

Colorimétrie et imagerie *CCD en couleur*

**Institut de Physique de l'Université de Neuchâtel (IPH)
Société Neuchâteloise d'Astronomie (SNA)**

Responsable: M. Willemin

Date du début de l'expérience: 23.06.2003

Date de la fin de l'expérience. 30.06.2003

TABLE DES MATIÈRES

1.	<u>DESCRIPTIF DE L'EXPERIENCE</u>	3
2.	<u>INTRODUCTION THEORIQUE A LA COLORIMETRIE</u>	4
2.1	Caractérisation photométrique d'un détecteur	4
2.2	Notions de photométrie et de colorimétrie	4
2.3	Système RGB	6
3.	<u>PARTIE EXPERIMENTALE</u>	8
3.1	Numérisation des données de rendement quantique	8
3.2	Mesures de la transmission spectrale des filtres rouge, vert et bleu	9
3.3	Détermination du rapport du temps d'exposition	10
3.3.1	Sensibilité spectrale	10
3.3.2	Détermination du temps d'exposition	11
	Spectre uniforme	11
	Corps noir	12
	Tableau récapitulatif	15
	Source monochromatique	15
3.4	Exemple pratique d'acquisition d'image en couleur	16
3.5	Exemples astronomiques	17
3.5	Conclusion	21
3.6	Références	21

1. DESCRIPTIF DE L'EXPERIENCE :

L'acquisition d'une image couleur nécessite la prise de vue à travers des filtres colorés dans les couleurs fondamentales (RGB). Des caméras effectuant cette prise de vue en une seule opération existent. Devant chaque pixel du capteur sont alors placés en alternance des filtres colorés correspondant aux couleurs fondamentales. L'avantage est la rapidité de la prise de vue, puisqu'une seule exposition est nécessaire. L'inconvénient est que le nombre de pixels effectif est réduit en conséquence.

Si la caméra ne possède pas cette structure, il est alors nécessaire de procéder à trois expositions successives en plaçant pour chaque prise un filtre coloré. Cette technique augmente alors la résolution initiale. Un autre avantage est le choix possible des filtres utilisés.

La caméra SBIG de type ST7 possède comme capteur principal pour l'acquisition d'images le CCD KODAK KAF-0401E. Ce capteur est parfaitement caractérisé. Son rendement quantique en fonction de la longueur d'onde est parfaitement connu. Mais cette caméra ne donne que des images noir-blanc.

L'acquisition d'images en couleur est cependant possible en effectuant l'acquisition au moyen de trois expositions successives avec les trois filtres colorés rouge, vert et bleu. Pour faciliter cette opération, la caméra est munie d'une roue à filtre motorisée.

Ces trois filtres colorés ont des transmissions proches des standards RGB. Mais ils restent malgré tout à caractériser. De plus le rendement quantique du capteur CCD n'est pas constant en fonction de la longueur d'onde. Il faut donc tenir compte de sa sensibilité spectrale et des spectres de transmission des trois filtres pour le traitement de l'image.

Le but est donc de déterminer les rapports des temps d'exposition entre les trois filtres rouge, vert et bleu de manière à obtenir une image couleur le plus proche de la réalité.

L'expérience se déroule en quatre phases:

- 1) Numérisation des données de rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour le capteur.
- 2) Mesure de la transmission spectrale des filtres rouge, vert et bleu.
- 3) Détermination du rapport des temps d'exposition entre les trois filtres colorés, de manière à obtenir une image couleur le plus proche de la réalité.
- 4) Exemple pratique d'acquisition d'image en couleur sur une cible de laboratoire d'une part, et sur un objet astronomique d'autre part, après une mise en service de la roue à filtre incluant la commande automatique par le programme CCD_SOFT et en utilisant un programme de traitement d'images en couleurs à partir d'images obtenues au moyen des filtres colorés.

2. INTRODUCTION THEORIQUE A LA PHOTOMETRIE ET COLORIMETRIE :

2.1 Caractérisation photométrique d'un détecteur:

Un photodétecteur crée un courant électrique lorsqu'il reçoit un flux lumineux. Idéalement un électron devrait être généré pour chaque photon reçu. Ce n'est en réalité pas le cas.

Rendement quantique:

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons créés par seconde et le nombre de photons incidents par seconde.

$$R = \frac{n_{el}}{n_{ph}}$$

Sensibilité spectrale:

La sensibilité spectrale est le rapport entre le courant électrique généré et le flux optique (de photons). Le courant électrique est le nombre d'électrons produits par seconde multiplié par leur charge

$$I = n_{el} \cdot e.$$

Le flux optique quant à lui est le nombre de photons incidents par seconde multiplié par l'énergie de chaque photon

$$\phi_{op} = n_{ph} \cdot h\nu = n_{ph} \cdot h \frac{c}{\lambda}.$$

La sensibilité spectrale est alors:

$$S = \frac{I}{\phi_{op}} = \frac{n_{el}}{n_{ph}} \cdot \frac{\lambda}{\frac{hc}{e}}$$

Le rapport $\frac{n_{el}}{n_{ph}}$ n'est autre que le rendement quantique R et la valeur $\frac{hc}{e}$ est une constante et vaut 1.24 dans les unités où λ est en μm . On obtient alors la formulation finale de la sensibilité spectrale:

$$S = \frac{\lambda \cdot R}{1.24} \quad [S] = \frac{\%}{W}$$

2.2 Notions de photométrie et de colorimétrie:

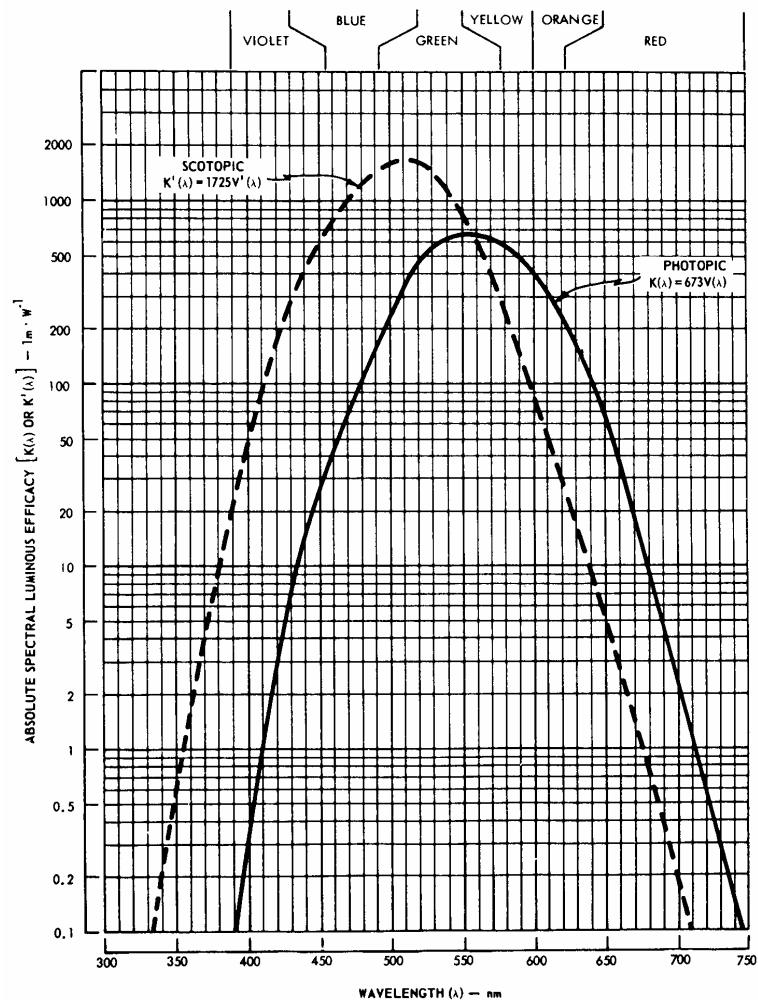
La colorimétrie est une technique de mesure et d'analyse de la couleur. Le système RGB, base de la colorimétrie, a été élaboré principalement par Maxwell.

On définit la perception de l'œil par $L = K \int V(\lambda) I(\lambda) d\lambda$, où $I(\lambda)$ est le flux de puissance lumineuse, $V(\lambda)$ est la sensibilité spectrale de l'œil (ou le coefficient correctif physiologique) et K un facteur de proportionnalité. La sensibilité de l'œil dépend de la longueur d'onde. L'œil sera sensible à des longueurs d'onde comprises en principe entre 400 et 750 nm. L'impression visuelle de l'émission dépend de la longueur d'onde. Pour une puissance fixe donnée, elle est plus grande, de jour, pour une longueur d'onde voisine de 550 nm (ce qui correspond à la couleur jaune). Mais l'œil se comporte de manière encore plus complexe. Il possède en effet deux types de photodétecteurs: les cônes et les bâtonnets.

Les cônes sont différenciés en trois types en fonction des pigments qu'ils renferment. Ils sont ainsi sensibles différemment dans trois plages de longueurs d'ondes différentes et permettent la vision colorée. Ils sont actifs si l'intensité d'illumination est suffisante et assurent ainsi la vision photopique.

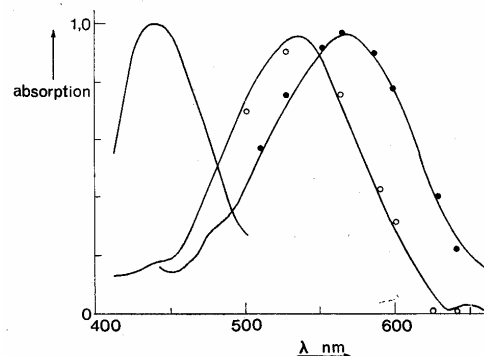
Les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes mais ne sont pas différenciés. Ils ne permettent donc pas une vision colorée, mais sont actifs dans les faibles niveaux d'éclairage. Ils assurent la vision scotopique.

Le graphe montre les courbes de sensibilité des deux types de vision, pour les cônes (courbe photopique) et pour les bâtonnets (courbe scotopique) [1]:



On comprend par exemple pourquoi la nuit les couleurs bleutées sont les mieux visibles. L'intensité lumineuse étant faible, les bâtonnets seront alors sensibles principalement à ces couleurs.

La sensation de couleur perçue par l'oeil en vision photopique provient de ce que ses photodétecteurs (cônes) contiennent trois types des pigments différents, présentant des absorptions spectrales différentes dans la plage visible (maxima vers 440, 530 et 570 nm). Le schéma ci-dessous montre les trois spectres d'absorption spectrale des différents cônes [2]:



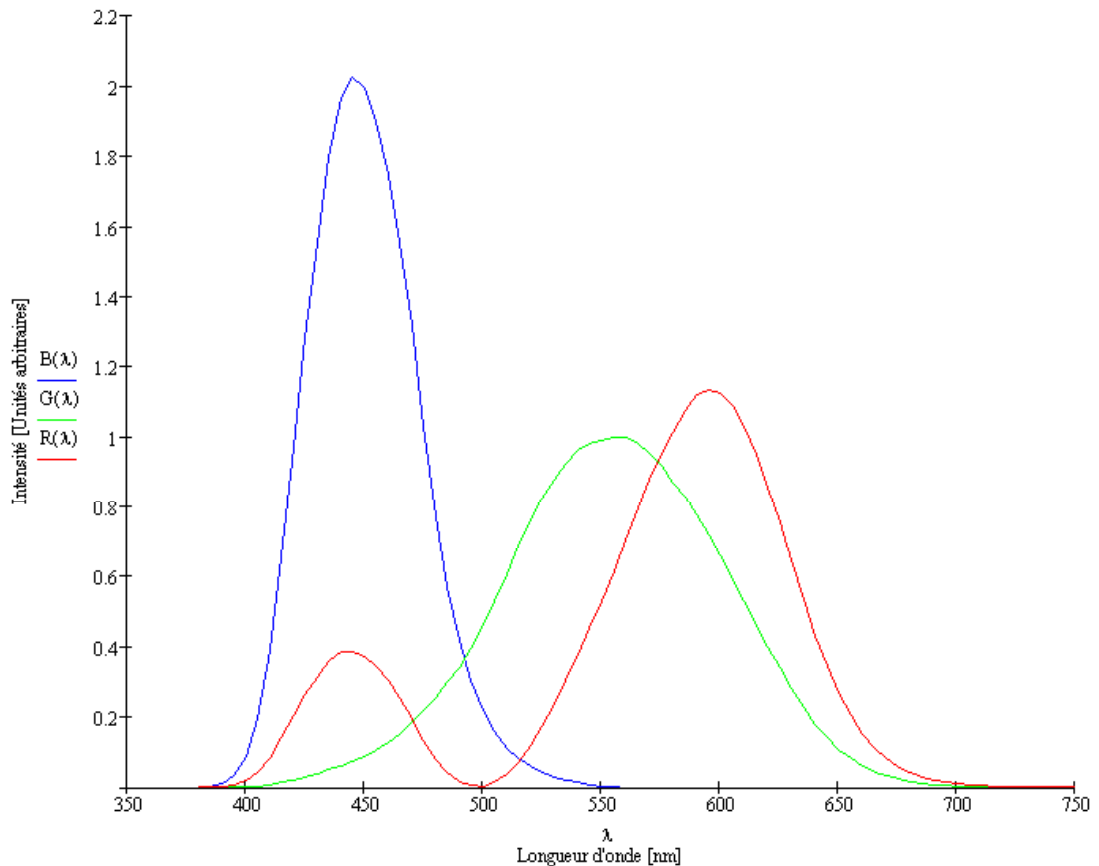
On peut alors dire que toute impression de couleur peut être représentée par une combinaison linéaire de ces trois spectres de bases.

2.3 Système RGB:

La contrainte sur le choix des spectres de base est que ces couleurs ne soient pas complémentaires les unes des autres et que la superposition des trois spectres dans un rapport bien défini donne une sensation de blanc.

En 1931, un choix a été fait pour les spectres, qui sont toujours utilisées comme base actuellement [2]. Les maximums de ces spectres se trouvent à 700 nm pour le rouge, à 546 nm pour le vert et à 436 nm pour le bleu.

Voici les composantes trichromatiques de l'œil avec un champ de vision de 10° par convention:



On peut alors définir les coefficients colorimétriques R, G et B de la manière suivante:

$$R = \int I(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad G = \int I(\lambda)G(\lambda)d\lambda \quad B = \int I(\lambda)B(\lambda)d\lambda$$

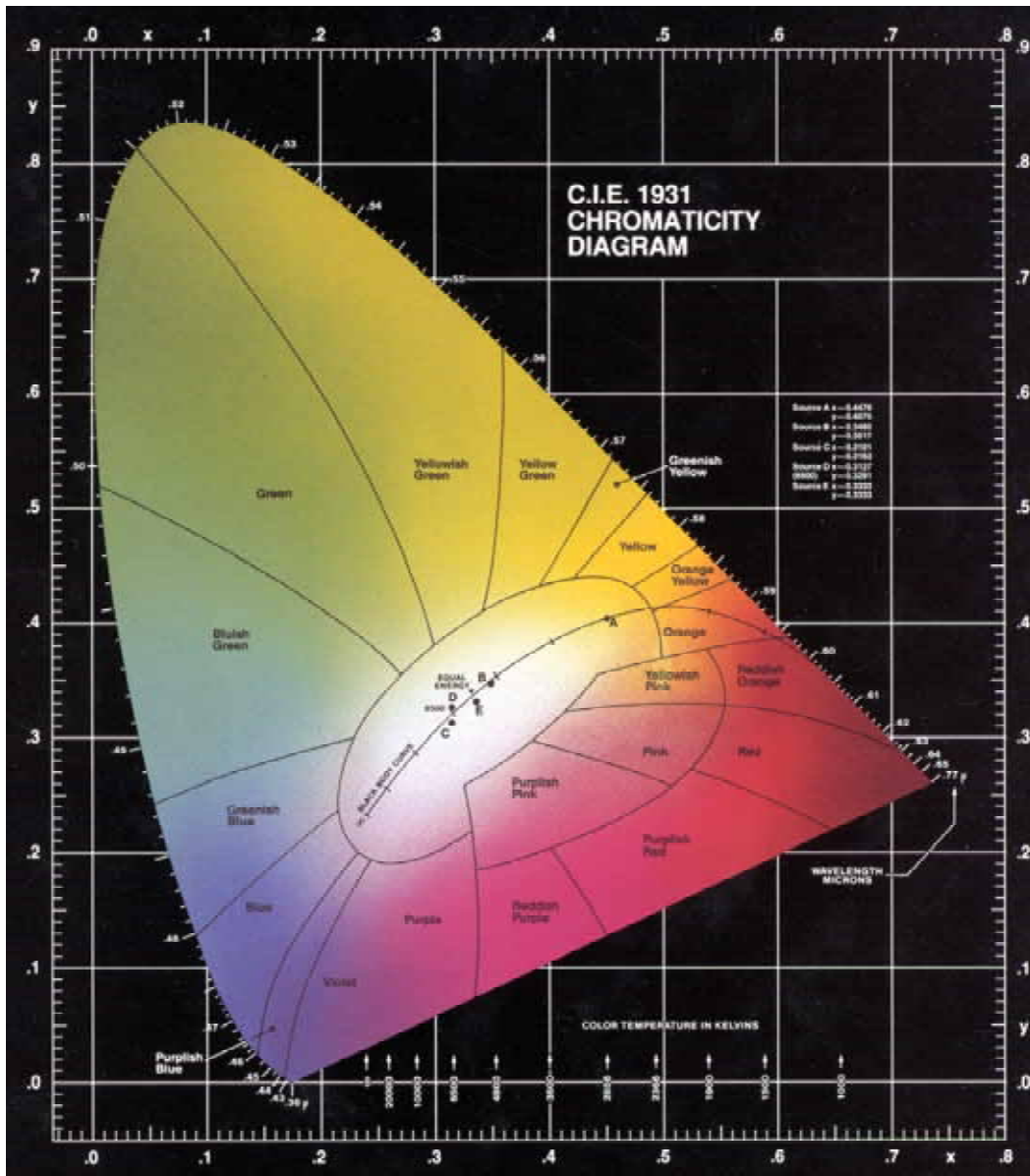
En terme d'intensité absolue, on peut normaliser les valeurs R, G et B par les valeurs suivantes:

$$r = \frac{R}{R+G+B} ; \quad g = \frac{G}{R+G+B} ; \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

Alors: $r + g + b = 1$.

Toute couleur peut alors être exprimée par deux des trois coefficients seulement. On peut alors faire un diagramme plan où les trois couleurs de base correspondent aux trois sommets d'un triangle.

Diagramme trichromatique:



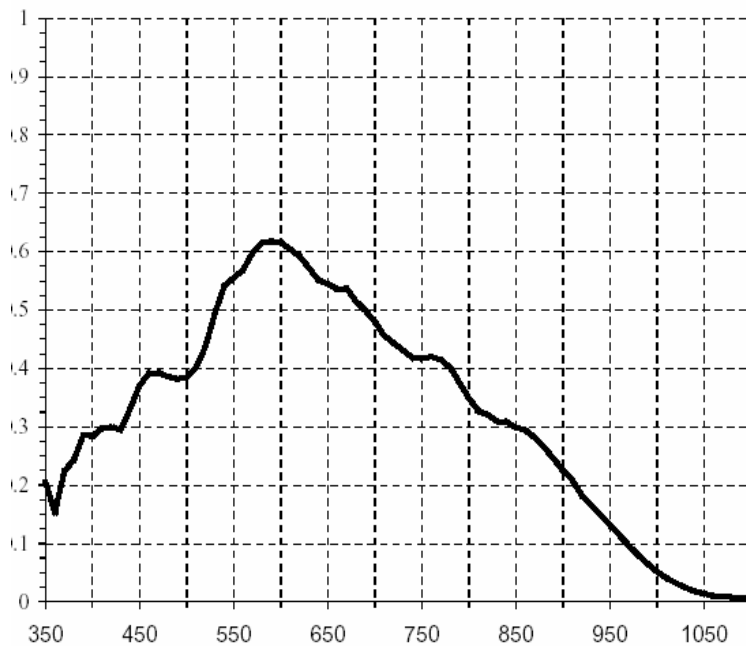
3. PARTIE EXPERIMENTALE :

3.1 Numérisation des données de rendement quantique:

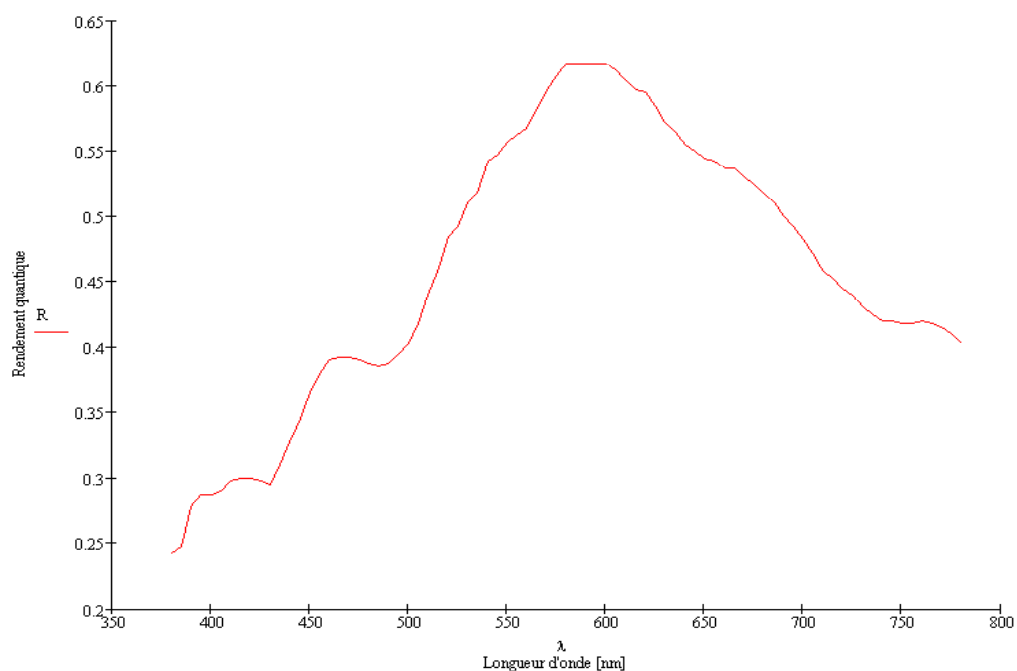
Le rendement quantique du capteur d'image KODAK KAF-0401E [3] étant donné sous forme graphique, il a été choisi de numériser les coordonnées points par points, à intervalle de 5 nm. A l'aide d'un programme de dessin comme Micrografx Designer, il est facile de lire avec bonne précision le rendement quantique du capteur.

Le rendement a été mesuré entre 380 et 750 nm car les données théoriques des composantes trichromatiques de l'œil sont significatives dans ce même intervalle.

Graphe de référence:



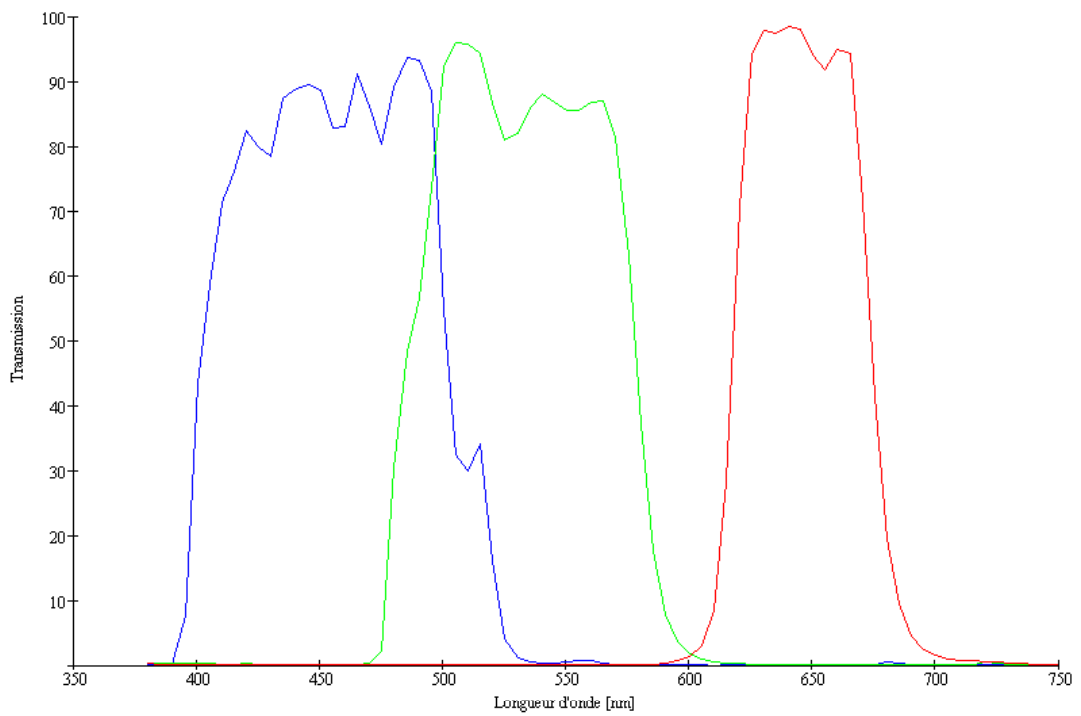
Graphe obtenu après numérisation:



3.2 Mesures de la transmission spectrale des filtres rouge, vert et bleu:

Cette mesure a été effectuée à l'école d'ingénieur du Locle (EICN) dans les laboratoires d'optique à l'aide d'un spectromètre à fibre *S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometer* de Ocean Optics [4]. La plage de mesure va de 380 à 750 nm, la résolution spectrale est fixée par l'appareil à $\Delta\lambda = 2$ nm.

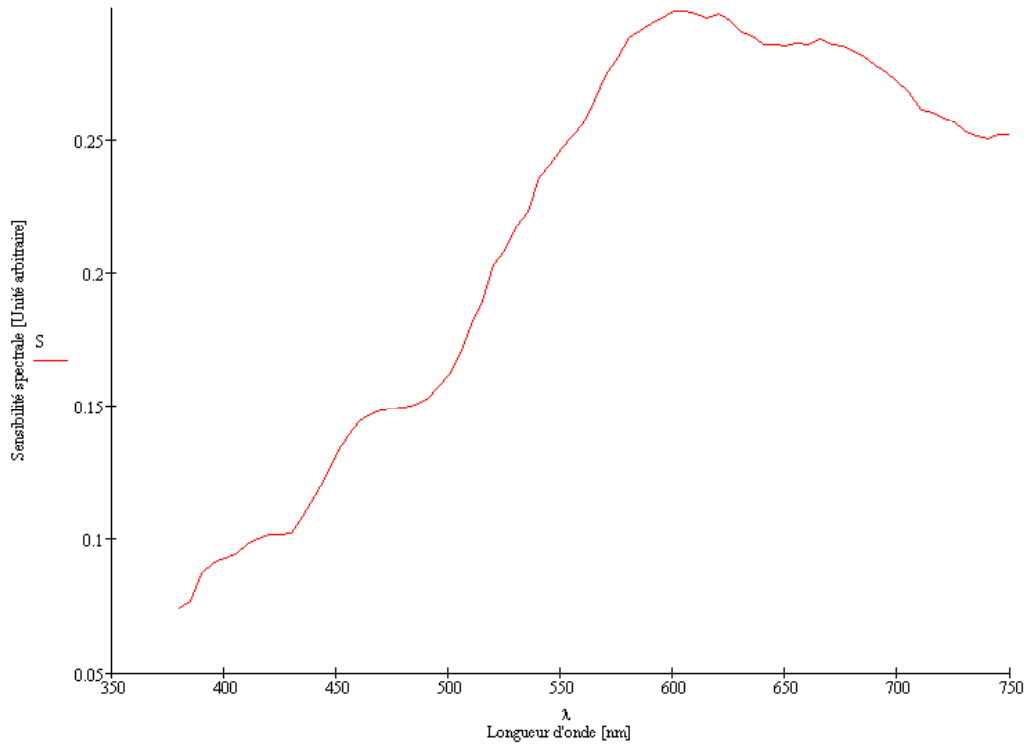
Le résultat obtenu est le suivant:



3.3 Détermination du rapport du temps d'exposition:

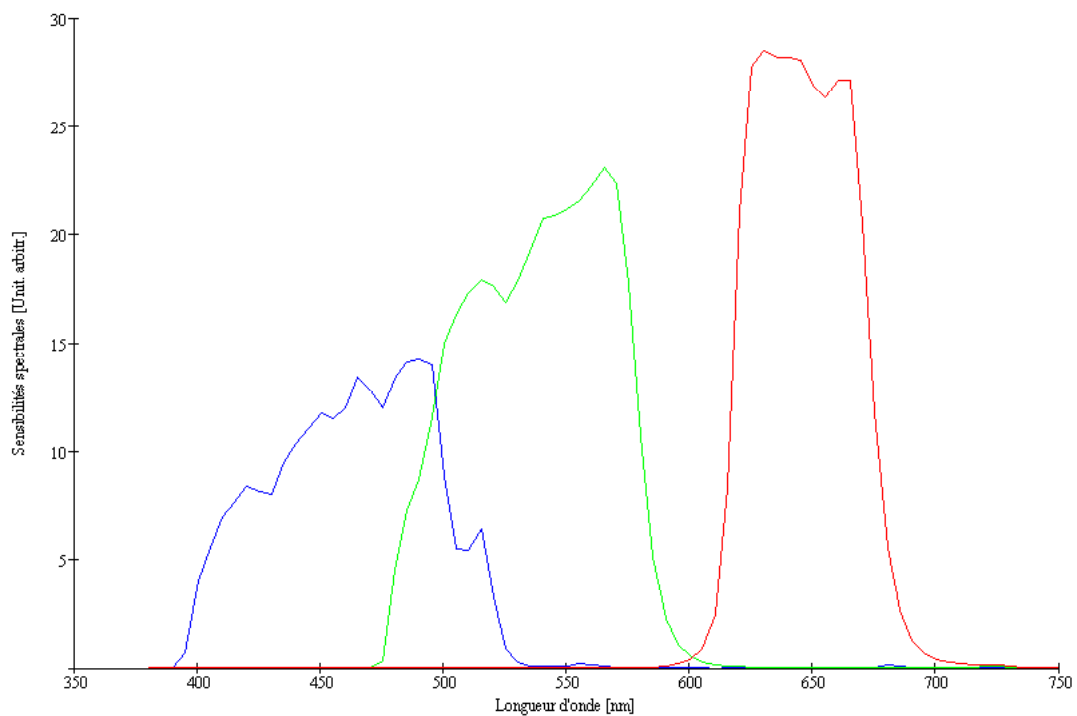
3.3.1 Sensibilité spectrale:

Partant du rendement quantique du capteur, on obtient la courbe de sensibilité spectrale suivante:



où λ est en nm.

Tenant compte encore des transmissions des filtres, on obtient finalement les sensibilités spectrales du capteur pour chacun des filtres colorés, notés S_r , S_g et S_b respectivement pour le rouge, vert et bleu:



3.3.2 Détermination du temps d'exposition:

Le but est de représenter correctement la couleur blanche. La couleur blanche est obtenue en superposant dans des rapports judicieux (RGB) les couleurs fondamentales rouge, verte et bleue.

Spectre uniforme:

On considère alors dans un premier temps un flux lumineux constant tel que $I(\lambda) = I_0 = \text{constant}$.

On peut calculer les coefficients de chacune des trois couleurs.

On pose:

$$r = k \int R(\lambda) I_0 d\lambda \quad g = k \int G(\lambda) I_0 d\lambda \quad b = k \int B(\lambda) I_0 d\lambda$$

où $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ et $B(\lambda)$ sont les composantes trichromatiques théoriques du rouge, vert et bleu respectivement et la constante k est une constante de normalisation telle que $r + g + b = 1$.

$$\text{Alors } k = \left[\int (R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)) I_0 d\lambda \right]^{-1}.$$

On obtient:

$$r = 0.333 \quad g = 0.333 \quad b = 0.333$$

Ce résultat signifie que chacune des trois composantes trichromatiques intervient dans la même proportion.

On va maintenant effectuer le même calcul mais pour les trois sensibilités spectrales de chacune des trois couleurs. On notera les coefficients des couleurs SR , SG et SB (qui sont "l'équivalent" aux coefficients R , G et B mais pour les filtres colorés).

On pose:

$$SR' = k \int S_r(\lambda) I_0 d\lambda \quad SG' = k \int S_g(\lambda) I_0 d\lambda \quad SB' = k \int S_b(\lambda) I_0 d\lambda$$

$$\text{où } k = \left[\int (S_r(\lambda) + S_g(\lambda) + S_b(\lambda)) I_0 d\lambda \right]^{-1}.$$

Les coefficients ainsi obtenus sont:

$$SR' = 0.351 \quad SG' = 0.389 \quad SB' = 0.260.$$

Mais on a vu précédemment que les valeurs désirées étaient $SR = SG = SB = 0.333$.

On doit donc appliquer des facteurs correctifs k_r , k_g et k_b pour obtenir ces valeurs.

$$\text{On pose:} \quad SR = k_r \cdot SR' \quad SG = k_g \cdot SG' \quad SB = k_b \cdot SB'$$

Avec les facteurs suivants

$$k_r = 0.949 \quad k_g = 0.856 \quad k_b = 1.281$$

où k_r , k_g et k_b sont les rapports des temps d'exposition.

Remarque: Le temps d'exposition le plus long est celui du bleu. Ce résultat est assez logique puisque la CCD est peu sensible au bleu.

Donc pour un temps d'exposition relatif du rouge égal à 1, on aura pour les autres temps:

$$t_r = 1 \quad t_g = 0.902 \quad t_b = 1.350$$

Dans cet exemple, le blanc était considéré comme une répartition uniforme, c'est-à-dire comme un spectre constant, indépendant de la longueur d'onde. Mais sur Terre, la lumière blanche qu'on considère comme blanche est la lumière du Soleil.

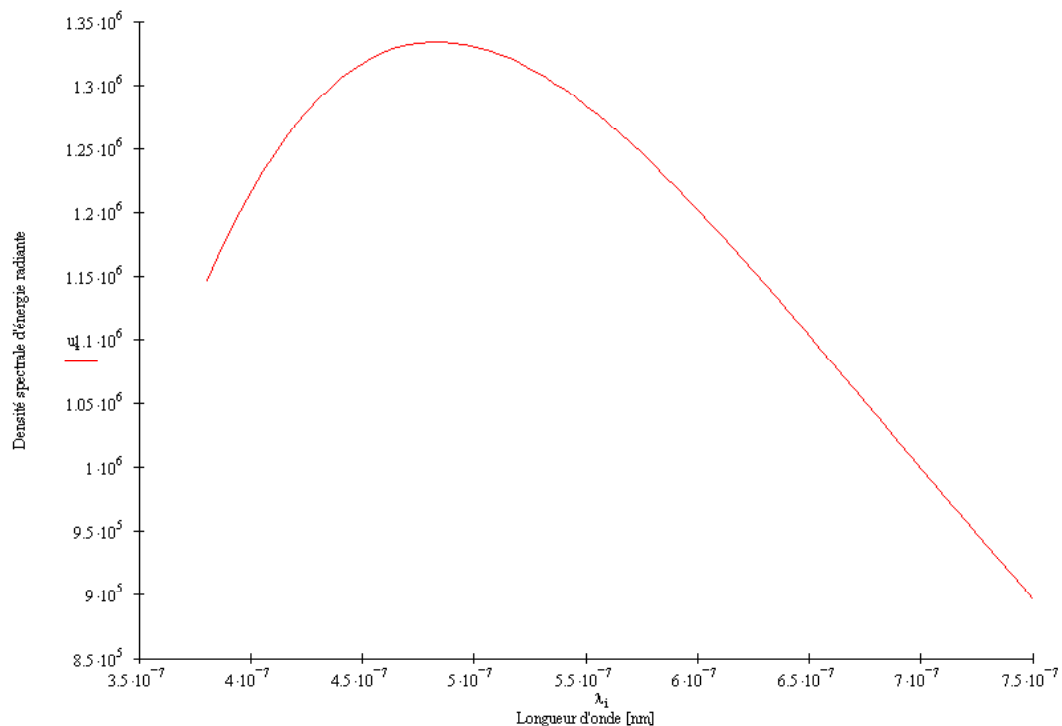
Corps noir:

On peut alors reprendre ces calculs en considérant une répartition spectrale obéissant à la loi de Planck pour un corps à 6000K, comme le soleil. La loi de Planck est la suivante:

$$u(\lambda) = 8\pi \frac{h \cdot c}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

où $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34}$, $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ et $k_B = 1.380658 \cdot 10^{-23}$.

La densité spectrale d'énergie radiante est de la forme:



On peut donc reprendre les mêmes calculs effectués précédemment, en multipliant les composantes trichromatiques et les sensibilités spectrales de chacune des trois couleurs par la répartition de Planck.

Les coefficients de chacune des trois couleurs de la manière sont alors:

$$r = k \int R(\lambda) \cdot u(\lambda) \cdot d\lambda \quad g = k \int G(\lambda) \cdot u(\lambda) \cdot d\lambda \quad b = k \int B(\lambda) \cdot u(\lambda) \cdot d\lambda$$

où la loi de Planck $u(\lambda)$ équivaut au $I(\lambda)$ et $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ et $B(\lambda)$ restent les composantes trichromatiques théoriques du rouge, vert et bleu respectivement et la constante k est une constante de normalisation telle que $r + g + b = 1$.

$$\text{Alors } k = \left[\int (R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda)) \cdot u(\lambda) \cdot d\lambda \right]^{-1}.$$

Dans ce cas, on obtient le résultat suivant:

$$r = 0.323 \qquad g = 0.332 \qquad b = 0.345$$

Comme avant, on va maintenant effectuer le même calcul mais pour les trois sensibilités spectrales de chacun des trois filtres colorés. On notera toujours les coefficients des couleurs SR, SG et SB.

On pose:

$$SR' = k \int S_r(\lambda) u(\lambda) d\lambda \qquad SG' = k \int S_g(\lambda) u(\lambda) d\lambda \qquad SB' = k \int S_b(\lambda) u(\lambda) d\lambda$$

$$\text{où } k = \left[\int (S_r(\lambda) + S_g(\lambda) + S_b(\lambda)) \cdot u(\lambda) \cdot d\lambda \right]^{-1}.$$

Les coefficients obtenus sont:

$$SR' = 0.316 \qquad SG' = 0.408 \qquad SB' = 0.276.$$

On introduit les facteurs correctifs k_r , k_g et k_b , pour obtenir:

$$SR = k_r \cdot SR' = r = 0.323 \qquad SG = k_g \cdot SG' = g = 0.332 \qquad SB = k_b \cdot SB' = b = 0.345$$

Ces conditions sont vérifiées avec les rapports suivants

$$k_r = 1.022 \qquad k_g = 0.815 \qquad k_b = 1.247$$

et k_r , k_g et k_b sont les rapports des temps d'exposition.

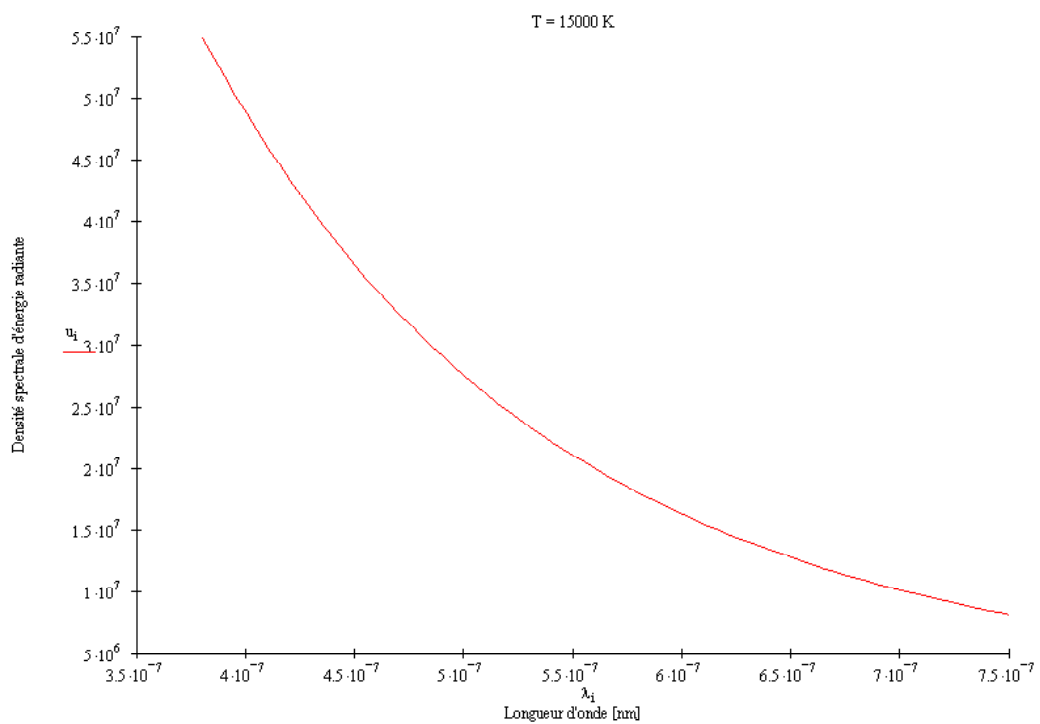
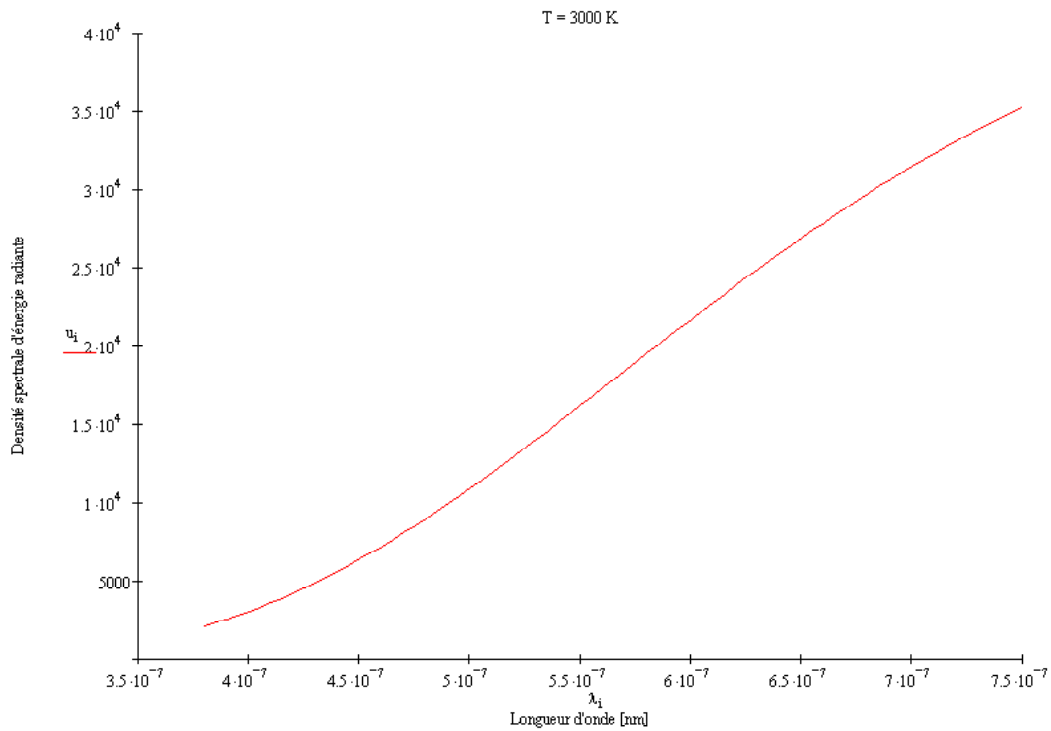
Donc pour un temps d'exposition relatif du rouge égal à 1, on aura pour les autres temps:

$$t_r = 1 \qquad t_g = 0.797 \qquad t_b = 1.220$$

On constate donc que ce ne sont pas les mêmes rapports qu'avant. Ainsi, si on ajuste les rapports des temps d'exposition afin de rendre correctement les couleurs pour une situation, l'autre situation ne sera pas rendue correctement.

On peut maintenant se demander ce qui se passerait si on photographiait une étoile très chaude, comme une naine blanche par exemple, qui a une température de 15000K, ou une géante rouge à une température de 3000K.

Dans ces cas, la densité spectrale d'énergie radiante prendront les formes suivantes:



Un calcul équivalent à précédemment fournit ainsi les résultats résumés dans le tableau suivant.

Tableau récapitulatif des différents rapports des temps d'exposition dans différentes conditions:

	Temps d'exposition relatif		
	R	G	B
$I(\lambda) = I_0 = \text{cste}$	1	0.902	1.350
Planck: T = 3000K	1	1.460	1.665
Planck: T = 6000K	1	0.797	1.220
Planck: T = 15000K	1	0.533	0.906

Remarque:

On observe une non-monotonie des valeurs qui s'explique facilement. La position du maximum de la loi de Planck en fonction de la longueur d'onde se déplace en fonction de la température.

Ce déplacement obéit à la loi de Wien:

$$\lambda \cdot T = 0.28978 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

où λ est en cm.

Avec cette relation on obtient que la position du maximum à T = 3000K est à 965.9 nm, à T = 6000K est à 483.0 nm et à T = 15000K est à 193.2 nm. Le maximum est alors dans l'infrarouge à T = 3000K, entre le vert et le bleu à T = 6000K et dans les ultraviolets à T = 15000K.

Source monochromatique:

On peut encore déterminer ce qui se passerait si l'objet photographié était une nébuleuse émettant une raie H_β unique à 656 nm.

Dans ce cas on aurait alors un pic de Dirac dans notre intégrale.

On trouve alors:

$$r = 0.716 \quad g = 0.284 \quad b = 0$$

Les coefficients pour les trois sensibilités spectrales de chacun des trois filtres colorés sont alors:

$$SR = 1 \quad SG = 2.292 \cdot 10^{-4} \quad SB = 4.164 \cdot 10^{-5}$$

On peut arrondir ces valeurs et écrire:

$$SR = 1 \quad SG = 0 \quad SB = 0$$

Une détermination d'un facteur correctif n'aurait alors aucun sens. En effet, on pourrait déterminer un rapport k_r sans problème. Mais la détermination d'un rapport k_b est impossible puisque $b \cdot k_b = SB$ à une infinité de solution car $b = SB = 0$. Quant au facteur k_g , il divergerait. Ce qui en fait signifierait un temps d'exposition infini du filtre vert.

Dans cet exemple, on ne pourra pas restituer fidèlement la couleur.

Remarque:

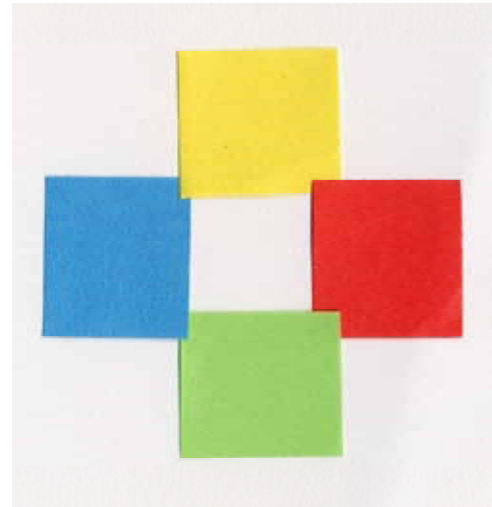
Il est difficile de procéder à une estimation d'erreur sur ces valeurs. En effet, toute erreur se traduit par un écart de couleur, qu'il n'est pas possible de quantifier au stade actuel, car il nécessite un approfondissement de diverses notions de colorimétrie.

3.4 Exemple pratique d'acquisition d'image en couleur:

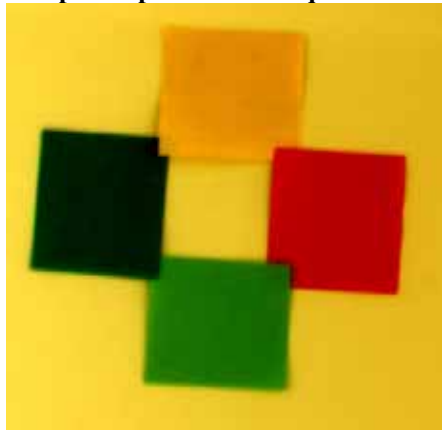
L'exemple pratique a été effectué par un temps couvert. La température de couleur n'est donc pas bien déterminée, par contre le spectre lumière pourrait être plus proche d'une distribution constante. A noter qu'une photographie en plein soleil n'est pas possible avec l'objectif à disposition (temps d'exposition inférieur limité à 10 ms).

Les images ont été acquises avec le logiciel CCD_SOFT et le traitement avec Astroart 3.0.

L'image de droite est la cible photographiée. Quatre photos ont été prises, toutes avec un temps d'exposition du rouge fixe à 200 ms, les autres étant calculées avec les rapports indiqués précédemment. Le quatrième exemple a été pris avec l'échantillon éclairé artificiellement à l'aide d'une lampe halogène.

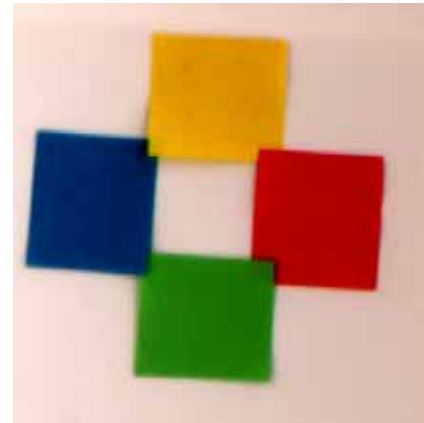


Temps d'exposition identiques



R = G = B = 200 ms

Intensité constante



R = 200 ms ; G = 180 ms ; B = 270 ms

Planck 6000K



R = 200 ms ; G = 160 ms ; B = 240 ms

Planck 3000K, éclairage halogène



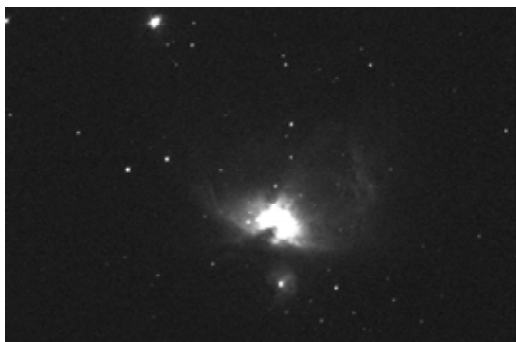
R = 200 ms ; G = 290 ms ; B = 330 ms

3.5 Exemples astronomiques:

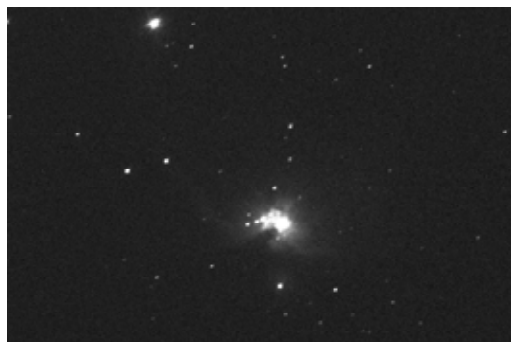
Pour créer une image couleur il est nécessaire de prendre trois prises de vue avec chacun des trois filtres colorés et un cliché sans filtre, appelé la luminance, qui représente la photo noir et blanc. La luminance donne l'information de luminosité de l'image couleur.

L'exemple suivant a été effectué sur M42 avec un objectif de 90 mm de diamètre et de 350 mm de focale. Les temps de pose appliqués sont ceux correspondant à une intensité constante, qui donne apparemment les meilleurs résultats. Ces temps de pose sont de 20 secondes pour le filtre rouge, 18 pour le filtre vert et 27 pour le bleu. La luminance a été exposée pendant 20 secondes. Le temps de pose était limité à cause de problèmes mécaniques qui ne permettaient pas de suivre l'image trop longtemps sans introduire des erreurs de suivis.

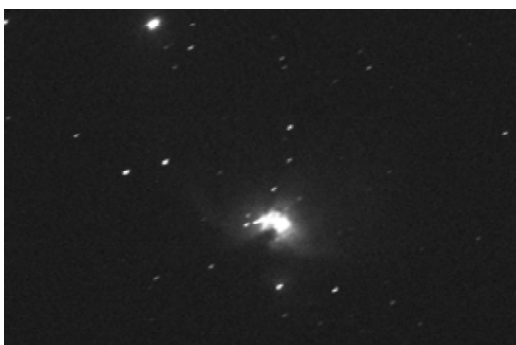
Filtre rouge



Filtre vert



Filtre bleu



Luminance

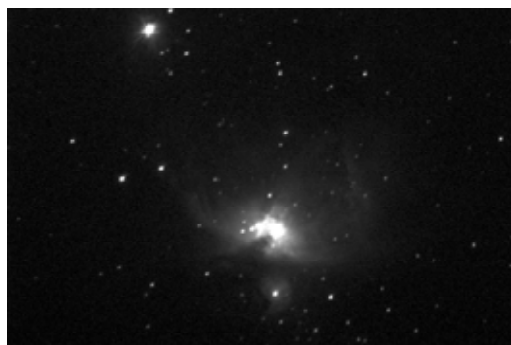


Image couleur



On peut alors se demander quelle est la sensibilité de la couleur de l'image finale à des différences de temps d'exposition. Les trois images qui suivent permettent de se rendre compte de l'erreur apportée par des variations des temps d'exposition.

M42 avec un temps d'exposition correspondant à une intensité constante.

Temps de pose de 20 secondes pour le rouge, de 18 pour le vert et de 27 pour le bleu:



M42 avec une petite erreur dans le temps d'exposition.

Temps de pose de 20 secondes pour le rouge, de 20 pour le vert et de 27 pour le bleu:



M42 avec des temps d'exposition égaux.

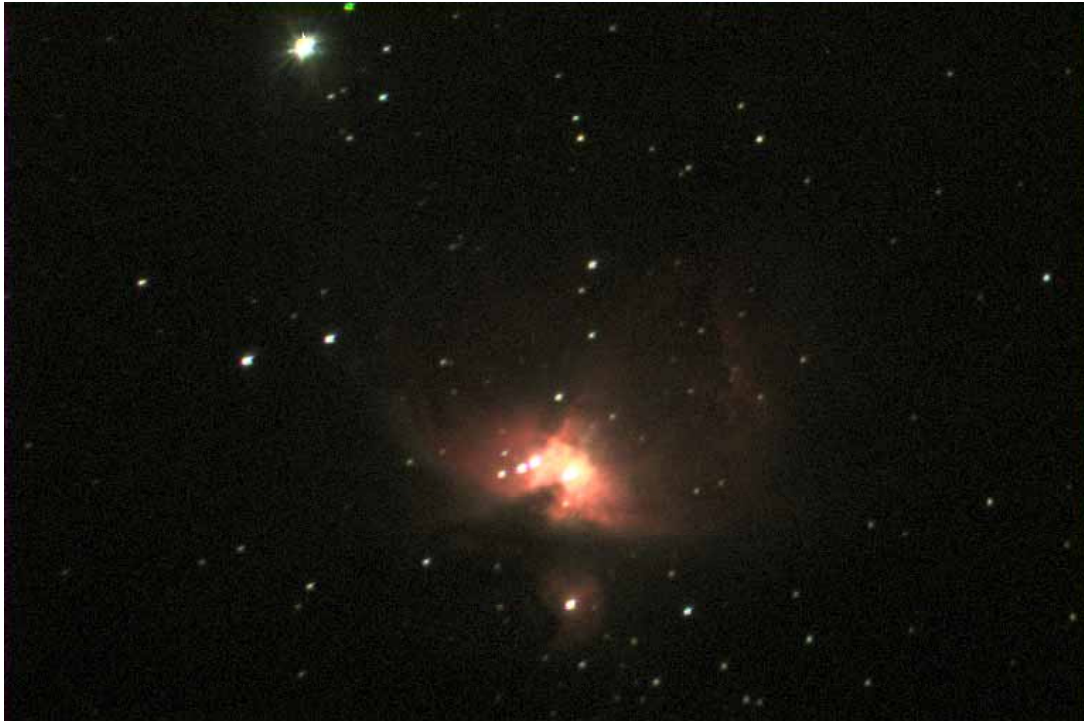
Temps de pose de 20 secondes pour le rouge, de 20 pour le vert et de 20 pour le bleu:



Les deux images suivantes montrent des nuances de couleur alors que les temps d'exposition étaient identiques, 20 secondes pour chacun des trois filtres.

La seconde image a été effectuée en mode "binning", c'est-à-dire en regroupant les pixels en groupes de quatre. Le binning diminue bien sûr la résolution mais augmente le signal.

Prise de vue normale:



Binning



Ce dernier exemple montre des images de galaxies.

M51 prise avec des temps d'exposition correspondant à l'intensité constante, donc 30 secondes pour le filtre rouge, 27 pour le vert et 44 pour le bleu:



M81 prise avec des temps d'exposition correspondant à l'intensité constante, donc 40 secondes pour le filtre rouge, 36 pour le vert et 54 pour le bleu:



La tache rouge sur cette image provient d'une erreur qui peut autant bien être un rayon cosmique qu'un problème technique (défaut du capteur, problème de transfert d'information, ...).

3.6 **Conclusion:**

Recréer ce que l'œil est capable de percevoir en terme de couleur pose des problèmes qui sont loin d'être triviaux. Il nécessite de reconstituer une image à partir des images analysées à travers les trois couleurs fondamentales. Les facteurs de proportionnalité pour cette reconstruction dépendent des sujets photographiés et de l'éclairage. Pour un sujet illuminé par le soleil (situé assez haut sur l'horizon), ce rapport R/G/B vaut $1 / 0.797 / 1.220$ (valable pour le capteur et les filtres considérés). Mais d'après les exemples effectués, les rapports correspondant au temps d'exposition à intensité constante, c'est-à-dire $1 / 0.9 / 1.35$ pour les filtres rouge / vert / bleu, semble le meilleur.

La leçon la plus importante à tirer de cette expérience est de réaliser qu'il est absolument impossible de rendre ces couleurs exactement telles que nous les verrions, quelles que soient les conditions dans lesquelles la photographie est prise. Dans certaines situations, *on ne pourra pas restituer fidèlement la couleur*. L'homme n'est pas près d'égaliser les capacités de l'œil dans ce domaine particulier.

3.7 **Références:**

- [1] Physics Vade Mecum, AIP 50th Anniversary, American Institute of Physics; Herbert L. Anderson; 1981
- [2] Vision et mesure de la couleur, Paul Kowaliski; Masson, Paris, 1978
- [3] www.fli-cam.com/downloads/kaf0401e.pdf
- [4] <http://www.oceanoptics.com/products/s2000.asp>

Autre ouvrage consulté:

- [5] Traité des couleurs, Presses polytechniques et universitaires romandes; Libero Zuppiroli & Marie-Noëlle Bussac; 2001