

OBSERVATION D'UN CRÉPUSCULE

Olivier Gayrard

Une étude détaillée de la pollution lumineuse autour de la ville d'Albi en Occitanie. Toute une série de manipulations scientifiques quantitatives, soigneusement décrites, étaie le niveau de dégradation actuel du ciel nocturne de la région.

Dans cet article nous tenterons d'estimer grossièrement l'intensité lumineuse, la couleur et la forme d'un halo de nuisance lumineuse de ville moyenne. Pour cela nous commencerons par décrire l'image d'un crépuscule avant d'en suivre son évolution dans le temps. Enfin par comparaison nous pourrons qualifier à quel type de crépuscule correspond le halo, et ainsi répondre à la problématique suivante : la nuit noire existe-t-elle encore autour de la ville d'Albi ?

Pour beaucoup d'entre nous, la lumière naturelle des étoiles et de la Lune a depuis longtemps été remplacée par des éclairages artificiels. Cet éclairage nocturne parfois non justifié, comme celui des bureaux, par des besoins réels porte le terme de pollution lumineuse. L'éclairage nocturne a permis entre autres de sécuriser nos villes, mais il existe des conséquences négatives sur la faune, la flore, les écosystèmes, la santé et la visibilité du ciel, qui sera l'objet de cet article. L'Humanité a toujours observé le ciel, que ce soit pour savoir quand semer, se repérer en mer, mais aussi répondre aux questions portant sur notre origine. Plus récemment, de nombreuses technologies utilisées dans nos vies quotidiennes sont dérivées des découvertes faites par l'astronomie.

Notre planète Terre est entourée d'une enveloppe d'air, juste assez épaisse pour permettre de nombreux jeux de lumière. Une atmosphère plus ou moins dense, comme pour respectivement Vénus et Mars, et les féeries des divers météores colorés ne nous seraient pas offerts.

Définitions des crépuscules

Intéressons-nous plus particulièrement aux crépuscules, durées au cours desquelles le Soleil sous l'horizon éclaire encore le ciel. Dans les faits, on distingue trois crépuscules ; civil, nautique et astronomique, suivant que le Soleil se trouve entre 0° et 6° , 6° et 12° et 12° et 18° sous l'horizon. Au cours du crépuscule civil, les corps les plus brillants, planètes et étoiles de faibles magnitudes, apparaissent. La lumière diffusée par l'atmosphère continue alors d'éclairer le sol avec suffisamment d'intensité pour permettre les activités humaines. Durant le crépuscule nautique, le ciel s'assombrissant, de nouvelles étoiles deviennent visibles. Sur les océans, la luminosité du ciel se détache de la noirceur des eaux. L'utilisation d'un sextant permet alors de mesurer des hauteurs d'étoiles au-dessus de l'horizon et de déterminer sa position. Pendant le crépuscule

astronomique, et à condition d'être éloigné de toute source de pollution lumineuse, les étoiles des dernières magnitudes visibles à l'œil nu apparaissent à leur tour. La lumière diffusée par les hautes couches atmosphériques peut encore gêner l'observation des objets les plus ténus comme la lumière zodiacale, lumière du Soleil diffusée par les particules interplanétaires qui orbitent dans le même plan que celui des planètes. Le meilleur moment de l'année dans l'hémisphère nord pour l'observer le soir est au printemps, lorsque l'écliptique est le plus incliné par rapport à l'horizon. En effet, pour le matin, c'est à l'automne que l'écliptique est plus inclinée.

Réalisation et interprétation de la photographie d'un crépuscule

La soirée du 3 mai 2021 à Saint-Benoît-de-Carmaux, (Tarn), se prêtait particulièrement bien à des travaux de photographies de crépuscules, la Lune ne se levant que le lendemain matin. La figure 1 a été réalisée à 21 h 22, soit 7 minutes avant la fin du crépuscule civil, le Soleil étant à $h = -5,0^\circ$. Un appareil photographique numérique (APN) Canon EOS 60D muni d'un objectif EF-S18-55 mm a été utilisé. Pour essayer de restituer la sensation visuelle de ce demi-jour, les réglages suivants ont été utilisés : ouverture 4,5 ; sensibilité ISO 100 ; temps d'exposition 1/50 s ; température de couleur 5300 K. La distance focale réelle était de 21 mm. Cette photographie a été en outre corrigée des aberrations de distorsion et de vignetage introduites par l'objectif. L'utilisation d'astrometry.net ainsi que d'une photographie du ciel étoilé prise plus tard dans la nuit a permis de remonter à la taille de la photographie : 61,2° par 40,8°. Comme les dimensions de la photographie sont de 5 184 pixels par 3 456 pixels, chacun d'eux recouvre 42,5 secondes d'arc, et 1° correspond à 85 pixels. La hauteur $h = 0^\circ$ de la ligne d'horizon a été estimée à partir d'une photographie du même paysage prise de nuit et de sa comparaison à l'aide du logiciel Stellarium. En effet, ce dernier permet de simuler la vue du ciel depuis le lieu de l'observateur. Une grille azimutale a alors permis de relever les positions des étoiles de la constellation du Cocher visibles dans cette direction cette nuit-là. Stellarium donnant la hauteur de ces étoiles, l'horizon du site d'observation peut alors être tracé. Dans le cas de la figure 1 l'horizon est à la ligne 3 305, la hauteur au-dessus de l'horizon $H = 5^\circ$ ligne 2 880, et ainsi de suite.



Fig.1. Fin d'un crépuscule civil ; hauteur du Soleil, $h = -5^\circ$. Les lignes jaunes correspondent aux hauteurs au-dessus de l'horizon $H = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ et 35° .

Détaillons à présent cette photographie. Chaque pixel de l'image est formé par trois sous-pixels rouge vert et bleu dont les intensités peuvent prendre des valeurs comprises entre 0 et 255 (2^8). Le rendu des couleurs est assuré par leur synthèse additive (sur l'écran d'un ordinateur), ce qui permet une palette de couleurs de plus de 16 millions de nuances, (2^{8*3}). Pour décrire cette image il sera utile de récupérer les valeurs RVB de ces différents sous-pixels. Pour ce faire, nous avons utilisé un petit programme écrit en Python.

Les figures 2 à 5 représentent les variations des intensités des sous-pixels rouges verts et bleus en fonction du numéro de colonne pour des hauteurs H allant de 35° à 5° au-dessus de l'horizon. Le cercle solaire vertical, ligne joignant le centre du Soleil au zénith passe par la colonne 2 592, milieu de l'image. Aussi toutes ces courbes sont-elles symétriques par rapport à cette verticale centrale. On observe que quelles que soient les hauteurs H et les lumières colorées, les intensités lumineuses diminuent lorsqu'on s'éloigne de la colonne 2 592 par valeur supérieure ou inférieure. En effet, pour une ligne fixée, la distance angulaire entre le Soleil et le point de l'image visé augmente en se rapprochant des bords du cliché. Nous constatons pareillement que plus nous nous éloignons de l'horizon et plus les intensités lumineuses diminuent. La combinaison de ces deux phénomènes produit la formation de l'arche crépusculaire.

Par ailleurs, nous remarquons que les pentes de ces courbes augmentent lorsque la hauteur H diminue. En prenant comme référence la pente de la figure 2 où $H = 35^\circ$, elles sont respectivement multipliées par environ 2, 3 et 4 pour $H = 25^\circ$, $H = 15^\circ$ et $H = 5^\circ$. La luminosité du ciel augmente lorsqu'on se rapproche de l'horizon car la lumière traverse une quantité plus importante d'atmosphère. La probabilité de diffusion des photons, quelle que soit leur longueur d'onde, augmente exponentiellement avec l'épaisseur de la couche traversée. Notons pour terminer cette description l'inversion des lumières colorées prépondérantes entre les hauteurs $H = 15^\circ$ et $H = 5^\circ$. Le contraste produit par ce changement de teinte dominante donne aux crépuscules toute leur beauté éphémère.

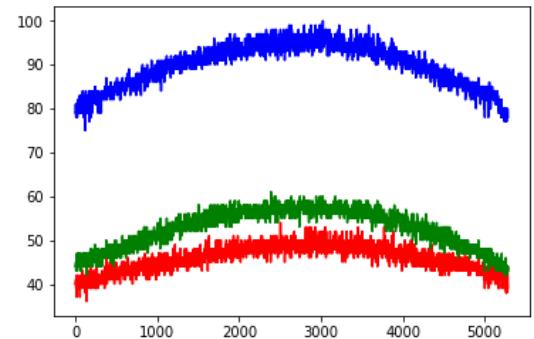


Fig.2. Hauteur au-dessus de l'horizon $H = 35^\circ$, le Soleil étant à $h = -5,0$.

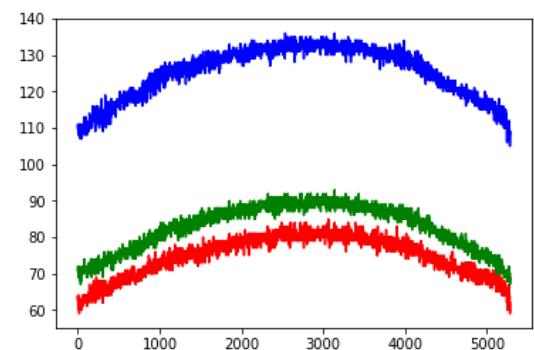


Fig.3. Hauteur au-dessus de l'horizon $H = 25^\circ$, le Soleil étant à $h = -5,0^\circ$.

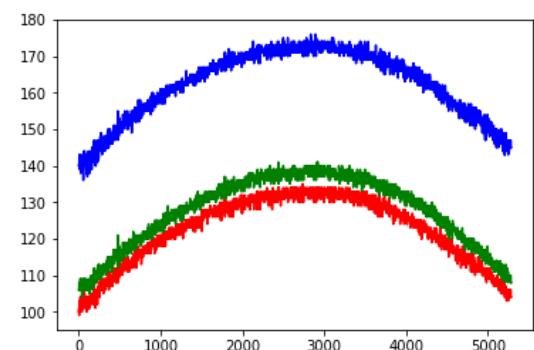


Fig.4 Hauteur au-dessus de l'horizon $H = 15^\circ$, le Soleil étant à $h = -5,0^\circ$.

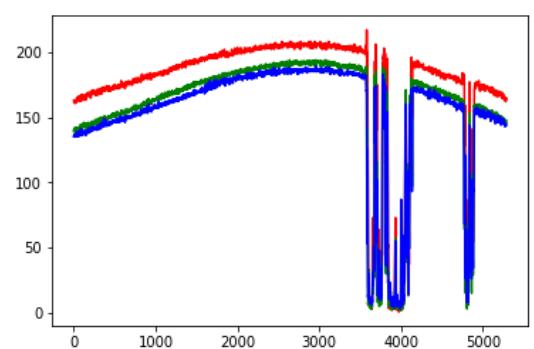


Fig.5. Hauteur au-dessus de l'horizon $H = 5^\circ$, le Soleil étant à $h = -5,0^\circ$.

D'après la théorie de Lord Rayleigh sur la diffusion moléculaire, la probabilité pour qu'un photon soit diffusé par une molécule de l'air est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de sa longueur d'onde. C'est ainsi qu'un photon « bleu » de longueur d'onde 450 nm a 3,2 fois plus de chance d'être diffusé qu'un autre photon de longueur d'onde 600 nm, « rouge », $(600/450)^4 = 3,2$. L'arche est constituée par la lumière diffusée par l'atmosphère dans notre direction, le Soleil étant déjà couché. Pour des hauteurs H importantes, la *masse* d'air traversée (voir encadré) par la lumière est relativement faible, et la diffusion préférentielle des photons « bleus » donne sa couleur au ciel. Lorsqu'on regarde vers l'horizon au crépuscule, la *masse* d'air traversée est plus importante. Elle a diffusé une part importante des photons de courte longueur d'onde en dehors de la direction d'observation, donnant maintenant les teintes jaune et rouge. C'est ce que nous pouvons mesurer sur les figures 4 à 5 où l'intensité de la lumière bleue passe environ de 172 à 186 tandis que celle de la lumière rouge passe de 133 à 208. Ce phénomène de rougissement est accentué par la présence dans l'atmosphère de particules de diamètre inférieur à 100 nm, telles les poussières, fumées et gouttelettes d'eau.

Réalisation et interprétation d'une série photographique en continu

Poursuivons maintenant nos observations des crépuscules en prenant une photographie toutes les minutes. L'APN est posé sur un plateau horizontal muni d'un index,

lui-même posé sur un cercle gradué en degré. Ainsi en suivant en temps réel sur Stellarium les azimuts du Soleil, il a été possible de faire en sorte que le cercle solaire vertical soit au mieux centré sur la colonne du milieu des photographies. Un programme écrit en Python a permis de récupérer les valeurs des intensités des lumières colorées rouge verte et bleue pour cette colonne aux lignes de hauteur 5°, 15°, 25° et 35° au-dessus de l'horizon. La première photographie a été prise à 21 h 55 et la dernière à 22 h 33.

Le choix a été fait de régler l'APN sur un temps d'exposition de 6 s avec une sensibilité de 800 ISO, l'ouverture étant fixée à 5. Ces réglages ont permis de faire en sorte de ne pas surexposer, ni sous-exposer les photos au cours de ces prises de vues. La quinzième image prise à 22 h 09 correspond à la fin du crépuscule nautique et au début du crépuscule astronomique dont la fin avait lieu ce soir-là à 22 h 53 soit 20 minutes après la fin du dernier point représenté sur les figures 6. En effet, les valeurs des intensités étaient trop proches du bruit de lecture pour être prises en compte. La fin du crépuscule civil, début du crépuscule nautique (21 h 29, soit 26 minutes avant la première photo) n'apparaît pas pour la raison inverse, les photographies étant en grande partie saturées.

Bien entendu un autre réglage aurait permis de mettre en évidence un autre type de passage du crépuscule. Ceci dit dans le travail ici présenté, nous recherchions à construire des courbes permettant de comparer le halo lumineux produit par la pollution des lumières nocturnes de la ville d'Albi ; halo visible lors du crépuscule astronomique. (Voir figure 7 a, b et c).

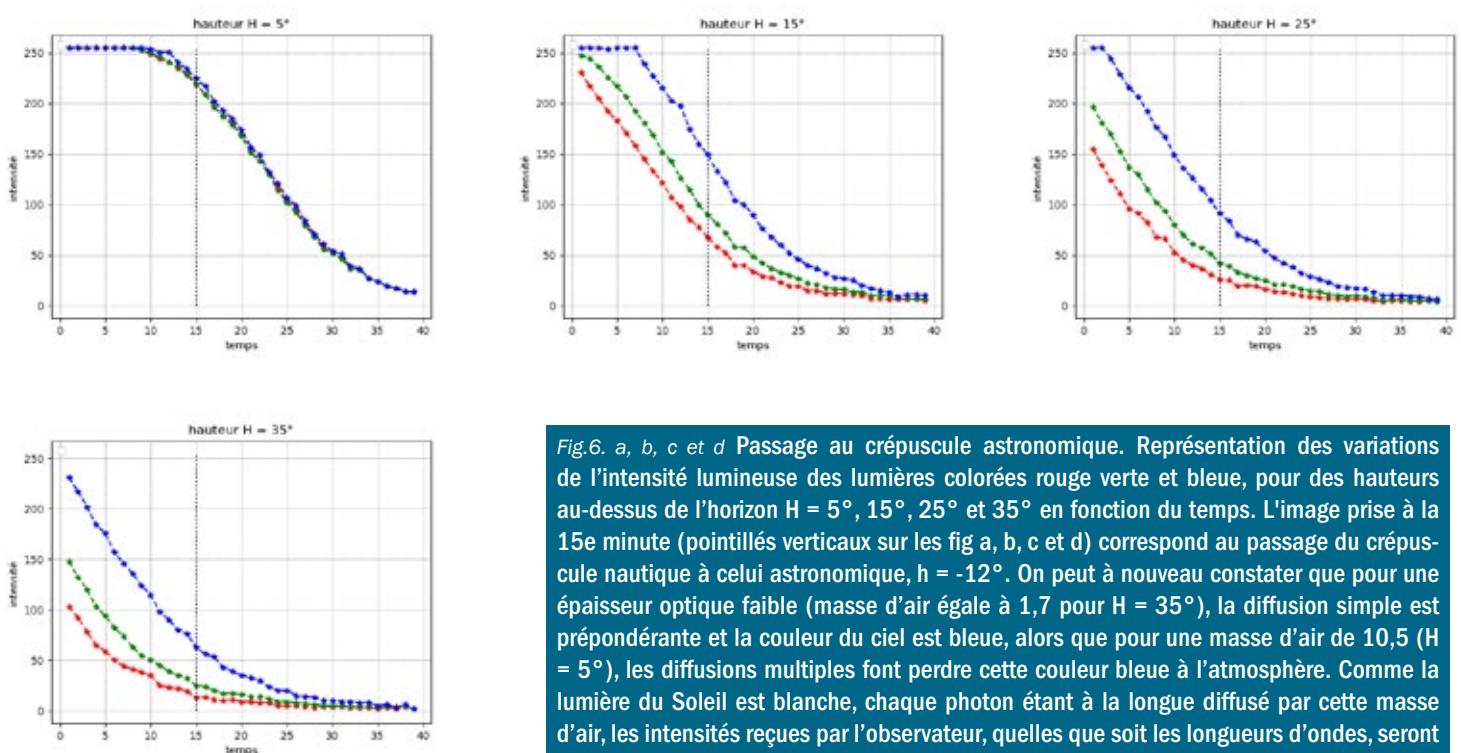


Fig.6. a, b, c et d Passage au crépuscule astronomique. Représentation des variations de l'intensité lumineuse des lumières colorées rouge verte et bleue, pour des hauteurs au-dessus de l'horizon H = 5°, 15°, 25° et 35° en fonction du temps. L'image prise à la 15e minute (pointillés verticaux sur les fig a, b, c et d) correspond au passage du crépuscule nautique à celui astronomique, h = -12°. On peut à nouveau constater que pour une épaisseur optique faible (masse d'air égale à 1,7 pour H = 35°), la diffusion simple est prépondérante et la couleur du ciel est bleue, alors que pour une masse d'air de 10,5 (H = 5°), les diffusions multiples font perdre cette couleur bleue à l'atmosphère. Comme la lumière du Soleil est blanche, chaque photon étant à la longue diffusé par cette masse d'air, les intensités reçues par l'observateur, quelles que soient les longueurs d'ondes, seront donc voisines au cours du temps, ce qui est bien visible sur la courbe a. Attention à ne pas tenir compte des seuils d'intensité égale à la valeur 255 correspondant à une saturation du capteur.



Fig.7a. 11 août 2021 à 00 h 18, photo prise dans les mêmes conditions que celles ayant permis de construire les courbes des figures 6 depuis le site de Cap Découverte en direction de la ville d'Albi. La photo est centrée vers la cathédrale et le centre-ville, distant de 6 km. Jupiter est le point visible en haut à gauche. La Lune est couchée depuis plus de 2 heures. Le Soleil est à $h = -27^\circ$.

Comparaison du halo lumineux de la ville d'Albi avec un crépuscule

Si nous comparons maintenant les figures 6a et 7b, nous constatons que les intensités lumineuses des composantes rouge et verte sont voisines de celles de la vingtième minute du crépuscule astronomique qui durait cette nuit-ci 44 minutes, (de 22 h 09 à 22 h 53). Or le Soleil était à une hauteur $h = -27^\circ$, très en dessous l'horizon. Il ne s'agit donc pas de lumière solaire diffusée, mais bien de lumière artificielle. Nous supposons que le halo lumineux est de forme sphérique. L'observation étant faite à 6 km du centre-ville d'Albi, il est ainsi mis en évidence que sur un territoire de plus de 100 km² centré sur la ville d'Albi, un halo de lumière était décelable par les moyens photographiques présentés ci-dessus.

Cela doit nous interroger sur l'impact de ces lumières artificielles sur les écosystèmes, au premier rang duquel les oiseaux figurent. En effet, pour éviter leurs prédateurs, deux espèces d'oiseaux migrateurs sur trois voyagent de nuit. Plus largement, les animaux utilisent, seuls ou en combinaison, des boussoles solaire, lunaire, polarisée et stellaire¹. L'obscurité dans le cas de cette dernière boussole est donc essentielle afin de mener à bien les migrations et de ne pas perturber ces espèces. Malheureusement, au cœur des trajets migratoires, les lumières de nos villes sont parfois un piège mortel pour ces oiseaux. Les halos de lumière perturbent leur trajectoire et allongent leur itinéraire. De nombreux oiseaux meurent ; les scientifiques estiment que 100 millions d'oiseaux en migration sont tués chaque année aux USA lors de collisions avec des bâtiments éclairés².

D'autres oiseaux, tels les chouettes et hiboux vivent la nuit. Leurs yeux sont très sensibles et détectent des intensités lumineuses aussi faibles que la lumière des

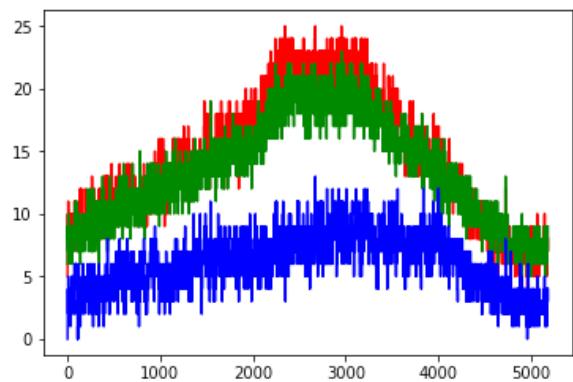


Fig.7b. La coupe à la hauteur de 5° rappelle par sa forme d'arche, sa couleur jaune et son intensité celle d'un milieu de crépuscule astronomique.

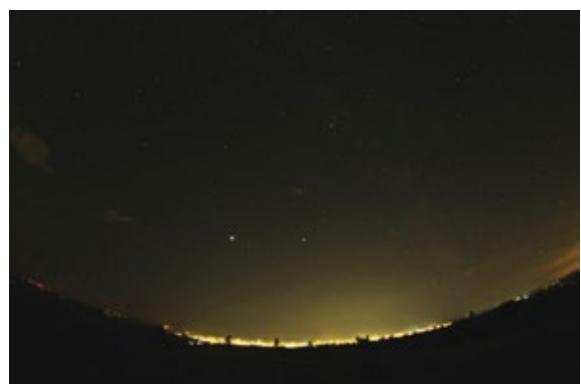


Fig.7c. Le halo de pollution lumineuse est ici mis plus clairement en évidence en utilisant un objectif fish-eyes, une pause de 15 s, ISO 800, ouverture 3,5. Le rendu exagère la pollution et n'est pas celui de la vision nocturne. La constellation du Dauphin au-dessus de Jupiter était par exemple facilement identifiable à l'œil nu et 65° plus à l'est de Jupiter la galaxie d'Andromède était visible en vision décalée.

étoiles. Quand une chouette chasse, elle sera facilement éblouie par la lumière artificielle. Elle ne parviendra pas à atteindre sa proie du premier coup et s'épuisera plus facilement. Et c'est sans compter que la pollution lumineuse peut faire fuir les proies potentielles qui ont besoin de la nuit pour se cacher. L'éclairage public des édifices servant habituellement de gîte aux rapaces nocturnes (églises, vieilles maisons) réduit d'autant plus le nombre de refuges potentiels pour ces espèces. Il en va de même pour de nombreuses autres espèces nocturnes qui sont sensibles à la lumière.

Il est important de réorienter les politiques d'éclairage public et privé. Tout en assurant ses missions de sécurisation des espaces urbains, les lampadaires des villes de demain doivent évoluer et mieux tenir compte des aspects environnementaux.

L'auteur remercie vivement Renaud Mathevret, enseignant chercheur à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III) et vice-président de l'association « Lumière en Midi Pyrénées », pour ses précieux conseils et ses critiques constructives dans l'élaboration de cet article.

¹ L'astronomie n°162 / juillet-août 2022 La question du mois. Yaël Nazé.

² <https://www.darksky.org/>