

La photométrie pour amateur d'astronomie

Objet

Savoir mesurer la lumière dans le cadre de la pratique de l'astronomie amateur.

Méthode

Synthèse des lectures sur la photométrie.

Beaucoup de vérifications personnelles.

Application aux moyens de mesures facilement accessibles aux AstrAms.

Je ne mentionne pas les références des sources les plus usuelles.

Introduction

Somnambule

Par penchant professionnel (ou par excès de rigorisme), j'apprécie de toujours mettre quelques chiffres, des ordres de grandeurs et des équations sur les concepts que je suis amené à fréquenter. J'apprécie cette perception de l'horlogerie du monde que cela procure, ce petit orgueil d'imaginer un instant que l'on pourrait faire tourner soit même les engrenages physiques ou mathématiques de l'univers.

Or cela fait des années que je n'y arrive pas en matière de photométrie. Cette physique-là résiste sans doute à la grossièreté de mon approche ou à mon manque d'application à la tâche. J'ai donc des tas de documents qui me semblent dépourvus de pédagogie, où je n'ai pas tout compris, où je me sens perdu et –surtout- entre-lesquels je n'arrive pas à établir les liens qui devraient y être.

Préambule

Voici plusieurs années, j'ai lu que des chercheurs pensaient que l'œil humain pouvait n'être sensible qu'à seulement quelques photons. La description de leur montage expérimental m'avait alors intrigué par sa complexité et ses liens avec la mécanique quantique. J'étais alors incapable de traduire ces quelques photons en unité de photométrie, en lux, en lumen, en candela ou en magnitude ou encore en temps de pause photographique.

Et donc en 2016, j'ai lu avec intérêt l'annonce, sur le site internet « ça se passe là-haut », que l'œil pouvait n'être sensible qu'à un unique photon ([http:// www. ca-se-passe-la-haut.fr / 2016 / 07 / lil-humain-un-organe-capable-de.html](http://www.ca-se-passe-la-haut.fr/2016/07/lil-humain-un-organe-capable-de.html)).

Une telle sensibilité est étonnante. Elle est pourtant publiée très sérieusement par Jonathan N. Tinsley et al. dans « Nature communications » le 19 juillet 2016 sous le titre « Direct detection of a single photon by humans » ([http:// www. nature.com / articles / ncomms12172](http://www.nature.com/articles/ncomms12172)).

Cette preuve fût fort compliquée à établir puisqu'il a fallu un générateur quantique capable de n'émettre qu'un seul photon, orienté convenablement et sur ordre. Il a aussi fallu trois cobayes mis dans le noir pendant 40 minutes. Des photons de 500 nanomètres leurs ont été dispensés en direction d'une zone dense en bâtonnet de l'œil tandis qu'ils fixaient une très faible lampe

rouge pour que l'œil soit bien positionné dans l'appareillage. Il a fallu plus de 30 000 expériences sur une vingtaine de séances. Avec un dispositif adéquat, on a testé la fiabilité de la perception humaine selon qu'un photon avait bien été émis ou pas.

On sait qu'une bonne part (certains disent 90%) de la lumière qui entre dans l'œil est absorbée ou réfléchi, et se perd dans les structures de l'œil. Malgré tout dans cette expérience, le taux de bonne réponse de 51,6% s'est avéré statistiquement significativement plus important que si celles-ci avaient été purement aléatoires. Il a même été montré d'autres phénomènes comme l'augmentation du taux de détection lorsqu'un autre photon avait été vu moins de 10 secondes avant.



Il arrive donc qu'un unique photon incident puisse traverser l'œil, atteindre la rétine, y être détecté, et déclencher -même si ce n'est pas sans erreur- une perception par le cerveau. Selon les cobayes, cette vision mono-photonique est « plutôt comme un sentiment, comme une sensation, à la limite de l'imagination... ». "... it's not like seeing light. It's almost a feeling, at the threshold of imagination..." selon Alipasha Vaziri de l'université Rockefeller de New York.

Cette bonne nouvelle a donc relancé mon envie de mettre en ordre et d'approfondir mes connaissances sur la quantification et la mesure de la lumière : la photométrie.

Funambule

Il y a de nombreuses unités physiques pour parler des photons, de la lumière, de l'éclairement, ou encore de la sensation lumineuse. Souvent les mêmes grandeurs sont déclinées selon les branches de la science ou selon les métiers qui les utilisent : Radioastronome, photographe, ophtalmologiste, éclairagiste ; etc.

Par exemple les ophtalmologistes s'intéressent à l'éclairement sur la rétine et parlent en Troland. Cette unité étant celle de l'illumination de la rétine produite par un objet dont la luminance est d'une candéla par mètre carré vu au travers d'une pupille de un millimètre carré d'ouverture. Cette unité -certainement très pratique- est donc une intensité lumineuse estimée dans des conditions particulières. En temps qu'intensité elle doit pouvoir s'exprimer aussi bien en Watt par stéradian, mais aussi en bougie, en Rayleigh et en lumen par stéradian. De quoi se perdre !

Au milieu de la confusion, on arrive toutefois à trier les très vieilles unités historiques (comme la bougie), des unités seulement anciennes (comme le Stilb qui est l'ancêtre dans le système CGS de la candéla par mètre carré), d'avec les unités modernes rattachées au système international des unités.

On arrive aussi à comprendre qu'il y a d'un côté les unités qui parlent de physique pure et de l'autre celles qui décrivent la sensation lumineuse humaine. Le lien entre les deux n'étant pas simple puisque l'œil a une certaine sensibilité de jour, mais qu'il a une sensibilité supérieure la nuit et même une sensibilité variable selon la durée de l'adaptation à l'obscurité et encore une sensibilité nocturne décalée vers le bleu.

Le tableau suivant, très incomplet, donne quelques unités et définition :

| Grandeur | Définition | Unité physique | Unité humaine | Autres unités |
|--|--|------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Unités usuelles et de base | | | | |
| Quantité de lumière | Énergie | Joule | Lumen seconde | |
| Flux lumineux | Puissance | Watt | Lumen | |
| Intensité lumineuse | Intensité | Watt / stéradian | Candela | -Bougie -Rayleigh -Troland |
| Unités spécialisées selon les métiers | | | | |
| Exitance Émittance | Puissance émise par unité de surface normale à la propagation | W / m ² | lm / m ² | |
| Éclairement Irradiance | Puissance reçue par unité de surface normale à la propagation | W / m ² | lux | -Foot-candle -Nox -Phot |
| Luminance Radiance | Puissance par unité de surface normale à la propagation, et par unité d'angle solide | W / m ² / sr | cd / m ² | Lambert |
| Exposition | Énergie reçue par unité de surface | J / m ² | Lux seconde | |
| Unités de la physique (pour les spectres) | | | | |
| Éclairement spectral | Densité spectrale de flux | W / m ² / Hz | | Jansky |
| Éclairement monochromatique | Puissance par unité de surface et par unité spectrale | W / m ² / μm | | |
| Intensité, luminance monochromatique | Puissance transportée par unité spectrale, par unité d'angle solide, et par unité d'élément de surface | W / m ² / sr / μm | | |

Parmi les unités liées à la sensibilité humaine, il faut mentionner la candéla, qui est l'unité normalisée de photométrie visuelle. Selon la conférence des poids et mesures de 1979 la candela est l'une des sept unités de base du système international :

« La candéla est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz (correspondant à une longueur d'onde dans le vide de 555 nm proche du vert) et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian. »

L'efficacité lumineuse de l'œil humain est ainsi normalisée et définie égale à 683 lm/W ou encore 683 cd.sr/W. Et c'est une sensibilité photopique ou diurne. Et comme l'indique Wikipédia : « Une bougie standard émet approximativement 1 cd.... C'est précisément pour correspondre à d'anciennes définitions de l'intensité lumineuse basée sur des bougies que la normalisation un peu curieuse de la candela a été choisie. »

Si l'on abandonne les bougies pour, par exemple, une ampoule à incandescence normale de 60 W. Elle produit typiquement 600 à 800 lumens ou 10 à 12,5 lm par watt électrique. Cette quantité de lumière est émise dans quasiment toutes les directions. Et donc en divisant ces

valeurs par l'angle solide représenté par une sphère, soit 4π stéradians, on obtient approximativement l'efficacité entre l'intensité lumineuse perceptible et la puissance électrique consommée : $12,5 / (4 \times 3,14)$ soit environ 1 cd par watt. Ce qui permet d'affirmer que l'ampoule de 60 W éclaire comme 60 bougies de l'ancien temps.

Ambulance

La démarche qui m'a permis de m'y retrouver consiste à aborder la photométrie par les moyens de mesure. J'en propose ici trois et j'explique en toute fin la manière de relier ces trois approches.

La première est celle du **photographe** qui doit exposer de manière équilibrer les hautes et les basses lumières sur ses images. De nos jours les appareils photos numériques (APN) offrent bien des fonctionnalités (parfois un peu cachées) dont celle de mesurer l'éclairement des scènes photographiées. Il y a donc là un moyen de mesure.

La seconde est celle de l'**astronome amateur** qui souhaite le ciel le plus noir possible afin de discerner les détails les moins lumineux des merveilles de l'univers. Munit d'un SQM (Sky Quality Meter), il a la faculté de mesurer la noirceur ou la luminosité du ciel. C'est là aussi un moyen de mesure de la lumière.

La troisième est celle de l'**astronome professionnel** qui doit analyser, comprendre et expliquer la physique des étoiles et de l'univers. Pour cela il quantifie la lumière avec les divers instruments que mettent à disposition les observatoires. Les observatoires disposent donc de moyens de mesure bien étalonnés de la lumière.

Un petit détour par l'œil

L'éclairement

Pour voir les couleurs, sauf dans le cas des écrans et des lampes, elles doivent être éclairées. Il faut donc parler du niveau d'éclairement d'une feuille de papier et de la sensation de luminance qu'il procure.

L'unité de mesure de l'éclairement lumineux est le lux pour la quantité de lumière qui arrive sur une surface pondéré -selon la longueur d'onde- par la sensibilité spectrale de l'œil.

En physique, on ne pondère pas de la sensibilité humaine. Il faudra plutôt se raccrocher à la sensibilité du capteur variable selon la longueur d'onde. Et donc on ne parle pas en lux mais en watt par mètre carré.

Des exemples :

La limite haute d'éclairement supportable est vers 100 000 lux. C'est l'éclairement que délivre le soleil s'il se trouve au zénith à midi. Si cet éclairement est envoyé sur une feuille de papier bien blanc, il procurera une sensation douloureuse à l'œil. Mais sur les feuillages verts des arbres, qui restituent moins de lumière, la vision ne sera pas désagréable.

Un écran d'ordinateur est calé pour donner l'impression qu'il est comme une feuille blanche éclairée par 300 lux à 1000 lux de lumière. C'est aussi le niveau conseillé de l'éclairement des bureaux et des lieux de travaux nécessitant un bon éclairement.

Autour de 100 lux se situe le minimum d'éclairement pour lire un livre sans fatigue.

La pleine Lune éclaire comme 0,1 à 0,2 lux, mais un bon ciel noir sans lune est vers 0,001 lux.

Vénus éclaire comme 0,000 1 lux. Et l'on sait que l'on peut arriver à distinguer l'ombre d'un objet projeté par l'éclairement de Vénus.

Sirius éclaire comme 0,000 01 lux et la limite de sensibilité de l'œil semble être 10 fois en dessous de cette valeur.

La luminance

La luminance est la quantité de lumière réémise par un objet et qui va dans l'œil ou dans l'objectif photographique. Elle est aussi pondérée selon la longueur d'onde par la sensibilité spectrale de l'œil. Elle se mesure en candéla par mètre carré.

En physique, on ne pondère pas de la sensibilité humaine. Et donc on ne parle pas en candéla par mètre carré mais en watt par mètre carré et par stéradian.

Typiquement la luminance d'un objet est reliée à son éclairement selon ses capacités de réflexion et de diffusion de la lumière. Cette capacité est exprimée en réflectance et la formule usuellement utilisée est celle de la loi de Lambert pour les objets diffusants (ce qui exclue les miroirs...) :

$$L = E.r / \pi$$

L luminance exprimée en candela par mètre carré (cd/m²). C'est la lumière arrivant du sujet sur l'appareil photo ou l'œil.

E éclairement, exprimé en lux (lx). C'est la lumière qui éclaire l'objet.

r réflectance, égale à 18% pour un objet gris neutre et 40% pour un blanc mat diffusant

On observe donc qu'une feuille de papier blanc bien mat et diffusant donnera un facteur $0,4/\pi=0,127$ entre les deux grandeurs. Soit environ un facteur 1/8.

Les couleurs en faible luminosité

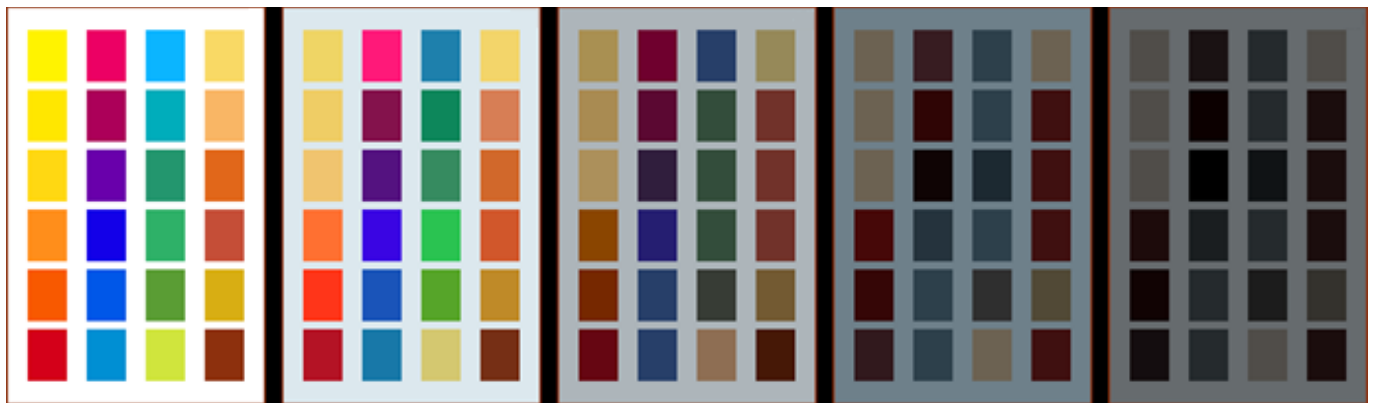
Le panneau ci-dessous simule la sensation de l'œil pour une mire de teintes vives observées à différents niveaux d'éclairement. De gauche à droite, entre le coucher du Soleil et la nuit noire astronomique.

Au couchant : Soleil à l'horizon et environ 200 lux d'éclairement

Changement assez subtil des couleurs du fait de la coloration du couchant. On différencie finement les jaunes mais on va les perdre à l'étape suivante. On franchit la limite entre vision photopique et mésopique vers 20 lux, quelques minutes après le coucher du Soleil.

15 minutes après le coucher du Soleil : Soleil à -4° et 2 lux

Changement rapide des couleurs. Le papier n'est déjà plus blanc. Les jaunes les plus vifs (et le jaune-vert lime) sont perdus et se confondent aux ocres et ors. On différencie les teintes de rouges mais on va les perdre à l'étape suivante.



| | | | | |
|--------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------------------|
| 200 lux | 2 lux | 0,2 lux | 0,02 lux | 0,002 lux |
| Soleil couchant | ...+15 minutes | ...+45 minutes | ...+60 minutes | ...+90 minutes |
| 0° Soleil à l'horizon | -4° | -12° Fin du crépuscule nautique | -16° | Nuit noire et sans Lune |

45 minutes : Soleil à -12° et 0,2 lux

Changement rapide des couleurs. On différencie mal les rouges. On différencie encore un peu les bleus des verts mais c'est limite.

60 minutes : Soleil à -16° et 0,02 lux

Changement subtil des couleurs. Rouge orange et brun sont confondus. Le violet est totalement noir. On distingue cinq tons : gris clair, gris jaune, chaud rougeâtre, froid bleuâtre et noir. La dernière apparence de couleurs ce sont les tons chauds et les tons froids. On est à la limite entre la vision mésopique et la vision scotopique.

90 minutes : Excellente nuit astronomique sans Lune et moins de 0,002 lux

Vision totalement scotopique. Il ne reste que trois tonalités : le gris clair du papier blanc, le gris moyen des jaunes vifs et le noir pour toutes les autres couleurs. On a perdu la dernière petite différence de couleurs entre tons chauds et tons froids.

Intérêt de ce passage par l'œil

Ce qui est plutôt intéressant ici est de constater que nous ne sommes pas tous familiarisés avec la notion de vision mésopique entre la vision purement diurne et purement nocturne. Ce n'est pas une transition rapide de diurne à nocturne. Elle commence avec un éclairage de 25 lux juste en dessous de celui nécessaire à la lecture vers 100 lux. La vision mésopique ne cède la place à la vision purement nocturne et scotopique que vers 0,025 lux c'est-à-dire plus de 1000 fois en dessous.

On se pose donc bien des questions sur la manière de lire un atlas de nuit puis de chercher les plus fins détails à l'oculaire... On se demande si tous ces chiffres sont bien les bons et en tout cas quels sont les bons chiffres pour la pratique de l'astronomie amateur.

Pour le photographe

L'indice de lumination

À l'époque où les pellicules avaient presque toutes des sensibilités voisines de 100 ISO, les photographes utilisaient une échelle de mesure nommée indice de lumination ou IL (EV pour Exposure Value en anglais). Historiquement, cette échelle permettait de jauger l'exposition de la pellicule selon les seuls réglages disponibles en ces temps : ouverture et temps de pause.

Cette méthode était soutenue par la formulation mathématique suivante :

$$IL = \text{Log}_2 (N^2/T)$$

Avec N l'ouverture de l'objectif (f/N) et T le temps de pause en seconde.

Avec Log_2 le logarithme en base 2.

Ainsi l'IL de zéro est obtenu pour une pause d'une seconde et un objectif ouvert à f/1.

Cet indice augmente de +1 lorsque le temps de pause est divisé par 2 ou lorsque l'objectif est fermé de un diaphragme (la surface collectrice de lumière est alors réduite d'un facteur 2).

Cet indice est aussi un moyen de quantification de la luminosité de la scène photographiée, mais à condition d'avoir une pellicule de 100 ISO.

Par exemple, à l'époque où les appareils n'avaient pas de cellule de mesure de la luminosité, les photographes apprenaient que pour un paysage éclairé par le plein soleil de midi, il fallait exposer à +15 IL avec une pellicule à 100 ISO. Il pouvait régler avec 1/100° de seconde à f/16. Puisque f/16 consiste à fermer l'objectif de huit diaphragmes soit +8 IL (f/1 1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16). Et que 1/100° de seconde consiste à réduire de temps de pause environ sept fois soit +7 IL (1 s ½ ¼ 1/8° 1/16° 1/32° 1/64° 1/128°). Finalement ces réglages donnaient bien : +8+7=+15°IL.

De même ils apprenaient qu'il fallait exposer à +13 IL avec un ciel nuageux clair, +11 IL avec un ciel nuageux sombre, +4 IL dans une maison peu éclairée, etc.

La notion de gris moyen

Avec l'arrivée du numérique, la lumination convenable de la pellicule se traduit dans les images JPEG par un niveau de gris moyen qui est le niveau de gris 128 sur une échelle allant du noir parfait à 0 au blanc pur à 255. Les écrans qui restituent les images numériques travaillent avec des signaux discrétisés aussi sur ces 256 niveaux de gris. Ainsi en prenant des photographies numériques en automatique, l'APN va combiner les informations de sa cellule de mesure d'éclairement (ou posemètre) avec un algorithme visant à restituer une image JPEG regardable, ni trop sombre ni trop claire et donc autour de 128.

Si bien qu'une surface parfaitement uniforme, qu'elle soit blanche, grise ou anthracite, qu'elle soit éclairée par le soleil, les nuages, une ampoule chichiteuse ou un quartier de Lune, donnera un fichier JPEG rempli de pixels de valeur très voisine de 128. Avec une scène plus complexe, contenant des hautes et des basses lumières, des zones éclairées ou dans l'ombre, l'algorithme va choisir l'illumination pour obtenir une image dont les pixels seront plus ou moins équilibrés entre des basses et des hautes valeurs.

Mais pour une image très uniforme il conservera un équilibre proche du gris moyen JPEG à 128. L'analyse des réglages de l'appareil pour ce genre d'image permet donc de remonter à l'éclairement que la cellule de l'appareil a mesuré. C'est donc une mesure de la luminosité.

Il faut se méfier des images non uniformes et des autres valeurs de gris des images, car les algorithmes des APN peuvent écraser ou dilater les dynamiques selon que le sujet photographié est fortement ou faiblement contrasté. Une division ou une multiplication d'un facteur 2 du niveau de gris JPEG n'est donc pas toujours liée à un facteur 2 sur le sujet photographié.

Les réglages APN

On comprend donc que l'on puisse utiliser les réglages d'un APN pour connaître la mesure de la lumière. C'est particulièrement intéressant avec les appareils numériques où l'on peut accéder aux trois réglages en sensibilité, en diaphragme et en temps de pause.

Les photographes n'ont pas fait évoluer dans cette direction le concept IL. Je cesse donc de détailler cet indice. J'utilise depuis des années un nombre guide (NG) qui quantifie, non pas la lamination sur la pellicule, mais la lumière entrant dans l'objectif et venant du sujet. Ce nombre guide utilise la formulation mathématique suivante :

$$NG = IL - \text{Log}_2 (S/100)$$

$$\text{Ou encore } NG = \text{Log}_2 (N^2/T) - \text{Log}_2 (S/100) = \text{Log}_2 (100.N^2 / T.S)$$

- Avec
- NG Nombre Guide (sans dimension)
 - N l'ouverture de l'objectif (f/N)
 - T le temps de pause en seconde
 - S la sensibilité en ISO de la pellicule
 - Log₂ le logarithme en base 2

Ainsi pour une même luminosité, si je règle une sensibilité plus forte d'un facteur 2, il me faudra augmenter l'indice de lamination en compensation, c'est-à-dire fermer l'objectif de un diaphragme ou bien réduire le temps de pause d'un facteur deux. Ce qui conservera un nombre guide constant.

Elle se calcule aussi avec l'abaque :

$$NG = \text{Log}_2 (N^2) - \text{Log}_2 (S/100) - \text{Log}_2 (T)$$

| Ouvertures | | Sensibilités | | Vitesses rapides | | Vitesses lentes | |
|------------|-------|--------------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|
| f/ 1 | 0 NG | 100 ISO | 0 NG | 1 sec | 0 NG | 1 sec | 0 NG |
| f/ 1,4 | +1 NG | 200 | -1 NG | 1/2 | +1 NG | 2 | -1 NG |
| f/ 2 | +2 NG | 400 | -2 NG | 1/4 | +2 NG | 4 | -2 NG |
| f/ 2,8 | +3 NG | 800 | -3 NG | 1/8 | +3 NG | 8 | -3 NG |
| f/ 4 | +4 NG | 1 600 | -4 NG | 1/16 | +4 NG | 16 | -4 NG |
| f/ 5,6 | +5 NG | 3 200 | -5 NG | 1/32 | +5 NG | 32 | -5 NG |
| f/ 8 | +6 NG | 6 400 | -6 NG | 1/64 | +6 NG | 1 min | -6 NG |
| f/ 11 | +7 NG | 12 800 | -7 NG | 1/128 | +7 NG | 2 | -7 NG |
| f/ 16 | +8 NG | 25 600 | -8 NG | 1/256 | +8 NG | 4 | -8 NG |
| | | 51 200 | -9 NG | 1/512 | +9 NG | 8 | -9 NG |
| | | 102 400 | -10 NG | 1/1024 | +10 NG | 16 | -10 NG |

La mesure de la luminance

Les spécialistes de photométrie et de photographie ont quantifié avec le système des unités internationales la notion d'IL, en y intégrant la sensibilité des pellicules comme moi. C'est ce qui permet aux photographes de disposer de cellules, de posemètres et de luxmètres étalonnés. Pour moi cela me permet de raccrocher les unités de photométrie à NG. Je peux remonter des réglages de l'APN à la quantité de lumière reçue par l'objectif exprimée en candéla par mètre carré. Cette relation est usuellement écrite :

$$IL = \text{Log}_2 (L.S / K)$$

Avec :

L luminance exprimée en candela par mètre carré (cd/m²). C'est la lumière arrivant du sujet sur l'appareil photo ou sur le moyen de mesure.

K constante d'étalonnage des posemètres. La norme ISO 2720:19742 recommande pour K des valeurs entre 10,6 et 13,4 pour une luminance exprimée en cd/m². Ce qui laisse une tolérance de plus et moins 10% dans les étalonnages des appareils. J'utilise ici une constante de valeur plutôt médiane :12,5.

On peut aussi réécrire la formule en utilisant ma définition de NG ce qui simplifie tout :

$$L = 0,125 \times [100.N^2 / T.S] = 0,125 \text{ cd/m}^2 \times 2^{\text{NG}} = 2^{(\text{NG}-3)} \text{ en cd/m}^2$$

Pour un sujet restitué par un gris moyen à 128, sa luminance L en candéla par mètre carré est calculable à partir des réglages de l'APN selon :

$$L = 2^{(\text{NG}-3)} \text{ en cd/m}^2$$

Cette écriture simple permet un calcul de tête pourvu que l'on soit familier de la série des puissances de deux : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1k, 2k, 4k, 8k, ...etc. Ainsi un paysage en plein soleil à midi, photographié à 100 ISO, 1/100°, F/16 est doté d'un NG de 15, et il restitue dans l'objectif une quantité de lumière de 2 à la puissance 15 moins 3, soit 4100 cd/m².

Attention tout de même aux détails qui peuvent fausser cette mesure. Par exemple la teinte doit être blanche ou grise mais à très faible coloration. Je n'ai pas transposé la formule pour les teintes rouge, verte ou bleu.

La mesure de l'éclairement

La transformation en lux est sujette à confusion. Car le lux est la quantité de lumière reçue par le sujet à photographier. Ce n'est pas la lumière entrant dans l'objectif. Du coup, il faut tenir compte de ce que restitue le sujet vers l'appareil photo.

Typiquement un papier blanc mat redistribue 40% de la lumière reçue, tandis qu'une peinture grise claire n'en redonne que 18%. Les photographes utilisent volontiers cette valeur de gris à 18%, car elle est proche de la restitution de la peau et cela leur permet d'obtenir des tons chaires moyens pour des portraits bien équilibrés.

On peut donc tout de même mesurer la quantité de lumière reçue par un objet à partir des paramètres photographique. La formule est usuellement écrite :

$$IL = \text{Log}_2 (E.S.r / K.\pi)$$

E éclairement, exprimé en lux (lx)

r réflectance, égale à 18% pour un objet gris neutre et 40% pour un blanc mat diffusant

Concrètement lorsque, sur une image uniforme JPEG, on obtient un ton gris moyen de 128 pour le blanc d'une feuille de papier, d'un tube de télescope ou d'un atlas (donc de réflectance 40%), c'est qu'ils recevaient des étoiles, de la Lune ou des lampes un éclairage exprimé en lux de :

$$E = (0,125 \cdot \pi / 40\%) \times [100 \cdot N^2 / T.S] = 0,982 \text{ lux} \cdot 2^{NG} \cong 2^{NG} \text{ en lux}$$

On dispose donc d'un moyen de mesure de l'éclairage (lux) avec un papier blanc et un APN.

Une feuille de papier blanc restituée par un gris uniforme moyen JPEG à 128, reçoit un éclairage E en lux calculable à partir des réglages de l'APN selon :

$$E = 2^{NG} \text{ en lux}$$

Mais attention à l'usage inverse, si connaissant l'éclairage en lux on cherche à déduire les réglages photographiques, il faut se poser la question de ce que l'on souhaite voir traduire en noir vers 0, en gris à 128 et en blanc vers 255. Par exemple un visage sera à traduire en gris mais le télescope à côté devra être bien plus clair pour sembler blanc. Il faudrait donc utiliser la formule avec le coefficient de réflectance à 18% dans ce cas. C'est là une partie du métier du photographe d'art.

Exemples

Dans mon bureau avec un papier bien blanc, mon APN me donne une image dont l'histogramme des pixels est bien centré sur 128 avec les réglages suivants : 400 ISO, F/4, 1/100°. On calcule de tête avec l'abaque que $NG = -2 + 4 + 7 = +9$. Ensuite avec les formules on calcule que l'objectif reçoit du papier blanc $2^{(9-3)} = 2^6 = 64 \text{ cd/m}^2$. Tandis que le papier reçoit de l'éclairage au plafond une puissance de $2^9 = 512 \text{ lux}$. Ce qui est cohérent avec la norme française qui impose d'éclairer entre 300 et 1000 lux les bureaux.

Les zones blanches de mon écran d'ordinateur sont photographiées à : 400 ISO, F/4, 1/160° pour restituer un gris moyen à 128. On calcule $NG = -2 + 4 + 7,3 = +9,3$. L'objectif reçoit de l'écran blanc $2^{(9,3-3)} = 2^{6,3} = 79 \text{ cd/m}^2$. Pour un écran on ne parle pas de l'éclairage qu'il reçoit. Mais pour les yeux, c'est une surface équivalente à celle d'une feuille de papier blanc éclairée par $2^{9,3} = 630 \text{ lux}$. Il n'y a donc pas de contrastes fatigants pour les yeux entre mes papiers et mes écrans.

Pour les astronomes amateurs

La mesure de la luminance du ciel au SQM

Nous utilisons depuis maintenant des années le SQM (Sky Quality Meter) pour contrôler la noirceur du ciel.

La notice du SQM de la société Unihedron précise la conversion entre la lecture en magnitude par seconde d'arc carrée et la luminance reçue du ciel exprimée en candéla par mètre carré. Selon eux : $[cd/m^2] = 10,8.E+4 \times 10^{(0,4 \times [mag/arcsec^2])}$

Ce qui s'écrit aussi :

$$L = 2,512^{(12,58-Mv/sac)} \cong 2^{((12,58-Mv/sac)*1,3288)} \text{ en } cd/m^2$$

Avec la formulation précédente de la luminance et de NG, cela permet de faire le lien entre magnitude visuelle par seconde d'arc et NG.

$$14,83 - 0,7525 * NG = Mv/sac \quad \text{ou} \quad 1,3288 * (14,83 - Mv/sac) = NG$$

On a une relation entre la mesure de luminance du SQM en magnitude par seconde d'arc carré et les réglages d'un APN qui restitue un sujet uniforme et plutôt blanc par un gris moyen JPEG de 128 :

$$15 - 3/4 * NG = Mv/sac \quad \text{ou inversement} \quad 4/3 * (15 - Mv/sac) = NG$$

Cette relation permet de réaliser des mesures avec un APN à défaut de SQM et inversement.

Exemples

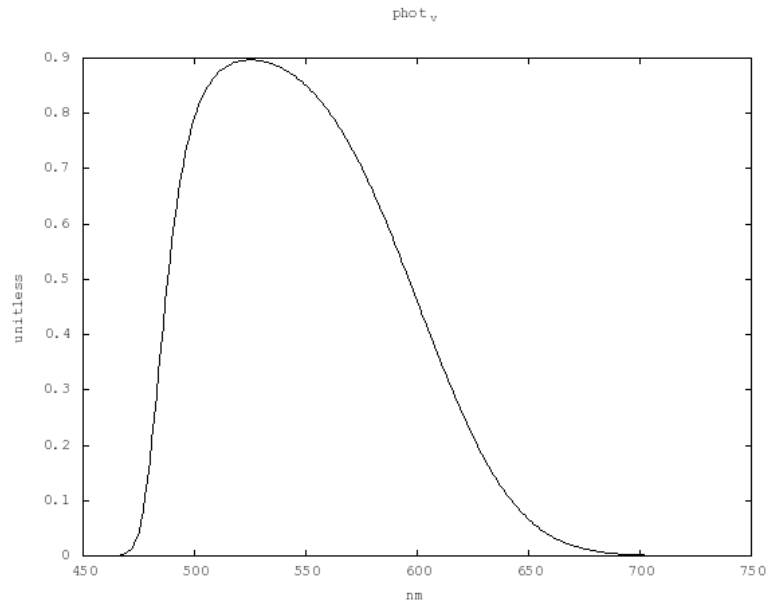
Par exemple la zone blanche d'un écran d'ordinateur portable donne au SQM 7,7 Mv/sac et se photographie en gris moyen à 400 ISO, 1/125 sec, f/5,6 ou 6,3 (selon mes APN) soit NG=+10,0 ou +10,5 ce qui est cohérent avec la formule.

Par exemple un ciel pollué de banlieue é mesuré au SQM à 18 Mv/sac, photographié à 1600 ISO en 2 secondes à f/2,8, donne une image bien délavée en gris moyen autour de 128. Il a donc bien un NG=-4,0 cohérent avec la formule. Cette relation permet donc de se faire une idée des réglages à ne pas dépasser si on souhaite un ciel bien noir et pas un ciel délavé tout gris.

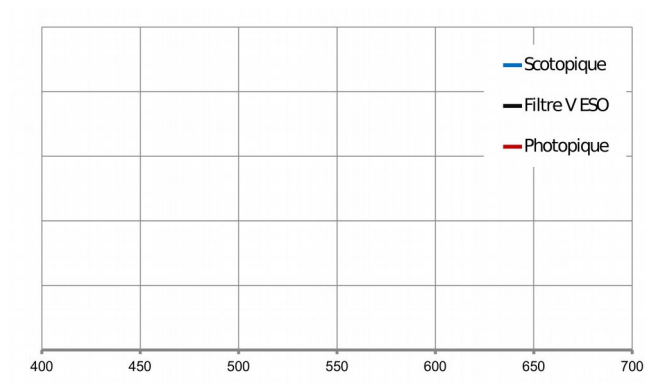
Sur ce même ciel à 18 mv/sac, on peut calculer l'éclairement qui sur une feuille de papier blanc donnerait la même luminance. C'est l'éclairement de 2^{-4} lux = 0,06 lux selon la formule vue précédemment. C'est un éclairement qui permet encore de distinguer quelques couleurs (gris clair, gris jaune, gris orangé, chaud rougeâtre, froid bleuâtre, froid verdâtre) et qui montre que l'on n'est pas en vision scotopique pure, les cônes sont encore un peu sensibles.

Les spectres

À titre d'exemple voici le profil du filtre de référence ESO pour la bande V. Il est proche de la sensibilité visuelle de l'œil humain. Il est en effet centré sur 550 nm avec une largeur équivalente de 102 nm ce qui ressemble à la réponse en sensibilité spectrale de l'œil.

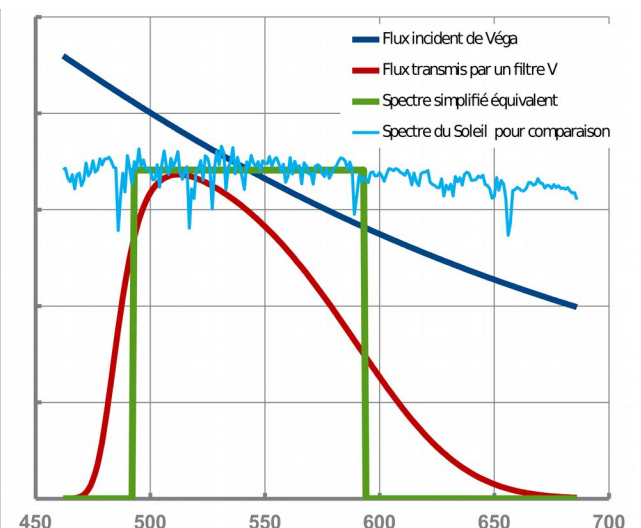
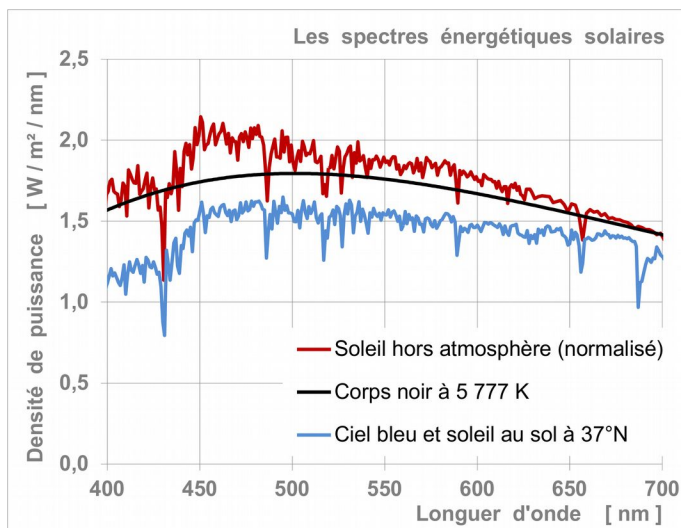


En vision diurne (photopique) et nocturne (scotopique), la sensibilité spectrale normalisée de l'œil humain est donnée selon Wikipédia par :



Les centres et largeurs de spectre en équivalent pleine sensibilité sont :
 En photopique le centre est à 560 nm avec une largeur de 107 nm.
 En scotopique le centre est à 502 nm avec une largeur de 97 nm.

Le filtre V de l'ESO est donc assez proche de la vision humaine.



La vulgarisation vers les astronomes amateurs

Les professionnels ont quantifié la relation entre la magnitude des étoiles et leur éclairement. Forcément car c'est cette quantification précise de la lumière reçue par leur instrument qui permet d'étudier l'univers. Il traîne donc dans les ouvrages de vulgarisation des tables de la luminosité de quelques objets emblématiques, comme le Soleil, la pleine Lune, Sirius, etc. Mais elles ne précisent pas toutes les conditions de calcul.

Par exemple on trouve des chiffres allant jusqu'à 130 000 lux pour le Soleil. Par calcul on arrive bien à cette valeur, mais pour le Soleil tout seul et hors atmosphère terrestre. Ou alors c'est pour le Soleil sous nos latitudes avec environ deux atmosphère d'atténuation mais avec le ciel bleu qui compense les atténuations !

La relation exacte semble être d'un lux pour -13,98 magnitudes visuelles ou $2,54 \cdot 10^{-6}$ lux à magnitude zéro. Les magnitudes des professionnels étant données hors atmosphère ! Ce qui impose de considérer l'atténuation de l'atmosphère qui varie d'un observatoire à l'autre selon son altitude, selon l'humidité et les poussières et selon la hauteur des objets sur l'horizon. On considère parfois 82 % de transmission au zénith pour une atmosphère moyenne traversée. Mais bien des objets, jamais très haut, justifient deux atmosphères sous nos latitudes.

Ce qui donne un éclairement E en lux produit par une étoile de magnitude visuelle Mv au zénith d'environ :

$$E = 82 \% \times 2,54 \cdot 10^{-6} \times 2,512^{-Mv}$$

Le tableau suivant précise quelques valeurs selon mes soins :

| Objet | Magnitude visuelle | Atténuation retenue | Éclairement au sol en lux |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| Soleil (seul sans le ciel bleu) | -26,83 | 2 atm. | 92 000 |
| Pleine Lune | -12,55 | 2 atm. | 0,18 |
| Vénus à son maximum | -4,6 | 2 atm. | 0,000 12 |
| Sirius | -1,46 | 2 atm. | 0,000 006 6 |
| Véga | +0,03 | 1 atm. | 0,000 002 0 |
| Étoile faible | +6,0 | 1 atm. | 0,000 000 008 |

Attention toutefois que l'éclairement produit par une seule petite étoile de magnitude 6 semble être très en dessous de ce que tout œil puisse percevoir.

De l'usage des lampes rouges

Avec un SQM, on peut mesurer la luminance de nos atlas et planchettes à dessin sous l'éclairage de nos lampes.

J'utilise une lampe rouge et une blanche, toute deux réglables finement et à très bas niveau. Il faut préciser que je travaille sans mes lunettes de myopie et donc en collant mes yeux à la surface du papier, ce qui modifie peut-être la faculté de lecture. Le tableau suivant détaille mes conditions d'éclairages mesurées lors d'une nuit bien noire (à plus de 21 mv/sac) après une heure d'acclimatation à l'obscurité :

| Éclairage | Mesure SQM [mv / sac] | Éclairement [lux] | Usage |
|----------------------|----------------------------|------------------------|---|
| Lampe rouge | | | |
| Au minimum | 17 | 0,16 | La couleur rouge commence à disparaître. Il reste une impression de teinte chaude. |
| 1 cran | 16 | 0,40 | Rouge très bien perceptible Minimum pour lire ou écrire au stylo noir. |
| 2 crans | 15 | 1,0 | Minimum pour dessiner au crayon HB |
| 3 crans | 14 | 2,50 | Travail confortable sur atlas |
| Flamme | | | |
| Bougie à 1 mètre | 13,5 – 14,0 | 4,0 - 2,5 | Travail confortable |
| Briquet à 1 mètre | 16,5 | 0,25 | Un peu chiche... |
| Lampe blanche | | | |
| Au minimum | 17 | 0,16 | Minimum pour lire ou écrire au stylo noir Couleurs faiblement perceptibles |
| 1 cran | 16 | 0,40 | Minimum pour dessiner au crayon HB |
| 2 crans | 15 | 1,0 | Travail très confortable sur atlas Couleurs bien perceptibles |

On constate déjà que le travail sous lampe rouge se fait avec une bonne perception de la couleur rouge, donc en vision non totalement scotopique. Et donc, même avec une lampe rouge, il faut se réadapter aux faibles luminances ensuite.

Tous ces éclairagements sont dans le domaine mésopique où les performances de la vision photopique se dégradent, sans avoir encore toutes les capacités de la vision scotopique. En vision mésopique les bâtonnets commencent à travailler mais ne sont pas au maximum de leurs aptitudes.

Aussi on constate que tous ces éclairagements sont supérieures à ceux d'une pleine Lune d'un facteur au moins 2 et parfois 10.

L'éclairage de travail confortable nécessite pour l'œil au moins 200 fois plus de lumière qu'un excellent ciel astronomique. C'est à dire 5 à 6 magnitudes.

Ensuite, si tant est que la mesure du SQM restitue la luminance dans les rouges comme l'œil les perçoit, il faut environ une magnitude d'éclairage de moins pour travailler en blanc. Mais cela ne dit rien sur le temps de réadaptation aux plus faibles lumières ensuite...

Pour les astronomes professionnels

On trouve sur les sites Internet des observatoires astronomiques gouvernementaux les formules qui donnent le nombre d'électrons que vont fournir les pixels d'un capteur pour une source lumineuse donnée. (Site de l'ESO : <http://www.eso.org/observing/etc>)

Par exemple sur le site de l'ESO, l'observatoire européen austral, se trouve un ETC. En français, un calculateur de temps d'exposition. Ses formules indiquent peu-ou-prou l'ensemble des paramètres qu'il faut considérer. C'est le meilleur moyen que j'ai trouvé pour aborder la photométrie professionnelle :

$$N = F \cdot \Delta \cdot S \cdot T \cdot E / P \quad (\text{ponctuel})$$

$$N = M \cdot \Omega \cdot \Delta \cdot S \cdot T \cdot E / P \quad (\text{surfacique})$$

Avec :

- N Nombre d'électrons collectés par pixel du capteur. Cette quantité sera ensuite convertie en un nombre codée sur 8, 10, 12 ou 14 bits pour donner le niveau de gris d'un point de l'image. Lorsque la conversion est bien faite, plus un sur le nombre d'électron donne plus un sur le niveau de gris.
- F ou M **Éclairement** monochromatique d'une source ponctuelle ou **luminance** monochromatique d'une source étendue. C'est la densité spectrale du flux d'énergie arrivant sur une surface depuis la source lumineuse. Elle s'exprime en $W / m^2 / nm$ pour un objet ponctuel et en $W / m^2 / nm / \text{sac}$ pour le ciel et les objets étendus. En précisant que les watts sont la somme de l'énergie des rayonnements arrivant chaque seconde de la source. Les mètres carrés pour la surface collectrice du télescope. Les nanomètres pour la largeur de la bande du spectre considérée. Et les 'sac' pour 'secondes d'arc au carré' ou 'seconde d'angle au carré' mesurent la surface du ciel ou de la source étendue.
- Ω Pour les sources étendues, c'est l'angle solide sur le ciel de la cellule collectrice en sac (seconde d'angle au carré). Selon le grossissement du télescope, un pixel est sensible à une plus ou moins grande surface du ciel ou de la source. En multipliant M par Ω on se ramène à un éclairement monochromatique F.
- Δ Largeur de la bande passante du filtre exprimé en nanomètres.
- S Surface collectrice du télescope en mètres carrés.
- T Temps d'exposition en secondes.
- P Énergie des photons collectés.
- E Efficacité de conversion du capteur de photon à électron.

On notera que cette formule omet de considérer l'atténuation atmosphérique liée à l'air, l'ozone, l'humidité, les poussières et l'épaisseur traversée. Elle omet aussi de considérer les atténuations dans les optiques. Un miroir aluminé usuel ne réfléchit que 85 % de la lumière visible, et il faut des traitements spéciaux pour obtenir 96 %. Elle n'indique pas non plus la magnitude de l'objet observé, ni le nombre de pixels sur lesquels l'image s'étale. En fait ces éléments sont à considérer séparément . En particulier, avec :

$$E = T_{\text{atmosphère}} \cdot T_{\text{télescope}} \cdot T_{\text{filtre}} \cdot EQD$$

$$F = F_0 \cdot 10^{-\text{magnitude} / 2,5}$$

La plupart des termes de transmission sont compréhensibles, mais il faut préciser :

- EQD Efficacité Quantique du Détecteur pour convertir les photons entrant en électrons
F₀ Éclairement monochromatique de référence ou densité spectrale de flux de référence à magnitude zéro (dans le domaine spectrale analysé). Par exemple pour Véga, dans le domaine visible autour de 550 nm, il est tabulé que F₀ = 3,56.10⁻¹¹ W / m² / nm.

Qu'elle est l'énergie des photons

L'énergie P des photons se calcule simplement en physique par :

$$P = h.c / \lambda$$

Avec :

- h 6,6262.10⁻³⁴ J.s la constante de Planck
c 2,9979.10⁺⁸ m/s la vitesse de la lumière
 λ la longueur d'onde de la lumière : 550 nm ou 0,55.10⁻⁶ m typiquement en bande V

Ici donc :

$$P = 3,61.10^{-19} \text{ J par photon visible de couleur vert-jaune à 550 nm}$$

Sur l'étendue de la sensibilité spectrale de l'œil humain qui va d'environ 400 à 700 nm, l'énergie des photons varie de 5,0 à 2,8.10⁻¹⁹ J.

Combien de photons en regardant Véga?

Le flux énergétique de la magnitude 0 a été défini et mesuré pour Véga. Ce flux a servi de référence de magnitude zéro pendant des années. Mais d'autres étalons existent car comme souvent il y en a de plus ou moins commodes selon les besoins des physiciens.

$$\text{Magnitude zéro sur Véga de } \mathbf{3,6.10^{-11} \text{ J / s / m}^2 / \text{ nm}}$$

Avec des photons de 550 nm on a une énergie de 3,6.10⁻¹⁹ J / photon :

$$\text{Densité spectrale de photons de } \mathbf{100\ 000\ 000 \text{ photons / s / m}^2 / \text{ nm}}$$

Il faut ensuite multiplier par la surface de la pupille d'observation. Par exemple pour un œil âgé dont la pupille nocturne se dilate à 5 mm de diamètre, soit 0,2 cm² :

$$\text{Densité spectrale entrante de } \mathbf{2\ 000 \text{ photons / s / nm}}$$

Comme ce flux est quasi constant sur la largeur d'un filtre V de 100 nm de large, ou sur la plage de sensibilité de l'œil (On justifiera cette approximation dans la suite) :

$$\mathbf{\text{Il rentre dans l'œil en provenance de Véga } 200\ 000 \text{ photons / s}}$$

À l'autre bout de la sensibilité de l'œil nous avons les étoiles de magnitude 6,5 que certains yeux expérimentés ou jeunes arrivent à voir sous un ciel bien noir. Ces étoiles émettent 400 fois moins de lumière que Véga. Il arrivera donc dans l'œil seulement 500 photons / s. Et encore faudrait-il compter l'atténuation de l'atmosphère qui ne laisse passer au zénith, et en plaine, que 80% de la lumière des étoiles.

Combien de photons en photographiant une étoile 10 mv?

$$\text{Magnitude zéro sur Véga de } 3,6.10^{-11} \text{ J / s / m}^2 / \text{ nm}$$

Magnitude 10 donc 10000 fois moins de lumière

Avec des photons de 550 nm on a une énergie de $3,6 \cdot 10^{-19}$ J / photon :

Il faut ensuite multiplier par la surface de la pupille d'observation. Par exemple pour un objectif photo de 200mm ouvert à f/2,8 a une pupille de 40 cm² :

Un spectre d'étoile blanche de 107 nm de largeur spectrale équivalente.

Une transmission atmosphérique zénithale de 80%

Il rentre dans l'objectif 200mm F/2,8 en provenance d'une étoile de 10 mv environ 3400 photons /s. Ces photons vont se répartir sur 4 à 8 pixels selon la finesse de la mise au point, la qualité de l'optique, la taille des pixels et encore d'autres facteurs.

Précisions sur les bandes spectrales

La densité de flux d'énergie, le paramètre F_0 de la formule, est connu par des mesures. Elle est raccordable à différente échelle normée de magnitude. L'une d'elle consiste à prendre l'étoile Véga comme référence de magnitude zéro dans tous les domaines spectraux. Ainsi dans le référentiel de Véga, les flux de photons ont été mesurés derrière les différents filtres qui définissent les domaines spectraux UV, bleu, visible, rouge, IR, etc. Ces flux et ces filtres normalisés sont détaillés sur le site de l'ESO.

Voici quelques exemples de bandes spectrales et de densités de flux normées. J'y ai ajouté les caractéristiques de longueur d'onde moyenne, de largeur de bande spectrale équivalente et de flux typique.

| Bandes spectrales du référentiel de Véga de l'ESO | Densité de flux d'une source de magnitude zéro dans le référentiel Véga de l'ESO $W / m^2 / nm$ | Longueur d'onde moyenne déduite nm | Largeur de la bande spectrale équivalente déduite nm | Flux de photon typique déduit photon / s / cm ² |
|---|--|---------------------------------------|---|---|
| U | $U_0 = 4.18023e-11$ | 360 | 27 | 205 000 |
| B | $B_0 = 6.60085e-11$ | 420 | 66 | 926 000 |
| V | $V_0 = 3.60994e-11$ | 550 | 102 | 1 018 000 |
| R | $R_0 = 2.28665e-11$ | 660 | 140 | 1 076 000 |
| I | $I_0 = 1.22603e-11$ | 800 | 140 | 692 000 |

En vision diurne (photopique) et nocturne (scotopique), la sensibilité spectrale normalisée de l'œil humain est donnée selon Wikipédia par :

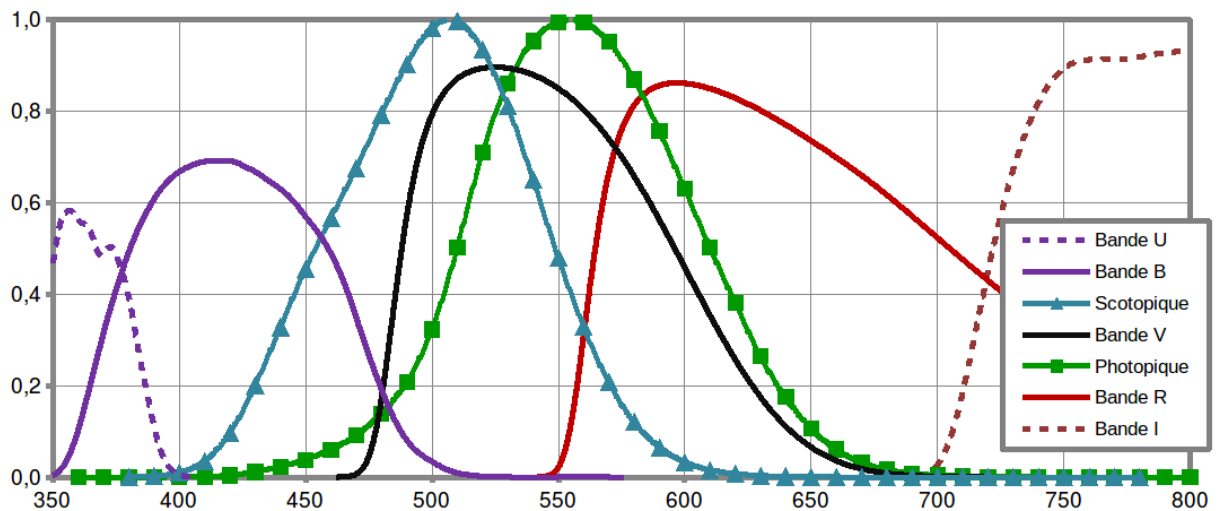
non faut le diag 683 lm/W

Les centres et largeurs de spectre en équivalent pleine sensibilité sont :

En photopique le centre est à 560 nm avec une largeur de 107 nm.

En scotopique le centre est à 502 nm avec une largeur de 97 nm.

Et si l'on rapproche ces choses-là, on a :



Ce n'est qu'un exemple. Il faudrait affiner avec la transmission atmosphérique, qui peut descendre à 50% voir plus selon la saison, la hauteur des étoiles, l'altitude. Il faudrait ajouter la luminosité de l'atmosphère (phénomène d'aurore ou de pollution lumineuse) qui ajoute au fond du ciel dans le bleu-vert ou le jaune-orangé. Enfin pour l'œil humain, il semble que la cornée, le cristallin, l'humeur vitreuse et les pigments de la rétine ne laissent passer que 80 % des photons au-dessus de 500nm et moins de 30 % en dessous. De plus ces chiffres sont très dépendants de l'âge...

Cela commence à fixer des ordres de grandeurs !

Contribution du ciel

La brillance du ciel (en magnitude par seconde d'arc au carré) varie selon la bande spectrale et selon l'âge de la Lune (en jours depuis la nouvelle Lune). Le tableau suivant donne un exemple sur quelques bandes spectrales :

| Âge de la Lune | U | B | V | R | I |
|----------------|------|------|------|------|------|
| 0 | 22,0 | 22,7 | 21,8 | 20,9 | 19,9 |
| 3 | 21,5 | 22,4 | 21,7 | 20,8 | 19,9 |
| 7 | 19,9 | 21,6 | 21,4 | 20,6 | 19,7 |
| 10 | 18,5 | 20,7 | 20,7 | 20,3 | 19,5 |
| 14 | 17,0 | 19,5 | 20,0 | 19,9 | 19,2 |

Toutefois cette brillance du ciel est dépendante de nombreux facteurs, comme la distance à la Lune, l'altitude de l'observatoire, l'humidité et les poussières. Il est préférable d'être prudent et de retenir plutôt qu'un quartier de Lune donne sur la noirceur du ciel une magnitude de moins et une pleine Lune quatre magnitudes de moins. Ce qui justifie pleinement de ne traquer les objets du ciel profond que quelques jours avant et après la nouvelle Lune et dans tous les cas loin de la Lune.

Les observatoires astronomiques du monde sont au mieux entre 21,5 et 21,9 en bande V, au zénith, les nuits sans Lune, lors des minimums solaires qui minimisent les phénomènes d'aurore boréale et de luminescence atmosphérique. Voir l'excellente analyse de La Palma en 2007 par Chris R. Benn (<http://www.ing.iac.es/Astronomy/observing/conditions/skybr/skybr.html>).

L'œil nu sous un ciel à 21,8 mv/sac

Appliquons la formule aux cônes de l'œil de nuit avec :

Un ciel émettant uniformément en bande V sur l'équivalent de 107 nm

Une énergie moyenne des photons de 550 nm de $3,6 \cdot 10^{-19}$ J / photon
Une mesure SQM de la magnitude surfacique à 21,8 dans le domaine visuel
Un œil ouvert à 5 mm soit une surface collectrice de $0,2 \text{ cm}^2$
Avec un éclairage sur un cône individuel de 2,5 microns de diamètre
Soit un angle sur le ciel de 0,5 minute d'angle
Soit une surface angulaire de $\text{Pi} \times 15^2 = 700 \text{ sac}$

On calcule un flux perceptible par chaque petit cône de :

$$3,6 \cdot 10^{-11} \times 10^{(-0,4 \cdot 21,8)} \times 0,2 \cdot 10^{-4} \times 10^7 \times 700 / 3,6 \cdot 10^{-19} = 0,3$$

Il faut utiliser ce résultat avec quelques précautions puisque l'on n'a pas considéré les atténuations de l'œil. Mais cela donne un ordre de grandeur.

Un ciel à 21,8 mv/sac => 0,3 photon / s sur un cône de diam. 2,5 μm

Certes, on n'a pas tenu compte des atténuations dans l'œil. Il n'arrive donc réellement sur un cône qu'une fraction de photon par seconde. Mais il est certain que le fond du ciel de montagne de nuit apparaît bien noir et sans coloration. Il est donc très probablement sous le seuil de sensibilité des cônes.

Pour autant, en vision nocturne les bâtonnets fonctionnent bien et comme ils mesurent au moins 30 microns de diamètre, soit au moins 12 fois plus qu'un cône, ils vont collecter individuellement au moins 144 fois plus de photons. On calcule donc que les bâtonnets reçoivent sous un ciel parfait à magnitude 21,8 un flux de :

Un ciel à 21,8 mv/sac => 40 photons / s par bâtonnet de diam 30 μm

Et 40 photons / s par tache de diffraction de diam 30 μm

Attention aussi que les défauts de l'œil, combinés à la taille de l'image de diffraction d'une pupille plus ou moins ouverte, font que les plus petits détails projetés sur la rétine sont plutôt de 5 à 7 μm de jour et de 15 à 30 μm de diamètre en vision nocturne.

Aussi le nombre des neurones qui alimentent le cerveau en provenance des cônes est environ 6 fois inférieur au nombre de ceux-ci. Il est même 100 fois inférieur pour les bâtonnets !

En combinant ces informations, on comprend bien que la résolution des cônes de l'œil en vision diurne bien éclairée -mais pas trop- n'est que de 5 microns au mieux, soit 1 minute d'angle, soit $10/10^\circ$ pour les ophtalmologistes. Et on arrive à une résolution pour les bâtonnets en basse lumière de 30 microns et plus. Cela donne au moins 6 minutes d'angle pour les plus petits détails perceptibles en vision scotopique et c'est cela qui justifie certains grossissements de la tache d'Airy de nos instruments à 3D...

Au passage il est intéressant de constater qu'une étoile de magnitude 6,5 au zénith (limite de visibilité sous un ciel à 21,8 mv/sac) délivre dans une pupille de 5 mm environ 400 photons par seconde. Comme son image est étalée par les défauts de l'œil sur environ 30 microns, on peut donc dire que la magnitude limite est liée à un rapport signal à bruit de 400/40.

L'œil nu sous un ciel urbain

Mais le ciel de nos banlieues est bien plus lumineux. Par exemple j'ai mesuré le ciel de Montigny-le-Bretonneux au SQM-L vers l'étoile polaire à 18,5 magnitudes visuelles par seconde d'arc carré.

Le fond du ciel est donc 21 fois plus lumineux qu'un ciel parfait de montagne. Et avec 21 fois plus de photons par cônes, soit environ 6 photons par secondes et par cône, cela commence à exciter assez les pigments rétinien pour goûter la teinte jaunasse du firmament.

Ce ciel à 18,5 délivre sur les bâtonnets 840 photons par secondes. Par ailleurs, la magnitude visuelle stellaire limite à l'œil nu en banlieue n'est que de 4,4 et encore est-ce par intermittences. Ce qui fait des étoiles à 3500 photons par secondes.

Application à l'observation (scotopique) au télescope

Par exemple le fond de ciel dans un télescope à très faible grossissement :

Un ciel émettant uniformément en bande V sur l'équivalent de 107 nm

Une énergie moyenne des photons de 550 nm de $3,6 \cdot 10^{-19}$ J / photon

Mesuré à la magnitude de 21,8 dans le domaine visuel ou avec un filtre V

Avec un télescope de 250 mm de diamètre soit une surface de $0,049\text{m}^2$

20% d'obstruction soit une transmission géométrique de 96%

Une transmission des aluminures et de l'oculaire d'environ 80%

Avec un grossissement de 50x et donc une pupille de 5 mm qui devrait donner un fond de ciel aussi lumineux qu'à l'œil nu

On conserve des bâtonnets de $30\mu\text{m}$ soit 6 minutes d'angles de résolution et 7,2 secondes d'arc sur le ciel ou 41 sac

$$10^{(-0,4 \cdot 21,8)} \times 3,61 \cdot 10^{-11} \times 0,049 \times 0,96 \times 0,80 \times 107 \times 41 / 3,61 \cdot 10^{-19}$$

= 31 photons / s perçu par les bâtonnets de diam. $30\mu\text{m}$

C'est bien le résultat attendu car avec une pupille de sortie instrumentale de 5 mm le ciel est presque aussi lumineux qu'à l'œil nu. On perd seulement les atténuations dans les optiques du télescope.

D'expérience le fond du ciel n'est pas noir dans cet oculaire et dans ce télescope même sous les meilleurs ciex du monde. C'est en partie ce qui motive à grossir ou à filtrer pour améliorer le contraste sur les galaxies et lorsque l'on cherche de fines dentelles gazeuses. Mais il est certain qu'alors l'œil travaille avec les bâtonnets. Les cônes ne recevant que moins de 144 fois cette lumière ne peuvent sans doute pas s'activer.

La faiblesse de ce flux comparé à l'impression de luminosité dans cette configuration tenterait de confirmer que les bâtonnets travaillent très bien à ce flux.

Si on cherche des grossissements plus élevées, par exemple de 500 fois, le fond du ciel sera 100 fois moins lumineux soit à 0,3 photons par secondes sur les bâtonnets. Le fond du ciel est alors noir.

Si l'on utilise un filtre H bêta ou OIII qui typiquement ne laisse passer que 10nm de largeur de spectre par rapport aux 100nm équivalent d'un spectre de sensibilité de l'œil, on fait chuter le fond du ciel d'en facteur 10.

Et de même pour un appareil photo

Appliquons la formule aux pixels d'un A7S avec une focale de 200 mm ouverte à 2,8 :

Un ciel émettant uniformément en bande V sur l'équivalent de 107 nm

Une énergie moyenne des photons de 550 nm de $3,6 \cdot 10^{-19}$ J / photon

Une mesure SQM de la magnitude surfacique visuelle à 21,8

Un objectif ouvert sur 40 cm^2

Avec un éclairage sur un pixel de $8,4\mu\text{m}$.

Soit un angle sur le ciel de 8,7 secondes d'arc

Soit une surface angulaire de 75 sac (seconde d'arc carré)

On calcule donc le flux reçu par ce quarteron de pixel de :

$$3,6 \cdot 10^{-11} \times 10^{(-0,4 \cdot 21,8)} \times 40 \cdot 10^{-4} \times 107 \times 75 / 3,6 \cdot 10^{-19} = 6$$

Il faut utiliser ce résultat avec quelques précautions puisque l'on n'a pas considéré les atténuations des optiques ni la répartition RVB de la lumière ni le filtre de Bayer des capteurs. Mais cela donne un ordre de grandeur. Si l'électronique restitue une impulsion par photon détecté, les pixels donneront selon leur couleur entre 1 et 3 impulsions par seconde.

**Un ciel à 21,8 mv/sac => 1 à 3 photons efficaces / s par pixel
avec un Sony A7S équipé d'un 200mm f/2,8**

Un ciel de banlieue à 18,5 mv/sac donne 21 fois plus de lumière et donc de 20 à 60 photons efficaces par pixels selon la couleur.

Trucs pas encore exploités

On a vu qu'un ciel à 18 mv/sac donne NG=-4.

On a vu qu'un ciel à 18 mv/sac délivre 1400 photons / s par bâtonnets de 30µm

On a vu que NG =-4 correspond à une luminance de 0,008 cd/m²

Il rentre dans une pupille d'œil de 5 mm en provenance de Véga 200 000 photons /s sans compter l'absorption atmosphérique.

Et que Véga donne un 0,000 002 0 lux d'éclairement

Mais on n'a pas vu la relation entre les unités photométrique et physique

Pour un spectre plat et un filtre plat autour de 550 nm, la constante est de 683 lm/W

0,000 002 lx -> 2,9^E-9 W ...

Surface 0,2 cm²

Énergie des photons 3,6e-19

Flux de 163000 ph/s pour véga cohérent avec 200 000*0.8 !

Flux de 1555 ph/s par bâtonnet de 30µm pour ciel à 18mv/sac cohérent avec 1400.

<http://ufcmed.org/cannabis-medical/maladie/cannabis-vision-scotopique/>

Le Dr Ethan Russo (États-Unis), conjointement avec des collaborateurs espagnols et marocains, a dirigé une étude sur l'effet possible du THC et du cannabis sur l'amélioration de la vision nocturne (Russo, 2003). Cette étude avait été soulevée par des pêcheurs jamaïcains et marocains qui, indépendamment les uns des autres, ont témoigné qu'après avoir fumé du cannabis ils pouvaient mieux voir la nuit quand ils pêchaient. L'étude a démontré que le cannabis fumé et le THC, consommé oralement à un dosage de 2,5 à 20 mg de Dronabinol, amélioreraient la capacité visuelle scotopique (vision nocturne) en fonction du dosage. Ainsi, les médecins envisagent une application thérapeutique du cannabis pour traiter l'héméralopie, ainsi que d'autres maladies similaires. Un article, paru en 1998 dans le magazine Nursing Standard a relaté le cas d'un patient atteint de rétinite pigmentaire, une maladie des yeux, pour qui l'inhalation de cannabis a considérablement amélioré la fonction visuelle.

<http://www.blog-couleur.com/Qu-est-ce-que-la-luminosite>

On appelle Luminosité (L) cette façon particulière de l'œil de percevoir la luminance. Le modèle colorimétrique sensé décrire la vision humaine, le CIE LAB utilise donc ce paramètre L pour décrire la distribution tonale. La relation qu'il existe entre Luminosité et Luminance a été décrite avec précision par une équation mathématique non linéaire et qui correspond à une courbe géométrique représentée dans le graphique ci-dessous.

La relation entre luminance et luminosité est définie par le modèle colorimétrique CIELAB. Une source lumineuse (Y) ayant seulement 18 % de la luminance de référence (Yn) sera perçue comme un gris moyen de 50 % de luminosité.

Résumé de photométrie pour AstrAms

Quelques références

[https:// www.eso.org/ observing/ etc/ doc/ formulabook/ index.html](https://www.eso.org/observing/etc/doc/formulabook/index.html)

[https:// www.nature.com/ articles/ ncomms12172](https://www.nature.com/articles/ncomms12172)

[http:// strock.pi.r2.3.14159.free.fr/ Ast/ Articles.html](http://strock.pi.r2.3.14159.free.fr/Ast/Articles.html)

[http:// www.telescope-optics.net/ eye.htm](http://www.telescope-optics.net/eye.htm)

Photométrie avec un APN

La luminance d'un objet restitué gris moyen sur une photographie est calculable à partir des réglages des APN. L'échelle pratique que j'utilise est un nombre guide NG qui se calcule avec l'abaque ci-dessous en additionnant les NG d'ouverture, de sensibilité et de temps de pause :

| Ouvertures | | Sensibilités | | Vitesses rapides | | Vitesses lentes | |
|------------|-------|--------------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|
| f/ 1 | 0 NG | 100 ISO | 0 NG | 1 sec | 0 NG | 1 sec | 0 NG |
| f/ 1,4 | +1 NG | 200 | -1 NG | 1/2 | +1 NG | 2 | -1 NG |
| f/ 2 | +2 NG | 400 | -2 NG | 1/4 | +2 NG | 4 | -2 NG |
| f/ 2,8 | +3 NG | 800 | -3 NG | 1/8 | +3 NG | 8 | -3 NG |
| f/ 4 | +4 NG | 1 600 | -4 NG | 1/16 | +4 NG | 16 | -4 NG |
| f/ 5,6 | +5 NG | 3 200 | -5 NG | 1/32 | +5 NG | 32 | -5 NG |
| f/ 8 | +6 NG | 6 400 | -6 NG | 1/64 | +6 NG | 1 min | -6 NG |
| f/ 11 | +7 NG | 12 800 | -7 NG | 1/128 | +7 NG | 2 | -7 NG |
| f/ 16 | +8 NG | 25 600 | -8 NG | 1/256 | +8 NG | 4 | -8 NG |
| | | 51 200 | -9 NG | 1/512 | +9 NG | 8 | -9 NG |
| | | 102 400 | -10 NG | 1/1024 | +10 NG | 16 | -10 NG |

Exemple : Le ciel de banlieue à 18 magnitudes par seconde d'arc carré (mv/sac) donne une image grise délavée (de niveau 128 en JPEG) avec NG=-4 ou : 3200 ISO 4 sec. F/2,8.

Pour une feuille de papier blanc restituée en JPEG RVB par un gris moyen à 128 :

Sa luminance L (en candéla par mètre carré) est calculable à partir de NG selon :

$$\text{Luminance reçue par l'APN : } L = 2^{(NG-3)} \text{ en cd/m}^2$$

Son éclairement E (en lux) est calculable à partir de NG selon :

$$\text{Éclairement reçue par la feuille : } E = 2^{NG} \text{ en lux}$$

Photométrie pour les AstrAms

Le SQM est un appareil de mesure de la luminance du ciel dans le domaine visible. Il y a donc une relation entre sa mesure en magnitude par seconde d'arc et les candelas par mètre carré.

On a une relation entre la mesure du ciel au SQM en magnitude par seconde d'arc carré et les réglages d'un APN qui restitue le ciel par un gris moyen JPEG à 128 :

$$15 - 3/4 * NG = mv/sac \quad \text{ou} \quad 4/3 * (15 - mv/sac) = NG$$

Photométrie avec la physique des professionnels

Il rentre dans l'œil en provenance de Véga (magnitude 0 - au zénith - en plaine – pupille de 5 mm) 160 000 photons par seconde. Et seulement 400 ph/s pour une étoile à 6,5 mv.

Un ciel à 21,8 mv/sac délivre (dans un œil ouvert à 5 mm) 0,3 ph/s sur un petit cône de 2,5 µm de diamètre. Et 40 ph/s sur un bâtonnet ou dans une tache de diffraction de diamètre 30 µm. La taille de la tache de diffraction étant liée aux défauts de l'œil. Le meilleur ciel astronomique est sans couleur (vision photopique des cônes) mais pas noir (vision scotopique des bâtonnets).

Quelques chiffres et mesures

| Source lumineuse | Éclairement produit au sol [lux] | Luminance des sources étendues [cd / m ²] | Luminance d'un papier blanc éclairé [cd / m ²] | Diamètre pupille [mm] | NG | SQM [mv/sac] |
|------------------------------------|------------------------------------|--|---|-------------------------|-------------------------|----------------|
| Étoile faible (mv=+6,0) | 0,000 000 008 | | | 6,0 | | |
| Fond du ciel à G = 2D | | 0,000 003 4 | | 6,0 | -15 | (26,2) |
| Vénus (Mv max=-4,6) | 0,000 12 | | | | | |
| Fond du ciel à G = 1D | | 0,000 014 | | 6,0 | -13 | <u>24,7</u> |
| Ciel de qualité (21 mv/sac) | 0,004 | 0,000 5 | | 5,9 | <u>-8</u> | 21 |
| Limite mésopique – scotopique | 0,01 à 0,025 | <u>0,001</u> à <u>0,003</u> | | 5,9 à 5,8 | -7 à -5,5 | 20,2 à 19,1 |
| Ciel de banlieue (18 mv/sac) | 0,063 | 0,008 | | 5,7 | <u>-4</u> | 18 |
| Pleine Lune (mv = -12,55) | 0,18 | | 0,06 | 2,4 / 5,4 | | |
| Dessin stylo bille (lampe blanche) | 0,16 | | 0,017 | 5,6 | -2,7 | <u>17</u> |
| Dessin crayon HB (lampe blanche) | 0,4 | | 0,043 | 5,4 | -1,3 | 16 |
| Lecture atlas (lampe blanche) | 1,0 | | 0,11 | 5,3 | 0 | <u>15</u> |
| Bougie à 1 mètre | 4 à | | 0,5 | 5,0 | 1,3 à | <u>14</u> à |
| Lecture atlas (lampe rouge) | 2,5 | | à 0,3 | | 2,0 | <u>13,5</u> |
| Limite photopique – mésopique | 25 à 80 | <u>3</u> à <u>10</u> | | 4,4 | | 11,4 à 10,1 |
| Papier blanc dans un bureau | 512 | | 64 | 3,7 | <u>+9</u> | 8,1 |
| Écran blanc d'ordinateur | | 79 | | 3,7 | <u>+9,3</u> | 8,1 |
| Bleu du ciel & midi à Paris | | 2 000 à 4 100 | | 2,4 | <u>+14</u> à <u>+15</u> | |
| Papier blanc sous nuages clairs | 37 000 | | 4700 | 2,2 | <u>+15,2</u> | (3,6) |
| Soleil à midi (mv=-26,8) | 130 000 | | 16 200 | 1,7 | <u>+17</u> | (2,3) |

Gras : Valeur mesurée personnellement Souligné : Valeur utilisée pour calculer les autres
(Entre parenthèses) : Valeurs théoriques ou hors gamme de mesure

Et le message

Faites des mesures !
Car cela permet ensuite de réfléchir juste... puis d'avancer.