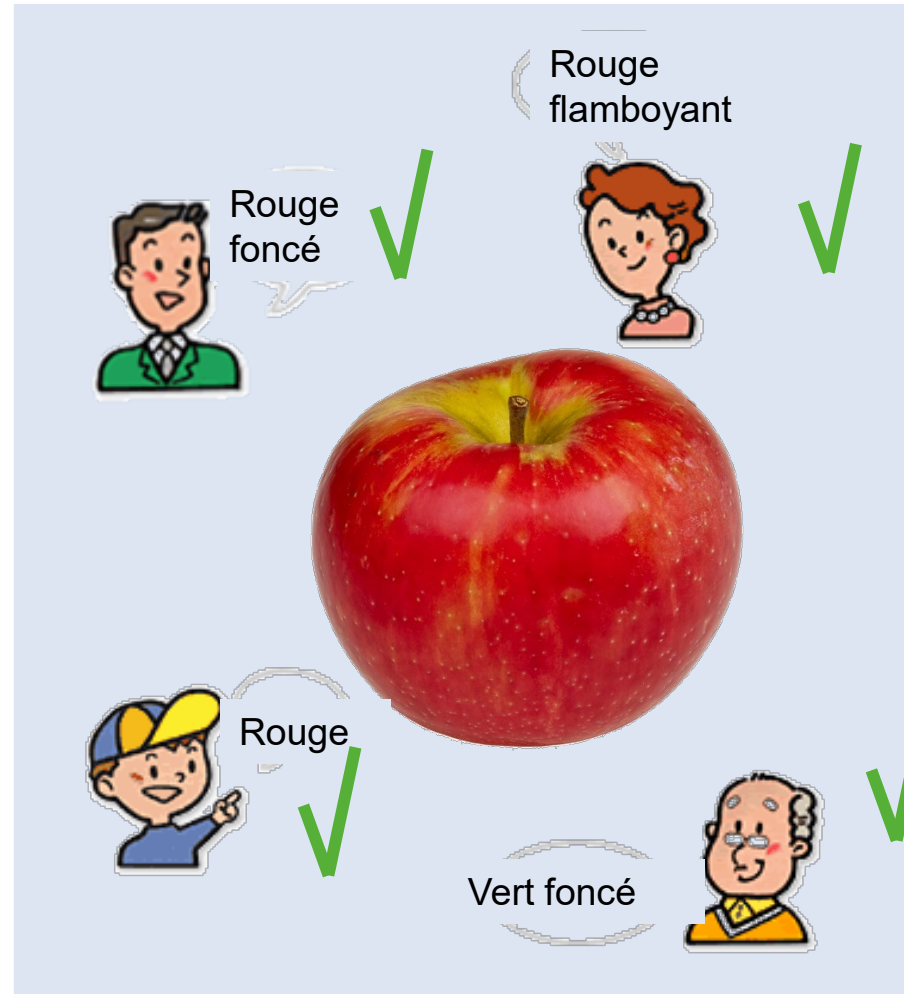
Activités de  
normalisation

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**