

Distance maximale de visibilité

1 Calculs

1.1 Seuil scopique de vision

Le seuil scopique absolu de visibilité est donné par :

$$I \geq I_{min} \sim 2,5 \times 10^{-6} \text{ lumen/m}^2 \quad (1)$$

Où I_{min} est le flux lumineux minimum pouvant être perçu pour une source fixe éclairant constamment.

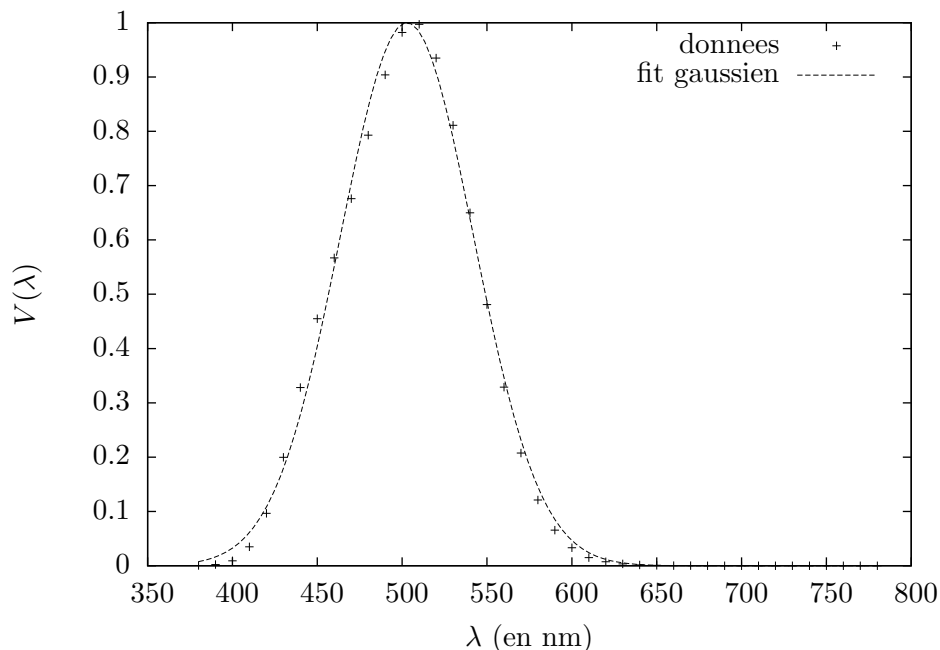
Par ailleurs le flux lumineux en lumen/m² (ou "lux") est donné par :

$$I = \frac{L}{d^2} = \frac{L_0}{d^2} \int_0^{+\infty} V(\lambda)p(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Où $L_0 = 1700\text{lumen/W}$ en vision scopique, V est l'efficacité lumineuse spectrale relative, et $p(\lambda)$ la puissance du signal lumineux (en W) comprise dans l'intervalle $[\lambda, \lambda + d\lambda]$.

La fonction V a l'allure donnée sur la figure (1). On réalise un fit gaussien des données expérimentales afin d'en obtenir une interpolation fiable qui permette le calcul de l'intégrale (2).

FIGURE 1 – Efficacité lumineuse spectrale et fit $V(\lambda)$ sous la forme $\exp((\lambda - \lambda_0)^2/2\Delta\lambda^2)$. On trouve $\lambda_0 = 503$ nm, $\Delta\lambda^2 = 40$ nm.



1.2 Corps noir

Les étoiles sont des corps noirs. Aussi il est possible de considérer, si on néglige les phénomènes atmosphériques, que $p(\lambda)$ est simplement le spectre d'un corps noir (loi de planck). Dans ce cas, la valeur de l'intégrale ne dépend que de la température et du rayon de l'étoile :

$$I = 4\pi \frac{R_*^2}{d^2} I_*(T) = 4\pi L_0 \frac{R_*^2}{d^2} \sigma T_*^4 \eta(T) \quad (3)$$

Ici η est une fonction sans dimension qui représente le "rendement lumineux" de l'étoile :

Et par ailleurs :

$$\eta(T) = \frac{1}{\sigma T_*^4} \int_0^{+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{e^{((\lambda-\lambda_0)^2/2\Delta\lambda^2)}}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} H(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

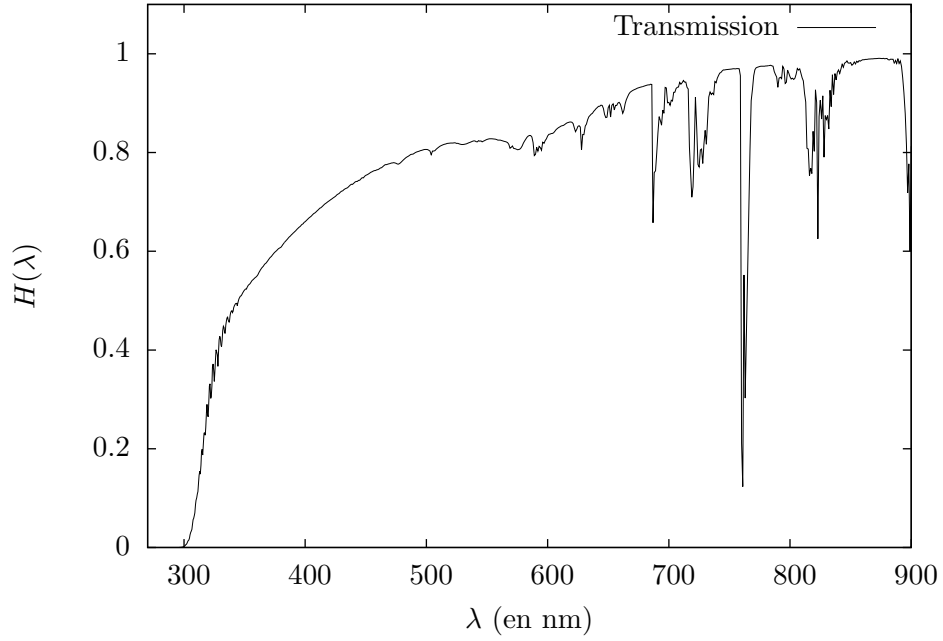
La fonction $\lambda \mapsto H(\lambda)$ représente la fraction de rayonnement transmise à travers l'atmosphère (à la verticale par exemple).

η est nécessairement plus petit que 1. Dans le cas idéal d'un rayonnement monochromatique à la longueur d'onde de sensibilité maximum de l'oeil $\eta = 1$. Pour un corps noir cependant le spectre est clairement non monochromatique et le rendement plus faible que 1. La courbe de $\eta(T)$ est donnée figure 3.

1.3 Atmosphère

La courbe de transmission de l'atmosphère à la verticale est donnée par la figure suivante :

FIGURE 2 – Courbe de transmission $H(\lambda)$ de l'atmosphère (traversée à la verticale)



H peut s'obtenir si l'on connaît la quantité de rayonnement absorbée par unité d'épaisseur d'atmosphère en fonction de l'altitude $\alpha(x, \lambda)$:

$$H(\lambda) = K \exp \left[- \int_0^{+\infty} \alpha(x, \lambda) dl \right] \quad (5)$$

Si l'atmosphère est traversée "de biais" :

$$H_\theta(\lambda) = K \exp \left[- \int_0^{+\infty} \alpha(x(l), \lambda) dl \right] \text{ et } x = \sqrt{R^2 + l^2 + 2Rl \sin \theta} - R \quad (6)$$

De là :

$$l^2 + 2Rl \sin \theta + R^2 - (x + R)^2 = 0 \quad (7)$$

$$\Delta = 4R^2 \sin^2 \theta - 4R^2 + 4(x + R)^2 = 4[(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta] \quad (8)$$

$$l = -R \sin \theta + \sqrt{(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta} \quad (9)$$

$$dl = \frac{x + R}{\sqrt{(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta}} dx \quad (10)$$

$$H_\theta(\lambda) = K \exp \left[- \int_0^{+\infty} \alpha(x, \lambda) \frac{x + R}{\sqrt{(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta}} dx \right] \quad (11)$$

En supposant que l'atmosphère est de dimension h très inférieure au rayon terrestre, et à l'horizon ($\theta = 0$) :

$$H_{\text{hor}}(\lambda) \simeq K \exp \left[- \int_0^h \alpha(x, \lambda) \sqrt{\frac{R}{2x}} dx \right] \quad (12)$$

On suppose par ailleurs que l'atmosphère possède un profil isotherme et que $\alpha(x, \lambda) = \alpha_0(\lambda) \exp(-x/L)$ ($L \ll h$). Dès lors :

$$H_{\text{hor}}(\lambda) \simeq K \exp \left[- \sqrt{\frac{R}{2}} \alpha_0(\lambda) \int_0^{+\infty} \frac{\exp(-x/L)}{\sqrt{x}} dx \right] = K \exp \left[- \sqrt{\frac{\pi R L}{2}} \alpha_0(\lambda) \right] \quad (13)$$

Si bien que :

$$H_{\text{hor}}(\lambda) = H(\lambda) \sqrt{\pi R / 2L} \quad (14)$$

Or $\sqrt{\pi R / 2L} \sim 35$! On ne voit rien à l'horizon. Il faut s'en approcher légèrement seulement.

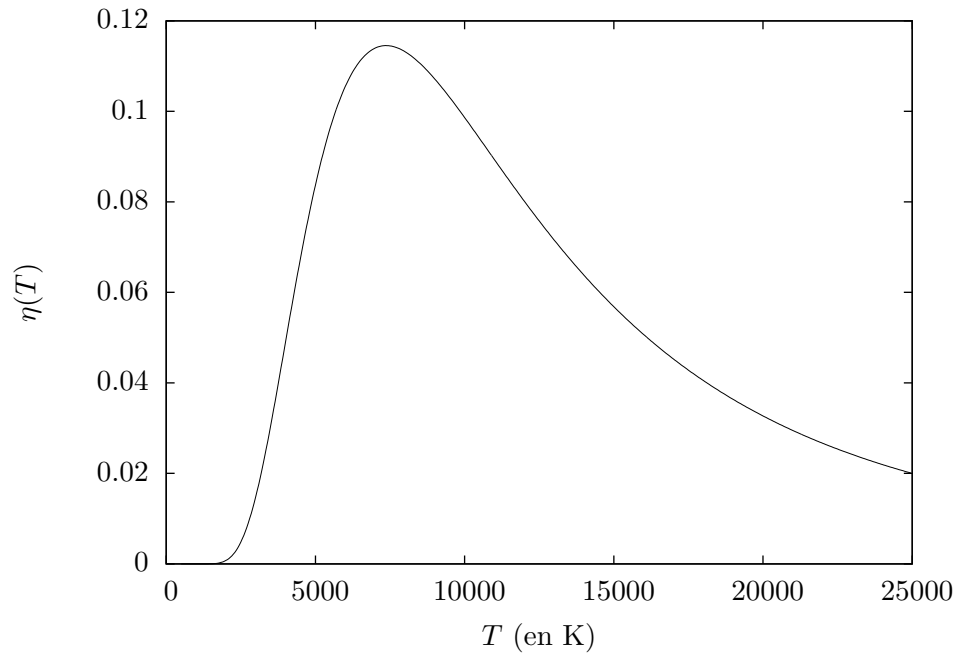
Plus généralement, il faut intégrer numériquement :

$$H_\theta(\lambda) = \exp \left[- \alpha_0(\lambda) \int_0^{+\infty} \exp(-x/L) \frac{x + R}{\sqrt{(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta}} dx \right] \quad (15)$$

Et alors :

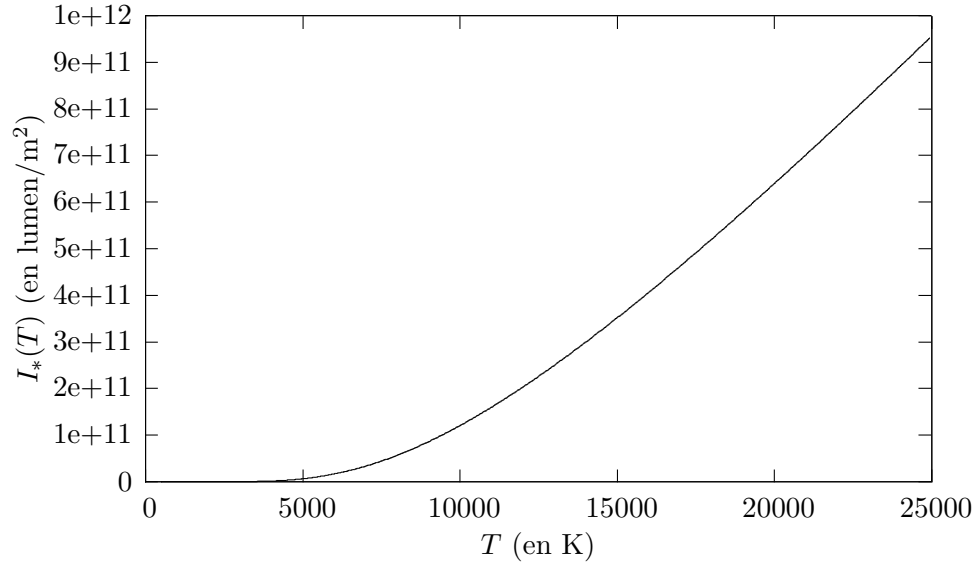
$$\text{AM}(\theta) \equiv \frac{\ln H_\theta(\lambda)}{\ln H(\lambda)} = \frac{1}{L} \int_0^{+\infty} \exp(-x/L) \frac{x + R}{\sqrt{(x + R)^2 - R^2 \cos^2 \theta}} dx \quad (16)$$

FIGURE 3 – rendement lumineux η d'un corps noir en fonction de sa température. La luminosité apparente pour l'oeil d'un corps noir est donné par le produit de sa puissance et de η .



Le flux lumineux par unité de surface de l'étoile $I_*(T) = L_0\eta(T)\sigma T^4$ (qui ne dépend donc également que de la température) en lumen/m² est représenté figure 4.

FIGURE 4 – Courbe de $I_*(T) = L_0\eta(T)\sigma T^4$, qui est directement proportionnel au flux reçu par l'oeil.



Finalement la condition de visibilité se réécrit :

$$d \leq R_* \sqrt{4\pi \frac{I_*(T)}{I_{min}}} \quad (17)$$

Cette équation peut être réécrite en terme de $\eta(T)$:

$$d \leq R_* \sqrt{4\pi \frac{L_0\sigma T^4\eta(T)}{I_{min}}} \quad (18)$$

La luminosité donne donc une limite de la forme $d \leq \theta(T)R_*$. La fonction $\theta(T)$ est représentée figure 7 ainsi que les valeurs de d/R pour certaines étoiles.

FIGURE 5 – Courbe de $\theta(T) = d_{max}/R_*$. La zone verte sous la courbe correspond aux étoiles visibles.

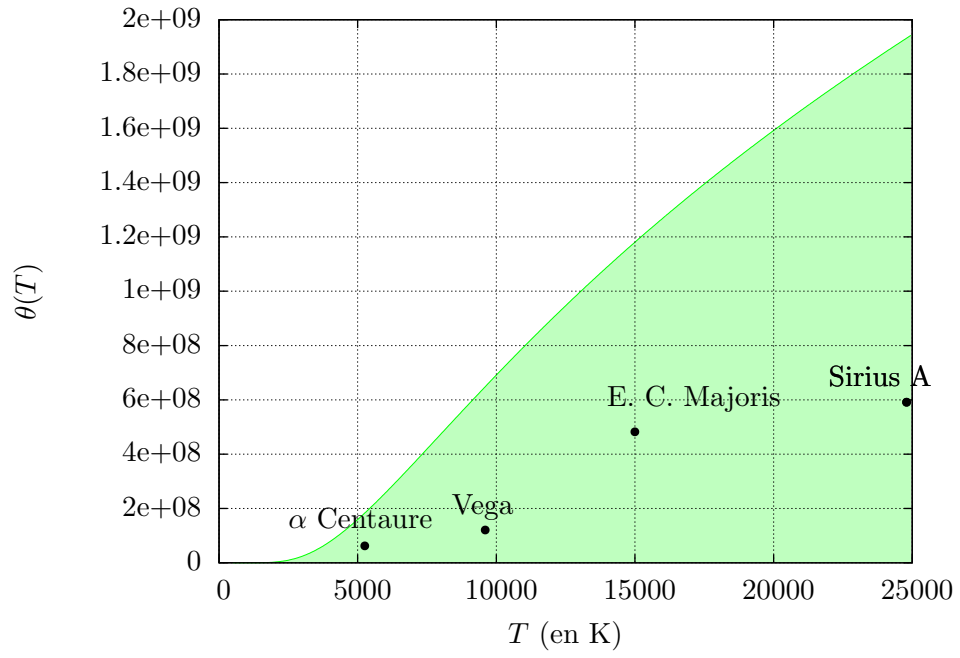


FIGURE 6 – Courbe de $\theta(T) = d_{max}/R_*$. La zone verte sous la courbe correspond aux étoiles visibles.

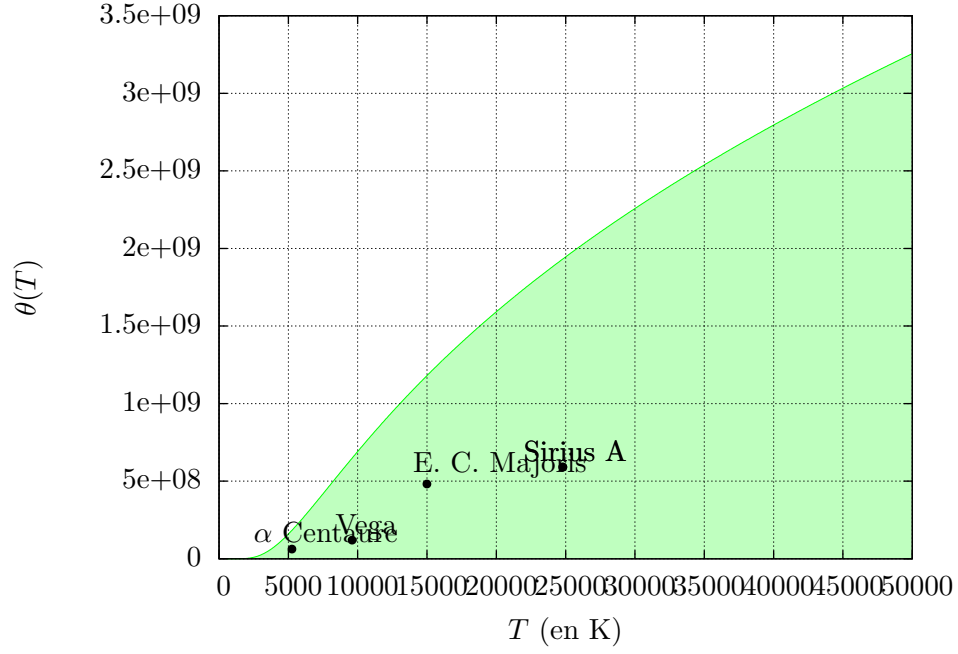


FIGURE 7 – Courbe de $\theta(T) = d_{max}/R_*$ pour différents angles d'élévation.

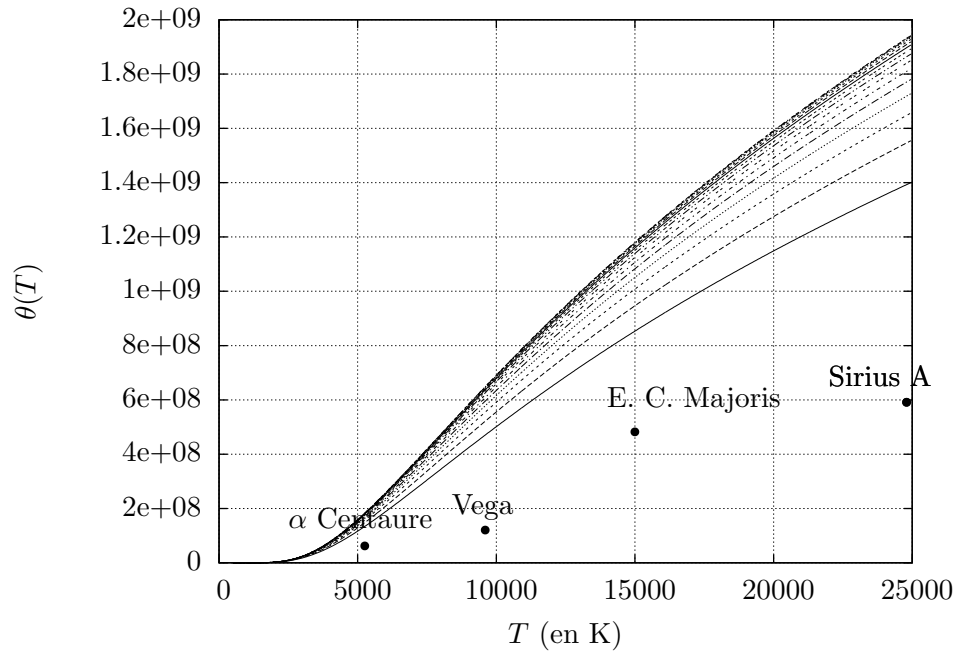


FIGURE 8 – Courbe de $\theta(T) = d_{max}/R_*$ pour différents angles d'élévation.

