A. Questions

1. Les unités SI des grandeurs photométriques lumineuses sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Chacune de ces unités peut être exprimée à partir de l'unité du flux lumineux (le Lumen) en utilisant leurs définitions mathématiques respectives. On obtient ainsi :

Grandeur lumineuse	**Unité SI**	**Unités exprimées à partir du flux lumineux**
Flux	Lumen	Lm
Éclairement	Lux	Lux = Lm · m^{-2}
Intensité	Candela	Cd = Lm · sr^{-1}
Luminance	Candela par mètre carré	Cd/m^2 = Lm · sr^{-1} · m^{-2}

On voit aussi qu'il existe une relation logique entre unités photométriques (grandeurs lumineuses) et unités radiométriques (grandeurs énergétiques), dans la mesure où il suffit de remplacer le Lumen [Lm] par le Watt [W] pour passer de l'une à l'autre (cf. Annexe A 1.2 du complément du cours).

Rappel : Les 7 unités de base du système international sont : le kilogramme **kg** pour la masse, la seconde **s** pour le temps, le mètre **m** pour la longueur, le kelvin **K** pour la température, l'ampère **A** pour l'intensité électrique, la mole **mol** pour la quantité de matière et le candela **Cd** pour l'intensité lumineuse. S'y ajoute le radian **rad** pour la mesure d'angle et le stéradian **sr** pour les angles solides. Toutes les unités pouvant être dérivées de ces unités de base font parties du système international.

2. La courbe de sensibilité spectrale V(λ), dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1, exprime la sensibilité de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde visibles (sa valeur est nulle pour les longueurs d'ondes invisibles, auxquelles l'œil humain est insensible par définition).

À rayonnement d'énergie constant, cette courbe indique que la sensation lumineuse est maximale pour les valeurs de V(λ) proches de 1 (couleurs « jaune-vert », de longueur d'onde de 555 nm). Elle montre aussi que les bleus et les rouges provoquent, à énergie constante, une sensation nettement plus faible. Pour provoquer une même sensation, une plus grande quantité d'énergie est nécessaire à ces longueurs d'onde. À l'inverse, les sources riches en jaune ou vert, comme par exemple les lampes à sodium, requièrent moins d'énergie pour provoquer une sensation visuelle de même intensité.

3. Dans le cas d'un rayonnement composé d'une seule longueur d'onde (rayonnement monochromatique), la relation entre une grandeur photométrique et son équivalent énergétique est donnée par (cas de la luminance par exemple) :

$$L(\lambda) = K \cdot V(\lambda) \cdot L_e(\lambda)$$

Dans le cas d'un rayonnement comportant plusieurs longueurs d'onde (rayonnement polychromatique), il est nécessaire de sommer chaque contribution respective, la relation devient :

$$L = K \cdot \sum_\lambda [V(\lambda) \cdot L_e(\lambda)]$$

où le symbole "Σ" représentant la somme sur les différentes longueurs d'ondes visibles, c'est-à-dire de 380 à 780 nm.

B. Problèmes

Problème 1 :

L'éclairement énergétique reçu par le radiomètre est donné par :

$$E_e = \varphi_e / A_r = (300 \cdot 10^{-3})/(3 \cdot 10^{-4}) = 1'000 \mathrm{W/m^2}$$

L'efficacité lumineuse [Lm/W] caractérise l'intensité de la sensation que crée un rayonnement dans l'œil. Ce paramètre est égal au ratio du flux lumineux (mesuré en Lumen) sur le flux énergétique (mesuré en Watt), il dépend de la répartition spectrale de ce rayonnement. En ce qui concerne la lumière du jour, ce rapport varie en fonction des conditions climatiques, avec l'ensoleillement comme principal paramètre. Nous prenons ici une valeur moyenne standard : 110 Lm/W.

L'éclairement lumineux correspondant à l'éclairement énergétique vaut donc :

$$E = \eta \cdot E_e = 110 \cdot 1'000 = 110 \mathrm{kLm/m^2}$$

Problème 2 :

a) Dans le cas d'un rayonnement monochromatique, la luminance s'obtient par la relation suivante:

$$L(\lambda) = K \cdot V(\lambda) \cdot L_e(\lambda)$$

En remplaçant par les valeurs numériques :

$$K = 683 \mathrm{Lm/W}$$
$$V(450\mathrm{nm}) = 0{,}038 (\text{cf. Annexe A 1.1})$$
$$L_e(450\mathrm{nm}) = 12 \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}$$

On obtient : $L(450\mathrm{nm}) = 311 \mathrm{Cd \cdot m^{-2}}$

b) Pour déterminer la luminance résultant de l'addition d'une longueur d'onde supplémentaire (670 nm), il suffit d'additionner les contributions de chaque longueur d'onde, soit :

$$L = K \cdot [V(450\mathrm{nm}) \cdot L_e(450\mathrm{nm}) + V(670\mathrm{nm}) \cdot L_e(670\mathrm{nm})]$$
$$\rightarrow L = 683 \cdot (0{,}038 \cdot 12 + 0{,}032 \cdot 12)$$
$$\rightarrow L = 573 \mathrm{Cd \cdot m^{-2}}$$

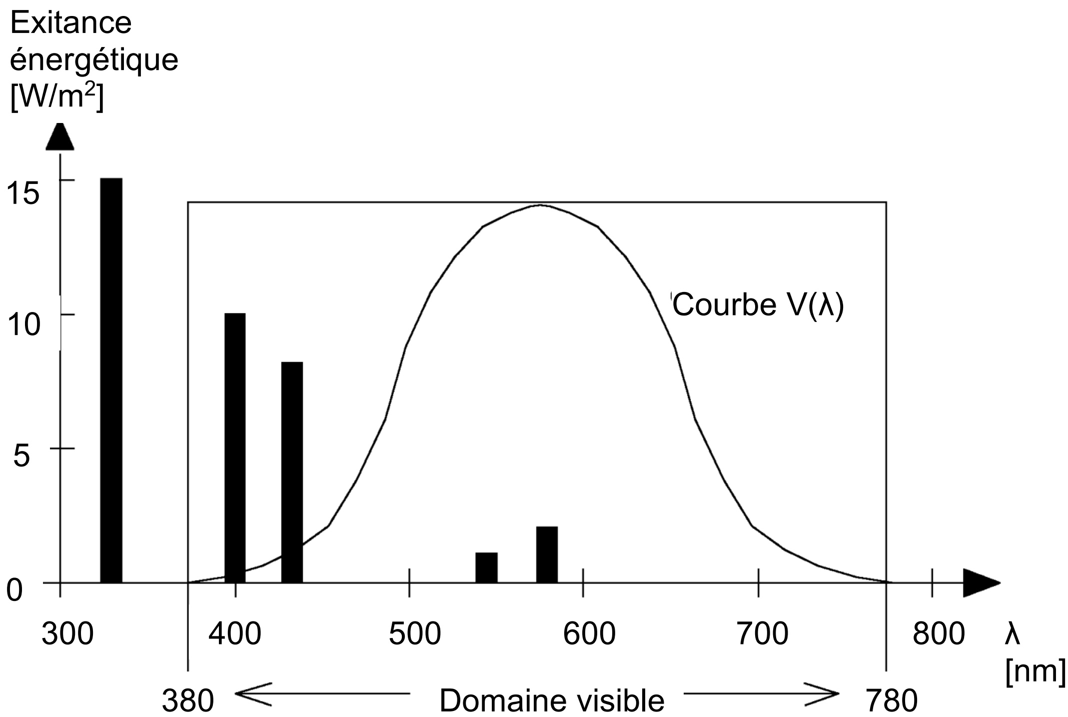
En procédant de la même manière pour la 3ème longueur d'onde, il vient :

$$L = 683 \cdot (0{,}038 \cdot 12 + 0{,}032 \cdot 12 + 0{,}757 \cdot 12)$$
$$\rightarrow L = 6'778 \mathrm{~Cd \cdot m^{-2}}$$

On voit ainsi que la plus grande partie de la sensation visuelle est due à la contribution du rayonnement de 590 nm, plus proche du maximum de la courbe V(λ), situé dans le « jaune-vert ».

Problème 3 :

Il est nécessaire, tout d'abord, d'identifier les raies d'émission spectrales situées dans le spectre visible (380 à 780 nm). Celles-ci sont au nombre de quatre (voir figure suivante) : leurs longueurs d'ondes sont de 405, 436, 546 et 578 nm.



a) On procède pour chacune d'entre elles, au recensement de leur exitance énergétique propre M_{ei} [W/m^2], puis à leur pondération à l'aide de la courbe de sensibilité spectrale V (λ) (cf. annexe A 1.1), de façon à déterminer leur exitance lumineuse M_i [Lm/m^2] :

$$M_i = K_m \cdot V(\lambda_i) \cdot M_{ei}$$

Les valeurs correspondant aux quatre longueurs d'onde visibles sont données à la table suivante :

λ_i [nm]	M_{ei} [W/m^2]	$V(\lambda_i)$	$V(\lambda_i) \cdot M_{ei}$ [$W_{lumineux}$/m^2]
405	10	0,0008	0,008
436	8	0,018	0,144
546	1	0,979	0,979
578	2	0,886	1,772
	21		**2,903**

L'exitance énergétique totale des longueurs d'onde visibles est donc de 21 W/m^2.

L'exitance lumineuse totale correspondante est donnée par :

$$M[\text{Lm/m}^2] = K_m \cdot \sum_{\lambda_i}[V(\lambda_i) \cdot M_{ei}]$$
$$= 683 \cdot 2.903 = 1'982\text{Lm/m}^2$$

b) Puisque 30% seulement de la puissance consommée par la source est dissipée dans le visible, la densité de cette puissance consommée est donc donnée par :

$$M_{e\text{totale}}[\text{W/m}^2] = 21/0.3 = 70\text{W/m}^2$$

Ce paramètre comprend, en plus de la puissance rayonnée dans le domaine des longueurs d'onde visibles, la partie de la puissance de la lampe émise hors du visible ainsi que les déperditions thermiques par conduction et convection.

L'efficacité lumineuse globale η [Lm/W] de la source, vaut donc :

$$\eta = \frac{1'982[\text{Lm/m}^2]}{70[\text{W/m}^2]} = 28\text{Lm/W}$$

On constate ainsi que l'efficacité lumineuse de cette source est faible (la lumière naturelle a une efficacité lumineuse d'environ 110 Lm/W). Cela est compréhensible dans la mesure où moins d'un tiers de la puissance électrique de la source est « utilisée » dans le visible.

Une manière d'améliorer l'efficacité lumineuse d'une source consiste à faire en sorte que la presque totalité de sa puissance serve à produire des rayonnements visibles (et non de la chaleur sous forme d'infrarouge).