

Perception de la lumière issue de LEDs

Françoise Viénot

*Muséum national d'histoire naturelle
Centre de recherche sur la conservation des collections*

Remerciements :

*LedToLite, Jean-Jacques Ezrati, Elodie Mahler, Albane Rambaud,
Jean Le Rohellec, Solenne Bailacq, Guillaume Coron*

ASPROM – Paris – 29/01/2010

Perception de la lumière issue des LEDs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- Obtenir de la lumière blanche avec des LEDs
- La fidélité des couleurs : l'indice de rendu des couleurs de la Commission Internationale de l'Eclairage
- D'autres indices de qualité
- Expériences dans un contexte réel
- Messages

La lumière blanche

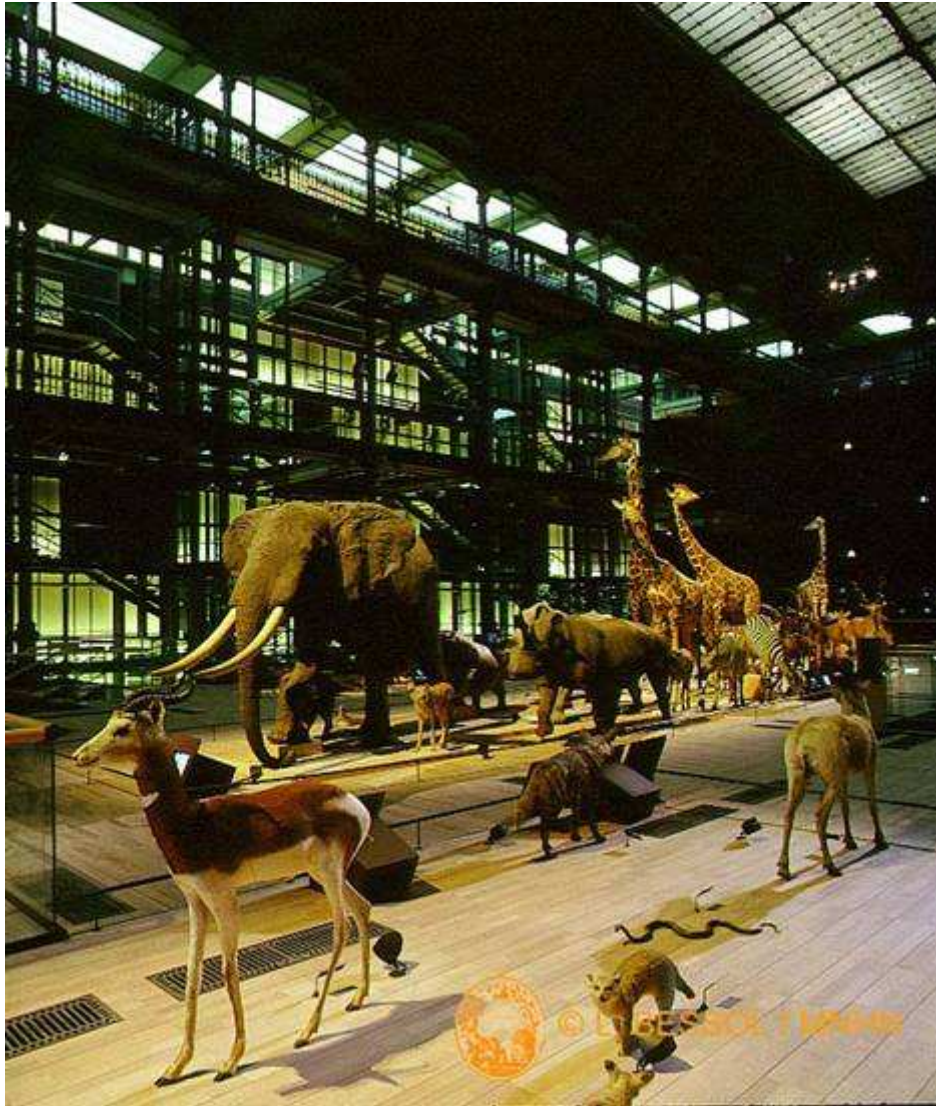
ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums



- Qu'attendre de la lumière?
 - Une efficacité élevée
 - Une faible consommation d'énergie
 - Intensité ajustable
 - Ni ultraviolet, ni infrarouge
 - De la lumière "blanche"
 - De la "qualité visuelle"

La lumière blanche

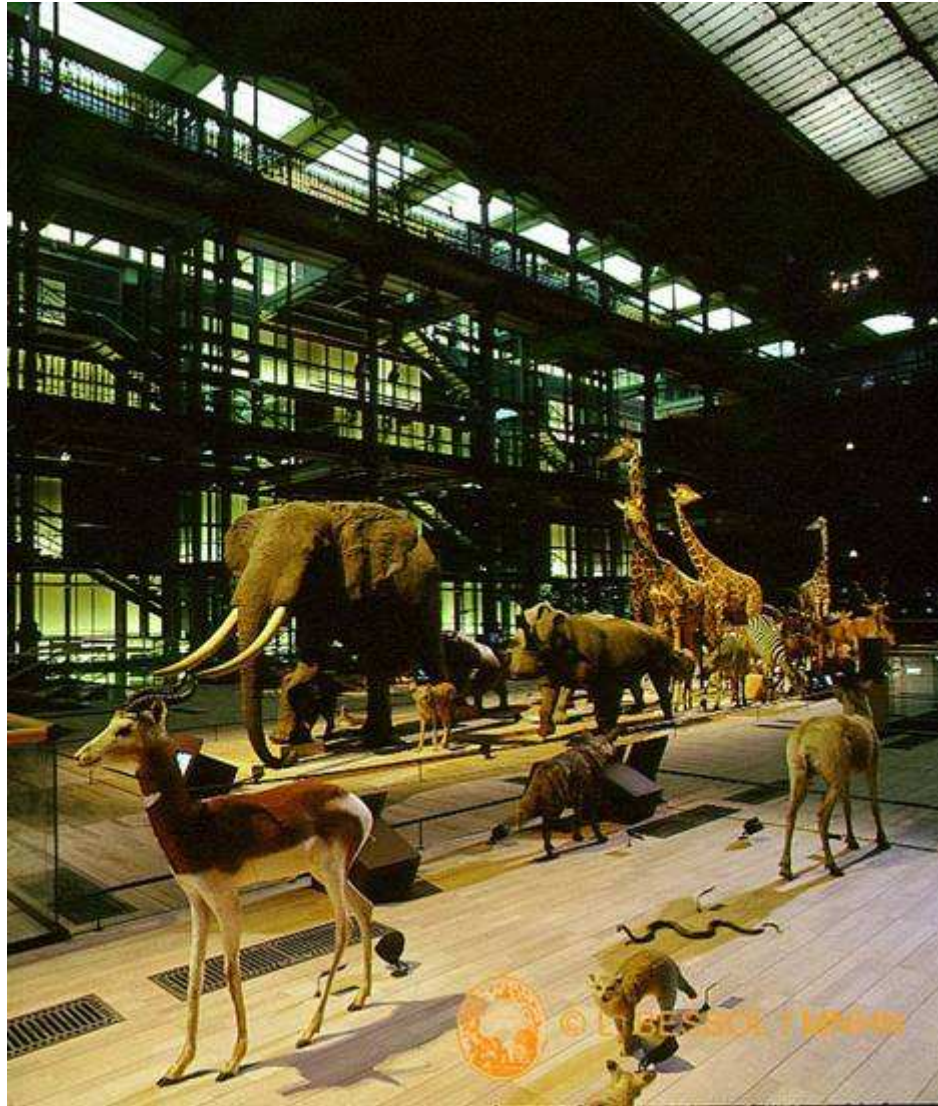
ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

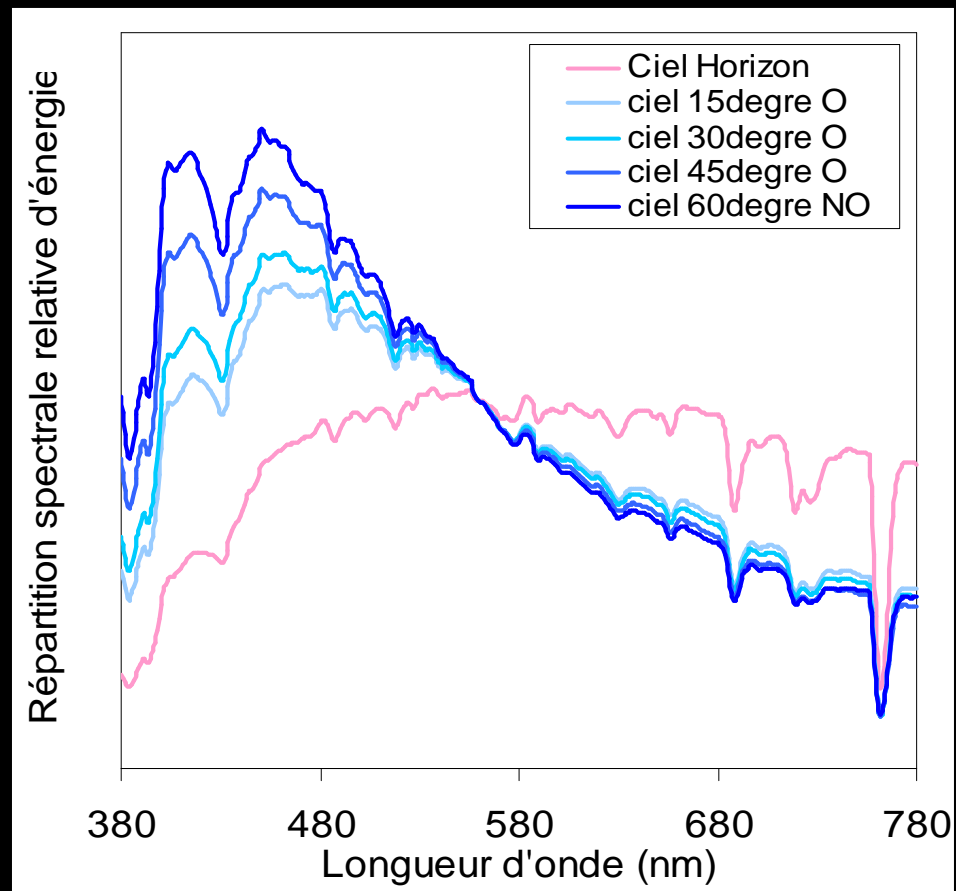
centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums



- Qu'attendre de la lumière?
 - Une efficacité élevée
 - Une faible consommation d'énergie
 - Intensité ajustable
 - Ni ultraviolet, ni infrarouge
 - De la lumière "blanche"
 - De la "qualité visuelle"
- Qu'est-ce que la lumière "blanche" ?
 - Lumière "du jour"
 - Ambiance chaude ou froide
 - Température de couleur
 - Notion de couleur, rien sur le spectre

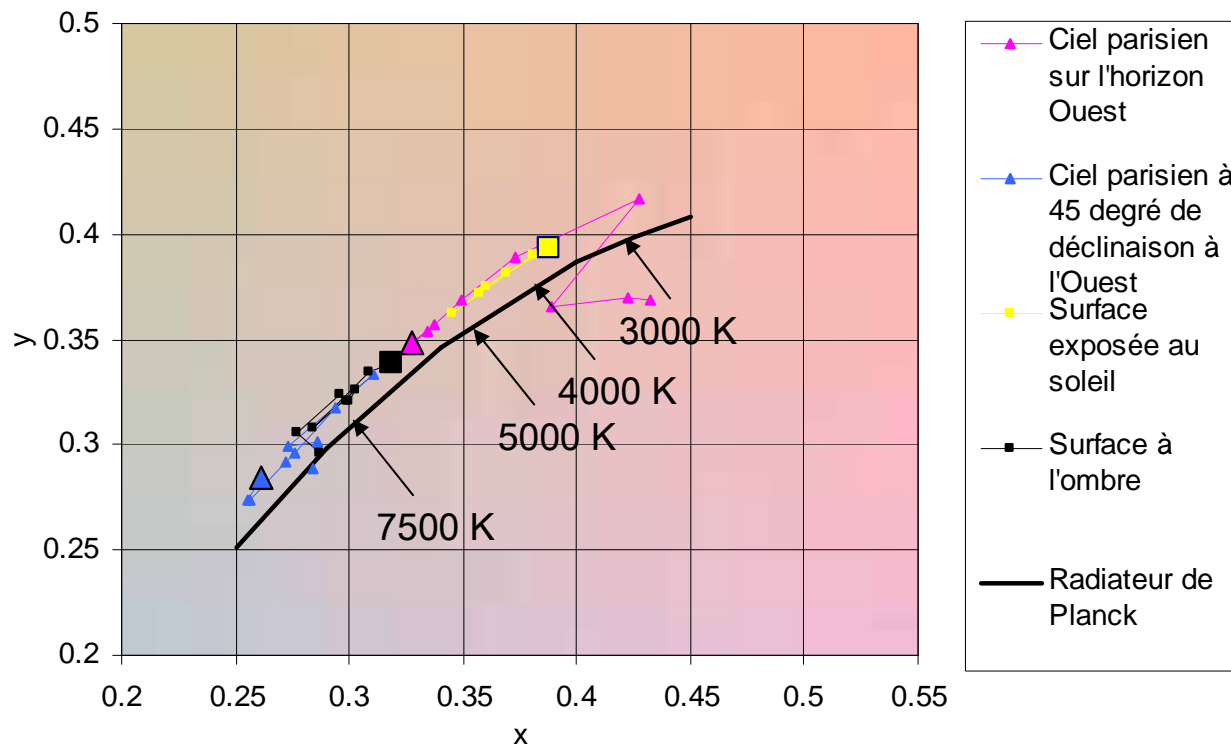


Une échelle de **couleur**

La Température de couleur proximale :

Température du radiateur de Planck dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée.

Lumière naturelle au dessus de la Mosquée de Paris



Obtenir de la lumière blanche avec des LEDs

Fluorescence

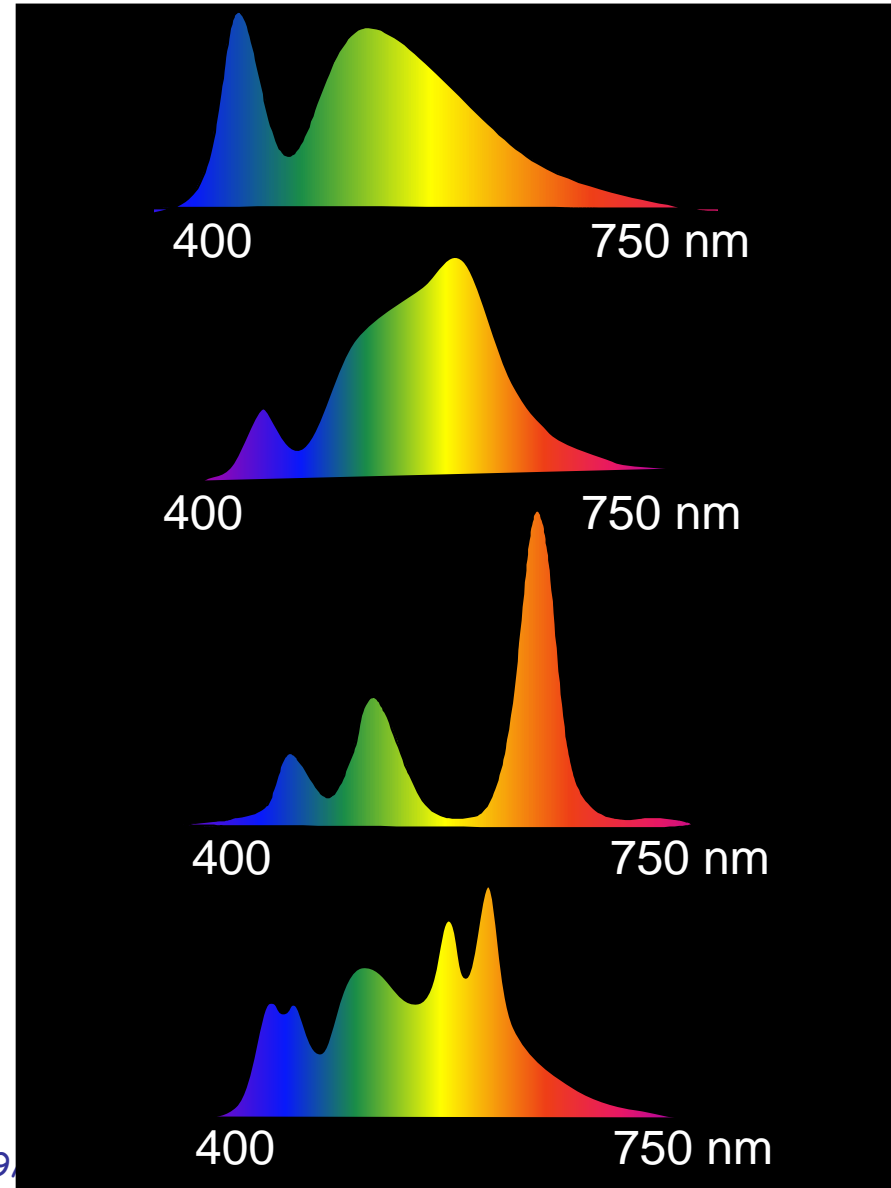
- B + 1 ou 2 phosphores
- UV + 3 phosphores

Assemblages

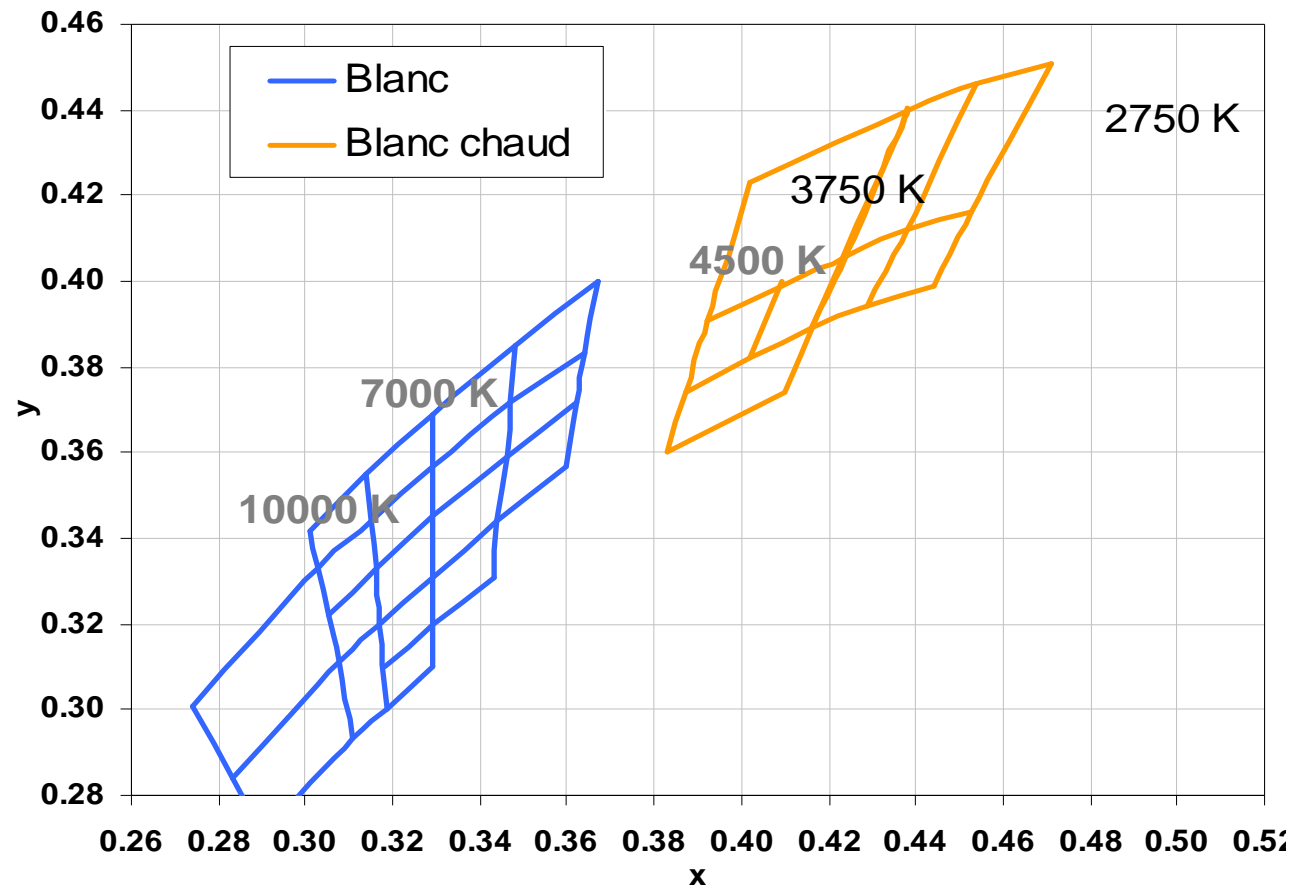
- R, G, B

Assemblages *riches*

- R, G, B, A, C, White



Un exemple de « binning »



Exemple d'organisation des boîtes d'assortiment de couleur pour l'assortiment des LEDs. Limites dans le diagramme de chromaticité x,y (à gauche). (d'après données Lumileds, 11/07)

La lumière blanche

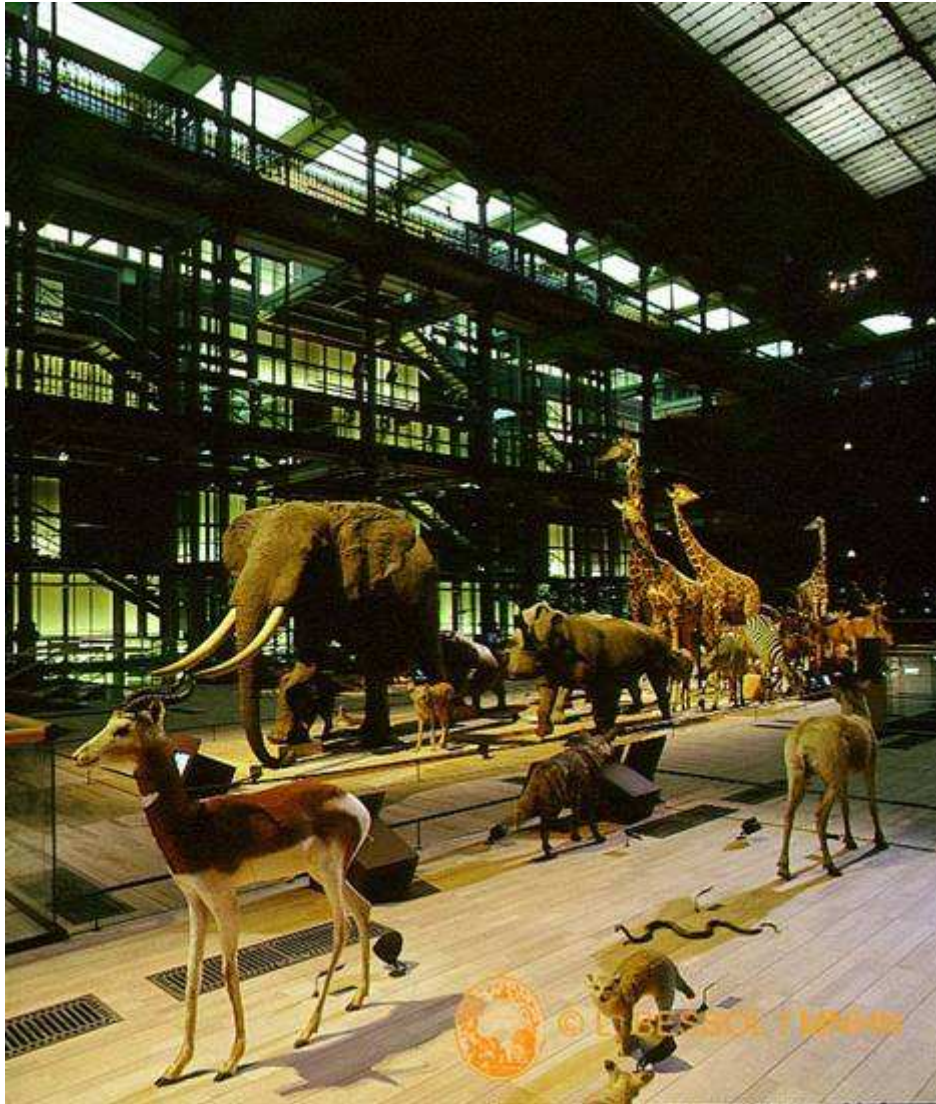
ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums

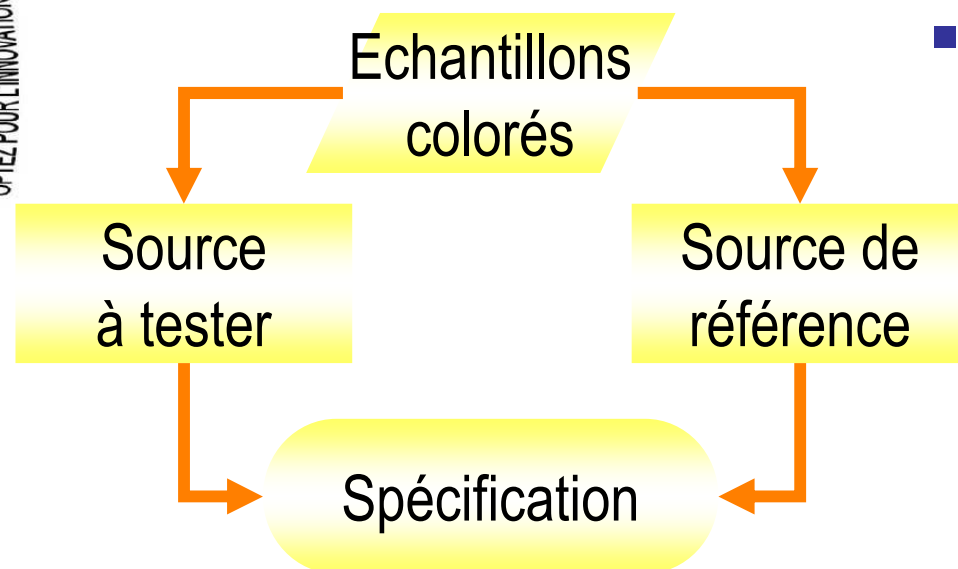


- Qu'attendre de la lumière?
 - Une efficacité élevée
 - Une faible consommation d'énergie
 - Intensité ajustable
 - Ni ultraviolet, ni infrarouge
 - De la lumière "blanche"
 - De la "qualité visuelle"
- Qu'est-ce que la "qualité visuelle" ?
 - La fidélité des couleurs
 - D'autres indices ?
 - Le confort et la santé

Fidélité des couleurs

L'indice de rendu des couleurs (IRC)
recommandé par la Commission
internationale de l'éclairage
CIE 13.3, 1995

Plusieurs idées de la «qualité»



■ Fidélité des couleurs

- Comparer la spécification colorimétrique d'une collection d'échantillons colorés éclairés par la source à tester, et leur spécification sous une source de référence :
Indice de rendu des couleurs

Indice de Rendu des Couleurs CIE, 1974, 1995

- Une collection d'échantillons

8 standards + 6
supplémentaires

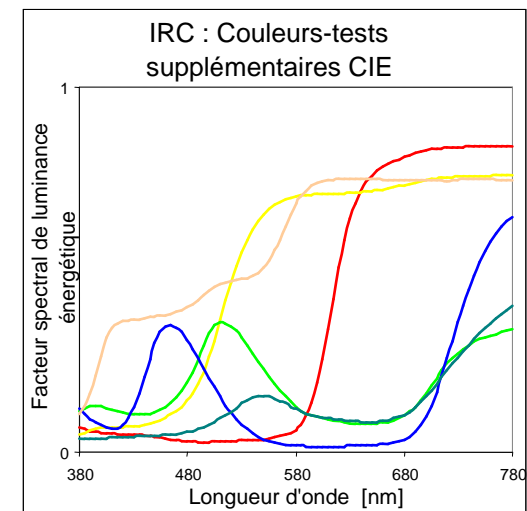
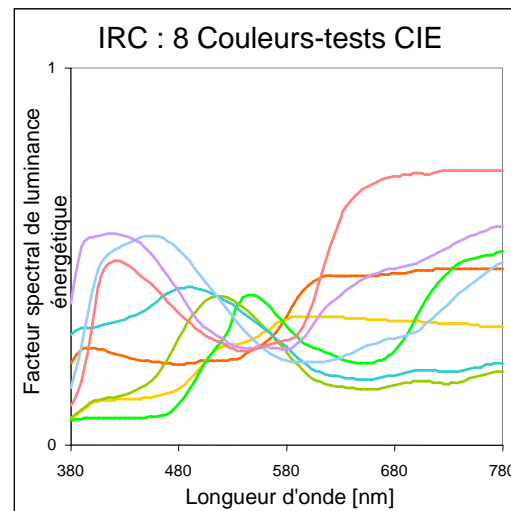
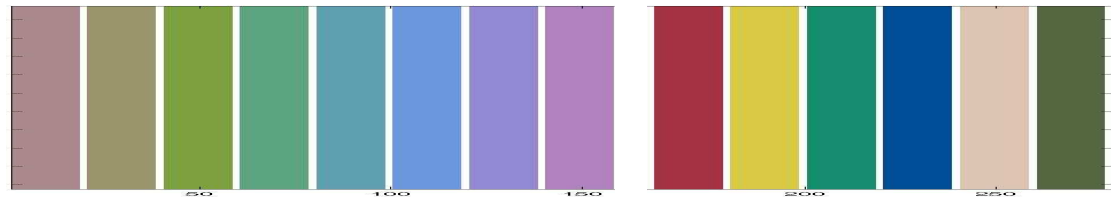
Facteur spectral de
réflexion connu

- Un illuminant de référence

De la même couleur
(même température de
couleur)

Lumière du jour ou
équivalent (corps noir)

- Une formule de différence de
couleur



Indice de Rendu des Couleurs CIE, 1974, 1995

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- Une collection d'échantillons

8 standards + 6
supplémentaires

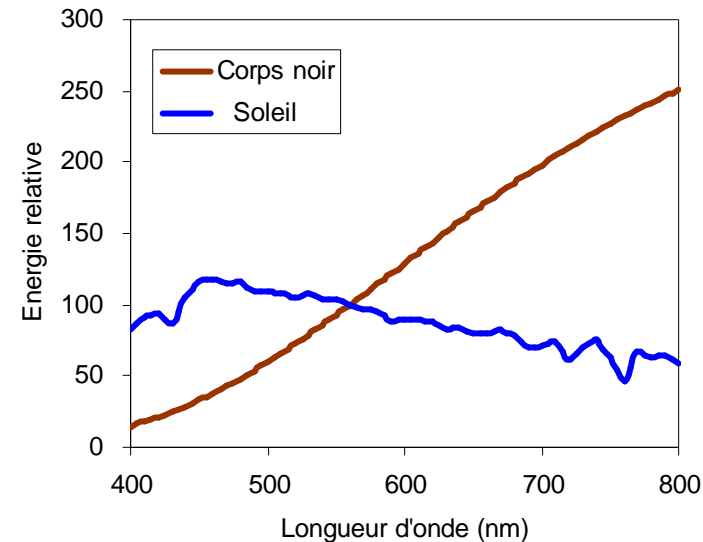
Facteur spectral de
réflexion connu

- Un illuminant de référence

De la même couleur
(même température de
couleur)

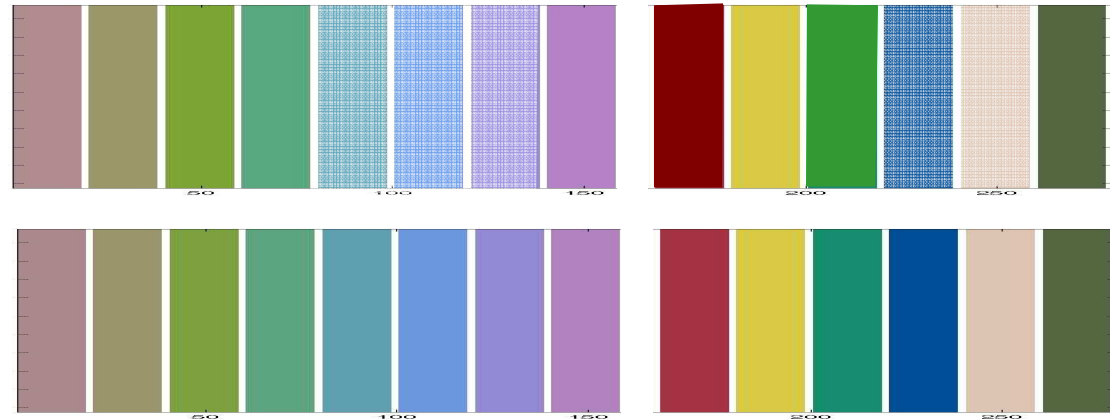
Lumière du jour ou
équivalent (corps noir)

Une formule de différence
de couleur



Indice de Rendu des Couleurs CIE, 1974, 1995

- Un illuminant de référence
température de couleur
proximale
- Une collection d'échantillons
Facteur de luminance
connu
8 standards + 6
supplémentaires
- Une formule de différence de
couleur



$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_{uv,i}$$

Si la couleur de l'échantillon sous l'éclairage testé s'écarte de la couleur de l'échantillon sous l'éclairage de référence, l'indice perd des points.

- Des indices particuliers
- Des indices généraux R_{a8} et R_{a14}

D'autres indices de qualité ...

Programmes expérimentaux dans
un contexte réel : des LEDs et des
objets à voir et à manipuler

Une activité intense à la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)

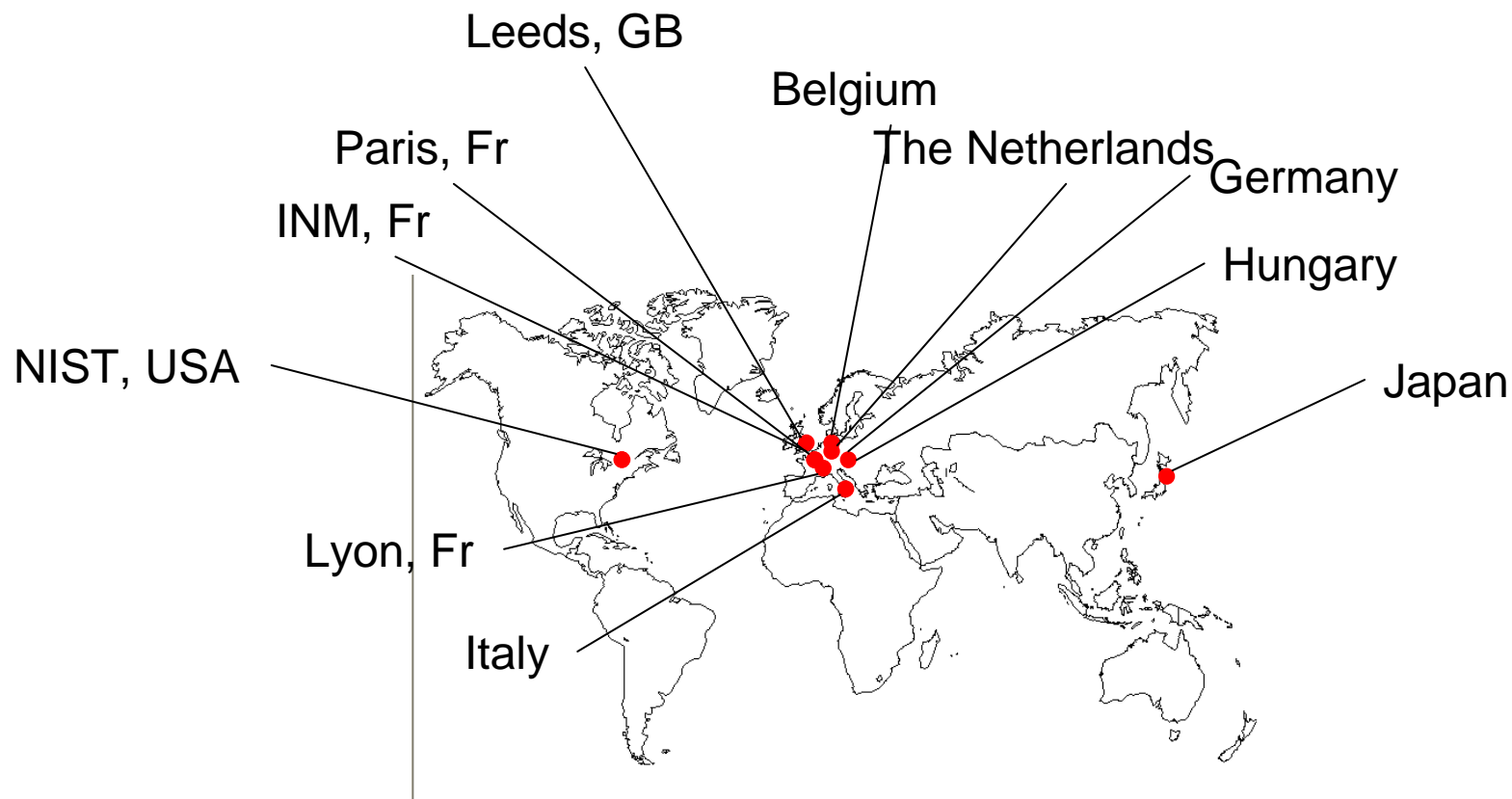
ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums



Quel indicateur de qualité?

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

fresh
superficial
slow
soft
male
clean
heavy
classic
cold
clear
O. Da Pos

Memory
K. Smet

Naturel
S. Jost-Boissard

Color Harmony
P. Bodrogi

Quality
N. Pousset

Fidelity, Preference
Szabo, J. Schanda

Observateurs naïfs ou expérimentés

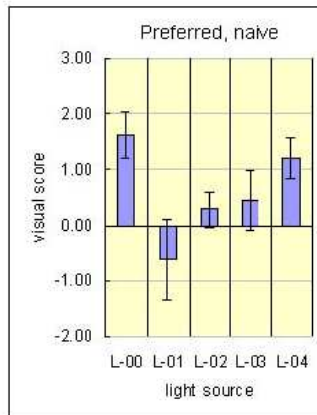


Figure 10. Memory colour scaling, preference, naïve observers.

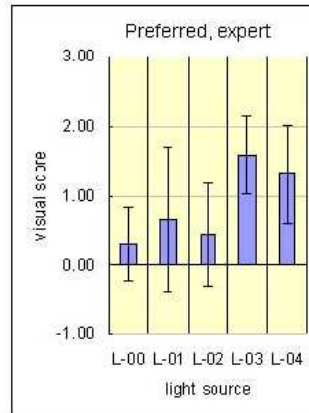


Figure 11. Memory colour scaling, preference, expert observers.

Sources et technologies

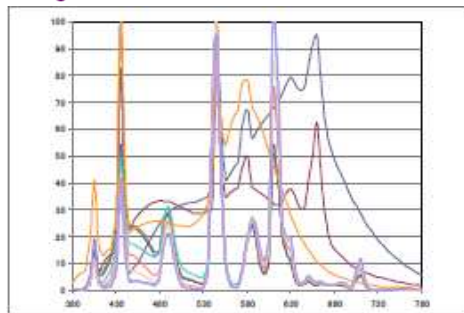


Fig. 1 Relative spectral power distributions of Fluorescent lamps (a part)

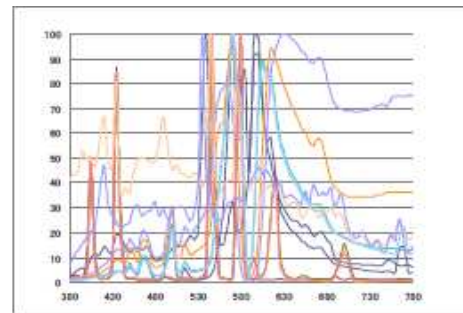


Fig. 2 Relative spectral power distributions of HID lamps (a part)

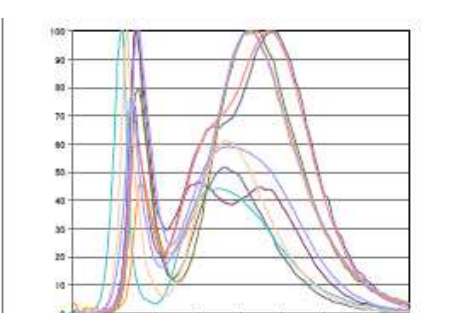


Fig. 3 Relative spectral power distributions of LED lamps (a part)

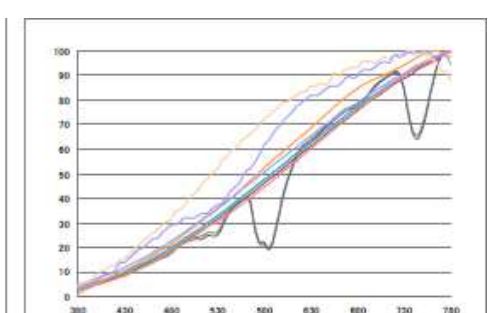


Fig. 4 Relative spectral power distributions of Incandescent lamps (a part)

Des graphes

et des formules

Indice de Rendu des Couleurs (IRC)

Color Appearance (CAM)

Li, Luo, Li

Color Quality Scale (CQS)

W. Davis, Y. Ohno

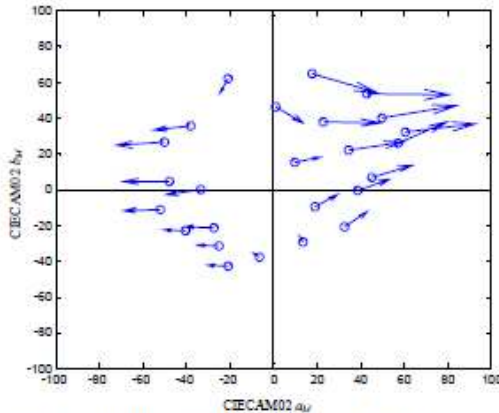


Figure 2 Sample distributions under the reference CIE D65 (circle) and the test source Zumtobel RGB LED (arrow end) in the CIECAM02 colour space.

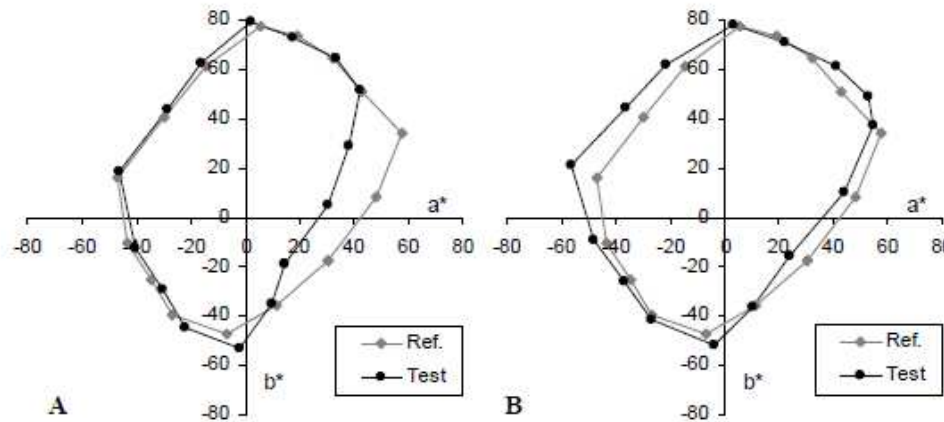
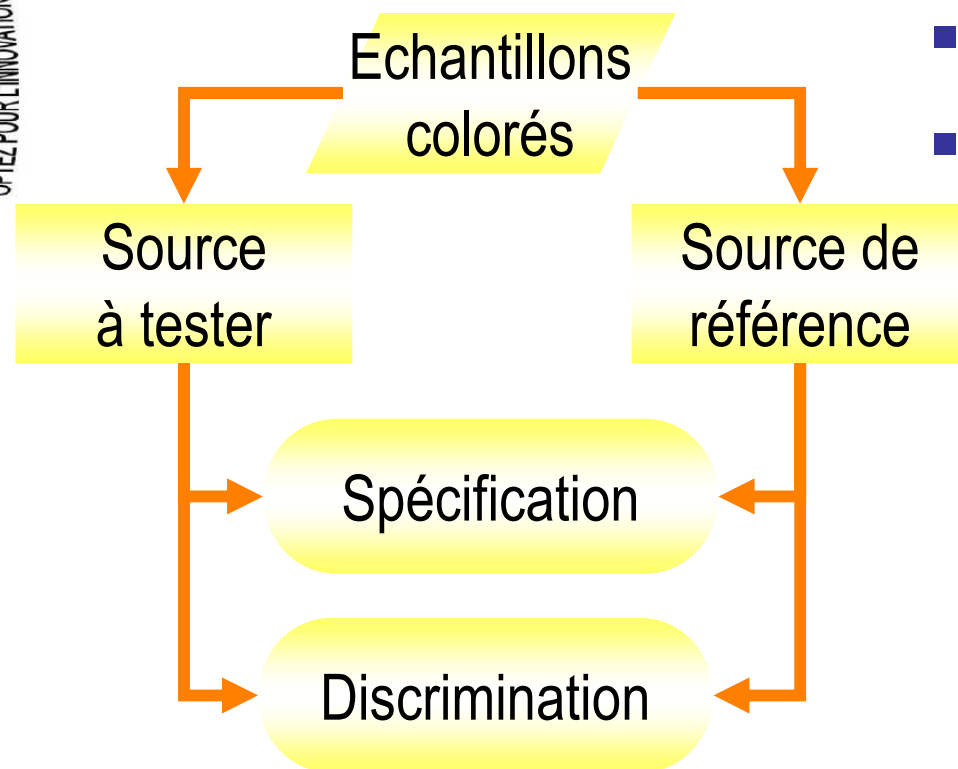


Figure 8: CIELAB coordinates of the 15 reflective samples when illuminated by the test source (black) and the reference source (grey) for spectrum A and spectrum B.

Expériences dans un contexte
réel, avec des LEDs et des
objets à voir et à manipuler

Plusieurs idées de la qualité

Plusieurs idées de la «qualité»



- Fidélité des couleurs
- Discrimination fine des couleurs
 - Comparer l'aptitude à discriminer des échantillons de couleurs voisines éclairés par la source à tester, et l'aptitude à les discriminer sous une source de référence : *nouveau label*

Plusieurs idées de la «qualité»

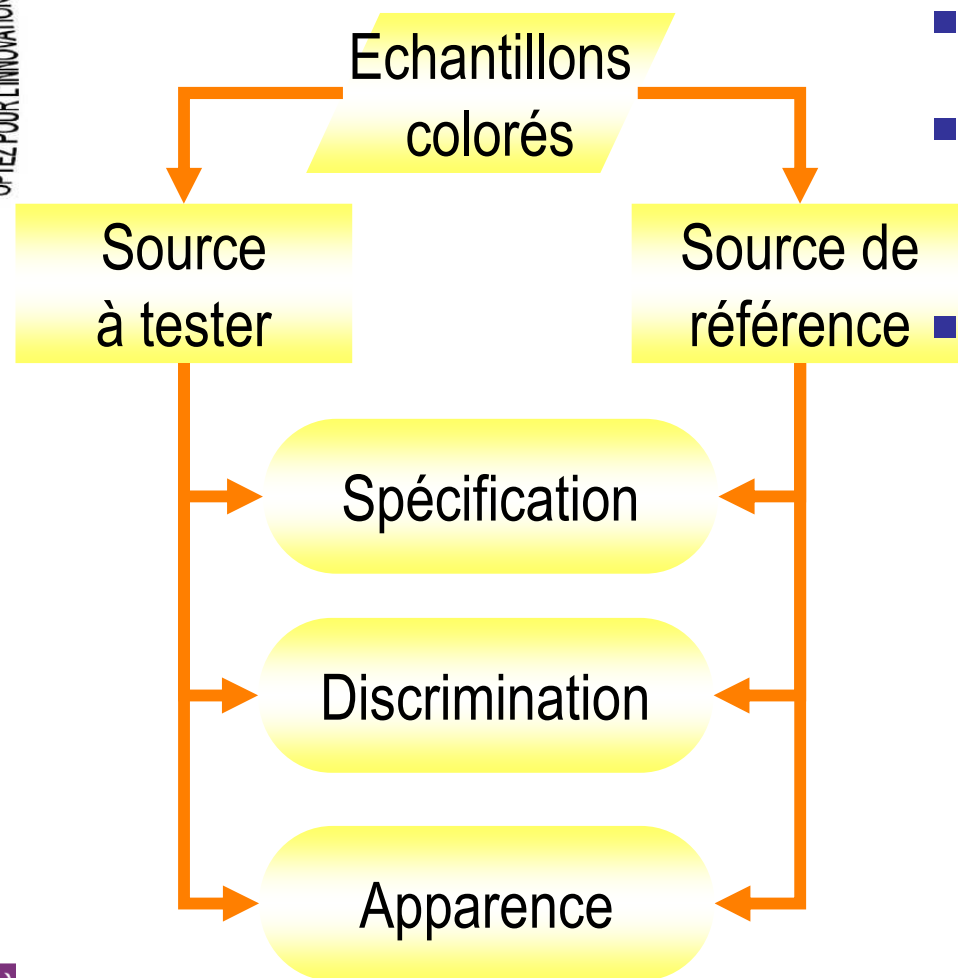
ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums



- Fidélité des couleurs
- Discrimination fine des couleurs
- Apparence naturelle
 - Comparer l'apparence d'échantillons colorés éclairés par la source à tester, et leur apparence sous une source de référence : *nouveau label*

Expériences dans un contexte réel

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- Une cabine à lumière
- Un éclairage réglable à base de LEDs

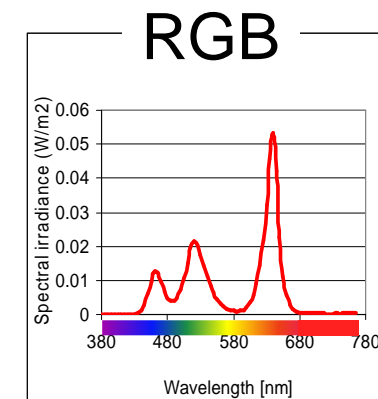
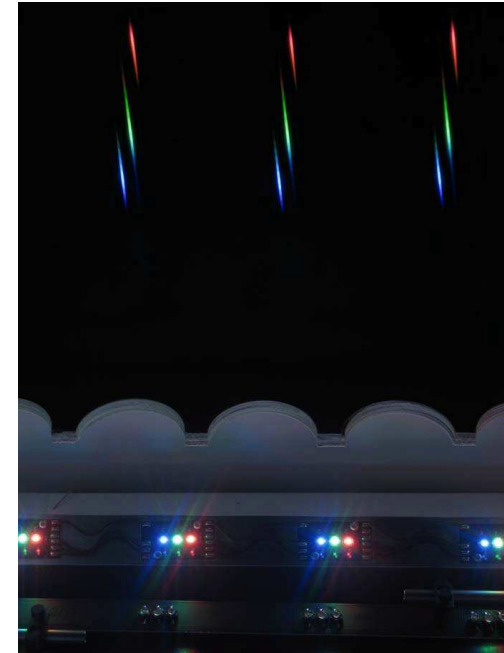


Eclairage

- LED clusters



LEDs rouge, verte, bleue "RGB"



Eclairage

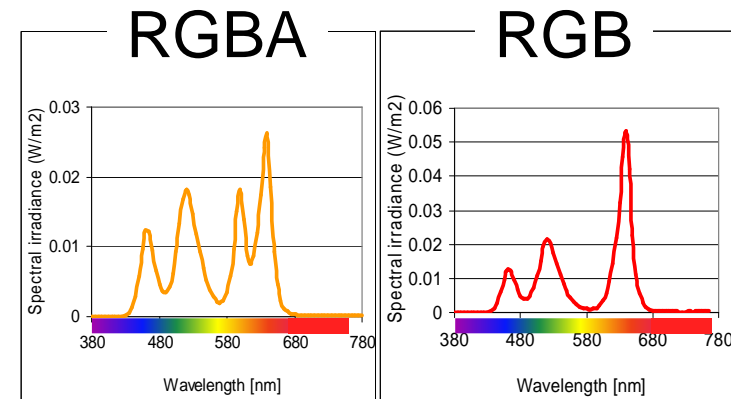
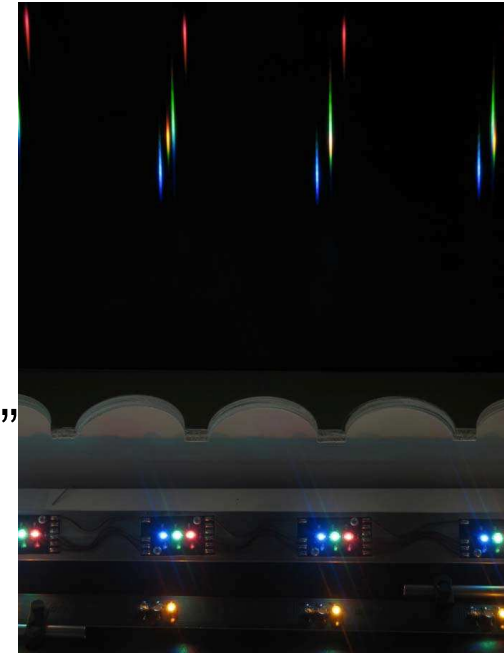
- LED clusters



LEDs rouge, verte, bleue “**RGB**”

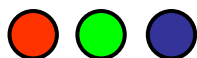


LEDs rouge, verte, bleue, ambre “**RGBA**”



Eclairage

■ LED clusters



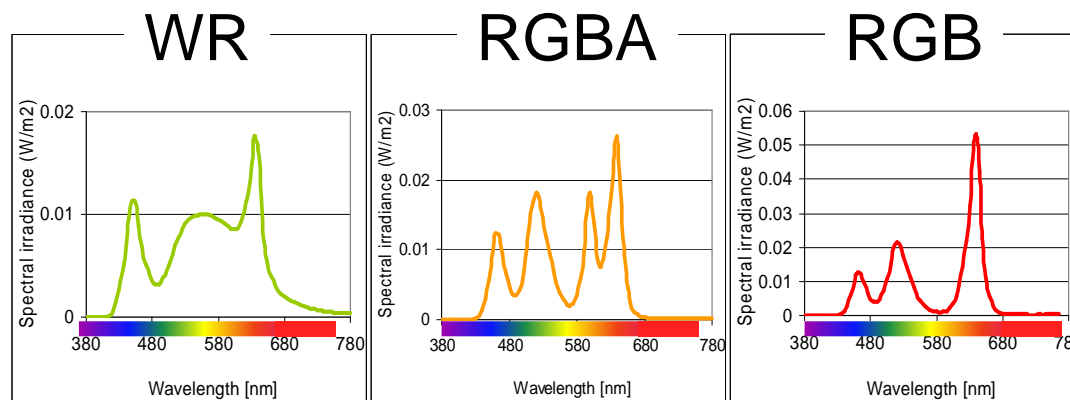
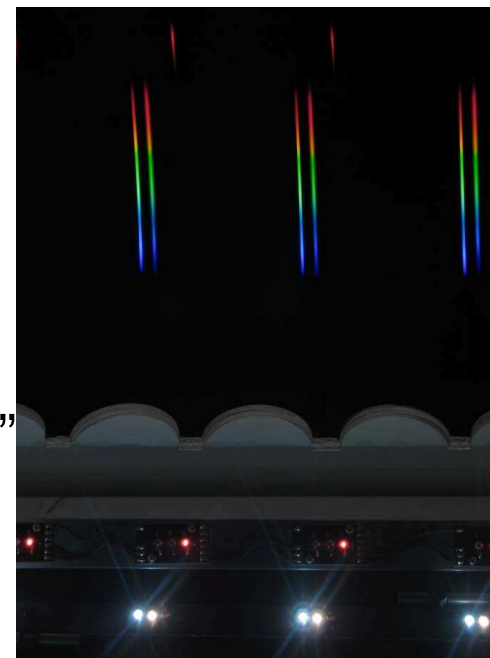
LEDs rouge, verte, bleue **"RGB"**



LEDs rouge, verte, bleue, ambre **"RGBA"**



LED blanc froid, rouge **"WR"**



Eclairage

■ LED clusters



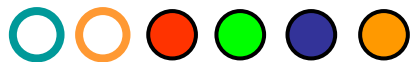
LEDs rouge, verte, bleue **"RGB"**



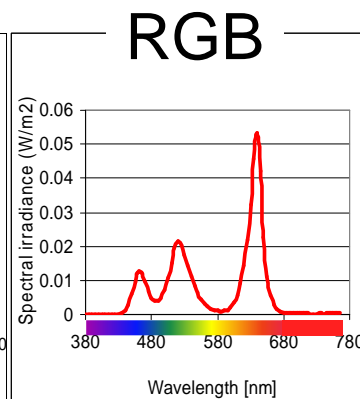
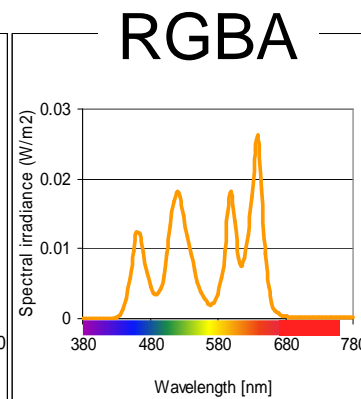
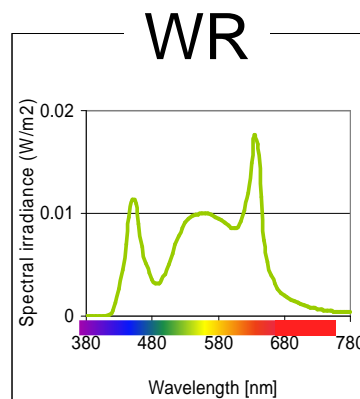
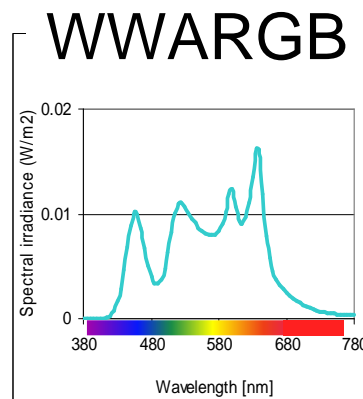
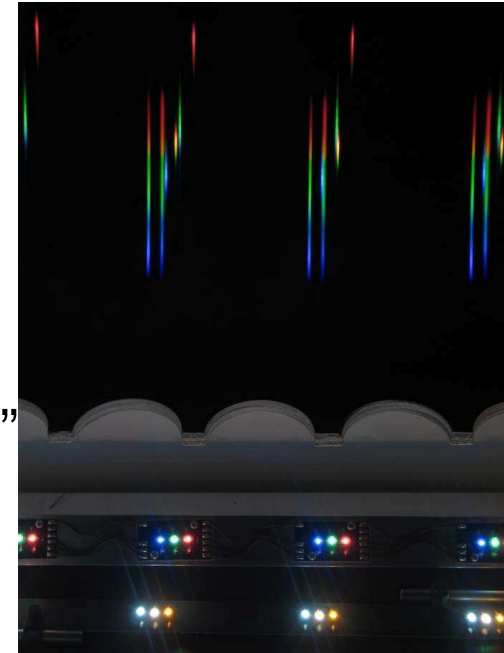
LEDs rouge, verte, bleue, ambre **"RGBA"**



LED blanc froid, rouge **"WR"**



LED blanc froid, blanc chaud, rouge, verte, bleue, ambre **"WWARGB"**



Eclairage

- LED clusters



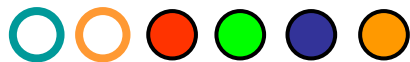
LEDs rouge, verte, bleue **“RGB”**



LEDs rouge, verte, bleue, ambre **“RGBA”**

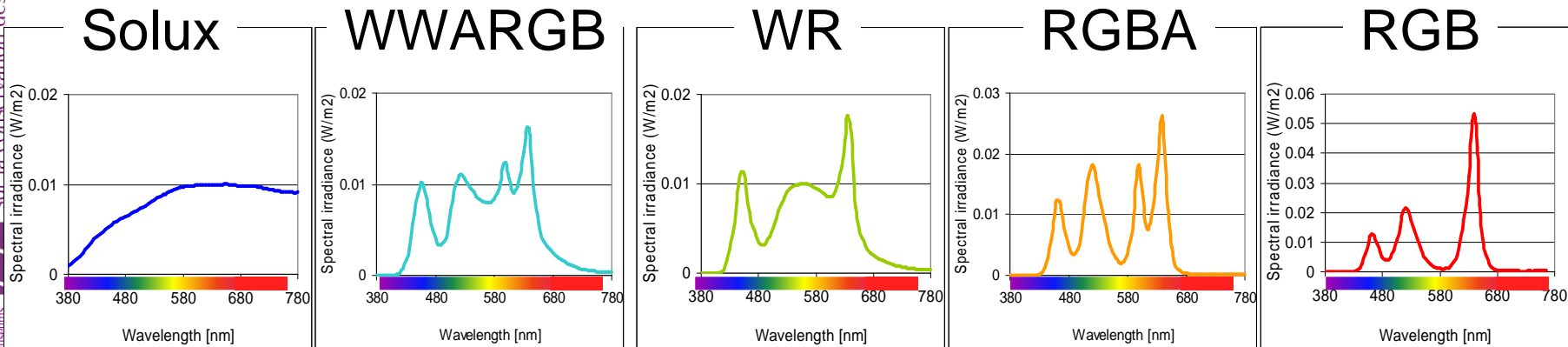


LED blanc froid, rouge **“WR”**



LED blanc froid, blanc chaud, rouge, verte, bleue, ambre **“WWARGB”**

- Référence : incandescence tungstène-halogène **“Solux”**



Expériences dans un contexte réel, avec des LEDs et des objets à voir et à manipuler

Plusieurs idées de la qualité
La discrimination des couleurs

La discrimination des couleurs

- 32 pions colorés uniformément distribués sur un cercle chromatique



Elodie Mahler, Guillaume Leprêtre

La discrimination des couleurs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- Tâche: “Remettre les pions dans le plateau dans l’ordre de leur couleur”
- 40 observateurs
 - âge < 35 ans
 - Vision des couleurs normale
- Chaque observateur est interrogé sous les 5 éclairages
 - $T_{cp} = 4000 \text{ K}$
 - $E = 600 \text{ lx}$



La discrimination des couleurs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

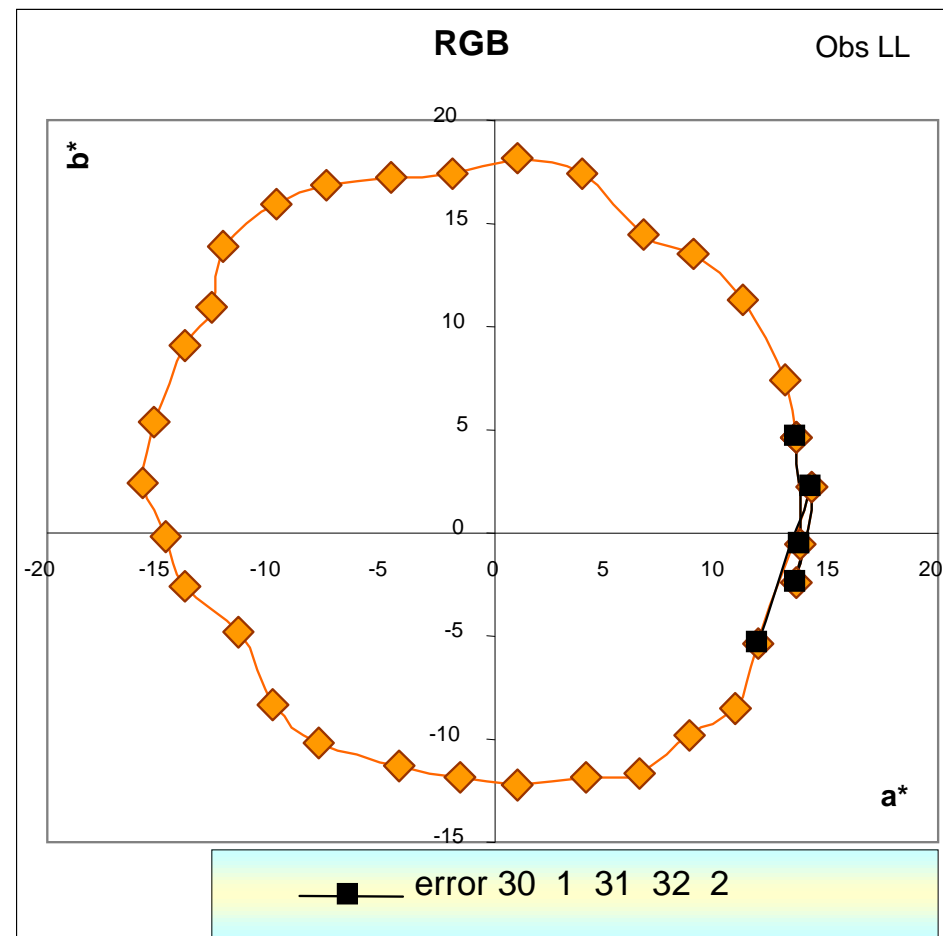
centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums

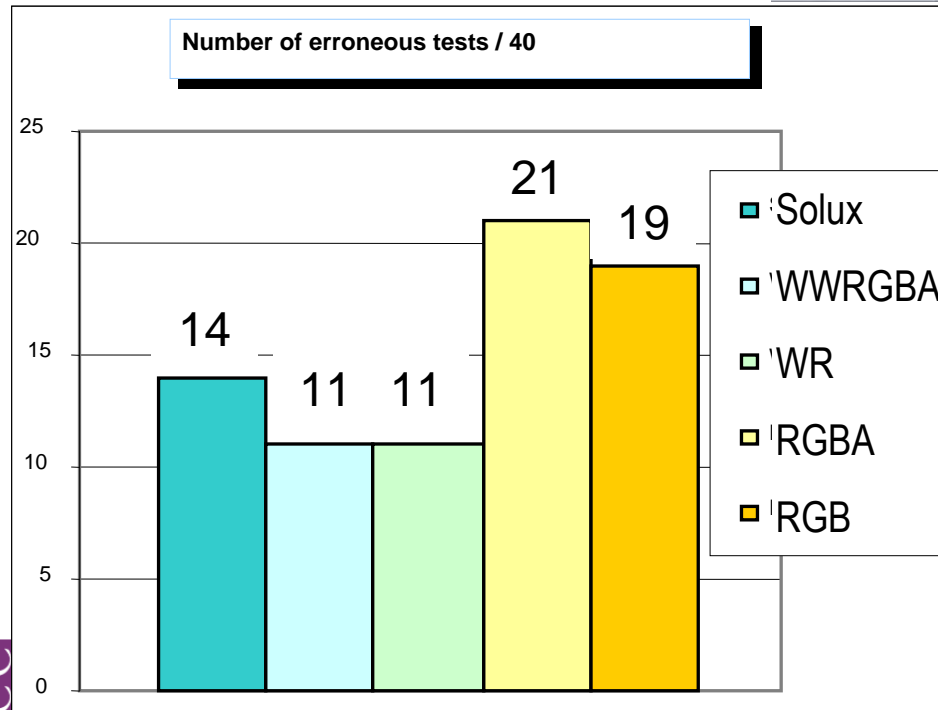
L'observateur peut réaliser une séquence dans l'ordre prévu, ou échouer (inversion, permutation)

Hypothèse : si beaucoup d'observateurs échouent, on attribuera leur échec à un défaut de qualité de l'éclairage

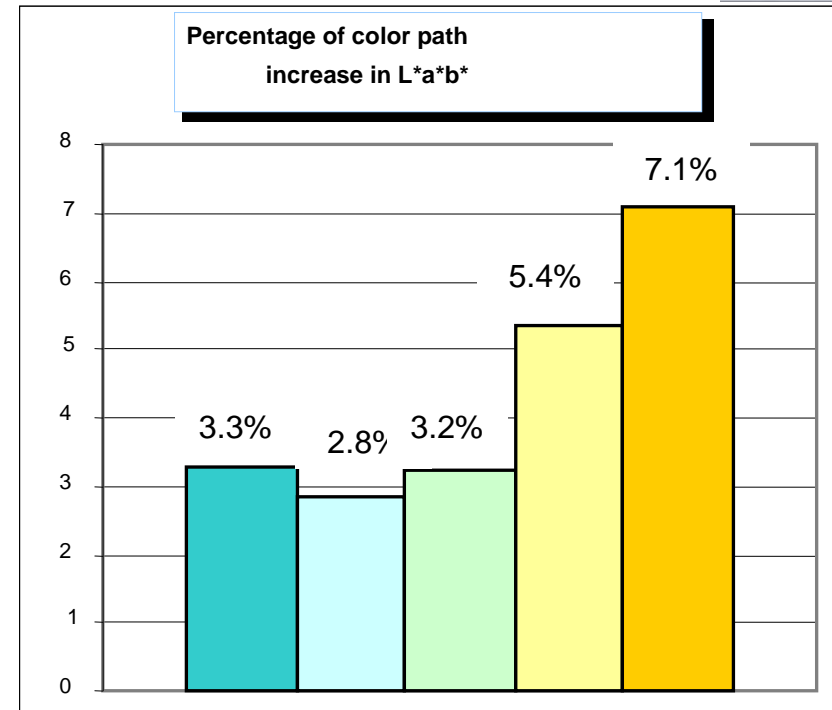


La discrimination des couleurs

- Nombre de séquences avec erreurs

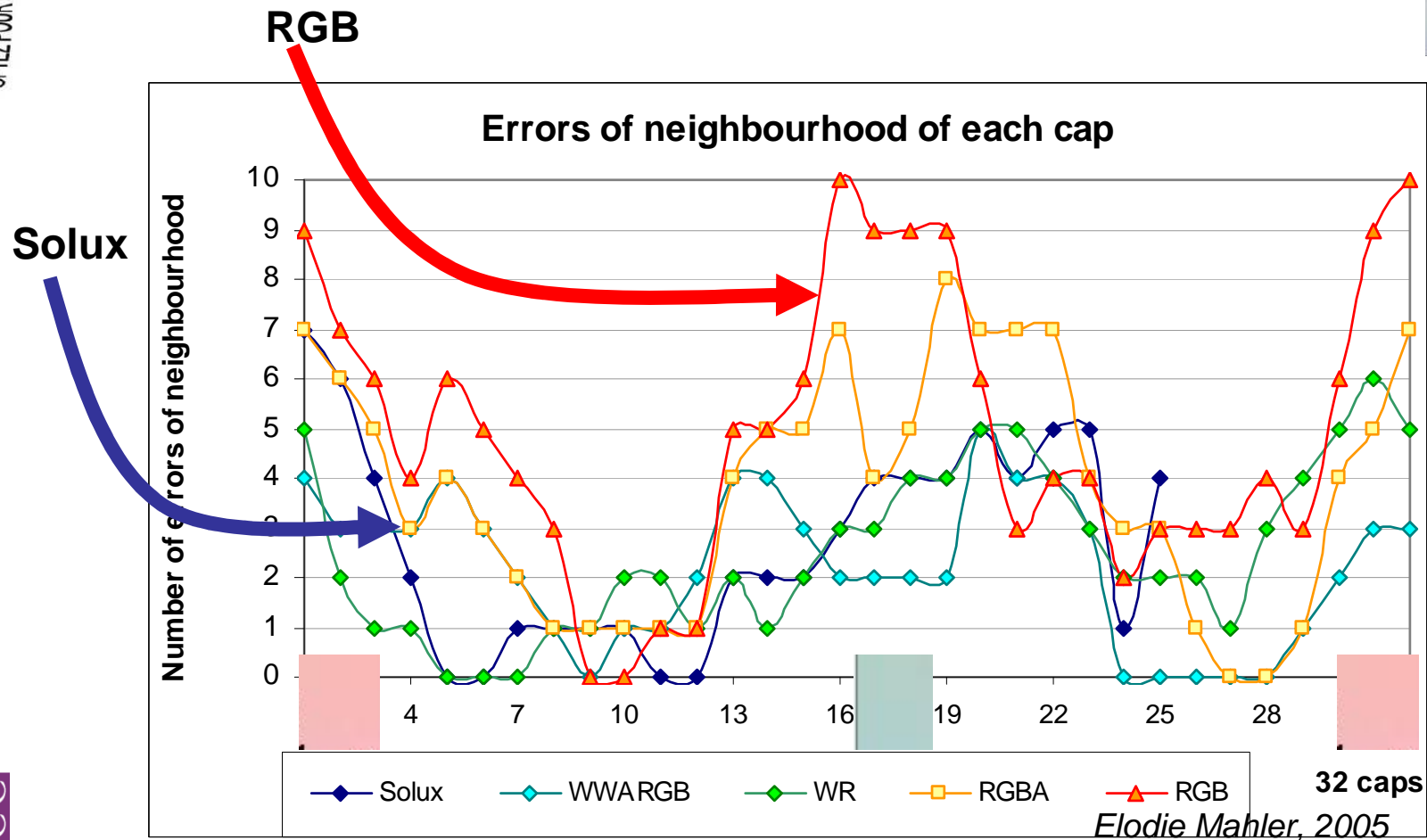


- Elévation de la plus petite différence de couleur discernable



La discrimination des couleurs

- Distribution des erreurs de classement



Expériences dans un contexte réel, avec des LEDs et des objets à voir et à manipuler

Plusieurs idées de la qualité

La discrimination des couleurs

L'apparence des couleurs

L' apparence des couleurs

- 38 échantillons de l'atlas NCS (Natural Color System)
 - Toutes les tonalités disponibles.
 - Les échantillons sont présentés un par un.





L' apparence des couleurs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums

- Tâche : Juger le degré de coloration sur une échelle numérique de 0 à 10.
 - L'échantillon neutre est placé sur la borne "0"



Jean-Jacques Ezrati, Clotilde Boust, 2007 44



L'apparence des couleurs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

- Distribution du degré de coloration

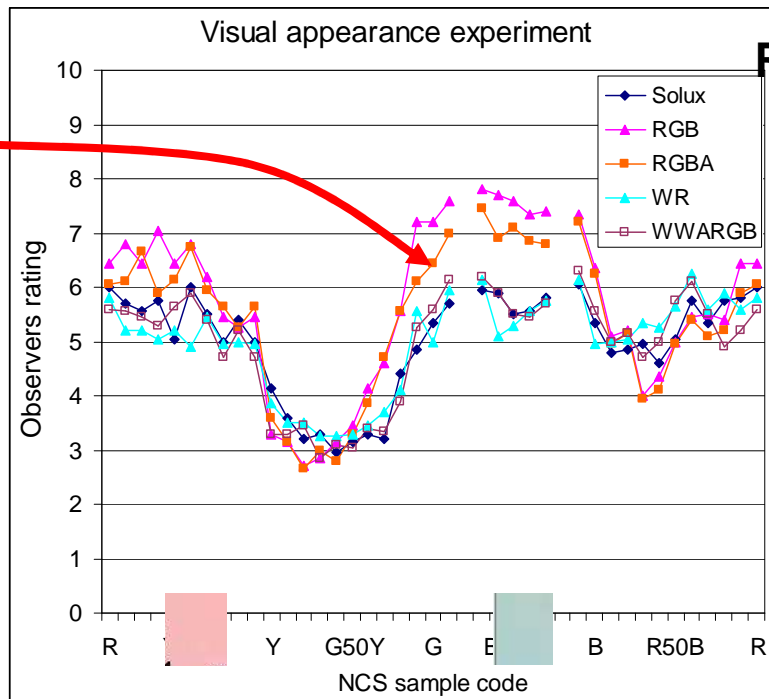
29 janvier 2010

centre de recherche sur la conservation des collections

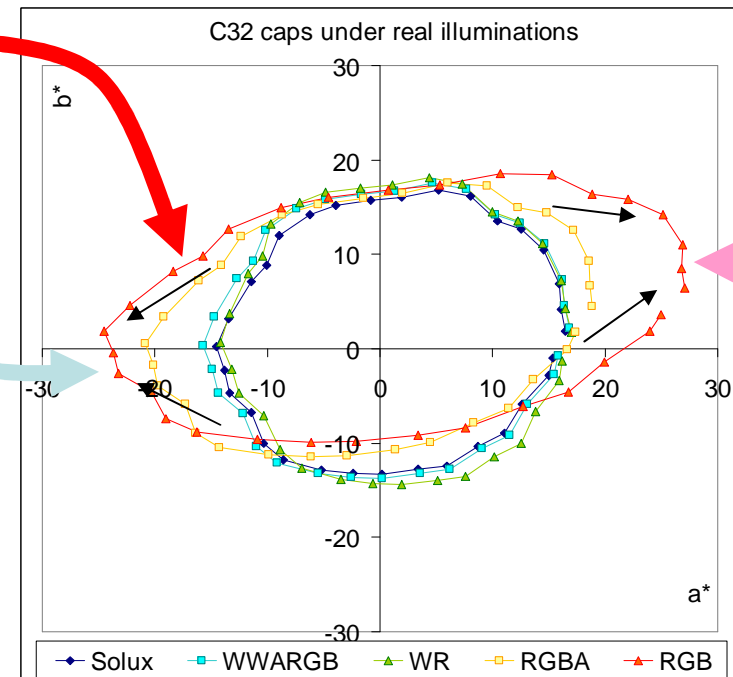


archives
bibliothèques
muséums

Echelle de coloration



RGB



CIELAB colour specification

Un paradoxe



Discrimination fine des couleurs

- Fidélité, naturel, IRC

OU



Accentuation de la coloration

- Changement d'apparence,
“embellissement”

Expériences dans un contexte réel, avec des LEDs et des objets à voir et à manipuler

Plusieurs idées de la qualité
La discrimination des couleurs
L'apparence des couleurs
Le bien-être

Qualité de l'éclairage par LEDs

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

Le bien-être ?

- Une bonne santé
 - Pas d'agression
 - Une impression de confort
 - Un sentiment inconscient
 - Des performances visuelles optimales
 - Un équilibre naturel
-
- Des réponses « visuelles non visibles »
 - La qualité de la lumière naturelle

F. Viénot : Perception de la lumière issue de LEDs. 29/01/2010

48

Performance visuelle



ASPROM
OPTIQUE POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections



archives
bibliothèques
muséums

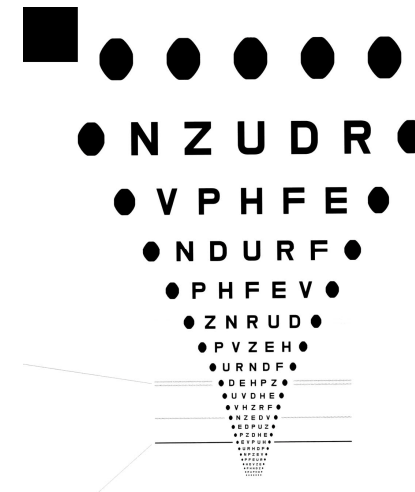
- Contrôle de la température de couleur proximale
- Contrôle de l'éclairage
- L'indice de rendu des couleurs le plus élevé ($R_a > 90$)



F. Viénot :

■ Tâches visuelles

- Acuité

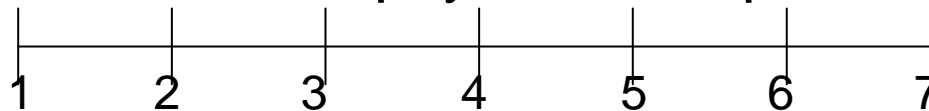


- Taux de succès et rapidité
- Performance de lecture

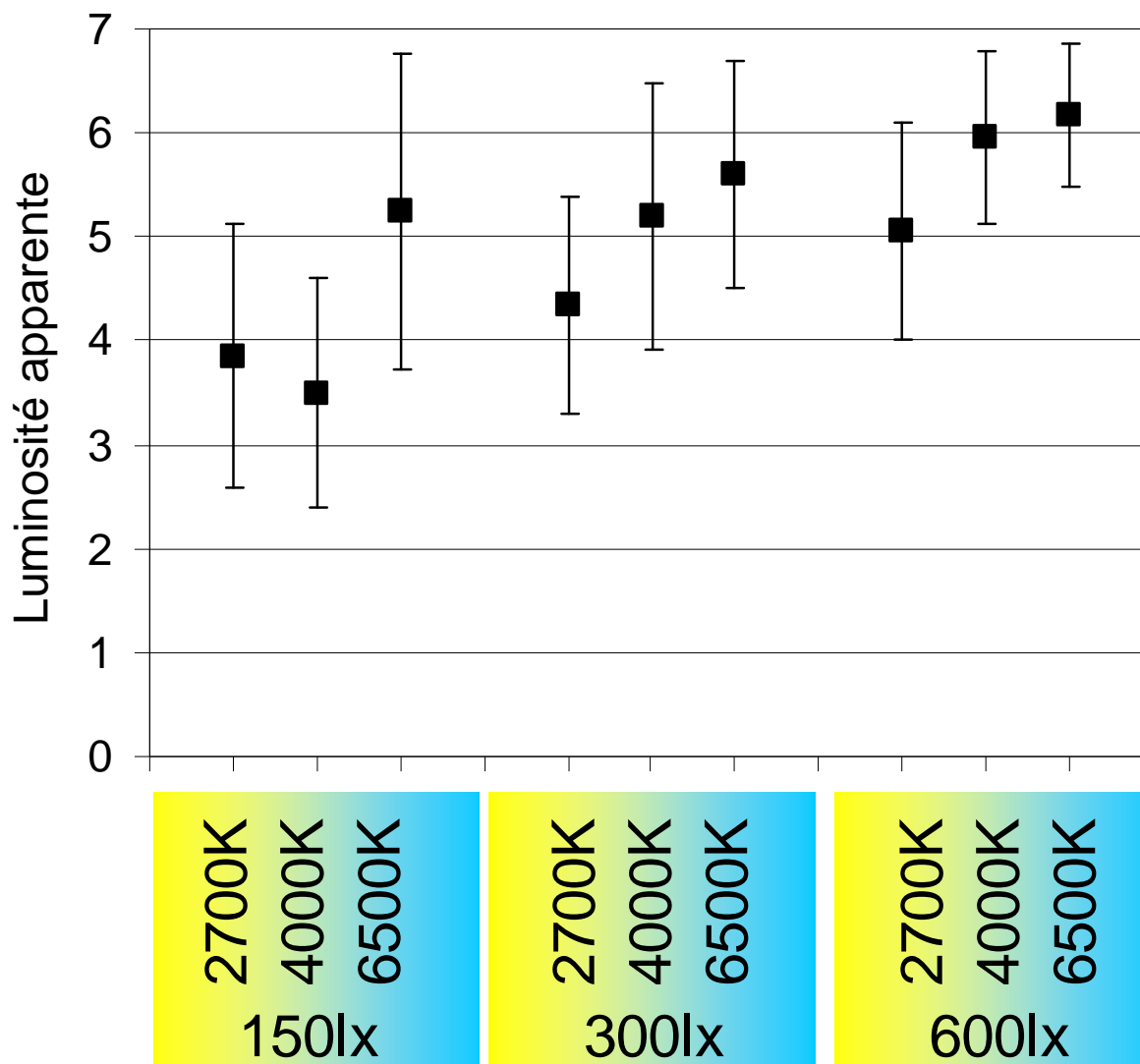
Ressenti subjectif: tâches

- *Français*
- *Sombre – Lumineuse*
- *Crépusculaire – Claire*
- *Inconfortable – Confortable*
- *Désagréable – Agréable*
- *Eblouissante – Non éblouissante*
- *Fatigante – Relaxante*
- *Froide – Chaude*
- *Triste – Gaie*
- *Rendu des couleurs artificiel –
Rendu des couleurs naturel*
- *English (my translation)*
- *Dark – Bright*
- *Dull – Clear*
- *Glaring – Non glaring*
- *Uncomfortable – Comfortable*
- *Unpleasant – Pleasant*
- *Tiring – Relaxing*
- *Cool – Warm*
- *Sad – Lively*
- *Artificial colour rendering – Natural
colour rendering*

Echelle psychométrique



Ressenti subjectif: Sombre / Lumineux



Performance visuelle et ressenti subjectif



ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- La performance, la rapidité et le taux de succès dans une tâche visuelle dépendent de l'éclairage.
 - Le ressenti subjectif dépend aussi de la température de couleur
 - Non seulement la **Luminosité** paraît augmenter quand l'éclairage augmente, ... mais, ... à éclairage donné, la **luminosité** paraît augmenter quand la **température de couleur** augmente !
 - Même chose pour la sensation d'éblouissement !

Le système visuel

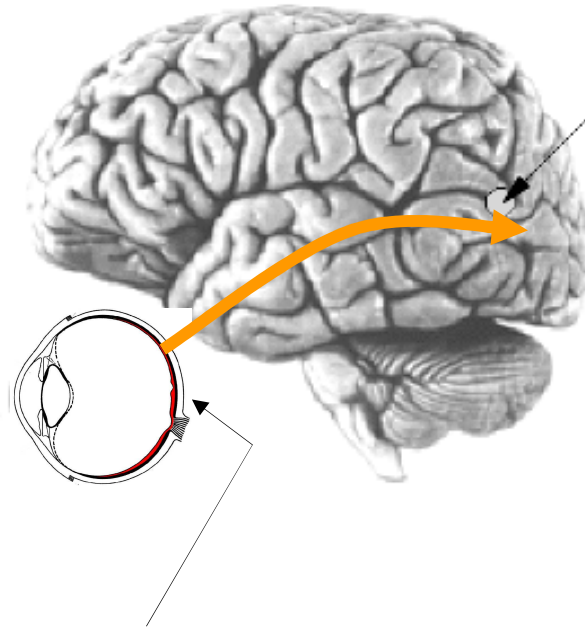
Siège du traitement de l'information dans le système visuel

CERVEAU

CORTEX

Traitement
des images

Couleur



RETINE

Cônes pour la vision de jour

Le système visuel

Siège du traitement de l'information dans le système visuel

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

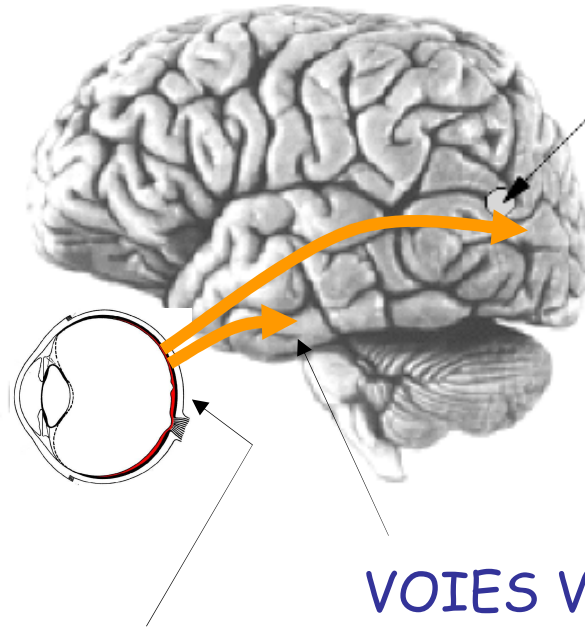
archives
bibliothèques
muséums

CERVEAU

CORTEX

Traitement
des images

Couleur



RETINE

Cônes pour la vision de jour

Bâtonnets pour la vision de nuit

VOIES VISUELLES
ACCESSOIRES

Mélanopsine pour les
contrôles réflexes

Enregistrement objectif de la pupille



ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

- L'expérience montre que, à luminance constante, la **luminosité paraît augmenter** quand la température de couleur augmente.
- Parallèlement, la **pupille rétrécit** !

L'altération du spectre peut modifier inconsciemment la réponse à la lumière. Elle pourrait se traduire par de l'inconfort visuel.

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

Expériences dans un contexte réel, avec des LEDs et des objets à voir et à manipuler

Plusieurs idées de la qualité
La discrimination des couleurs
L'apparence des couleurs
Le bien-être

Conclusion

Promoting the highest visual quality

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

■ Colour vision and colour rendering

- There is a visual paradox. The choice is betw
 - Either to maintain fidelity, discrimination, naturalness
 - Or to offer colourfulness enhancement, beautification



■ Visual performance and visual sensation

- Subjective sensation does not correlate with measured performance.
- Alteration of the spectrum may induce modification of the non-visual response to light and be reflected in visual discomfort.



Promoting the highest visual quality

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections

CR
CC

archives
bibliothèques
muséums

- Colour vision and colour rendering
 - There is a visual paradox. The choice is betw
 - Either maintain fidelity, discrimination, naturalness
 - Or offer colourfulness enhancement, beautification



- Visual performance and visual sensation
 - Subjective sensation does not correlate with measured performance.
 - Alteration of the spectrum may induce modification of the non-visual response to light and be reflected in visual discomfort.



Qualité de la lumière - Conclusion (1)

ASPROM
OPTEZ POUR L'INNOVATION

29 janvier 2010

centre de recherche
sur la conservation des collections



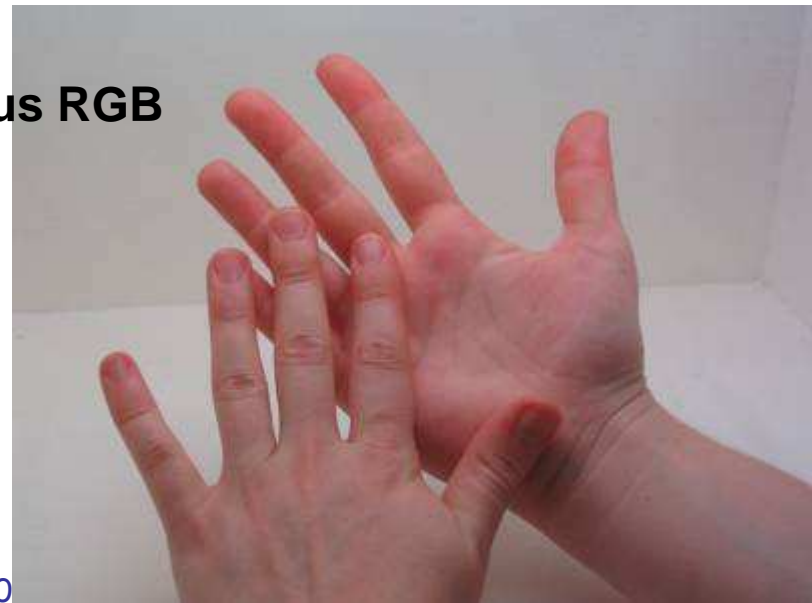
archives
bibliothèques
muséums

- Toutes les lumières ne sont pas équivalentes.
- Rendu des couleurs
 - soit Fidélité des couleurs, et discrimination fine des couleurs
 - soit “Embellissement” avec accentuation de la coloration

- ! Le gain apparent de coloration s'obtient aux dépens de la discrimination fine des couleurs.



Sous RGB



Photos Blandine Placais

Qualité de la lumière - Conclusion (2)

- Il convient de développer **plusieurs indices de qualité** pour la lumière, selon **l'objectif** que l'on se fixe.

Fidélité
Discrimination fine
Naturel ?



Coloration
Vivacité
Préférence ?



Fonctions visuelles
Ressenti subjectif
Confort et santé ?

- Pour la vie quotidienne, priorité à la **fidélité** des couleurs, priorité à un **spectre complet**, proche du spectre de la **lumière naturelle**.

Merci de votre attention

- VIÉNOT F., MAHLER E., EZRATI J.-J., BOUST C., RAMBAUD A., BRICOUNE A., 2008, Color appearance under LED illumination: The visual judgment of observers. *Journal of Light and Visual Environment*, 32 :208-213.
- MAHLER E., EZRATI J.-J., VIÉNOT F., 2009, Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering. *Color Research & Application*, 34 : 8-17.
- VIÉNOT F., DURAND M.-L., MAHLER E., 2009, Kruithof's rule revisited using LED illumination. *J. Mod. Optics*, 56 : 1433-1446.
- VIÉNOT F., DURAND M.-L., MAHLER E., 2009, The effect of LED lighting on performance, appearance and sensations, *Proceedings of the CIE Light and Lighting Conference*, Budapest, 27-29 May 2009.