

A. Questions

1. L'efficacité lumineuse maximale K_m est de 683 Lm/W. Elle est atteinte par un rayonnement monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 555$ nm pour laquelle $V(555 \text{ nm}) = 1$. La couleur correspondante est un « vert-jaune ».

C'est la longueur d'onde qui, à luminance énergétique égale, provoque la plus grande sensation de luminosité. Aucune autre longueur d'onde n'est capable de l'égaler en cela.

2. La couleur que nous percevons d'un objet dépend des caractéristiques spectrales (nature et quantité des différentes longueurs d'onde qui la compose) de la surface de cet objet et de la source qui l'éclaire.

Par exemple, la surface d'une tomate est telle que seule la composante rouge de la lumière est réfléchie, toutes les autres sont absorbées. Eclairée par une source lumineuse blanche composée de toutes les longueurs d'ondes du visible, elle paraîtra rouge. Cependant, un objet ne peut réfléchir que les longueurs d'onde qu'il reçoit de la source.

Par exemple, si on illumine une tomate avec une lumière verte, elle paraîtra noire car la lumière verte ne contient pas de composante rouge.

Si elle est éclairée avec une lumière magenta (composé de rouge et de bleue), la tomate paraîtra toujours rouge.

La couleur apparente est cette couleur perçue dans un contexte défini.

La couleur intrinsèque d'un objet ne peut être perçue que si on l'éclaire avec une *source normalisée*, bien définie, dont le flux lumineux contient toutes les longueurs d'ondes en même quantité. On utilise pour cela des lampes halogènes de température de filament comprise entre 5500 et 6000 K, qui émettent un flux de couleur blanche, contenant toutes les longueurs d'onde en quantité approximativement égales.

3. La notion de « lumière blanche » est difficile à définir. Sur le plan formel, le « blanc idéal » est caractérisé par une densité spectrale d'énergie constante dans tout le domaine visible ($S_\lambda = \text{cste}$).

Il n'est, toutefois, pas seul à provoquer cette sensation : tout rayonnement à spectre continu et suffisamment lisse produit une sensation de blanc. Cela est vrai, pour autant que rien ne nous rappelle un rayonnement considéré comme blanc et ressenti quelques minutes auparavant.

Ainsi la plupart des lampes halogènes, dont le filament atteint 3000 à 4000 K, nous apparaissent blanches en absence de lumière du jour. En présence de celle-ci, elles nous apparaissent de teinte jaunâtre. Cela demeure ainsi tant que la sensation de couleur blanche, due à la lumière du jour, persiste dans notre mémoire.

Certains tubes fluorescents de température de couleur proche de 3000 K (éclairage des boulangeries et des boucheries par ex.) provoquent le même effet.

4. Pour choisir trois couleurs primaires, permettant par addition et mélange de reproduire la plus grande part de couleurs perçues, il suffit :
- de prendre deux couleurs pures suffisamment éloignées aux deux extrémités du spectre des couleurs visibles ;
 - de choisir la troisième primaire au milieu du spectre.

C'est le cas des primaires RGB constituées des rayonnements monochromatiques de 435 (bleu), 546 (vert) et 700 nm (rouge).

Trois groupes de cellules photosensibles, munis de 3 pigments différents, tapissent la rétine. Le système des 3 primaires reproduit le mécanisme de perception des couleurs de l'œil humain dans la mesure où l'absorption maximale de ces pigments correspond approximativement aux couleurs définies par les 3 primaires RGB.

5. Le système chromatique RGB est appliqué, de nos jours encore, en télévision. On utilise dans ce cas, comme pour les écrans informatiques en couleur, 3 poudres de phosphore différentes qui reproduisent les couleurs des 3 primaires (rayonnements monochromatiques de 700, 546 et 435 nm).

Ce mode de reproduction des couleurs est limité : seule une partie du diagramme CIE, contenant toutes les couleurs réelles, est couverte par le triangle RGB, représentant l'ensemble des couleurs reproductibles par ce système (les verts et les turquoises en sont absents).

Une tentative a été effectuée dans les années 60 pour améliorer la restitution de ces deux couleurs. La primaire G a été remplacée par une autre primaire G, correspondant au sommet du diagramme CIE (520 nm).

Cette solution désavantage considérablement les jaunes et les oranges, auxquels nous sommes particulièrement sensibles, puisqu'ils sont présents dans la coloration de la peau du visage. Les 3 primaires RGB initiales sont, de ce fait toujours en usage.

B. Problèmes

Problème 1 :

Le facteur de transmission d'un matériau est donné par le quotient du flux lumineux transmis par ce dernier et du flux incident. Il s'agit donc de déterminer :

- le flux ϕ émis par la source à l'intérieur du globe
- le flux ϕ_t transmis finalement par le globe

Le premier est donné par la relation suivante, qui découle de la définition même de l'intensité :

$$\varphi = I \cdot \Omega [\text{Lm}]$$

où Ω [sr] n'est autre que l'angle-solide soutenu par une sphère, valant $4 \cdot \pi$ [sr].

On a donc : $\varphi = 50[\text{cd}] \cdot 4 \cdot \pi[\text{sr}] = 628[\text{Lm}]$

Le flux transmis peut être déterminé à partir de l'exitance M [Lm/m^2] du globe, grâce à la relation :

$$\varphi_t = M \cdot A [\text{Lm}]$$

où $A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ représente l'aire du globe de rayon $R = 1$ m.

On a donc : $\varphi_t = M \cdot A = M \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 35 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 1^2 = 440 \text{ Lm}$

Le facteur de transmission du matériau τ_d [-] vaut donc :

$$\tau_d = \frac{\varphi_t}{\varphi} = \frac{440}{628} = 0.70$$

Le verre diffusant, constituant la sphère, transmet donc 70% du flux émis à l'intérieur par la source. Il s'agit du facteur de transmission diffuse, par opposition à la transmission régulière : le facteur correspondant τ_r est nul dans le cas d'un matériau lambertien, puisque tout le flux est transmis de façon parfaitement diffuse.

Problème 2 :

a)

Les contributions des deux flux lumineux provenant des sources S_1 et S_2 sont additionnées, dans la mesure où il n'y a pas d'interférences entre ces derniers (ce sont des faisceaux de lumière incohérente, contrairement à la lumière émise par un laser).

La luminance L résultant de la superposition des deux faisceaux est donc donnée par l'addition des luminances L_1 et L_2 , causée par chaque source séparément :

$$L = L_1 + L_2 [Cd/m^2]$$

L_1 et L_2 sont liées aux éclairements respectifs E_1 et E_2 , sur la base des relations suivantes :

$$L_1 = \frac{\rho \cdot E_1}{\pi} = \frac{0.8 \cdot 785}{3.14} \approx 200 [Cd/m^2]$$

$$L_2 = \frac{\rho \cdot E_2}{\pi} = \frac{0.8 \cdot 390}{3.14} \approx 100 [Cd/m^2]$$

La luminance résultante de la feuille vaut donc :

$$L = 100 + 200 = 300 Cd/m^2$$

La couleur apparente de la feuille se situe sur la droite reliant les sources S_1 et S_2 sur le diagramme chromatique CIE : elle se trouvera entre les couleur bleue, cyan et vert. Pour connaître la teinte exacte, il faudrait calculer les quantités de couleur q_1 et q_2 (cf. série 6).

b)

Le coefficient de réflexion de la surface est maximal entre les longueurs d'ondes 530 nm et 610 nm : les autres longueurs d'onde ont des coefficients de réflexion faibles. On peut en déduire que sa couleur intrinsèque sera dans les verts-jaunes.

On calcule des luminances réfléchies sur cette surface en utilisant les coefficients de réflexion correspondant aux longueurs d'ondes de nos sources : 390 nm et 500 nm :

$$L_{1,surface} = \frac{\rho \cdot E_1}{\pi} = \frac{0.02 \cdot 785}{3.14} \approx 5 [Cd/m^2]$$

$$L_{2,surface} = \frac{\rho \cdot E_2}{\pi} = \frac{0.1 \cdot 390}{3.14} \approx 12.4 [Cd/m^2]$$

La couleur apparente de la surface sera à nouveau sur la droite reliant S_1 et S_2 sur le diagramme chromatique CIE ; elle sera plus proche de S_2 (vert) que pour la feuille, puisqu'ici $L_{2,surface} > L_{1,surface}$ alors que c'était l'inverse pour la feuille blanche.

Problème 3 :

Le premier graphe représente le facteur de réflexion de la surface (fraction : entre 0 et 1 et sans unité) en fonction de la longueur d'onde en nm. La variation du facteur de réflexion en fonction de la longueur d'onde est une caractéristique essentielle de la surface, qui exprime son pouvoir de réflexion pour les différentes couleurs spectrales (couleurs pures).

La figure 1 illustre le comportement de ce facteur en fonction de la longueur d'onde pour la surface considérée : le pouvoir de réflexion maximal est atteint dans ce cas pour la longueur d'onde de 570 nm, correspondant à la couleur « verte ».

Propriétés spectrales de la surface

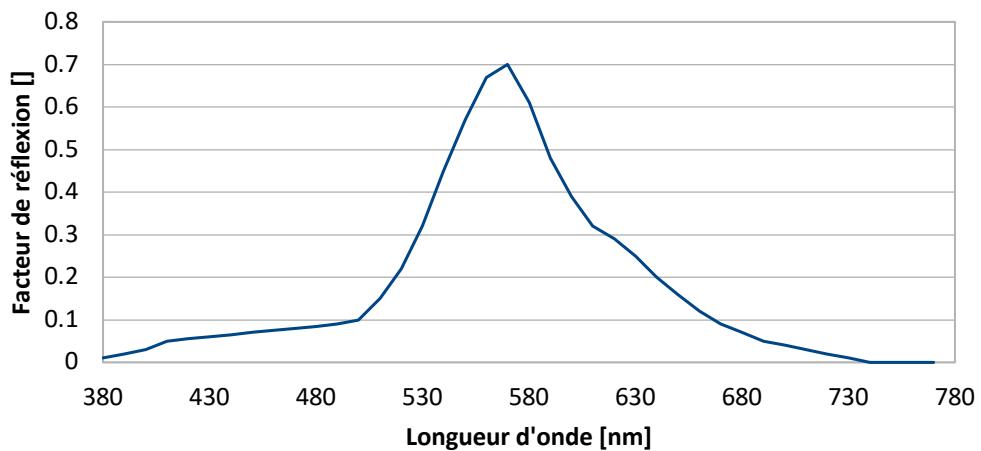


Figure 1 Facteur de réflexion de la surface

Le deuxième graphe représente les densités spectrales d'émission (en mW émis par 10 nm) des deux sources (trait foncé pour la lampe Sodium Haute Pression et trait clair pour la source normalisée D_{65}). Les deux sources considérées se distinguent par leurs propriétés spectrales très différentes (cf. figure 2).

Comparaison spectrale des sources

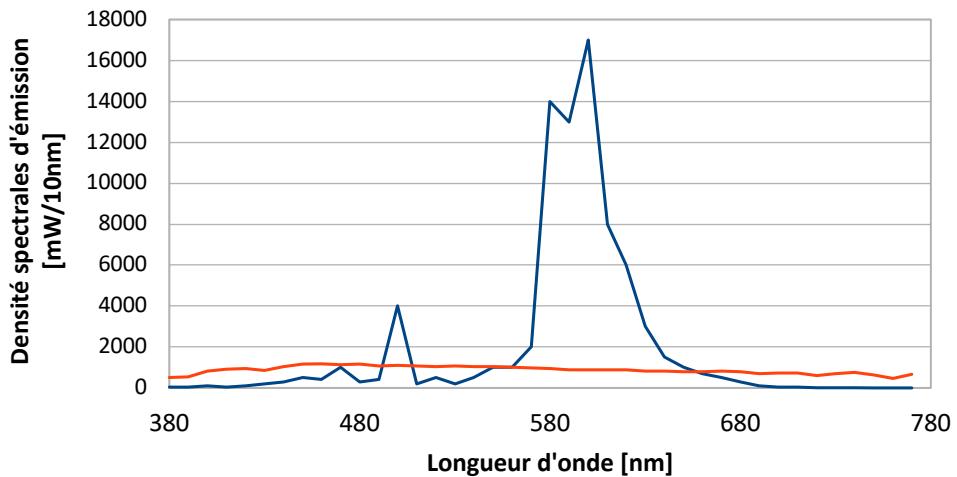


Figure 2 Comparaison des spectres d'émission des sources.
Densité spectrale du sodium (ligne foncée) et de la source D₆₅ (ligne claire)

La source « D₆₅ » est une *source normalisée* (source de référence) et possède un spectre continu et « lisse », caractéristique des sources de lumière blanche. Cette source constitue de fait une source proche de la lumière du jour, dont la température de couleur est égale à 6500 K.

Quant à la lampe au sodium haute pression, elle se distingue par une haute densité spectrale d'émission énergétique aux environs de la longueur d'onde de 600 nm : c'est ce qui explique la couleur « jaune/orange » très marquée qui lui est propre (ex. des passages de sécurité pour piétons). Cette caractéristique d'émission en forme de pic prononcé est bien visible sur la figure 2 : il ne s'agit bien entendu pas d'une source de référence !

Comparaison spectral en réflexion

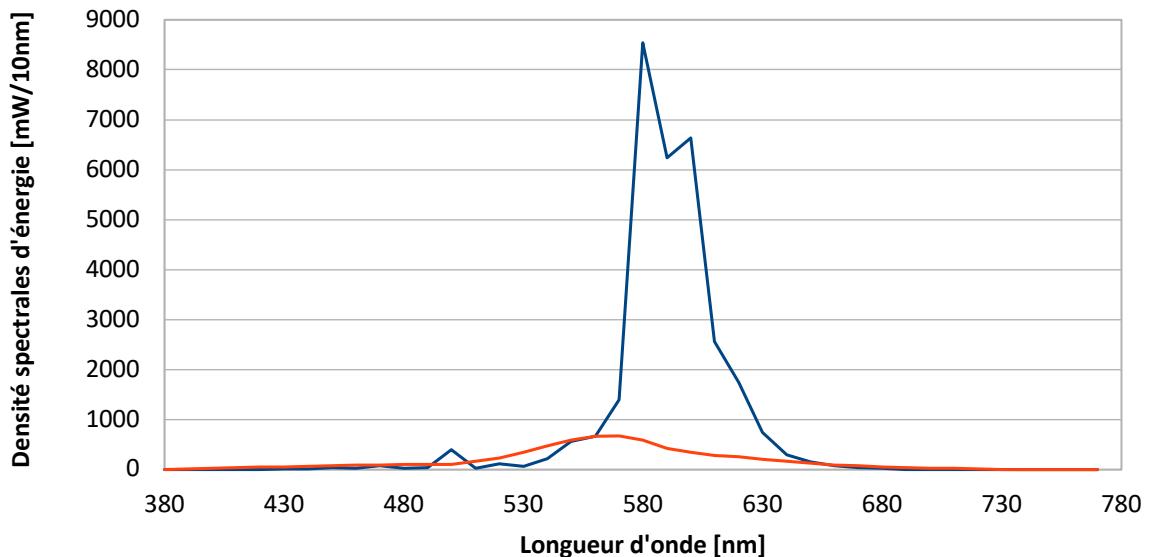


Figure 3 Comparaison des spectres de réflexion des sources, pour la source au sodium (ligne foncée) et de la source « D65 » (ligne clair).

Le troisième graphe illustre les spectres des flux réfléchis R_λ pour les deux sources en question, en mW réfléchis par 10 nm. Les caractéristiques spectrales du flux réfléchi par la surface considérée, lorsqu'elle est éclairée par l'une ou l'autre de ces sources, s'obtiennent simplement pour chaque longueur d'onde par le produit suivant :

$$R_\lambda = \rho_\lambda \cdot S_\lambda$$

où S_λ est le flux incident et ρ_λ le coefficient de réflexion à la longueur d'onde λ .

Les spectres des flux réfléchis pour les deux sources en question (figure 4) se distinguent par :

- une forte composante de couleur « jaune/orange » (580–600 nm), lorsqu'on éclaire la surface avec une lampe au sodium (couleur apparente)
- une légère teinte de couleur « verte » (560–570 nm), lorsqu'on éclaire la surface par une source de référence (couleur intrinsèque).

On observe par ailleurs une similitude entre cette dernière courbe et celle du facteur spectral de réflexion de la surface.