

Samuel Delaunay – *Astronome amateur*

Je fais de l'astrophysique

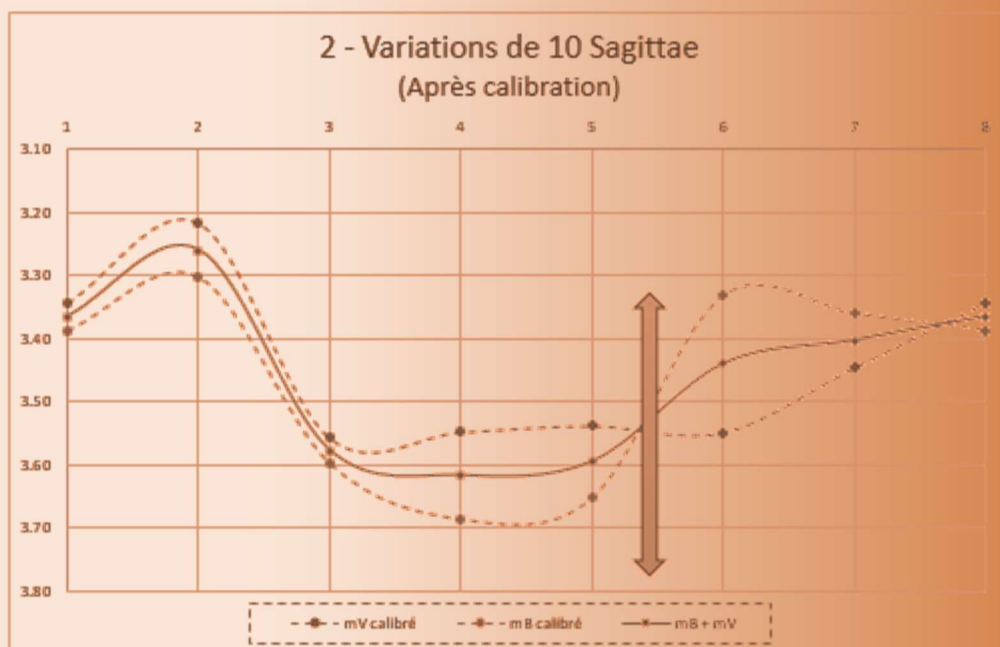
avec mon petit télescope

I do astrophysics with my little telescope

Livret II

Méthodes pratiques d'analyse individuelle des d'étoiles

Practical methods for individual star analysis



Tous droits réservés, dépôt enregistré à la Société des Gens de Lettre – Paris

Reproduction interdite sans autorisation de l'auteur

Édition 2026



Après 10 ans à observer le ciel aux jumelles puis avec une grande lunette, je me suis mis assez tardivement à l'astrophotographie en 2018.

Au départ, comme beaucoup, mon but était de faire de très belles photos qui pourraient déclencher en nous le même sentiment d'émerveillement que ces fantastiques vues des *Piliers de la Création* ou d'Orion qu'Hubble a popularisées.

Cet art est difficile, et rapidement, la seule voie de progrès est d'augmenter le nombre de pauses, dans une course sans fin vers un but inatteignable.

De même avec un petit télescope automatisé, le Seestar 50, on est rapidement pris dans un vertigineux exercice de course après le catalogue de Messier et de belles couleurs de nébuleuses.

De formation scientifique, et de par mon travail de gestion de contrats informatiques, j'aime ne pas seulement voir de belles images, mais surtout obtenir et analyser des données qui vont me permettre de comprendre.

C'est pourquoi depuis 2020, je tente de mesurer la luminosité des étoiles, détecter les mouvements d'un pulsar, mettre en évidence des disques protoplanétaires ou étudier la structure et la composition des galaxies.

Oui il est possible de faire par nous-même quelques travaux de mesure et d'analyse. C'est pourquoi je partage mon expérience afin d'inciter les astronomes amateurs et étudiants en science qui voudraient évoluer vers la compréhension de ce qu'ils observent, à faire ces premiers pas dans l'astrophysique.

After 10 years of observing the sky with binoculars and then a large telescope, I took up astrophotography relatively late in 2018.

Initially, like many others, my goal was to take beautiful that could trigger in us the same sense of wonder as those fantastic views of the Pillars of Creation or Orion that Hubble popularized.

This art is difficult, and quickly, the only way to progress is to increase the number of pauses, in an endless race toward an unattainable goal.

Similarly, with a small automated telescope, the Seestar 50, one quickly finds oneself caught up in a dizzying exercise chasing the Messier catalog and beautiful nebula colors.

With a scientific background, and through my work in IT contract management, I enjoy not only seeing beautiful images, but above all obtaining and analyzing data that will allow me to understand. That's why, since 2020, I've been trying to measure the brightness of stars, detect the movements of a pulsar, identify protoplanetary disks, and study the structure and composition of galaxies.

Yes, it's possible to do some measurement and analysis work ourselves. That's why I'm sharing my experience to encourage amateur astronomers and science students who would like to take these first steps in astrophysics, as they seek to better understand what they observe.

Remerciements à :

Amaury Delaunay, étudiant en mathématiques, qui a relu très attentivement la cohérence de mes propos.

Jérôme Delaunay qui a observé la rotation du Soleil et effectué des photographies complémentaires au télescope newton de 254 mm.

Raphaël Labro qui a conçu et réalisé un prototype de spectroscopie adapté pour le Seestar S50.

Hugues Meunier qui m'a fourni un spectre réalisé avec un Star Analyser 200.

Méthodes pratiques d'analyse individuelle des d'étoiles

Samuel Delaunay

Table des matières

Préambule : une diversité d'approches ... pour une diversité d'étoiles	4
1. Étoiles multiples.....	6
Importance du temps de pause	6
Étoiles doubles dans Orion.....	9
Tentative de calcul de la parallaxe d'Alnitak C.....	10
Mouvement propre d'Alnitak C.....	16
Étude d'Alnitak AB.....	19
Une étoile multiple, Sigma-Orionis	23
Étoiles double dans le trapèze d'Orion	24
2. Principes et méthode de la spectroscopie	26
Préparation de l'image d'un spectre de référence	26
Préparation des données	27
Injection des données dans l'outil Excel	30
Lissage des données et analyse des pentes	31
Calibration du spectre sur les raies	32
Test avec le spectre solaire	34
3. Spectres des principaux types d'étoiles au Seestar.....	35
Premiers tests.....	35
Spectroscopie à réseau imprimé.....	38
4. Spectres avec un réseau de diffraction	39
Une étoile bleue – Rigel	39
Une étoile rouge – Aldebaran	41
5. Spectres avec le Star Analyser 200.....	42
Critique des résultats.....	43
6. Analyse d'une étoile variable céphéide	44
Mesures	45
Impact des conditions atmosphériques	46
Potentiel impact de la diffusion du signal sur le capteur	47
Calibration sur Vega	48
Résultat.....	48

Calcul de la magnitude absolue.....	50
Discussion du résultat	50
Autres étoiles variables	52
7. Observation d'une étoile à neutron.....	53
L'étoile à neutron de M1 (Nébuleuse du Crabe).....	53
Traitements de l'image.....	53
Analyse via un graphique	54
Analyse des interférences	57
8. Observation solaire.....	58
Forme du Soleil.....	58
Anatomie des tâches solaires.....	59
Calcul de la rotation solaire.....	61
Rotation des tâches.....	62
Conclusion.....	64

Préambule : une diversité d'approches ... pour une diversité d'étoiles

Durant nos premiers travaux sur les amas d'étoiles, nous n'avons mesuré comme paramètres que la luminosité des étoiles dans le bleu et le vert. Avec ces seuls paramètres nous avons réussi à déterminer le type stellaire et la masse relative des étoiles, ainsi que leur distribution dans les amas.

Nous allons maintenant diversifier et approfondir ce que nous avons commencé.

Diversifier en nous intéressant à d'autres conditions telles que l'appartenance à un système gravitationnel pour former des étoiles doubles ou multiples, ou en étudiant des étoiles de types très particuliers, comme une céphéide, une étoile à neutron, ou une étoile de type très commun, notre Soleil.

Approfondir en nous intéressant à l'ensemble du spectre des étoiles, et pas seulement à deux longueurs d'onde.

L'étude d'une Céphéide, outre ses caractéristiques propres, rejoindra le fil conducteur de nos premiers travaux qui était de maîtriser la qualité de notre travail et de la marge d'erreur. Nous compléterons cette préoccupation avec l'étude de l'impact atmosphérique sur nos mesures.

Cette diversité d'approche se traduira concrètement par l'utilisation d'instruments variés, le Seestar bien sûr, mais aussi ma grande lunette 152/900 et même une petite lunette bon marché. Il est possible de faire certains travaux avec un très faible budget. Nous améliorerons notre instrumentation avec la constitution d'un spectroscopie ultra-simplifiée et accessible à tous.

En toute honnêteté, sur certains sujets comme la mesure de la parallaxe d'une étoile, nous atteindrons la limite de ce qui est accessible à un astronome amateur. Nous apprendrons autant de nos erreurs et de nos limites que de nos réussites. Ceci à condition de garder un esprit critique et de sans arrêt nous remettre en question.

Bon courage à tous pour *faire de l'astrophysique avec un petit télescope* !

Tous les fichiers nécessaires pour effectuer les analyses sont disponibles ici :

<https://samueldelaunay.com/index.php/analyses-individuelles-des-etoiles/>

Preamble: A Diversity of Approaches... for a Diversity of Stars

During our initial work on star clusters, we measured only the luminosity of stars in the blue and green wavelengths. With these parameters alone, we were able to determine the stellar type and relative mass of stars, as well as their distribution within clusters.

We will now diversify and expand upon what we have begun.

Diversify by considering other conditions, such as belonging to a gravitational system to form binary or multiple stars, or by studying very specific types of stars, like a Cepheid variable, a neutron star, or a very common type, our Sun.

Expand by examining the entire stellar spectrum, and not just two wavelengths.

The study of a Cepheid variable, in addition to its unique characteristics, will connect with the guiding principle of our initial work, which was to ensure the quality of our work and minimize the margin of error. We will complement this research with a study of the atmospheric impact on our measurements.

This diverse approach will translate concretely into the use of various instruments: the Seestar, of course, but also my large 152/900 refractor and even a small, inexpensive telescope. It is possible to carry out certain tasks with a very limited budget. We will improve our instrumentation by building an ultra-simplified spectroscope accessible to everyone.

In all honesty, on certain subjects, such as measuring the parallax of a star, we will reach the limits of what is accessible to an amateur astronomer. We will learn as much from our mistakes and limitations as from our successes. This is provided we maintain a critical mindset and constantly question our assumptions.

Good luck to everyone doing astrophysics with a small telescope!

All the files needed to perform the analyses are available here:

<https://samueldelaunay.com/index.php/analyses-individuelles-des-etoiles/>

1. Étoiles multiples

Multiple Stars

Certaines étoiles sont dans une relation gravitationnelle avec une ou plusieurs proches, et forme une étoile double ou multiple. C'est un somme un mini-amas de deux à cinq étoiles, et très rarement plus.

Nous pourrions bien sûr analyser ces systèmes de la même manière que des amas d'étoiles comme nous l'avons fait dans le premier livret. Mais ici nous allons nous intéresser spécifiquement à leur cinématique.

Mais avant cela, il nous faut tout d'abord les dissocier entre-elles. Exercice délicat, car généralement, il y a une étoile principale et une plus petite qui tourne autour, le compagnon. La luminosité de l'étoile principale occulte en partie la faible luminosité du compagnon. Leur écartement parfois très serré nous obligera à trouver une alternative afin de dépasser la limite de la résolution de nos instruments.

Some stars are gravitationally bound to one or more nearby stars, forming a binary or multiple star system. This is essentially a mini-cluster of two to five stars, and very rarely more.

We could, of course, analyze these systems in the same way as star clusters, as we did in the first booklet. But here we will focus specifically on their kinematics.

Before that, however, we must first distinguish them from one another. This is a delicate task, because generally, there is a primary star and a smaller one orbiting around it, the companion. The brightness of the primary star partially obscures the faintness of the companion. Their sometimes very close separation will require us to find an alternative method to overcome the resolution limits of our instruments.

Importance du temps de pause

Importance of exposure time

Pour diminuer la taille apparente de l'étoile principale et espérer distinguer son compagnon, il nous faut diminuer le temps de pause pour avoir une étoile la plus ponctuelle possible, tout en maintenant le compagnon visible.

Nous constatons en effet que plus le temps de pause est long, et plus la taille apparente d'une étoile augmente. Ceci est dû à la propagation du signal sur le capteur de notre camera. Cet effet physique sera étudié en détail quand nous nous intéresserons aux variations de luminosité d'une étoile céphéide.

Parfois, restreindre la taille perçue de l'étoile principale oblige à rendre trop sombre son compagnon, de sorte que nous ne pouvons pas le voir. L'astuce consiste à varier les temps de pauses, afin de garder pour chaque étoile la taille minimale décelable. Un photomontage permettra de montrer simultanément l'étoile principale et son compagnon, en prenant bien soin de les positionner correctement.

To reduce the apparent size of the main star and hopefully distinguish its companion, we need to shorten the exposure time to obtain the most pinpoint image possible, while keeping the companion visible.

We observe that the longer the exposure time, the greater the apparent size of a star. This is due to the propagation of the signal across our camera's sensor. This physical effect will be studied in detail when we examine the variations in brightness of a Cepheid variable star.

Sometimes, reducing the perceived size of the main star forces us to make its companion too dark, so that we cannot see it. The trick is to vary the exposure times to maintain the minimum detectable size for each star. A photomontage will allow us to simultaneously show the main star and its companion, taking care to position them correctly.

Exemple avec Alnitak (ou Zeta Orionis), une étoile d'Orion. Examinons l'effet de la diminution du temps de pause.

Ici, l'étoile principale masque complètement le compagnon supposé :

Example with Alnitak (or Zeta Orionis), a star in Orion. Let's examine the effect of decreasing the exposure time.

Here, the primary star completely obscures the supposed companion:



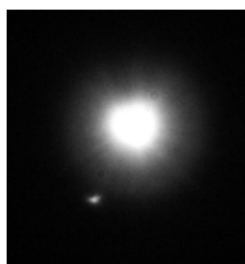
En diminuant le temps de pause, on révèle un supposé compagnon :

By decreasing the exposure time, a supposed companion is revealed:



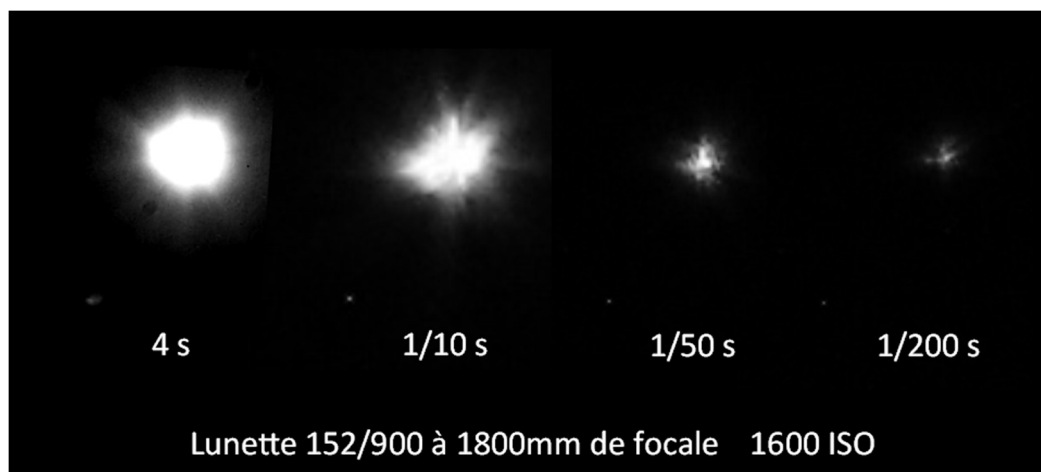
En augmentant la focale au moyen d'une lentille de Barlow, on améliore encore la distinction entre les deux étoiles :

By increasing the focal length using a Barlow lens, the distinction between the two stars is further improved:



L'étoile principale est également ainsi observée et au temps d'exposition minimal on croit deviner plusieurs composantes :

The main star is also observed in this way, and at the minimum exposure time, several components can be discerned:



Ces photos ont été obtenues avec ma lunette 152/900 et un reflex CANON EOS 1300D. il suffit de tourner la molette du temps d'exposition, de regarder le résultat sur l'écran en « liveview » et d'étager les temps de pauses, de quelques secondes à quelques millisecondes.

Avec le Seestar S50, il n'est pas possible de forcer le mode planétaire, où de courtes pauses sont possibles, sans passer par la recherche d'un objet du système solaire. On obtient tout de même un résultat exploitable sur Alnitak :

These photos were taken with my 152/900 refractor and a Canon EOS 1300D DSLR. Simply turn the exposure time dial, view the result on the screen in "live view," and adjust the exposure times from a few seconds to a few milliseconds.

With the Seestar S50, it's not possible to force planetary mode, which allows for short exposures, without first searching for a solar system object. However, we still obtained usable results on Alnitak.



Pour cette approche, il faut proscrire les cumulations de nombreuses pauses, comme nous aimons le faire pour obtenir de belles images d'astrophotographie, elles seront inexploitable pour nos travaux.

Exemple avec 17 minutes de pauses, on voit la nébuleuse de la Flamme mais Alnitak est trop étendue :

For this approach, we must avoid accumulating numerous exposures, as we often do to obtain beautiful astrophotography images; they will be unusable for our work. For example, with 17 minutes of exposure, we can see the Flame Nebula, but Alnitak is too large.



Étoiles doubles dans Orion

Double stars in Orion

Orion est un fantastique terrain de chasse pour les étoiles doubles.

Si nous procédons de même dans toute la zone d'Alnitak et des nébuleuses voisines, nous mettons en évidence plusieurs étoiles potentiellement doubles ou triples.

Orion is a fantastic hunting ground for double stars.

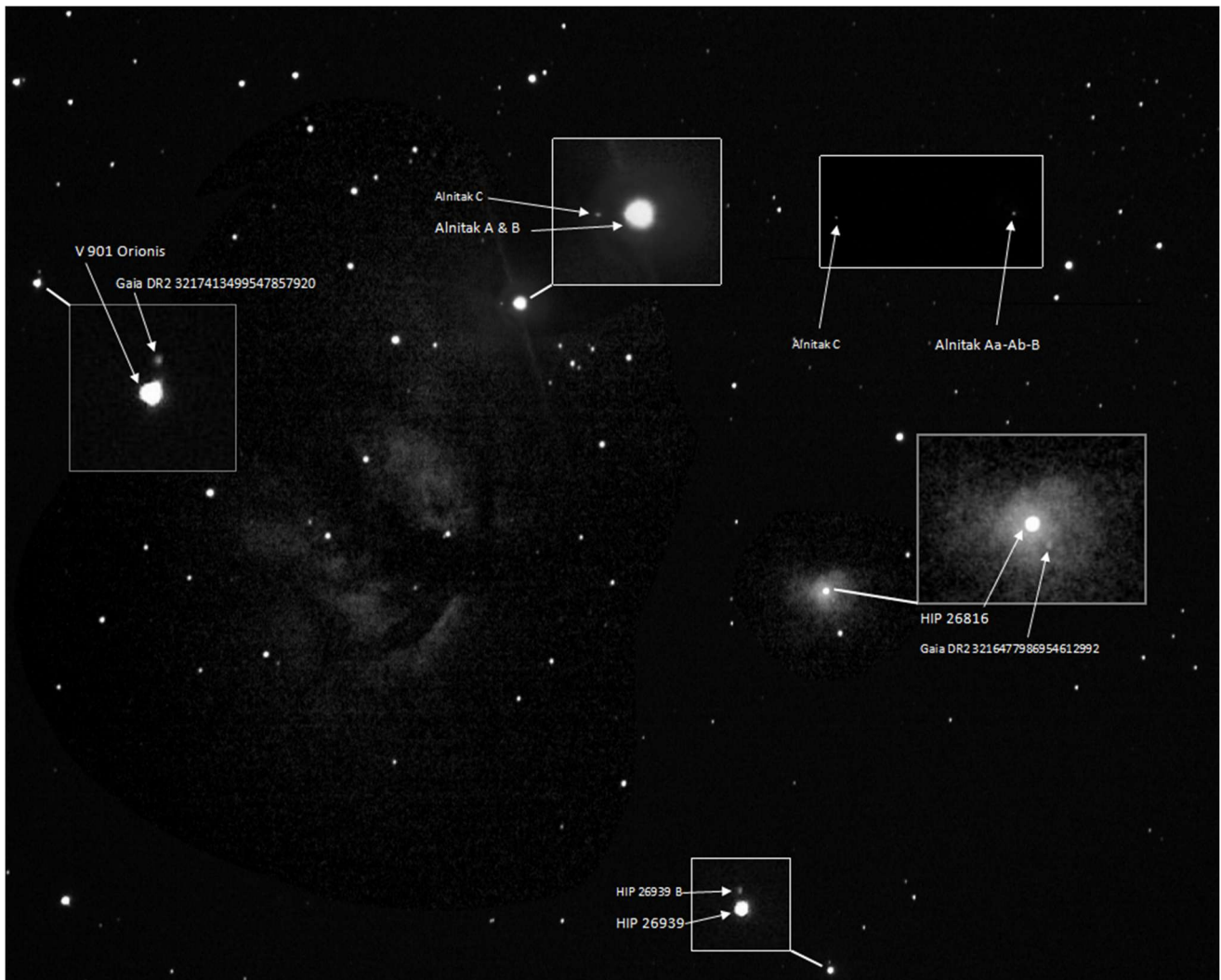
If we do the same throughout the Alnitak region and neighboring nebulae, we reveal several potentially double or triple stars.

Les différentes composantes de chaque système sont notées selon une nomenclature :

- A : étoile la plus brillante du système
- B : deuxième étoile la plus brillante du Système
- Aa : première composante de l'étoile la plus brillante
- Ab : deuxième composante de l'étoile la plus brillante
- C : troisième étoile la plus brillante du Système

The different components of each system are designated according to the following nomenclature:

- A: brightest star in the system*
- B: second brightest star in the system*
- Aa: first component of the brightest star*
- Ab: second component of the brightest star*
- C: third brightest star in the system*



Les étoiles doubles entourées dans un cadre gris ne sont pas de véritables étoiles doubles, mais des « doubles optiques », qui paraissent doubles mais sont en fait situées dans des plans très distants. L'une des deux est en fait très en arrière et paraît de ce fait plus petite.

Alnitak C n'est pas liée au système Alnitak Aa-Ab-C. Elle peut nous apparaître à tort comme faisant partie d'une étoile multiple.

The double stars outlined in gray are not true double stars, but "optical doubles," which appear as doubles but are actually located in very distant planes. One of the two is actually much further back and therefore appears smaller. Alnitak C is not part of the Alnitak Aa-Ab-C system. It can be mistakenly identified as part of a multiple star system.

Tentative de calcul de la parallaxe d'Alnitak C

Attempt to calculate the parallax of Alnitak C

Nous pouvons tenter d'utiliser la méthode de la parallaxe pour étudier la variation de la position apparente d'Alnitak C et en déduire sa distance.

Étudions la variation de distance apparente entre Alnitak A et C :

We can try using the parallax method to study the variation in the apparent position of Alnitak C and deduce its distance.

Let's study the variation in apparent distance between Alnitak A and C:



Nous constatons qu'elle semble se déplacer latéralement et non tourner autour d'Alnitak A.

We observe that it appears to move laterally and not rotate around Alnitak A.

Alnitak C est donc une « double optique » qui est en fait située très en arrière. Son mouvement latéral apparent est dû au fait que la Terre tourne, et donc notre point d'observation varie. Ce mouvement apparent est nommé parallaxe annuelle, car elle est à son maximum à des périodes de 6 mois.

Ici nous n'avons que 52 jours entre Novembre et Janvier, en considérant que la position de la Terre dans sa rotation autour du soleil est la même au 12 janvier 2021 et au 12 Janvier 2026. Cela fait 0.1425 année soit environ 1/7 d'année.

La formule de calcul de distance est normalement établie pour une parallaxe de 6 mois en retenant le mouvement apparent maximal sur une période glissante de 6 mois.

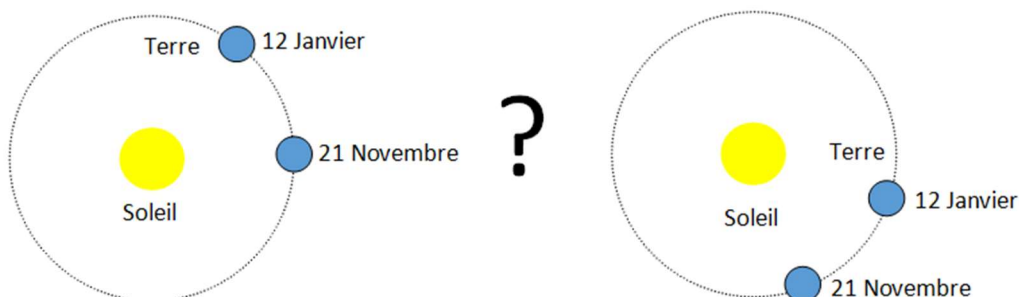
Nous ne savons donc pas comment positionner correctement les deux positions d'observation :

Alnitak C is therefore a "double optic" that is actually located far back. Its apparent lateral movement is due to the Earth's rotation, and thus our point of observation varies. This apparent movement is called annual parallax, because it is at its maximum over periods of 6 months.

Here we only have 52 days between November and January, assuming that the Earth's position in its rotation around the sun is the same on January 12, 2021, and January 12, 2026. This equates to 0.1425 years, or approximately 1/7 of a year.

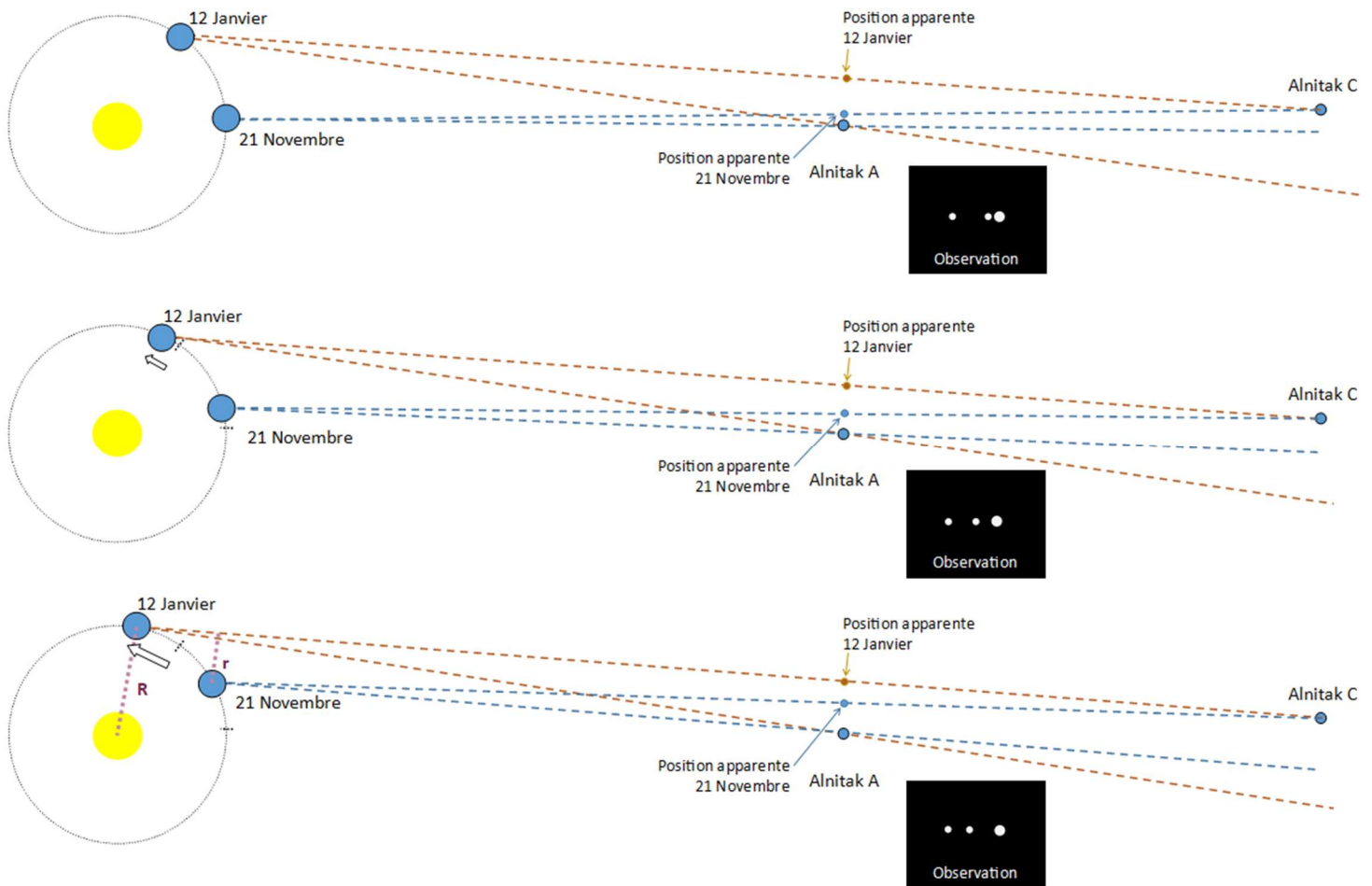
The distance calculation formula is normally established for a 6-month parallax, taking into account the maximum apparent movement over a rolling 6-month period.

Therefore, we do not know how to correctly position the two observation points.



Nous allons néanmoins tenter différentes positions et observer l'évolution du mouvement apparent d'Alnitak C :

We will nevertheless try different positions and observe the evolution of the apparent movement of Alnitak C:



La dernière configuration de positions paraît être compatible avec notre observation, mais cela est trompeur : si Alnitak C était placée beaucoup plus en arrière que sur notre schéma, le résultat de la première configuration pourrait ressembler à la troisième.

The last configuration of positions appears to be compatible with our observation, but this is misleading: if Alnitak C were placed much further back than in our diagram, the result of the first configuration could resemble the third.

Passons aux calculs.

Let's move on to the calculations.

<https://astrodom.fr/formules.html>

Champ d'une photo au Canon APS-C avec la lunette de 900 mm de focale :

Field of view of a photo taken with a Canon APS-C camera using a 900mm focal length lens:

Champ = $3438 \times (d / F)$ avec d =taille du capteur en mm et F =focale de l'instrument en mm

Champ = $3438 \times (22,2 / 900) = 84,804$ minutes d'arc soit 5 088.24 secondes d'arc pour 10368 pixels.

La parallaxe est de 10 pixels soit 4.907 secondes d'arc pour 1/7ème d'année.

Field of view = $3438 \times (d / F)$ where d = sensor size in mm and F = focal length of the instrument in mm

Field of view = $3438 \times (22.2 / 900) = 84.804$ arcminutes, or 5088.24 arcseconds, for 10368 pixels.

The parallax is 10 pixels, or 4.907 arcseconds, for 1/7 of a year.

Formule de calcul de la distance d'Alnitak C pour une parallaxe de 6 mois :

Formula for calculating the Alnitak C distance for a 6-month parallax:

$D = R / \theta$ avec D , distance en parsec, R distance Terre-Soleil soit 1 UA et θ l'angle en secondes d'arc.

Ici R ne sera pas d'un parsec car notre parallaxe n'est pas établie sur 6 mois. Essayons avec la troisième configuration des positions et prenons donc r à la place de R :

$D = R / \vartheta$, where D is the distance in parsecs, R is the Earth-Sun distance (1 AU), and ϑ is the angle in arcseconds.

Here, R will not be one parsec because our parallax is not established over 6 months. Let's try with the third configuration of positions and therefore take r instead of R :

$R = 1,99$ cm

$r = 0,92$ cm

$R / r = 2,163$

La formule devient :

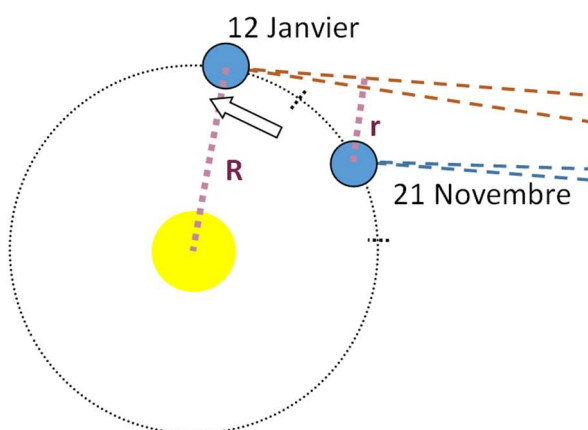
The formula becomes:

$D / 2,163 = (1 / 2,163) / 4.907$

$D / 2,163 = 1 / (4.907 * 2,163)$

$D = 1 / (4.907 * 2,163)$

$D = 0.094$ parsec



Ce résultat est totalement incohérent, Alnitak C serait très proche de la Terre, car la distance Terre-soleil étant de 1 parsec, 0.094 parsec représente un peu moins que 10% de cette distance.

La difficulté d'obtenir un résultat satisfaisant vient du fait que pour apprécier la distance entre Alnitak C et A, il faut prendre en compte que, et nous le verrons plus loin, Alnitak A est composée de plusieurs étoiles en rotation. Elle paraît comme se déformer selon les positions de ses composantes.

This result is completely inconsistent. Alnitak C would be very close to Earth, since the Earth-Sun distance is 1 parsec, and 0.094 parsecs represents slightly less than 10% of this distance.

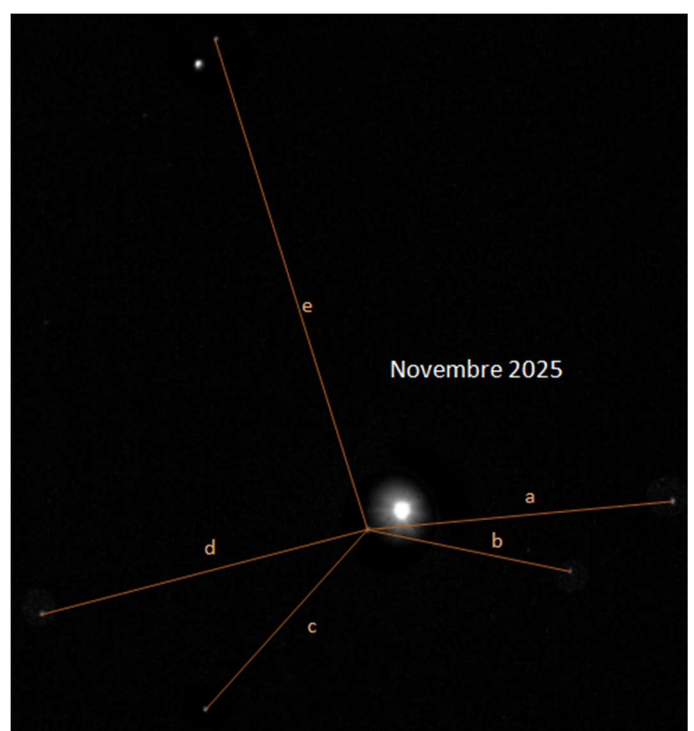
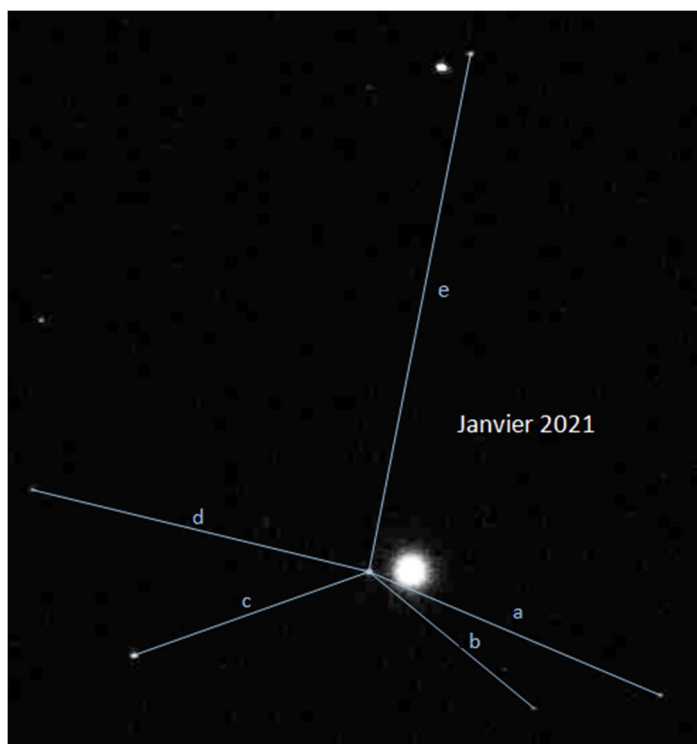
The difficulty in obtaining a satisfactory result stems from the fact that, to determine the distance between Alnitak C and A, we must take into account that, as we will see later, Alnitak A is composed of several rotating stars. It appears to be distorted depending on the positions of its components.

Il nous faut donc un référentiel plus fiable pour mesurer les distances.

We therefore need a more reliable reference point for measuring distances.

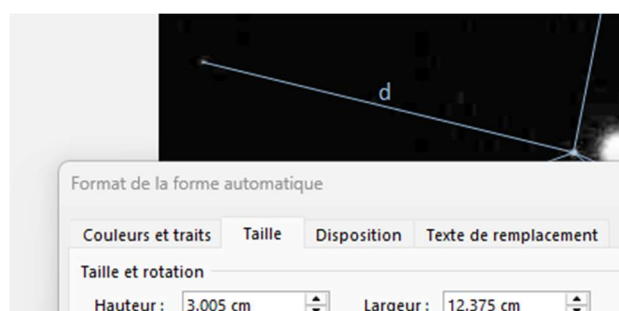
Mesurons l'évolution des distances entre Alknitak C et les autres étoiles visibles dans le champ en traçant des segments entre les étoiles :

Let's measure the evolution of the distances between Alknitak C and the other stars visible in the field by drawing segments between the stars:



Dans le logiciel utilisé (Publisher), la longueur des segments n'est pas directement indiquée, il faut la calculer comme étant la tangente d'un triangle défini par la hauteur et la longueur de l'objet :

In the software used (Publisher), the length of the segments is not directly indicated; it must be calculated as the tangent of a triangle defined by the height and length of the object:



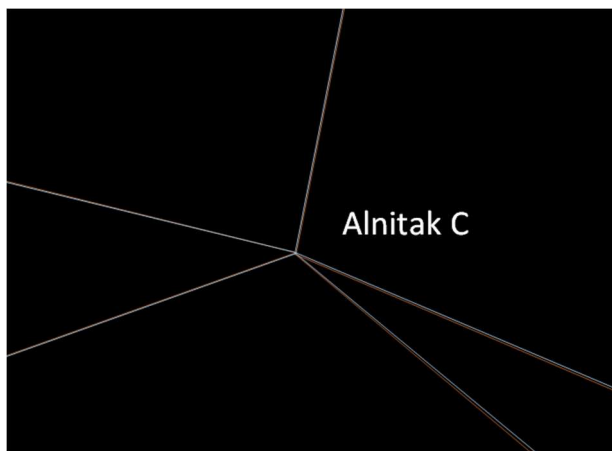
Reportons les mesures dans un tableau (Cf. Réseau-parallaxe.xlsx onglet « Réseau ») :

Let's record the measurements in a table (See Réseau-parallaxe.xlsx tab « Réseau ») :

Segments	janv-21			en % de a	nov-25			en % de a	Écart en %
	Hauteur	Largeur	Tangente		Hauteur	Largeur	Tangente		
a	4.550	10.724	11.649	100.0000%	1.056	11.361	11.410	100.0000%	0.0000%
b	5.025	6.072	7.882	67.6573%	1.558	7.548	7.707	67.5472%	0.1101%
c	3.078	8.653	9.184	78.8384%	6.705	6.031	9.018	79.0389%	-0.2004%
d	3.005	12.375	12.735	109.3165%	3.163	12.135	12.540	109.9078%	-0.5913%
e	19.039	3.735	19.402	166.5496%	18.255	5.681	19.119	167.5600%	-1.0103%

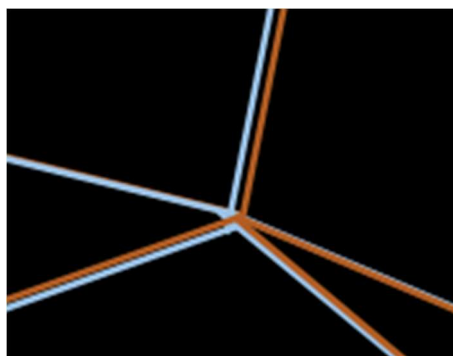
Ensuite superposons les deux tracés en cherchant à ce que les angles se superposent au mieux autour d'Alnitak C :

Next, we superimpose the two drawings, trying to ensure that the angles overlap as closely as possible around Alnitak C:



Nous constatons un très faible écartement entre les deux versions du segment e :

We observe a very small difference between the two versions of segment e:



Pour limiter la marge d'erreur il faut réaliser un schéma de la plus grande taille possible.

Après remesure des deux versions du segments *d* et conversions pour pouvoir relier la parallaxe mesurée à un écart angulaire (Cf. Réseau-parallaxe.xlsx onglet « Réseau ») :

To minimize the margin of error, the diagram should be as large as possible. After remeasurement of both versions of segment d and conversions to link the measured parallax to an angular deviation (See Réseau-parallaxe.xlsx tab « Réseau ») :

Après mise à l'échelle entre les deux figures et superpositions

After scaling between the two figures and superimposing them

janv-21			
	Hauteur	Largeur	Tangente
d	24.046	98.984	101.863

nov-25		
Hauteur	Largeur	Tangente
25.663	98.581	101.867

Écart en cm
-0.003734

Taille en arcsecondes du segment d sur la photo complète de 2021

Size in arcseconds of segment d in the full 2021 photo

	Hauteur	Largeur	Tangente
d 2021	9.335	1.812	9.509
Image		62.542	

Arc s/cm

81.35717

Arc s
773.645
5088.240

Ratio de taille

Size ratio

d 2021
d 2021 photo

Tangente
101.863
9.509
9.3353%

Parallaxe

Diagramme
Photo

-0.00373	cm
-0.00035	cm

Arc s
0.02836

$$D = 1 / (0.02836 * 2,163)$$

$$D = 16.30 \text{ parsec}$$

Cette distance est encore bien trop faible pour être crédible, néanmoins nous avons amélioré notre méthode. La véritable distance étant 381.39 parsec. Il nous faudrait 20 fois plus de précision dans les mesures. Pour avoir 20 fois plus de résolution il nous faudrait un télescope de 3 mètre de diamètre.

This distance is still far too small to be credible; nevertheless, we have improved our method. The true distance is 381.39 parsecs. We would need 20 times greater precision in the measurements. To achieve 20 times greater resolution, we would need a telescope with a diameter of 3 meters.

Nous avons donc établi qu'Alnitak C est bien une double optique et non une étoile en gravitation autour d'Alnitak A. La mesure de sa parallaxe et le calcul de sa distance nous semble hors de portée, bien que nous ayons essayé d'améliorer notre méthode en élargissant le référentiel de mesures aux étoiles voisines.

We have therefore established that Alnitak C is indeed a double optic and not a star in gravitation around Alnitak A. The measurement of its parallax and the calculation of its distance seem to us beyond our reach, although we have tried to improve our method by extending the reference frame of measurements to neighboring stars.

Mouvement propre d'Alnitak C

Alnitak C's Own Movement

Notre difficulté à mesurer suffisamment précisément une parallaxe pourrait s'expliquer, outre la très relative précision de nos mesures, par le fait que les étoiles ont un mouvement propre, indépendant de notre perception d'un changement de position de par la rotation de la terre autour du soleil.

En effet, les étoiles « avancent » dans une direction donnée, toutes les étoiles tournant autour du centre de la galaxie. Le mouvement propre de chaque étoile pouvant être légèrement différent de ces voisines, cela peut expliquer en partie les variations significatives de nos segments.

Le mouvement global que nous mesurons est donc ce mouvement propre, modulé cycliquement par l'effet de la parallaxe.

A défaut de mesure, pouvons-nous faire une simulation de la combinaison du mouvement propre et de la parallaxe annuelle ?

Our difficulty in measuring parallax with sufficient precision could be explained, in addition to the very relative accuracy of our measurements, by the fact that stars have their own motion, independent of our perception of a change in position due to the Earth's rotation around the Sun.

Indeed, stars "move" in a given direction, all stars revolving around the center of the galaxy. Since the proper motion of each star can be slightly different from its neighbors, this can partly explain the significant variations in our segments. The overall motion we measure is therefore this proper motion, modulated cyclically by the effect of parallax. In the absence of precise measurements, can we simulate the combination of proper motion and annual parallax?

Prenons les données de l'étoile dans la base de donnée Simbad : simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=* zet Ori C

Let's take the star data from the Simbad database :

```
Basic data :
* zet Ori C -- Star
Other object types: ? * (BD,*,...), ** (**,ADS,...), NIR (2MASS)
ICRS coord. (ep=J2000) : 05 40 46.1671174152 -01 55 36.349356360 (Optical) [ 0.0347 0.0329 90 ] A 2020yCat.1350....0G
FK4 coord. (ep=B1950 eq=1950) : 05 38 14.6766875277 -01 57 05.823278342 [ 0.0347 0.0329 90 ]
Gal coord. (ep=J2000) : 206.4388858974914 -16.5754377385388 [ 0.0347 0.0329 90 ]
Proper motions mas/yr : 1.951 -1.552 [0.041 0.036 90] A 2020yCat.1350....0G
Radial velocity / Redshift / cz : V(km/s) 18.08 [3.38] / z(spectroscopic) 0.000060 [0.000011] / cz 18.08 [3.38]
(Opt) C 2022yCat.1355....0G
Parallaxes (mas): 2.5877 [0.0387] A 2020yCat.1350....0G
Fluxes (6) :
B 9.64 [0.03] D 2000A&A...355L..27H
V 9.54 [0.03] D 2000A&A...355L..27H
G 9.564458 [0.002776] C 2020yCat.1350....0G
J 9.501 [0.039] C 2003yCat.2246....0C
H 9.523 [0.026] C 2003yCat.2246....0C
K 9.512 [0.023] C 2003yCat.2246....0C
```

Mouvement propre (*Proper motion*) : 1.951

Parallaxe : 2.58977

En faisant varier cycliquement la parallaxe chaque année entre 0 et 2.58977 sur une période de 6 mois, et en combinant ce mouvement avec le mouvement propre qui est linéaire, nous obtenons (Cf. Réseau-parallaxe.xlsx onglet « Simulation »):

By cyclically varying the parallax each year between 0 and 2.58977 over a period of 6 months, and combining this movement with the linear motion, we obtain (See Réseau-parallaxe.xlsx tab « Simulation»):

Alnitak C

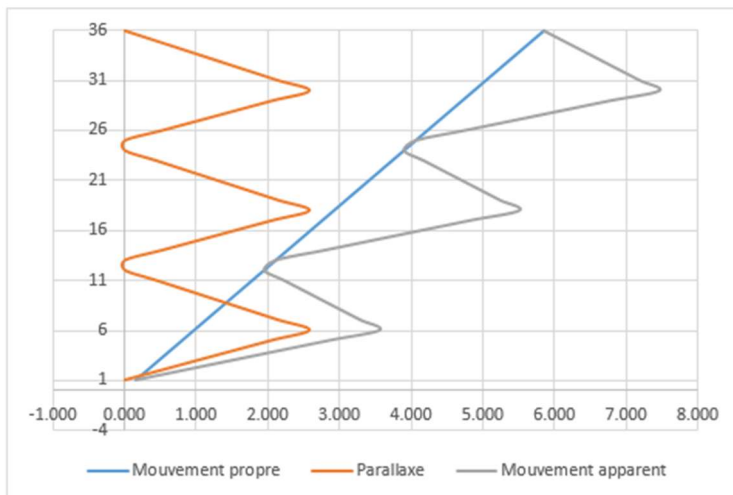
Mouvement propre 1.95100
Parallaxe 2.58977

Maximun de parallaxe

	Mouvement propre	Parallaxe	Mouvement apparent
1	0.163	0	0.162583333
2	0.325	0.518	0.843120667
3	0.488	1.036	1.523658
4	0.650	1.554	2.204195333
5	0.813	2.072	2.884732667
6	0.976	2.590	3.56527
7	1.138	2.158	3.296225
8	1.301	1.727	3.02718
9	1.463	1.295	2.758135
10	1.626	0.863	2.48909
11	1.788	0.432	2.220045
12	1.951	0.000	1.951
13	2.114	0.000	2.113583333
14	2.276	0.518	2.794120667
15	2.439	1.036	3.474658
16	2.601	1.554	4.155195333
17	2.764	2.072	4.835732667
18	2.927	2.590	5.51627
19	3.089	2.158	5.247225
20	3.252	1.727	4.97818
21	3.414	1.295	4.709135

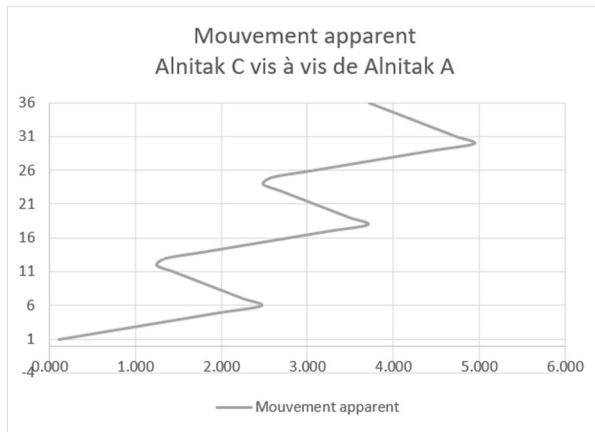
Nous obtenons un mouvement apparent en dents de scie, ici modélisé sur 36 mois :

We obtain an apparent sawtooth pattern, modeled here over 36 months:



En effectuant de même avec Alnitak A, et en faisant la différence entre le deux, nous obtenons le mouvement apparent d'Alnitak C vis-à-vis de sa voisine :

By doing the same with Alnitak A, and taking the difference between the two, we obtain the apparent movement of Alnitak C with respect to its neighbor:



Il nous faudrait donc mesurer le déplacement apparent sur plusieurs années pour distinguer la parallaxe annuelle du mouvement apparent.

Toutes les étoiles du champ étant potentiellement affectées par des mouvements analogues, aucune ne peut servir à elle seule de référence fiable.

Le satellite GAIA qui mesure les mouvements propres et parallaxe de millions d'étoiles fait 70 mesures par étoiles sur 5 ans. Il fait des mesures relatives et reconstitue une vue en 3D de toutes les étoiles mesurées. Le mouvement de chaque étoile est ainsi caractérisé par rapport à l'ensemble du modèle.

Il effectue de manière bien plus précise et massive ce que nous avons tenté en mesurant des segments entre les étoiles.

We would therefore need to measure the apparent displacement over several years to distinguish the annual parallax from the apparent motion. Since all the stars in the field are potentially affected by similar motions, none can serve as a reliable reference on its own.

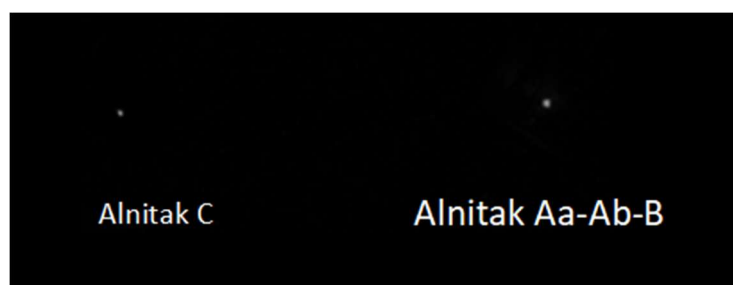
The GAIA satellite, which measures the proper motions and parallax of millions of stars, takes 70 measurements per star over 5 years. It makes relative measurements and reconstructs a 3D view of all the measured stars. The motion of each star is thus characterized relative to the entire model. It performs, with far greater precision and on a much larger scale, what we attempted by measuring segments between stars.

Étude d'Alnitak AB

Alnitak AB Study

En utilisant la plus forte résolution du reflex et une focale de 1800 mm, Alnitak A et B ne sont pas séparables avec une lunette 152/900.

Using the highest resolution of the SLR and a focal length of 1800 mm, Alnitak A and B are inseparable with a 152/900 refractor.



Au télescope de 254 mm, avec une mise au point parfaite, il est possible de séparer les composantes A et B (photo et schéma Jérôme Delaunay) :

Focale native 1270 mm + Barlow 2.5X = focale de 3175 mm

With a 254 mm telescope and perfect focus, it is possible to separate components A and B (photo and diagram by Jérôme Delaunay):

Native focal length 1270 mm + 2.5x Barlow lens = focal length of 3175 mm



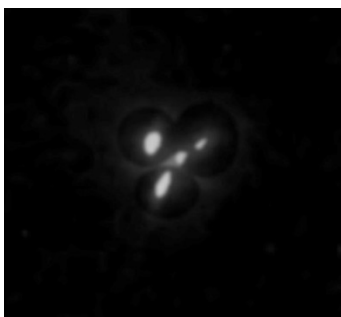
Avec la lunette 150/900, en défocalisant très légèrement puis en utilisant le seuillage, on croit mettre en évidence plusieurs composantes, mais il s'agit probablement d'un artéfact :

With the 150/900 refractor, by very slightly defocusing and then using thresholding, one thinks one is highlighting several components, but this is probably an artifact:



Pour en avoir le cœur net, je demande à mon acolyte, Jérôme Delaunay, de photographier Alnitak AB à la plus forte focale possible du télescope de 254 mm :

To get to the bottom of it, I asked my colleague, Jérôme Delaunay, to photograph Alnitak AB at the longest possible focal length of the 254 mm telescope:

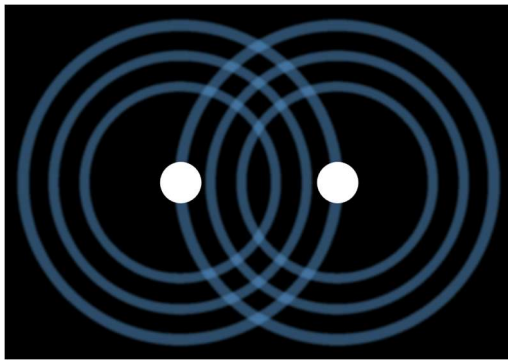


Le Couple (Aa-Ab) - B étant réputé très proche, l'écart perçu entre ses composantes est ici beaucoup trop large. L'image que nous voyons ne peut donc pas être directement celles des composantes de l'étoiles, néanmoins elle paraît liée à la structure fine du système stellaire.

Quel phénomène pourrait expliquer cet effet de loupe sur une structure que nos optiques ne peuvent pas discerner ? La piste la plus plausible est une déformation de l'image par le milieu traversé par la lumière, donc par l'atmosphère. En cherchant ce lien dans divers articles, il s'avère que c'est bien le cas : l'atmosphère diffracte la lumière issue de chaque étoile. Des interférences se forment un peu comme si on lançait deux petites pierres à la surface de l'eau :

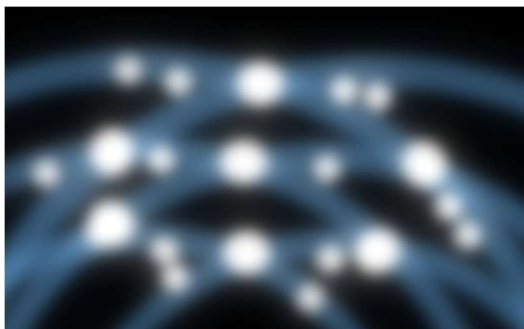
Since the binary system (Aa-Ab) - B is known to be very close, the perceived separation between its components is far too large here. The image we see cannot therefore directly represent the star's components; nevertheless, it appears to be linked to the fine structure of the stellar system.

What phenomenon could explain this magnifying effect on a structure that our optics cannot discern? The most plausible explanation is a distortion of the image by the medium through which the light passes, namely the atmosphere. Researching this connection in various articles confirms that this is indeed the case: the atmosphere diffracts the light from each star. Interference occurs, somewhat like throwing two small stones onto the surface of water.



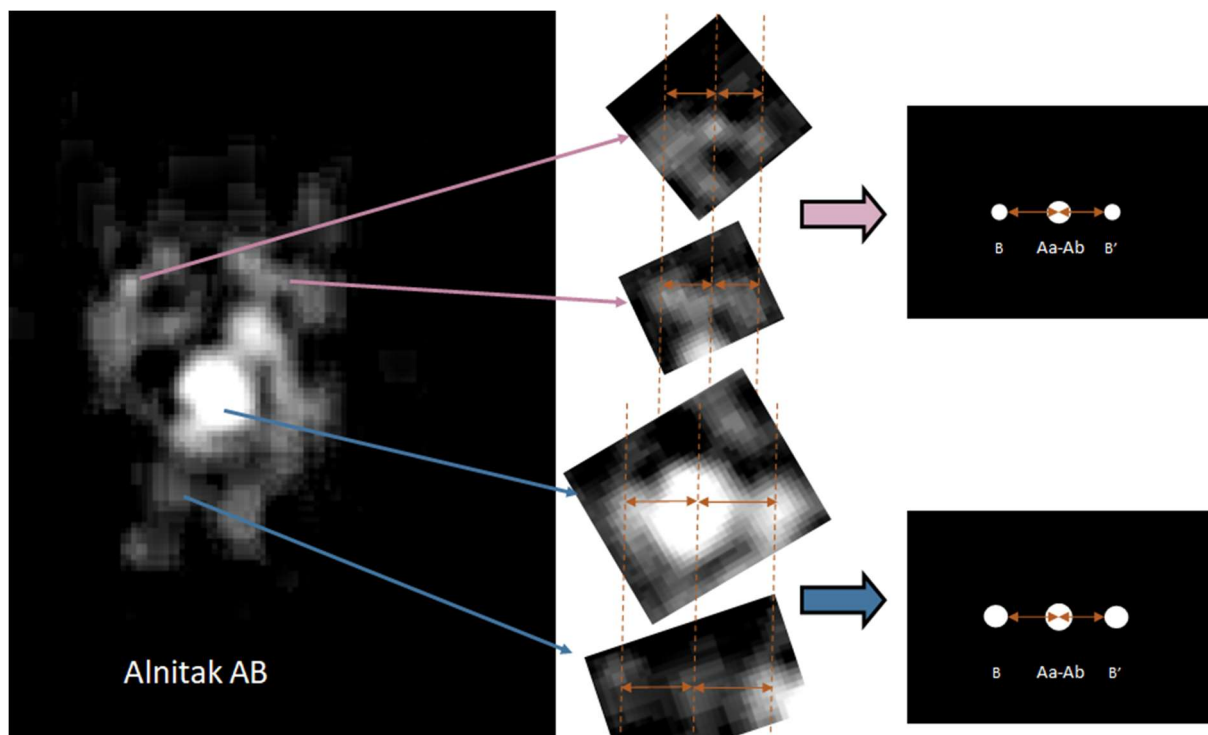
L'image perçue correspond à autant de couples que de nœuds d'interférence :

The perceived image corresponds to as many pairs as there are interference nodes:



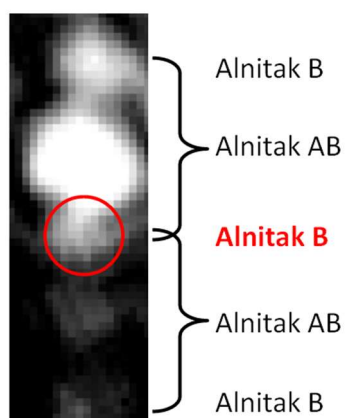
En affinant le traitement de l'image par augmentation de la netteté, nous voyons un certain nombre de duplications d'une forme qui ressemble à un petit haltère, avec souvent une boule centrale. Ce sont autant d'image déformées du couple (Aa-Ab) - B. La taille relative des diverses occurrences varie un peu, mais la symétrie est toujours assez précisément conservée :

By refining the image processing by increasing sharpness, we see a number of duplicates of a shape resembling a small dumbbell, often with a central sphere. These are all distorted images of the pair (Aa-Ab) - B. The relative size of the various occurrences varies slightly, but the symmetry is always quite precisely preserved:



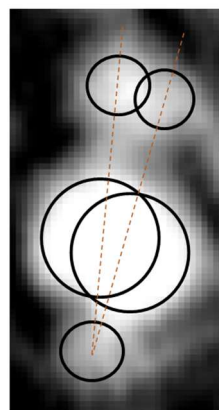
B apparait en double, son occurrence rouge est commune à deux regroupements :

B appears twice; its red occurrence is common to two groupings:



L'occurrence principale de l'image est elle-même double, mais partiellement séparée :

The main instance of the image is itself double, but partially separated:



Nous avons encore une fois traité le sujet de la manière la plus simple possible. Il existe des traitements mathématiques très complexes pour analyser automatiquement les image d'étoiles diffractées.

Il y a beaucoup d'explications et de ressources sur cette page : <http://www.astrosurf.com/hfosaf>

We have once again addressed the topic in the simplest way possible. There are very complex mathematical methods for automatically analyzing images of diffracted stars.

There are many explanations and resources on this page: <http://www.astrosurf.com/hfosaf>

Une étoile multiple, Sigma-Orionis

A multiple star system, Sigma-Orionis

Non loin de la Tête de Cheval, il y a une étoile multiple avec un système à cinq étoiles, Sigma Orionis.

Observons là en détail à la lunette de 150 mm :

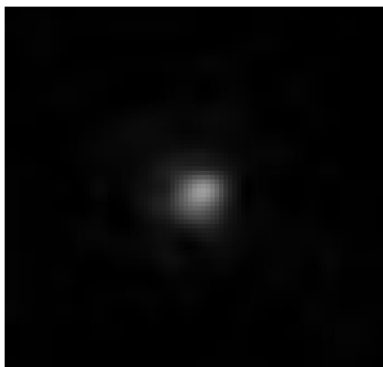
Not far from the Horsehead Nebula, there is a multiple star system with five stars, Sigma Orionis.

Let's observe it in detail with a 150mm refractor:



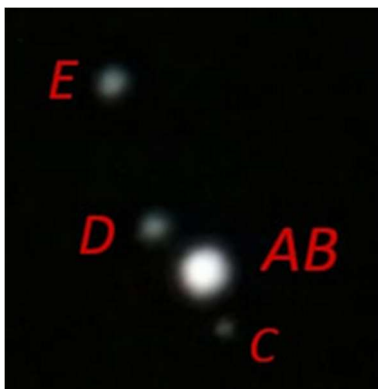
La composante principale, AB, n'est pas séparable optiquement, même avec un très gros télescope :

The main component, AB, is not optically separable, even with a very large telescope:



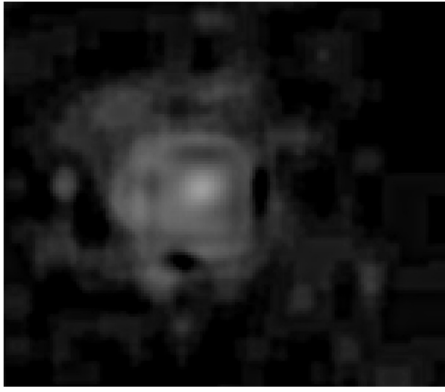
Au télescope 254 mm (Photo Jérôme Delaunay), les étoiles sont plus ponctuelles :

With the 254 mm telescope (Photo Jérôme Delaunay), the stars are more pinpoint:



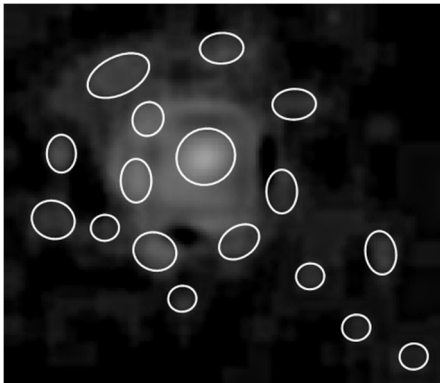
A la lunette, en augmentant très fortement les bas niveaux de l'image du couple AB, on fait apparaître des artéfacts dus aux interférences, mais ils sont beaucoup plus ténus et confus que pour Alnitak :

With a telescope, greatly increasing the low levels of the image of the AB pair reveals artifacts due to interference, but they are much more subtle and indistinct than for Alnitak:



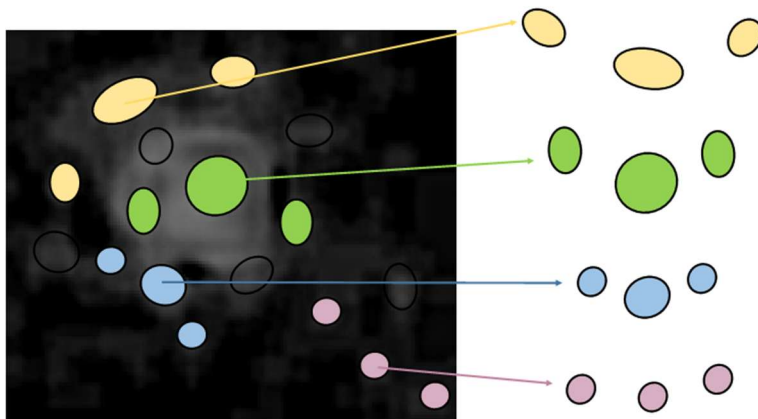
Traçons les nœuds des interférences :

Let's draw the interference nodes:



Puis recherchons un arrangement qui serait dupliqué :

Then let's look for an arrangement that would be duplicated:



Il y a indéniablement une corrélation dans les rapports de distance distances et les angles. Cette distribution non aléatoire des nœuds entre eux indique que l'étoile est assurément double.

There is undeniably a correlation between the distance ratios and the angles. This non-random distribution of the nodes relative to each other indicates that the star is certainly a double star.

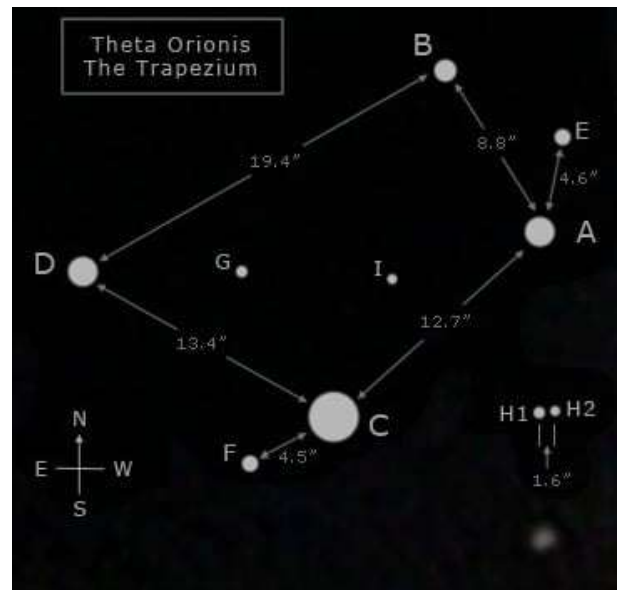
Étoiles double dans le trapèze d'Orion

Double stars in the Orion Trapezium

<https://www.astropix.com/html/observing/trapezium.html>

Au cœur de la nébuleuse d'Orion, plusieurs des étoiles qui irradiant la nébuleuse sont également des étoiles multiples. Avec un télescope de 254 mm (Photo Jérôme Delaunay) :

*At the heart of the Orion Nebula, several of the stars that illuminate the nebula are also multiple stars.
(Photo: Jérôme Delaunay) 254 mm telescope:*



- A : étoile triple
- B : étoile quintuple
- C : étoile binaire
- D : étoile unitaire, variable
- E : étoile double
- F : étoile unitaire, variable

- A: Triple star*
- B: Quintuple star*
- C: Binary star*
- D: Unitary variable star*
- E: Double star*
- F: Unitary variable star*

Nous voilà au terme (provisoire) de nos découvertes sur les étoiles multiples. Je dois vous avouer que j'avais commencé par ce sujet car je pensais qu'il serait le plus simple ... Il est en fait très complexe et un véritable défi pour les astronomes amateurs !

We have now reached the (provisional) end of our exploration of multiple stars. I must confess that I started with this topic because I thought it would be the simplest... It is in fact very complex and a real challenge for amateur astronomers!

2. Principes et méthode de la spectroscopie

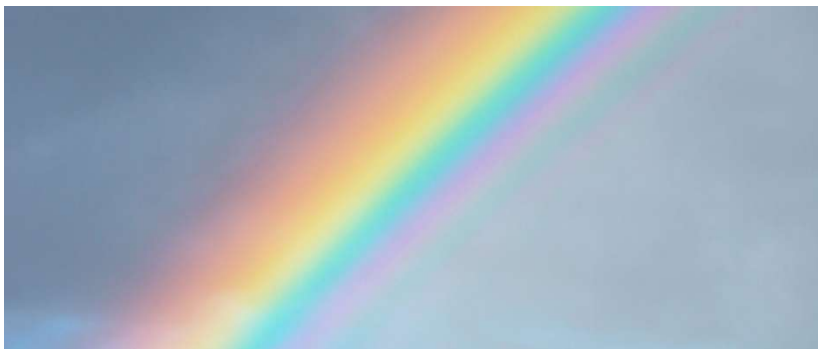
Principles and methods of spectroscopy

Le but de la spectroscopie c'est de décomposer la lumière d'un objet pour en analyser les différentes composantes.

L'outil le plus simple pour décomposer la lumière, c'est un prisme, qui reproduit ce que nous observons lors d'un arc-en-ciel.

Un arc-en-ciel est donc un spectre du Soleil. Nous pourrions très bien essayer d'utiliser la photo d'un arc en ciel pour étudier le Soleil.

The goal of spectroscopy is to break down the light emitted by an object in order to analyze its different components. The simplest tool for breaking down light is a prism, which reproduces what we observe in a rainbow. A rainbow is therefore a spectrum of the Sun. We could very well try using a photograph of a rainbow to study the Sun.



Si nous découpons une fine bande de cet arc en ciel et la présentons de manière inversée, avec le violet à gauche et le rouge à droite :

If we cut out a thin strip of this rainbow and present it in reverse, with purple on the left and red on the right:



En normalisant les niveaux :

By normalizing the levels:



La couleur la plus intense nous apparaît être le jaune, couleur que nous percevons du soleil.

Pour aller plus loin il nous faut mesurer précisément les niveaux de chaque couleurs, et c'est ce que nous allons essayer de faire.

The most intense color appears to us to be yellow, the color we perceive from the sun. To go further, we need to precisely measure the levels of each color, and that's what we're going to try to do.

Préparation de l'image d'un spectre de référence

Preparing the image of a reference spectrum

Pour mettre au point l'outillage d'analyse, il vaut mieux partir d'un spectre de référence d'une étoile blanche qui va donc contenir l'ensemble du spectre possible.

C'est donc un spectre de Sirius que nous allons utiliser :

To develop the analysis tools, it's best to start with a reference spectrum of a white star, which will therefore contain the entire possible spectrum. We will thus use a spectrum of Sirius:



Il est très ressemblant au spectre solaire, mais nous y distinguons des bandes noires, ou bandes d'absorption. Pour les obtenir il faut un spectroscopie avec une résolution suffisante, ce que nous verrons ultérieurement.

Pour analyser ce spectre, une image de 1 pixel de haut suffit. Le spectre de la lumière visible allant de 400 à 780 nanomètres, une image de 381 pixels de large permettra d'avoir une échelle d'un nanomètre par pixel. Nous verrons plus loin que pour manipuler plus facilement les données, il faut une image quatre fois plus large, donc de 1524 pixels.

It is very similar to the solar spectrum, but we can distinguish dark bands, or absorption bands. To obtain them, a spectroscopy with sufficient resolution is needed, which we will see later.

To analyze this spectrum, an image 1 pixel high is sufficient. Since the visible light spectrum ranges from 400 to 780 nanometers, an image 381 pixels wide will allow us to have a scale of one nanometer per pixel. We will see later that to more easily manipulate the data, we need an image four times wider, therefore 1524 pixels.

Préparation des données

Data preparation

Si nous voulons faire des mesures, il nous faut transformer une image en valeurs de luminosité.

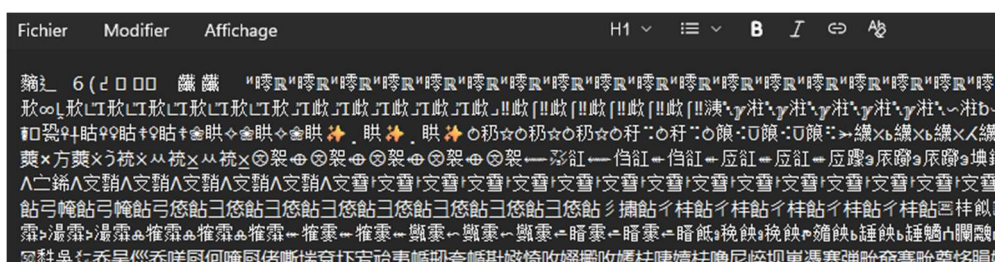
Le codage RVB d'une image informatique est composée de nombres, donc il doit y avoir moyen de lire le fichier d'une image pour en extraire ces nombres. Un fichier de type JPEG étant compressé, pour lire les valeurs il faut le convertir en fichier BMP. **Attention, Photoshop code les BMP avec un format où les données ne sont pas agencées de manière simple, privilégier un convertisseur en ligne tel que <https://convertio.co/fr/jpg-bmp>**

If we want to take measurements, we need to convert an image into brightness values.

The RGB encoding of a computer image is composed of numbers, so there must be a way to read the image file to extract these numbers. Since a JPEG file is compressed, to read the values it must be converted to a BMP file. Note that Photoshop encodes BMPs in a format where the data is not arranged in a simple way; it's best to use an online converter such as <https://convertio.co/fr/jpg-bmp>

Si nous enregistrons un fichier BMP au format texte (.txt) puis l'ouvrons un fichier BMP dans un éditeur de texte qui lit le fichier d'après le code ASCII, nous ne lisons pas directement des nombres :

If we save a BMP file as a text file (.txt) and then open it in a text editor that reads the file according to the ASCII code, we are not directly reading numbers:

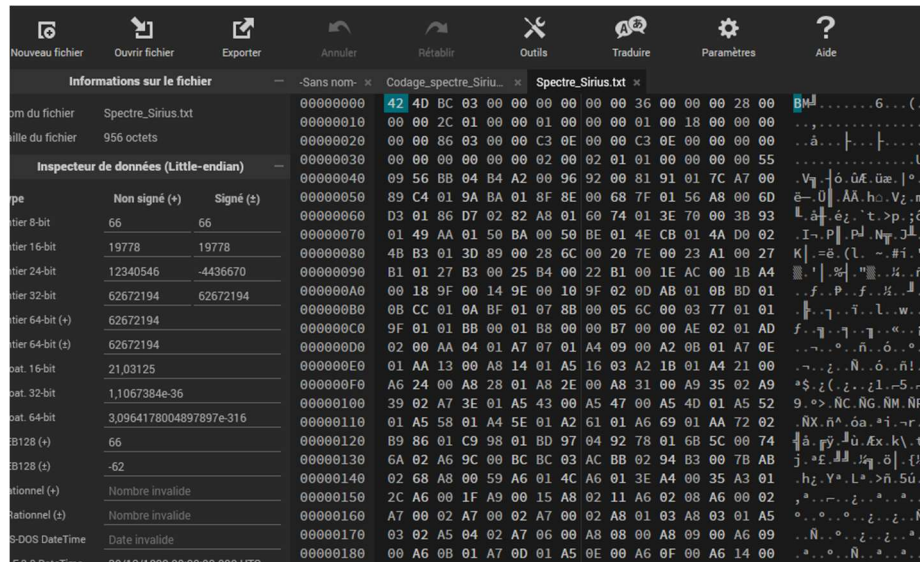


Pour accéder aux données numériques du fichier image, il faut l'ouvrir dans un éditeur en hexadécimal.

Nous allons utiliser l'éditeur en ligne <https://hexed.it> qui est très simple à utiliser.

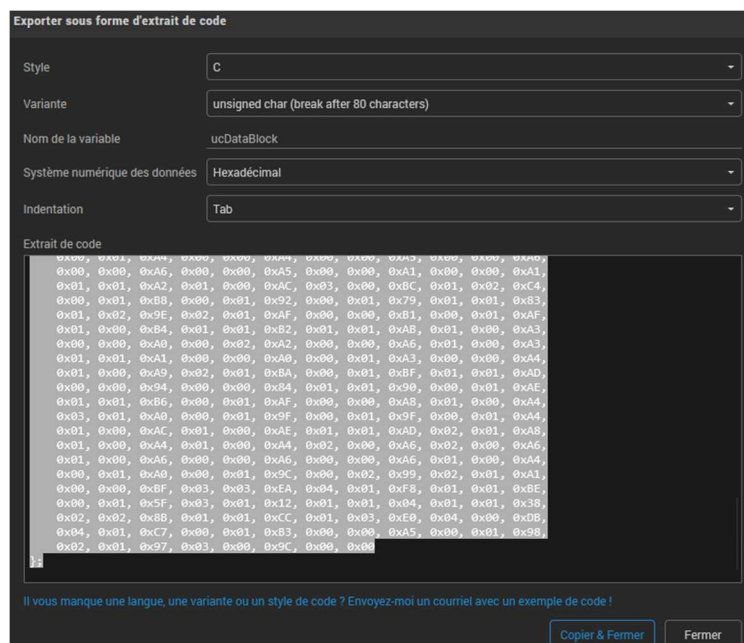
Après avoir ouvert le fichier texte du BMP, nous voyons apparaître des colonnes de données en hexadécimal :

To access the image file's numerical data, you need to open it in a hexadecimal editor. We'll use the online editor <https://hexed.it>, which is very easy to use. After opening the BMP text file, we see columns of hexadecimal data:



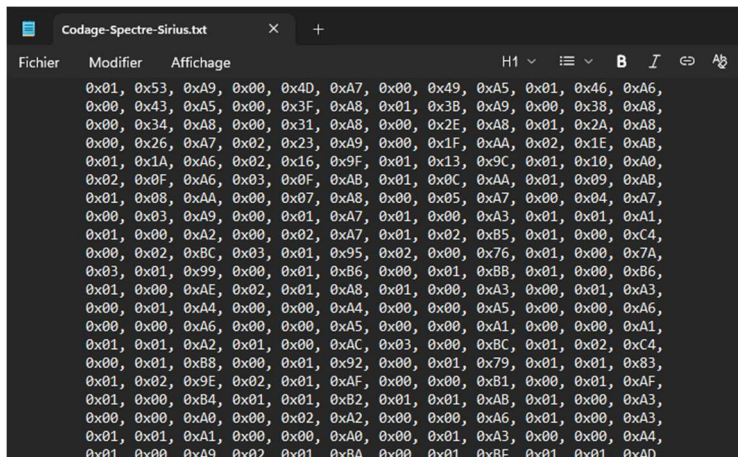
En cliquant dans ces colonnes et en copiant (CTRL + A puis CTRL + C), une fenêtre s'ouvre permettant de copier les données :

By clicking in these columns and copying (CTRL + A then CTRL + C), a window opens allowing you to copy the data:



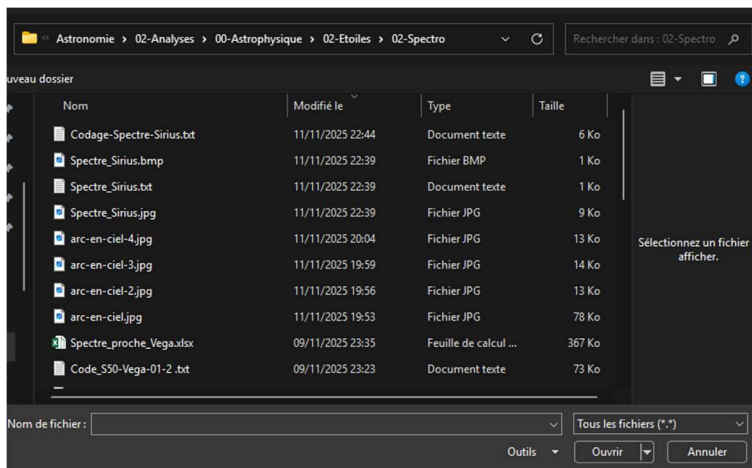
Ensuite nous collons ces données dans un nouveau fichier texte :

Next, we paste this data into a new text file:



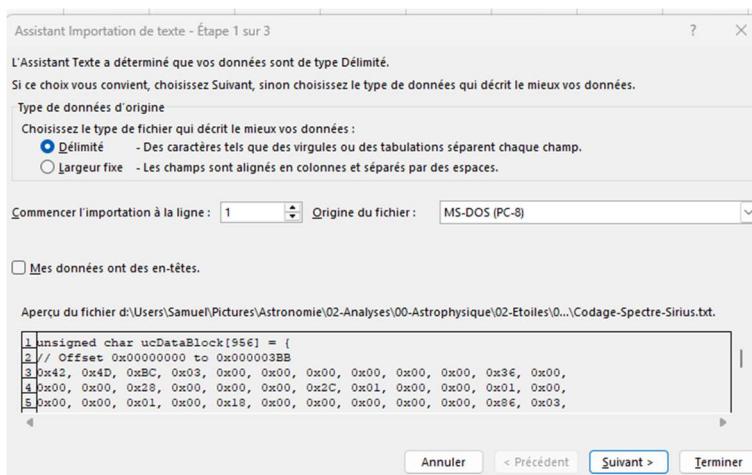
Ces données numériques séparées par des virgules sont importables dans Excel. Pour voir un fichier texte à ouvrir il faut sélectionner « Tous les fichiers (*.*) » :

These comma-separated numeric data can be imported into Excel. To view a text file to open, select "All files (.*)":*



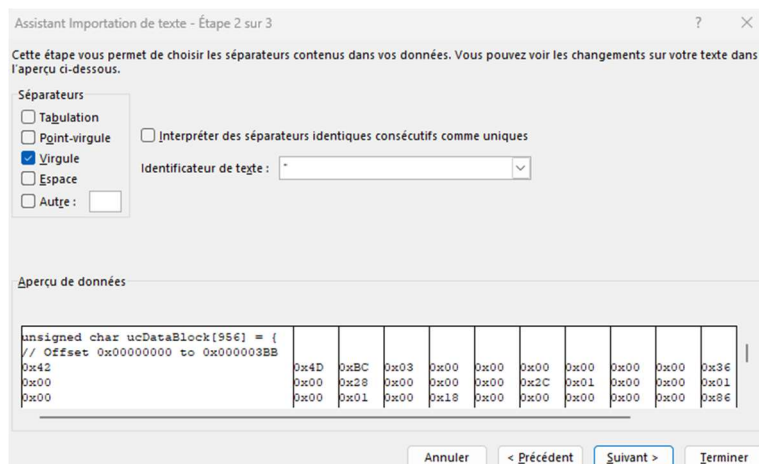
Choisir l'option « Délimité » :

Choose the "Bounded" option:



Puis le séparateur virgule :

Then the comma separator:



Cliquer sur « Terminer » et un classeur s'ouvre avec les données de l'image au format hexadécimal :

Click on "Finish" and a workbook will open with the image data in hexadecimal format:

1	unsigned char ucDataBlock[3738] = {											
2	// Offset 0x00000000 to 0x00000E99											
3	0x42	0x4D	0x9A	0x0E	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x8A	0x00
4	0x00	0x00	0x7C	0x00	0x00	0x00	0xB0	0x04	0x00	0x00	0x01	0x00
5	0x00	0x00	0x01	0x00	0x18	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x10	0x0E
6	0x00	0x00	0xC3	0x0E	0x00	0x00	0xC3	0x0E	0x00	0x00	0x00	0x00
7	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0xFF	0x00	0x00	0xFF
8	0x00	0x00	0xFF	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0xFF	0x42	0x47
9	0x52	0x73	0x8F	0xC2	0xF5	0x28	0x51	0xB8	0x1E	0x15	0x1E	0x85
10	0xEB	0x01	0x33	0x33	0x33	0x13	0x66	0x66	0x66	0x26	0x66	0x66
11	0x66	0x06	0x99	0x99	0x99	0x09	0x3D	0x0A	0xD7	0x03	0x28	0x5C
12	0x8F	0x32	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
13	0x00	0x00	0x04	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
14	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x04	0x01	0x00	0x02

Les données sont prêtes à être injectées dans notre outil d'analyse.

The data is ready to be fed into our analysis tool.

Injection des données dans l'outil Excel

Data injection into the Excel tool

Le tableau est agencé en 4 groupes de 3 colonnes, codant chacune pour une des couleurs RVB. Il nous suffit de recopier un groupe de trois colonnes. Les premières lignes ne sont pas codantes pour des pixels car il y a un entête. Pour être bien sûrs de ne prendre que des données codantes il faut partir du bas du tableau et remonter pour copier 381 lignes.

The table is arranged in 4 groups of 3 columns, each coding for one of the RGB colors. We only need to copy one group of three columns. The first few rows don't code for pixels because they contain a header. To ensure we only copy coded data, we must start at the bottom of the table and copy 381 rows.

Collons ces données dans l'onglet « Données BMP » du fichier Spectre_Sirius.xlsx, dans la zone entourée en noir :

Paste this data into the "BMP Data" tab of the Spectre_Sirius.xlsx file, in the area highlighted in black:

Lissage *smoothing*

moving average				real value
Moyenne mobile				Valeur réelle
100	50	30	5	1
1.00				
0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Ajuster manuellement le poids de chaque échelle de lissage				
Manually adjust the weight of each smoothing scale				

Une valeur à 1 pour l'échelle « Moyenne mobile » 30, et à 1 pour l'échelle « Valeur réelle » indique que 50 % des valeurs moyennées avec les 30 points les plus proches et 50 % des valeurs réelles brutes sont utilisées dans le graphe. Le graphique montre alors moins de rugosité :

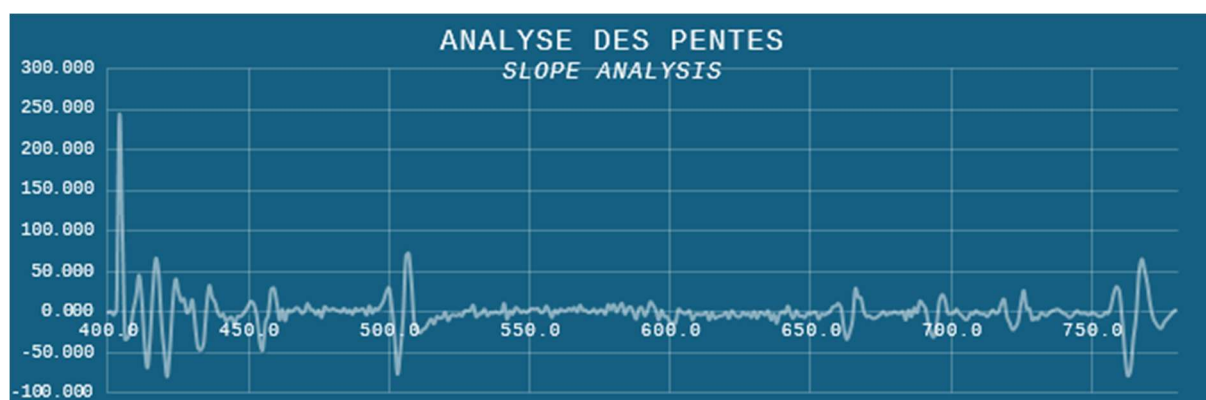
A value of 1 for the 30-point "Moving Average" scale and 1 for the "Actual Value" scale indicates that 50% of the values averaged with the 30 nearest points and 50% of the raw actual values are used in the graph. The graph then shows less roughness.

Une valeur à 2 pour l'échelle « Moyenne mobile » 30, à 1 pour « Moyenne mobile » 5 et à 1 pour l'échelle « Valeur réelle » indique que 50% des valeurs moyennées avec les 30 points les plus proches, 25% des valeurs moyennées avec les 5 points les plus proches et 25 % des valeurs réelles brutes sont utilisées dans le graphe. Le graphique montre alors encore moins de rugosité :

A value of 2 for the 30-point "Moving Average" scale, 1 for the 5-point "Moving Average" scale, and 1 for the "Actual Value" scale indicates that 50% of the values averaged with the 30 nearest points, 25% of the values averaged with the 5 nearest points, and 25% of the raw actual values are used in the graph. The graph then shows even less roughness.

Pour repérer d'éventuelles raies d'absorption et les voir sans les données d'émission, une analyse des pentes est effectuée :

To identify potential absorption lines and visualize them without emission data, a slope analysis is performed:



Calibration du spectre sur les raies
Spectrum calibration on the lines

L'objectif est de caller très précisément ces pics sur les valeurs théoriques correspondant à l'image située en dessous du graphe.

The goal is to precisely align these peaks with the theoretical values corresponding to the image located below the graph.

Pour vérifier la concordance, il faut cliquer sur « Détecter » en dessous du tableau d'analyse des pics :

To verify the match, click on "Detect" below the peak analysis table:

0	
0	
0	
0	

Détecter
 detect

Absorption peaks	
Pics d'absorption	
nm	Molécule
406	
414	
421	
433	
455	
503	
511	
663	
694	
722	
763	

Les longueurs d'ondes des pics sont alors remontées dans le tableau :

The wavelengths of the peaks are then entered into the table:

Nous savons que la longueur d'onde attendues pour le H alpha est de 656 nm.

La valeur la plus proche remontée est de 663 nm. Il y a donc un décalage potentiel de $656 - 663 = -7$ nm entre notre graphe et le spectre théorique.

Appliquons un décalage de -7 à notre graphe :

We know that the expected wavelength for H-alpha is 656 nm. The closest recorded value is 663 nm. Therefore, there is a potential shift of $656 - 663 = -7$ nm between our graph and the theoretical spectrum. Let's apply a shift of -7 nm to our graph:

Calibration

H-alpha shift Décalage du H alpha -7

Cela décale de 7 points notre graphe vers la gauche. Redétections les pics d'absorption :

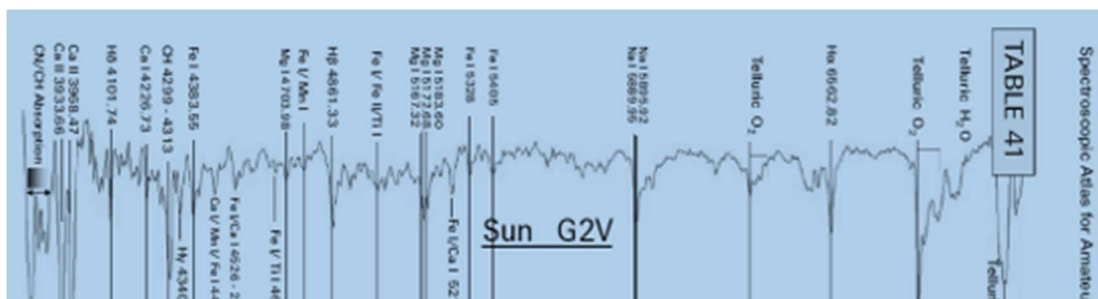
This shifts our graph 7 points to the left. Let's redetect the absorption peaks:

nm	Molécule
400	
407	
414	
426	
448	
496	H bêta
504	
656	H alpha
687	
715	
756	O2 atm
768	

Les raies d'absorption sont en phase avec le modèle théorique, et les espèces chimiques correspondances identifiées.

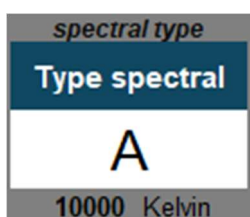
Plus bas dans l'écran, un graphique montre les raies théoriques avec les espèces chimiques associées :

The absorption lines are consistent with the theoretical model, and the corresponding chemical species have been identified. Further down the screen, a graph shows the theoretical lines with their associated chemical species:



Le type spectral de l'étoile est calculé et affiché, avec une estimation de la température de surface :

The spectral type of the star is calculated and displayed, along with an estimate of the surface temperature:



Tous les calculs et la méthode d'identification des pics d'absorption sont dans l'onglet « Calcul ». Les tables de correspondance permettant de retrouver le type spectral et les espèces chimiques sont dans l'onglet « Paramètres ».

All calculations and the method for identifying absorption peaks are in the "Calculation" tab. The lookup tables for determining spectral type and chemical species are in the "Parameters" tab.

Test avec le spectre solaire

Test with the solar spectrum

Ici la calibration du spectre grâce aux raies d'absorption est impossible, la résolution de notre spectre issu d'un arc en ciel ne les montre pas.

La méthode consiste à positionner l'image du spectre le plus en phase possible avec l'image théorique.

Le spectre a été décalé de 50 pour être en phase avec l'image.

Ainsi cadré, la surface du spectre est centrée sur le jaune, ce qui correspond bien au type G de notre étoile.

Here, calibrating the spectrum using absorption lines is impossible, as the resolution of our spectrum, derived from a rainbow, does not show them. The method consists of positioning the spectral image as closely as possible to the theoretical image. The spectrum was shifted by 50 to be in phase with the image. Framed in this way, the spectral area is centered on yellow, which corresponds well to the G type of our star.



Pour que le spectre ne soit pas trop saturé, et donc trop blanc, il faut régler la luminosité au minimum, voire faire une capture écran pour éviter d'avoir plusieurs secondes de pauses.

On découpe ensuite dans Photoshop une fine bande du spectre, que l'on porte à la taille de 1524 x 1 pixels. Ceci permet de moyenner les couleurs en largeur (ici il est ré-élargit pour pouvoir le distinguer) :

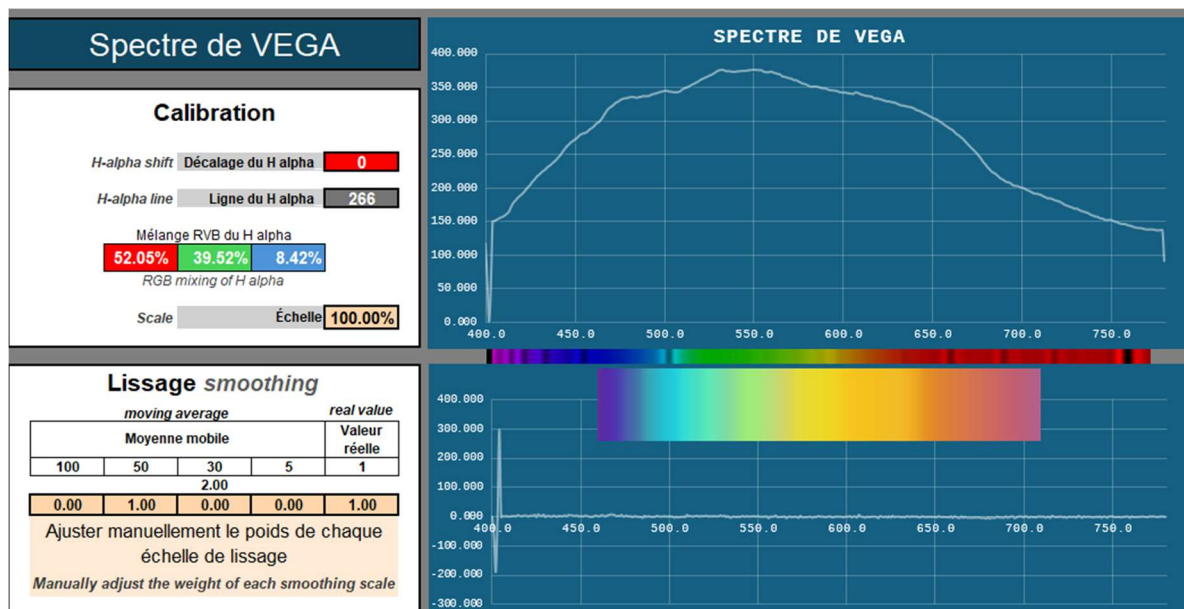
To prevent the spectrum from becoming oversaturated, and therefore too white, the brightness should be set to minimum, or even a screenshot should be taken to avoid several seconds of exposure. Next, a thin strip of the spectrum is cropped in Photoshop and resized to 1524 x 1 pixels. This allows for the average width of the colors (here it is enlarged again to make it distinguishable):



Comme nous l'avons vu dans la partie sur la méthodologie du traitement des spectres, nous convertissons cette image en données exploitables dans Excel et les recopions dans notre outil.

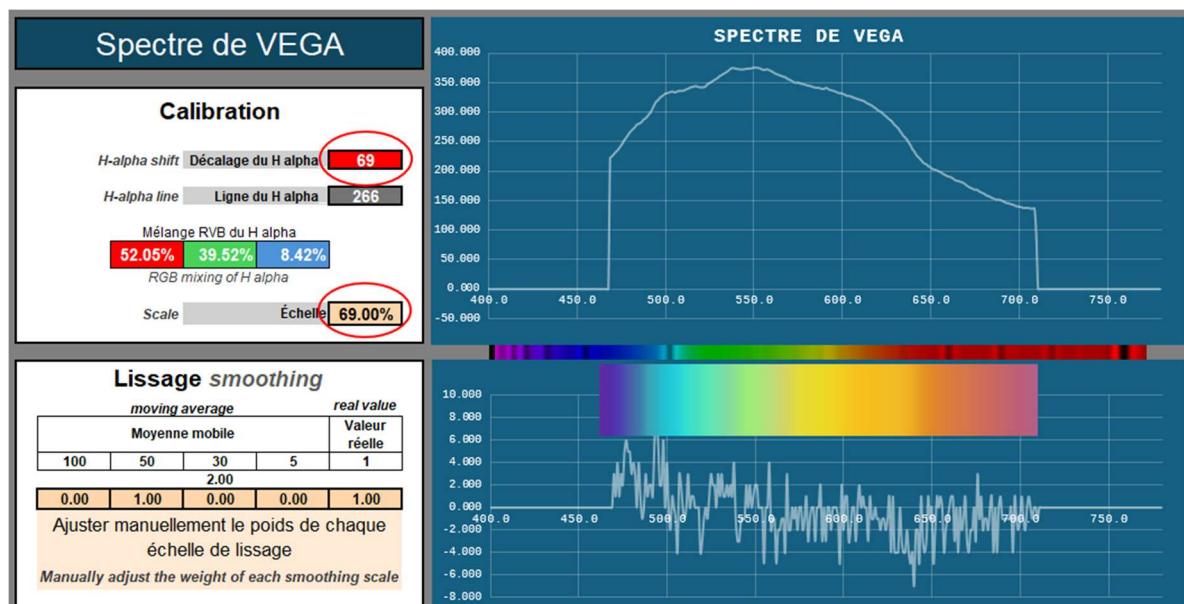
Dans un premier temps, le graphique du spectre n'est pas en phase avec l'image que nous avons positionnée de manière cohérente avec le spectre de référence :

As we saw in the section on spectral processing methodology, we convert this image into usable data in Excel and copy it into our tool. Initially, the spectral graph is not aligned with the image, which we have positioned consistently with the reference spectrum.



En décalant le spectre et en le réduisant en largeur nous pouvons le faire correspondre à la largeur de notre image :

By shifting the spectrum and reducing its width, we can make it match the width of our image:



Notre spectre est incomplet : il manque une partie du bleu-violet et du rouge.

Ceci est dû au fait qu'avec notre « spectroscopie » rudimentaire, les différents ordres (= instances) du spectre ne sont pas bien séparés et en partie confondus :

Our spectrum is incomplete: it's missing part of the blue-violet and red regions. This is because, with our rudimentary "spectroscopy," the different orders (or instances) of the spectrum are not clearly separated and are partially overlapped.



Aucune section de ce spectre ne contient de couleurs continues du violet au rouge.

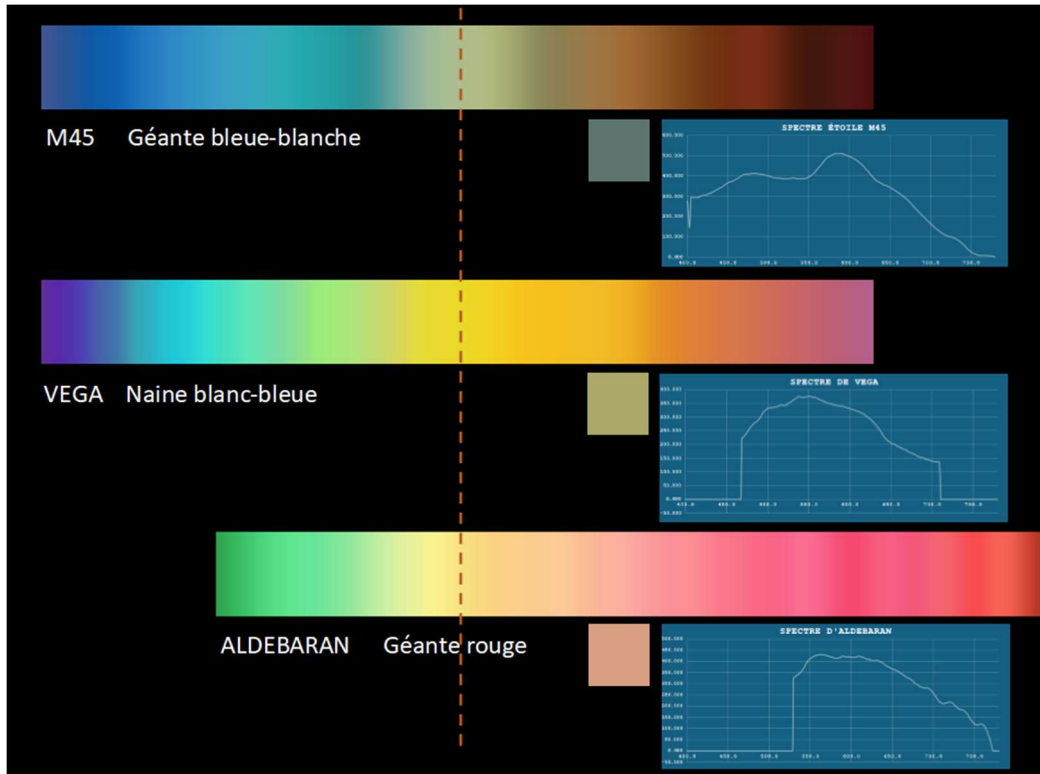
La section la plus exploitable va du bleu à une partie du rouge :

No section of this spectrum contains continuous colors from violet to red. The most usable section extends from blue to part of red:



En traitant de la sorte trois étoiles, une bleue, une blanche et une rouge, on obtient :

By treating three stars in this way—one blue, one white, and one red—we obtain:



Aucun spectre n'est complet. Il y a tout de même une certaine cohérence dans les graphes. L'étoile bleue de M45 (Les pléiades) a une zone plus large dans le bleu, Vega a presque toutes les couleurs, et Aldébaran est la plus étendue dans le rouge.

Pour chaque spectre, la couleur moyenne est facilement obtenue en réduisant l'image à un carré d'un pixel de côté.

Aucune raie d'absorption n'est décelable à cause de la faible résolution de notre « spectroscopie ».

No spectrum is complete. Nevertheless, there is a certain consistency in the graphs. The blue star M45 (the Pleiades) has a larger area in the blue, Vega contains almost all colors, and Aldebaran is the most extensive in the red. For each spectrum, the average color is easily obtained by reducing the image to a one-pixel square. No absorption lines are detectable due to the low resolution of our "spectroscopy."

Spectroscopie à réseau imprimé

Printed grating spectroscopy

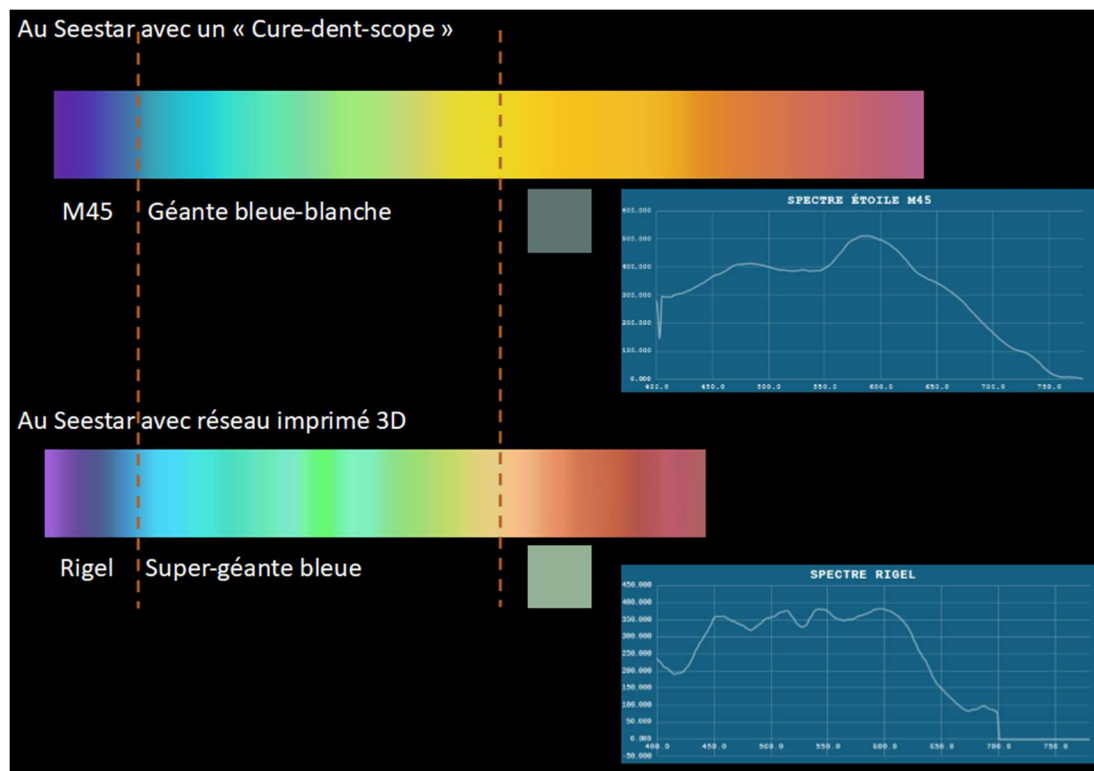
Un spectroscopie imprimé en 3D est testé. Il comporte plus de raies que le « cure-dent-scope ».

A 3D-printed spectroscopy is being tested. It has more spectral lines than the "toothpick-scope".



Avec le Sestar S50, un spectre de Rigel est obtenu et comparé à une étoile précédente de type proche :

Using the Sestar S50, a spectrum of Rigel is obtained and compared to a previous star of a similar type:



Le spectre est un peu plus complet dans le violet, mais moins dans le rouge, et les raies d'absorptions ne sont toujours pas visibles.

The spectrum is a little more complete in the violet, but less so in the red, and the absorption lines are still not visible.

4. Spectres avec un réseau de diffraction

Spectra with a diffraction grating

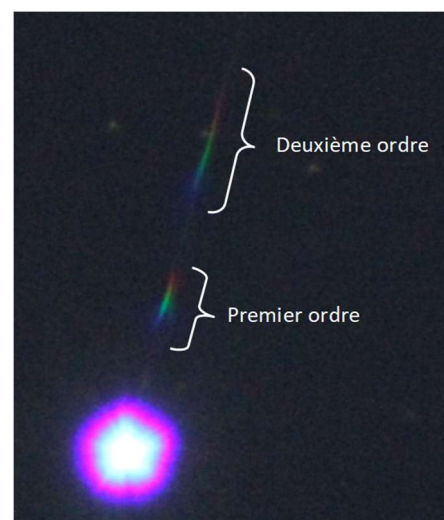
Pour obtenir des raies d'absorption il nous faut davantage de résolution. Un réseau de diffraction acheté pour une dizaine d'euros sur un célèbre site de vente en ligne fera l'affaire. Un premier test avec le Seestar s'avère décevant : le suivi ne fonctionne pas. Aussi c'est à la grande lunette 152/900 que les travaux vont se poursuivre. Pour calibrer notre outil, trois étoiles bien visibles sont choisies, du bleu au rouge.

To obtain absorption lines, we need higher resolution. A diffraction grating purchased for around ten euros from a well-known online retailer will do the trick. An initial test with the Seestar proves disappointing: tracking doesn't work. So, the work will continue with the large 152/900 telescope. To calibrate our instrument, three clearly visible stars are chosen, ranging from blue to red.

Une étoile bleue – Rigel

A blue star – Rigel

Le spectre apparaît répété plusieurs fois et assez sombre. Il faut pousser le temps d'exposition et l'étoile apparaît comme surexposée. Le spectre le plus proche de l'étoile, dit de



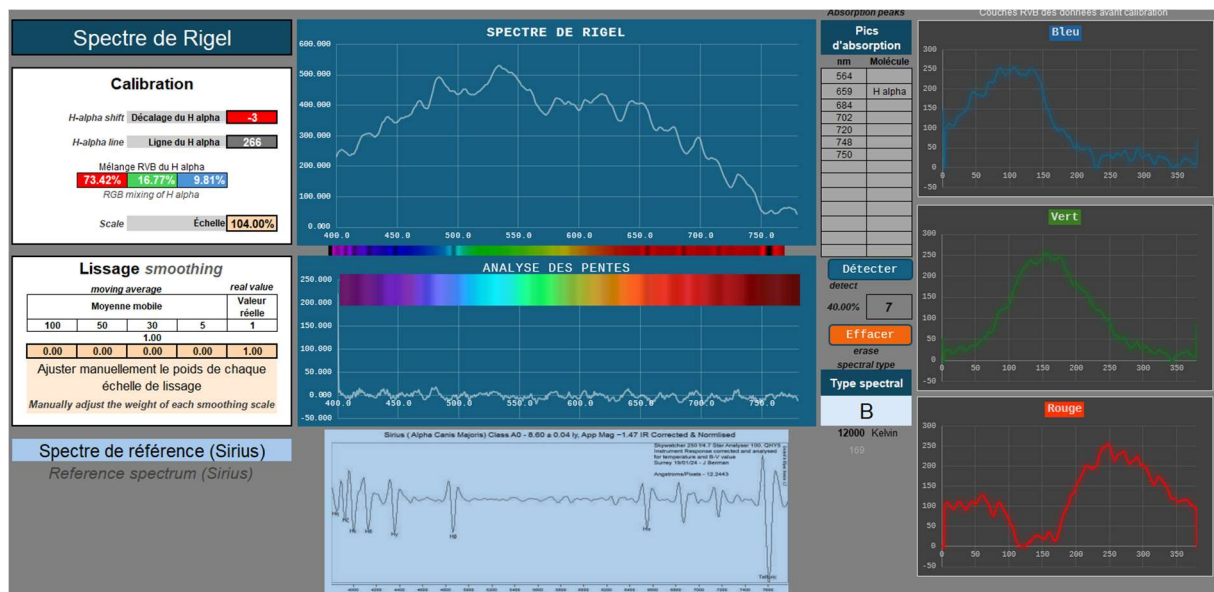
« premier ordre » est plus lumineux et net. C'est celui-là que je vais utiliser.

The spectrum appears repeated several times and is quite dark. The exposure time must be increased, and the star appears overexposed. The spectrum closest to the star, called the "first-order" spectrum, is brighter and sharper. That's the one I'm going to use.

(Cf. 1-Spectre_Rigel.xlsm)

L'apparition sur le graphique de créneaux un peu plus délimité oblige à affiner la méthode de détection des pics d'absorption. Le seuil de détection est paramétrable au moyen d'un seuil ici réglé à 40%. Avec cette valeur 7 pics potentiels sont détectés.

The appearance of slightly more defined segments on the graph necessitates a refinement of the method for detecting absorption peaks. The detection threshold can be set using a value here of 40%. With this value, 7 potential peaks are detected.



La calibration est faite de manière à ce que la longueur d'onde du H alpha soit identifié (ici -3 et 104% pour l'échelle).

The calibration is performed so that the wavelength of H-alpha is identified (here -3 and 104% for the scale). The estimated temperature is slightly too high, 12,000 degrees instead of 10,000. estimée est un peu trop chaude, 12 000 degrés au lieu de 10 000.

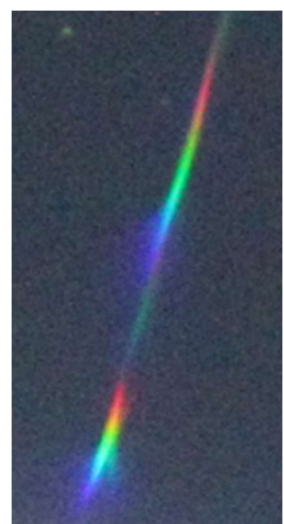
Une étoile blanche – Sirius

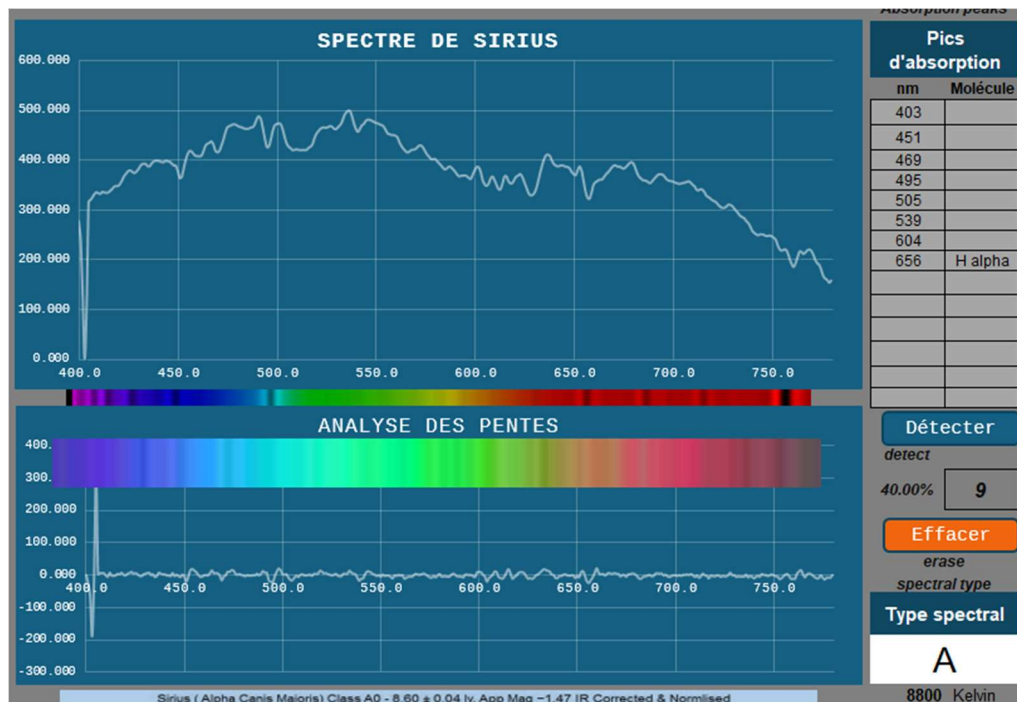
A white star – Sirius

Sirius est très lumineuse, et son spectre est spectaculaire ! La luminosité est également plus homogène.

Sirius is very bright, and its spectrum is spectacular! The brightness is also more uniform.

(Cf. 2-Spectre_Sirius.xlsm)





Là encore, seul le H Alpha est détecté. Cette fois la température estimée est un peu trop froide (8800 degrés au lieu de 9800). Il s'en faut de peu pour que d'autres pics soient détectés, mais si on ajuste un peu la calibration pour détecter un autre pic, le premier est perdu. Notre spectre n'est peut-être pas sur une échelle de longueur d'onde absolument linéaire, ce qui nous complique la tâche.

Again, only H-alpha is detected. This time the estimated temperature is a bit too low (8800 degrees instead of 9800). It's close to detecting other peaks, but if we slightly adjust the calibration to detect another peak, the first one is lost. Our spectrum may not be on a perfectly linear wavelength scale, which complicates our task.

Une étoile rouge – Aldebaran

A red star – Aldebaran

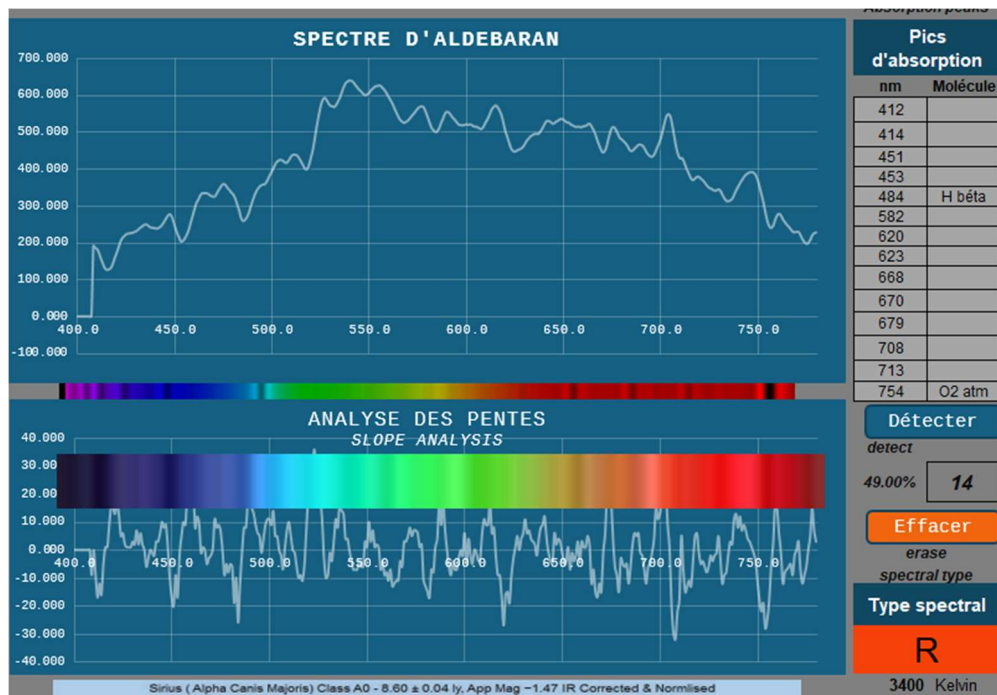
Pour Aldebaran, d'emblée la partie bleue du spectre apparaît assez sombre, confirmant que c'est une étoile rouge :

(Cf. 3-Spectre_Aldebaran.xlsm)

C'est avec cette étoile que nous obtenons le meilleur résultat, aussi bien pour la détection des pics d'absorption que de l'estimation de la température.

For Aldebaran, the blue part of the spectrum immediately appears quite dark, confirming that it is a red star: It is with this star that we obtain the best result, both for the detection of absorption peaks and for temperature estimation.





Le profil général du spectre est cohérent : sa surface moyenne est plus vers la gauche de l'axe des longueurs d'ondes que celle de Rigel.

The overall profile of the spectrum is consistent: its average surface is further to the left of the wavelength axis than that of Rigel.

5. Spectres avec le Star Analyser 200

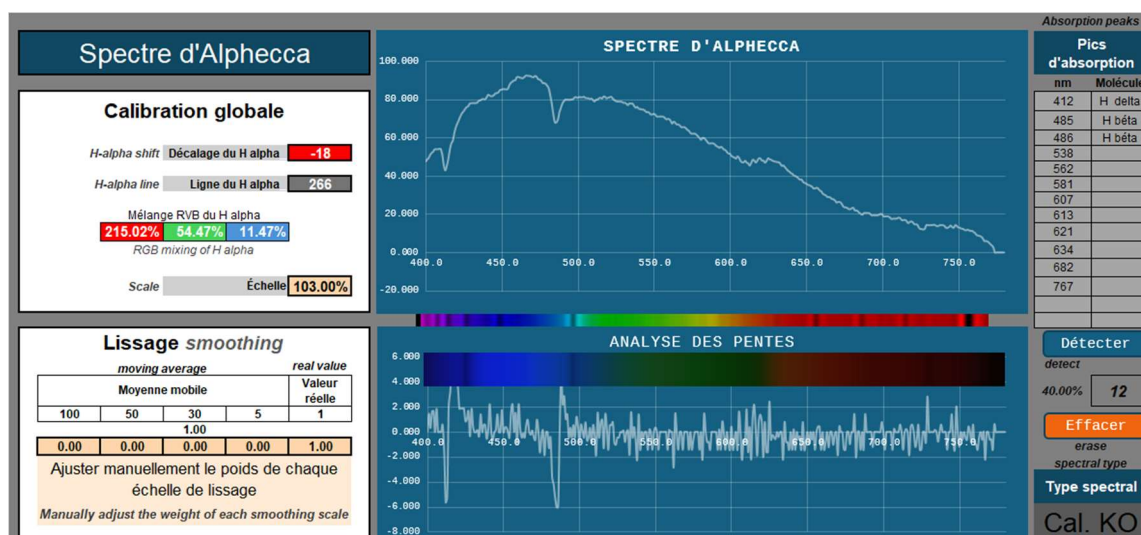
Spectra with the Star Analyser 200

Un collègue astronome amateur s'est lui aussi mis à analyser les étoiles et a eu la gentillesse de m'envoyer le spectre de l'étoile Alphecca réalisé avec une Star Analyser 200. Un grand merci à Hugues Meunier, animateur de la page Facebook « Astrolunette » pour ce partage.

A fellow amateur astronomer has also taken up star analysis and kindly sent me the spectrum of the star Alphecca, obtained with a Star Analyser 200. Many thanks to Hugues Meunier, administrator of the Facebook page "Astrolunette," for sharing this.

Cf. 1-Spectre_Alphecca, le spectre obtenu est plus précis, les pics d'absorption plus évidents :

The resulting spectrum is more precise, with more evident absorption peaks.

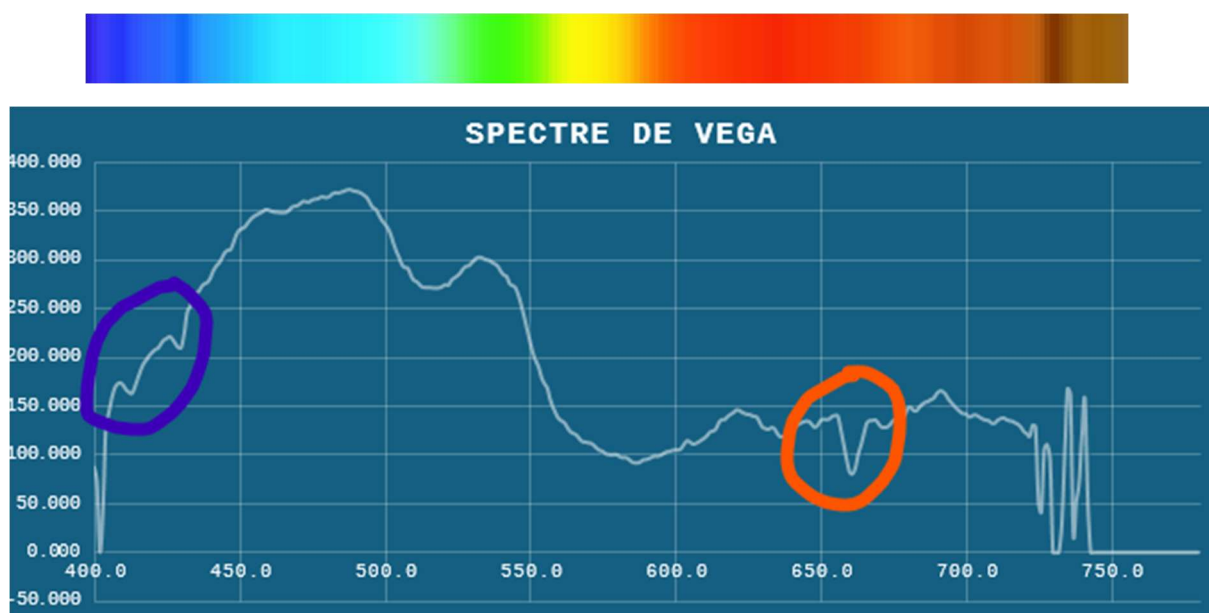


La détection du type spectral ne fonctionne pas, mon calcul de barycentre est très dépendant de la calibration des niveaux RGB. Ce sera là un travail à poursuivre : tenir compte de la sensibilité du capteur qui n'est pas le même que ceux utilisés précédemment.

Spectral type detection isn't working; my center of gravity calculation is highly dependent on RGB level calibration. This will be an area for further investigation: taking into account the sensor's sensitivity, which differs from those used previously.

Avec un spectre de Vega présenté dans le mode d'emploi du Star Analyser, on obtient un spectre encore trop imprécis. La raie H Alpha est bien visible et détectable, les autres raies un peu faibles :

Using the spectrum of Vega presented in the Star Analyzer's user manual, we obtain a spectrum that is still too imprecise. The H-alpha line is clearly visible and detectable, but the other lines are somewhat weak.



Critique des résultats
Critique of the results.

Nous avons progressé avec des moyens très simples et accessibles à tous, depuis une première observation du Soleil grâce à un arc-en-ciel, jusqu'aux premières détections de pics d'absorption avec un réseau bon marché.

Nous sommes cependant loin d'avoir atteint la précision et la complétude des résultats nécessaires à la caractérisation fine des mécanismes internes aux étoiles. Nos résultats sont du même ordre que ce que nous avons pu caractériser pour les étoiles des amas, sauf qu'ici nous arrivons à le faire pour des étoiles individualisées.

We have made progress using very simple and accessible methods, from the first observation of the Sun using a rainbow to the first detections of absorption peaks with an inexpensive grating. However, we are far from achieving the precision and completeness of results necessary for a detailed characterization of the internal mechanisms of stars. Our results are of the same order as what we were able to characterize for stars in clusters, except that here we are able to do so for individual stars.

6. Analyse d'une étoile variable céphéide

Analysis of a Cepheid variable star

Dans l'histoire des sciences, l'étude des étoiles de type Céphéide a eu une importance considérable.

C'est à une femme, Henrietta Swan Leavitt, que l'on doit ce patient travail de mesure à partir de 300 plaques photographiques en verre. Elle publia ses travaux en 1908. Sur cette base de mesures complétée de mesures dans le rouge (le fameux "redshift"), Edwin Hubble confirma en 1929 la théorie selon laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse qui dépend de leur distance. Le jésuite Georges Lemaître avait prédit cette expansion en 1927 et en 1949 sa théorie a été nommée ironiquement "big bang". C'est le nom qui est resté.

Mais en quoi cette étoile d'apparence si banale est-elle à l'origine de la confirmation de l'expansion de l'Univers ?

Tout simplement car sa luminosité varie périodiquement en fonction de sa masse. En mesurant la période de cette variation, on en déduit sa masse grâce à des paramètres établis expérimentalement par Henrietta Swan Leavitt. En mesurant d'autres étoiles du même type, on en déduit précisément leur distance, car leur luminosité mesurée ne dépend que de leur distance et nom de leur masse qui est fixe pour une période donnée. En mesurant ce type d'étoile dans des galaxies, on peut en calculer leur distance, complétée de leur vitesse, grâce à la mesure du « redshift ».

Henrietta Swan Leavitt est décédée en 1921 et en 1926 on songea à lui donner le prix Nobel, mais c'était trop tard, le prix ne pouvant être décerné que de son vivant.

Il est possible de refaire par soi-même les observations d'Henrietta Swan Leavitt avec un petit télescope. Pour garantir des mesures fiables, il nous faut beaucoup de méthode et de rigueur, calibrer avec une étoile de référence, et ne pas compter son temps.

In the history of science, the study of Cepheid variable stars has been of considerable importance.

This painstaking work of measurement, using 300 glass photographic plates, is owed to a woman, Henrietta Swan Leavitt. She published her work in 1908. Based on these measurements, supplemented by measurements in the red (the famous "redshift"), Edwin Hubble confirmed in 1929 the theory that galaxies are moving away from each other at a speed that depends on their distance. The Jesuit Georges Lemaître had predicted this expansion in 1927, and in 1949 his theory was ironically dubbed the "Big Bang." That name stuck.

But how did this seemingly ordinary star lead to the confirmation of the expansion of the Universe?

Quite simply, because its luminosity varies periodically according to its mass. By measuring the period of this variation, we can deduce its mass using parameters established experimentally by Henrietta Swan-Leavitt. By measuring other stars of the same type, we can precisely deduce their distance, since their measured luminosity depends only on their distance and not on their mass, which is fixed for a given period. By measuring this type of star in galaxies, we can calculate their distance, along with their velocity, thanks to the measurement of the "redshift."

Henrietta Swan-Leavitt died in 1921, and in 1926, there was talk of awarding her the Nobel Prize, but it was too late, as the prize could only be awarded during her lifetime. It is possible to replicate Henrietta Swan-Leavitt's observations yourself with a small telescope. To guarantee reliable measurements, we need a great deal of method and rigor, calibration with a reference star, and plenty of time.

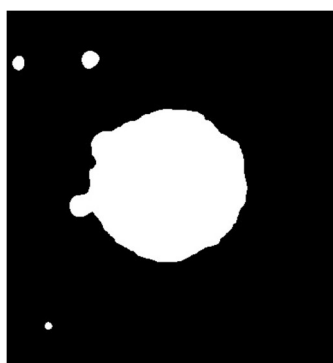
Mesures

Measures

Nous allons reprendre la méthodologie utilisée pour l'analyse des amas d'étoiles mais en essayant de l'améliorer. Pour limiter la marge d'erreur, nous allons travailler à huit fois la résolution native du Seestar. Je ne reviens pas sur ce point ni sur la fonction de seuillage, déjà décrites dans le livret un.

Au lieu de prendre la mesure de deux diamètres de l'étoile et d'en calculer la surface, nous allons mesurer directement la surface :

We will use the same methodology as for star cluster analysis, but with improvements. To minimize the margin of error, we will work at eight times the native resolution of the Seestar. I won't go over this point or the thresholding function again, as they were already described in booklet one. Instead of measuring two diameters of the star and calculating its area, we will directly measure the area:



Dans Photoshop, la fenêtre « Journal des mesures » nous donne directement cette surface :

In Photoshop, the "Measurement Log" window directly gives us this surface area:

Zone	Périmètre	Circularité	Hauteur	Largeur
26866.000...	823.251875	0.498135	326.000000	275.000000

Dans le tableau Excel (Cf. 10-Sagittae.xlsx), il y a pour chaque date de mesure, deux lignes, une pour saisir directement la surface, et une pour ceux qui voudraient continuer d'utiliser les diamètres :

In the Excel spreadsheet (see 10-Sagittae.xlsx), for each measurement date, there are two rows: one to directly enter the surface area, and one for those who would like to continue using the diameters.

V		pixels carré	464000.6863
largeur C	Hauteur C	Surface C	Correction
169	174	23100.31	0.050
		21331.00	0.046

Les cellules à saisir sont sur fond vert clair (et bleu clair pour les données de la couche bleue).

Il nous faudra faire ces mesures plusieurs nuits consécutives, ce qui n'est pas toujours facile avec la météo. A cause de cela, deux valeurs ont été extrapolées dans le tableau.

The cells to be entered are on a light green background (and light blue for the data in the blue layer). We will need to take these measurements over several consecutive nights, which isn't always easy given the weather. Because of this, two values have been extrapolated in the table.

Impact des conditions atmosphériques

Impact of atmospheric conditions

En mesurant la luminosité d'une étoile proche, nous introduirons un facteur de correction pour compenser la variation de luminosité qui serait dû aux conditions atmosphérique.

By measuring the brightness of a nearby star, we will introduce a correction factor to compensate for the variation in brightness that would be due to atmospheric conditions.

Impact atmosphérique

11 Sagittae Calibration des surfaces

	Surface B	Facteur calibration	Correction	mB	Écart	Surface B	Facteur calibration
20251012	26290	1.0000	0.057	3.12	0.00	24118	1.0000
20251013	25661	1.0245	0.055	3.14	0.03	23136	1.0424

Ici nous avons choisi l'étoile 11 Sagittae car elle est dans le même champ que 10 Sagittae et à peu près de même taille.

Sa surface est arbitrairement associée à la valeur 1 pour notre facteur de calibration.

Nous constatons que le 13 octobre, la surface de l'étoile paraît un peu plus petite, alors que cette étoile n'est pas variable. Ceci est dû à l'effet de l'atmosphère qui, selon les conditions météorologiques, absorbe plus ou moins la lumière. Nous compenserons donc ce soir-là les mesures de 10 Sagittae de 4,24% en multipliant les surfaces par 1,0424.

Nous pouvons mesurer dans le bleu et le vert ces variations de surfaces dues à l'atmosphère, afin de constater qu'elles les impactent de manière différenciée, ce qui se traduit par une variation du mB-mV :

Here we chose the star 11 Sagittae because it is in the same field of view as 10 Sagittae and is roughly the same size. Its surface area is arbitrarily assigned a value of 1 for our calibration factor.

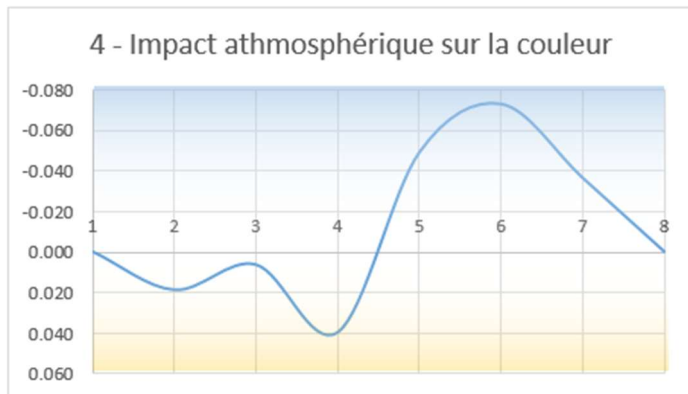
We observe that on October 13th, the star's surface area appears slightly smaller, even though this star is not variable. This is due to the effect of the atmosphere, which absorbs more or less light depending on weather conditions. Therefore, on that evening, we compensated for the 4.24% difference in 10 Sagittae's surface area by multiplying the measurements by 1.0424.

We can measure these atmospheric surface area variations in the blue and green bands to observe that they affect the stars differently, resulting in a variation in mB-mV.

Correction	mV	Écart	mB-mV	Écart
0.052	3.21	0.00	-0.09	0.00
0.050	3.26	0.05	-0.11	0.02
0.047	3.32	0.11	-0.10	0.01
0.048	3.31	0.10	-0.13	0.04
0.075	2.81	-0.40	-0.04	-0.05
0.073	2.84	-0.37	-0.02	-0.07

Nous pouvons en tirer un graphique :

We can create a graph from this:



Ces mesures d'une étoile de référence doivent être faites chaque soir où nous mesurons la luminosité de la céphéide et à la même heure. Le tableau de correction obtenu ne pourra pas être réutilisé pour d'autres observations ultérieures.

These measurements of a reference star must be taken every night we measure the Cepheid's brightness, and at the same time each night. The resulting correction table cannot be reused for subsequent observations.

Potentiel impact de la diffusion du signal sur le capteur

Potential impact of signal diffusion on the sensor

Nous avons tous constaté qu'en augmentant le temps de pause, une étoile paraît plus grosse. C'est pourquoi nous devons absolument prendre toujours le même temps de pause pour nos mesures.

Néanmoins, il nous faut nous assurer que cette augmentation apparente de taille due à la diffusion du signal photoélectrique sur le capteur, est bien proportionnelle au temps de pause et à la taille de l'étoile. Le risque serait que l'impact du temps de pause soit légèrement différent entre l'étoile mesurée, et l'étoile de référence, ce qui fausserait le facteur de correction atmosphérique.

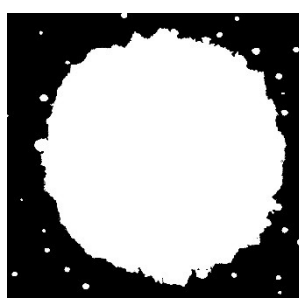
Prenons une étoile très lumineuse, Vega, avec le temps de pause habituels pour nos mesures (2 minutes), et un temps beaucoup plus long :

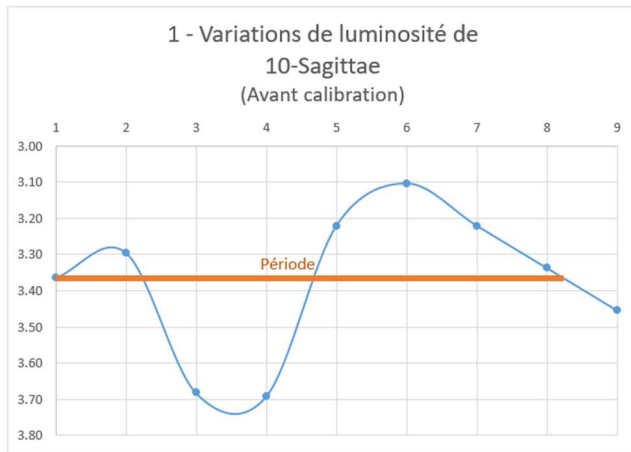
We have all observed that increasing the exposure time makes a star appear larger. This is why we absolutely must always use the same exposure time for our measurements. However, we must ensure that this apparent increase in size, due to the scattering of the photoelectric signal on the sensor, is indeed proportional to the exposure time and the size of the star. The risk would be that the impact of the exposure time is slightly different between the measured star and the reference star, which would skew the atmospheric correction factor. Let's take a very bright star, Vega, with the usual exposure time for our measurements (2 minutes), and a much longer exposure time:

Deux minutes



31 minutes



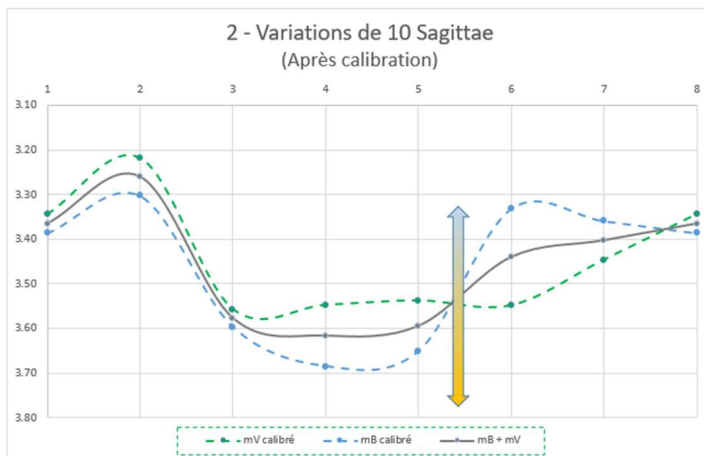


La période est de 8,26 jours, avec une incertitude liée à notre extrapolation.

The period is 8.26 days, with an uncertainty related to our extrapolation.

Après correction, le graphique ne change pas totalement mais la forte amplitude du sixième jour est plus modérée :

After correction, the graph does not change completely, but the strong amplitude of the sixth day is more moderate:



Le graphique a été établi dans le bleu, le vert et pour la moyenne des deux.

La luminosité de l'étoile est bien variable, mais également l'écart entre mB et mV. Autrement dit, sa couleur oscille également, mais de manière légèrement décalée à la variation de luminosité.

Elle est jaune le jour deux et légèrement bleue, donc plus chaude, le jour 6.

Un graphique des mB-mV nous montre ces variations de couleurs :

The graph was created using blue, green, and the average of the two. The star's brightness is indeed variable, as is the difference between mB and mV. In other words, its color also oscillates, but slightly delayed by the variation in brightness.

It is yellow on day two and slightly blue, therefore warmer, on day six. A graph of mB-mV shows us these color variations:



Calcul de la magnitude absolue

Calculation of absolute magnitude

La loi de Leavitt nous indique une relation entre la période de la céphéide et sa magnitude absolue :

Leavitt's law indicates a relationship between the period of the Cepheid variable and its absolute magnitude:

$$M (\text{Magnitude}) = -2,78 * \text{Log} (P) - 1,35$$

$$M = -2,78 * \text{Log} (8,26) - 1,35$$

$$M = -3,90$$

La magnitude absolue de la céphéide étant de 3,845, notre marge d'erreur est de 1,4 %, ce qui est pour nous un très bon résultat.

Since the absolute magnitude of the Cepheid is 3.845, our margin of error is 1.4%, which is a very good result for us.

Discussion du résultat

Discussion of the result

La synchronisation des phases de la variation de la couleur de la céphéide avec celle de l'impact atmosphérique est suspecte. Une partie de la variation de couleur de la céphéide est peut-être dû à une sous-estimation de l'impact atmosphérique.

The synchronization of the phases of the Cepheid's color change with that of the atmospheric impact is suspicious. Part of the Cepheid's color change may be due to an underestimation of the atmospheric impact.

Après coup on peut chercher des données météorologiques :

Afterwards, we can look for meteorological data:

Conditions météorologiques

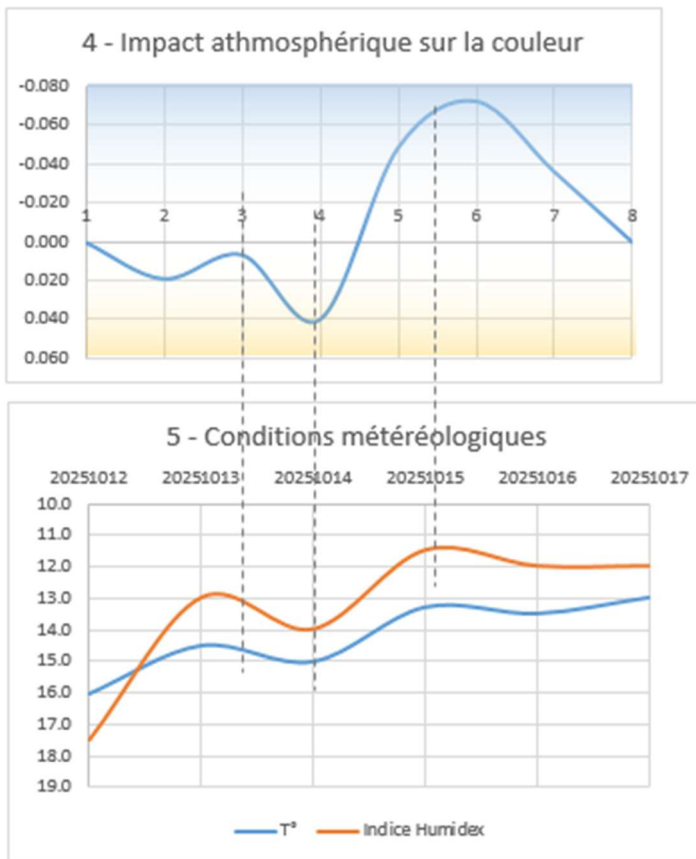
	T°	Indice Humidex
20251012	16.0	17.5
20251013	14.5	13.0
20251014	15.0	14.0
20251015	13.3	11.5
20251016	13.5	12.0
20251017	13.0	12.0

Indice Humidex = effet combiné de la chaleur et de l'humidité.

Humidex index = combined effect of heat and humidity.

Si on met ces données en regard des variations de couleur dues à l'atmosphère :

If we compare this data with the color variations due to the atmosphere:



Il semble y avoir une corrélation entre la baisse des températures et d'Humidex avec un surdécalage du spectre dans le bleu (attention, l'échelle de l'axe des températures est inversée).

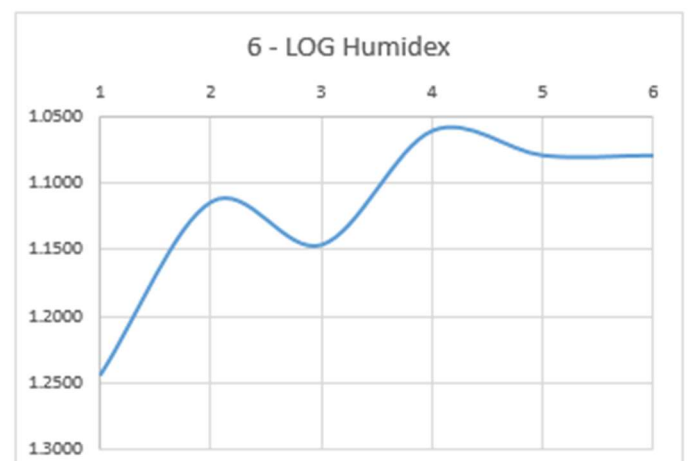
Cette corrélation est très imparfaite, elle concerne d'avantage la phase que les valeurs en elles-mêmes.

Cette relation n'est pas linéaire, le 15 octobre, l'Humidex est un peu supérieur à la valeur du 13, mais le décalage vers le bleu est plus sensible.

There appears to be a correlation between the drop in temperature and humidex and an over-shift of the spectrum towards the blue end (note that the temperature axis scale is reversed). This correlation is very imperfect; it relates more to the phase than to the values themselves. This relationship is not linear. On October 15th, the humidex was slightly higher than on the 13th, but the shift towards the blue end was more pronounced.

Une échelle logarithmique donne une corrélation plus satisfaisante :

A logarithmic scale provides a more satisfactory correlation:



Il reste à établir une relation plus sûre entre les conditions atmosphériques et le décalage vers le bleu de l'étoile de référence.

Il reste à établir une relation plus sûre entre les conditions atmosphériques et le décalage vers le bleu de l'étoile de référence.

Autres étoiles variables

Other variable stars

Concernant les étoiles variant à cause de transits d'exoplanètes, il nous faudra mesurer des variations infimes de luminosité. Notre méthode simplifiée utilisant un seuillage ne pourra s'y appliquer, et il faudra mesurer des variations de luminosité de chaque pixel de l'image de l'étoile.

La précision des mesures devra être bien supérieure, les variations de magnitude étant de l'ordre de 25 à 55 millièmes de magnitude.

Candidates potentielles (information communiquées par Jean-Claude Mario) :

WASP-10b

WASP-80b

HATP 20b

Il semble illusoire d'obtenir un résultat probant avec un télescope de moins de 250 mm de diamètre et cela sort du cadre que nous nous sommes fixé.

Regarding stars whose brightness varies due to exoplanet transits, we will need to measure minute variations in luminosity. Our simplified method using thresholding will not be applicable, and we will need to measure the luminosity variations of each pixel in the star's image. The precision of the measurements will need to be much greater, as the magnitude variations are on the order of 25 to 55 thousandths of a magnitude. Potential candidates (information provided by Jean-Claude Mario): WASP-10b WASP-80b HATP 20b It seems unrealistic to obtain conclusive results with a telescope smaller than 250 mm in diameter, and this falls outside the scope of our objectives.

7. Observation d'une étoile à neutron

Observing a neutron star

L'étoile à neutron de M1 (Nébuleuse du Crabe)

The neutron star of M1 (Crab Nebula)

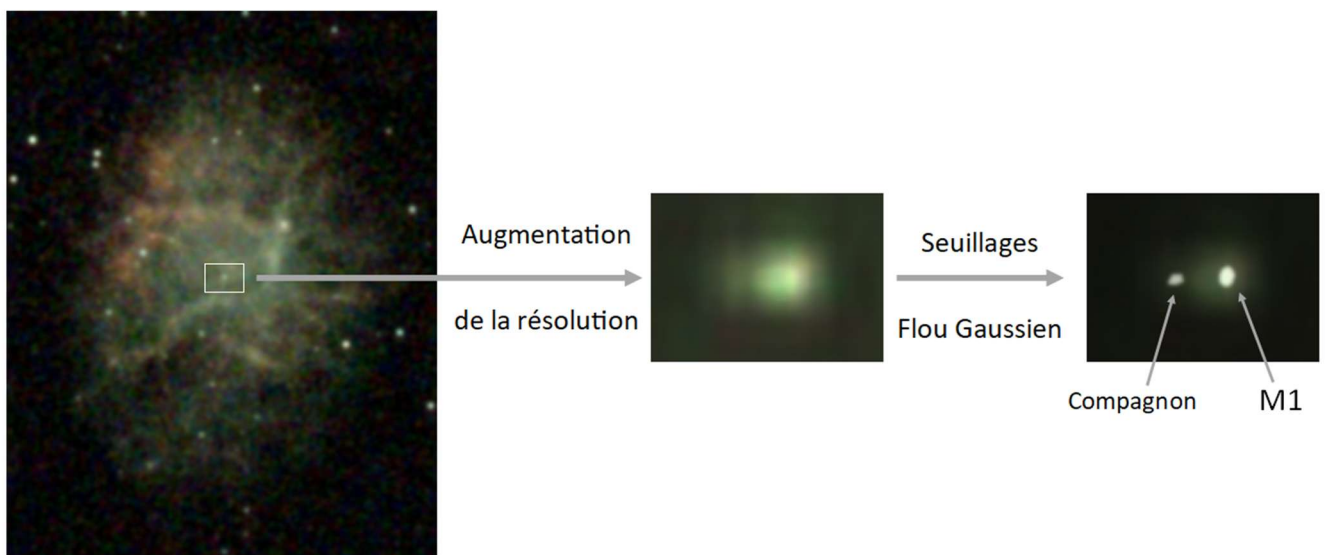
La nébuleuse M1 s'est formée suite à l'explosion d'une Supernova, pour laisser en son centre un reste d'étoile très dense et très petit, composée de neutrons.

Cette étoile à neutron est très petite (20 à 40 km) et peu lumineuse. Pour la détecter il nous faudra cumuler des pauses et ensuite traiter l'image avec plusieurs séries de traitements incluant un seuillage.

The M1 nebula formed following the explosion of a supernova, leaving at its center a very dense and very small stellar remnant composed of neutrons. This neutron star is very small (20 to 40 km) and faint. To detect it, we will need to accumulate exposures and then process the image with several processing steps, including thresholding.

Avec le Seestar S50 nous cumulons une centaine de pauses de 10 secondes :

With the Seestar S50 we accumulated around one hundred 10-second pauses:



Traitements de l'image

Image processing



Après deux cycles de seuillage et flou Gaussien, l'étoile à neutron et son compagnon sont bien séparés.

Nous ne pouvons pas déduire de rapport de masse via les rapports de tailles apparentes, car chaque étoile a eu un niveau de seuillage différencié.

After two cycles of thresholding and Gaussian blurring, the neutron star and its companion are well separated. We cannot deduce mass ratios from apparent size ratios because each star underwent a different level of thresholding.

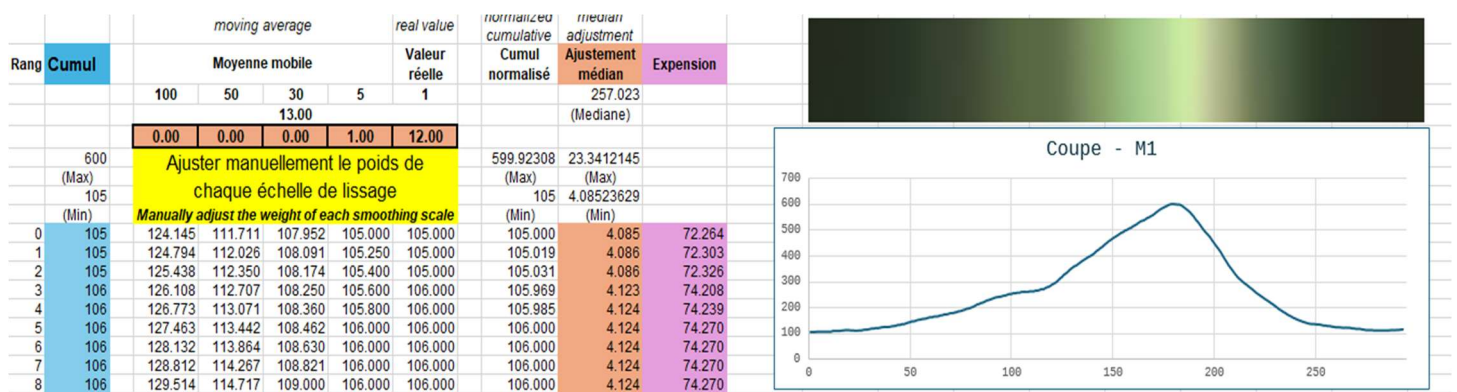
Analyse via un graphique

Analysis via a graph

Nous pourrions également étudier une coupe de l'image et mesurer la luminosité de chaque point comme nous l'avons fait avec les spectres d'étoiles.

Pour cela notre outillage est simplifié et adapté (Cf. Analyse_M1.xlsx) :

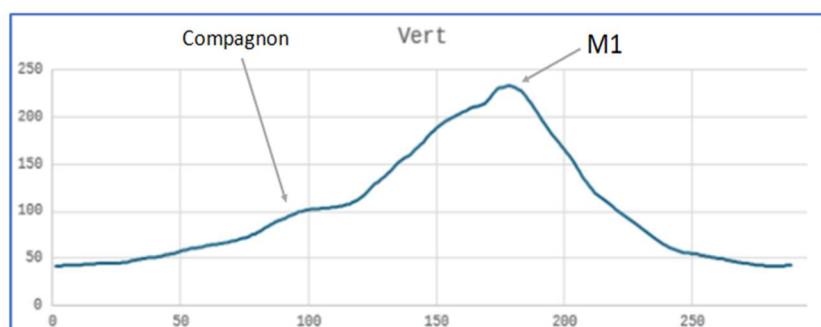
We could also study a cross-section of the image and measure the brightness of each point, as we did with the spectra of stars. For this, our tools are simplified and adapted):



La courbe obtenue ne représente pas la luminosité en fonction de la longueur d'onde, mais la variation de la luminosité en fonction de la distance le long de la coupe.

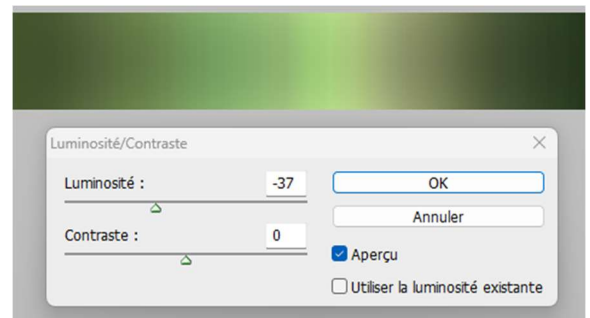
Sur la couche verte de l'image nous observons plus nettement une petite bosse qui correspond au compagnon :

The resulting curve does not represent brightness as a function of wavelength, but rather the variation of brightness as a function of distance along the cross-section. On the green layer of the image, we can more clearly observe a small bump that corresponds to the companion:



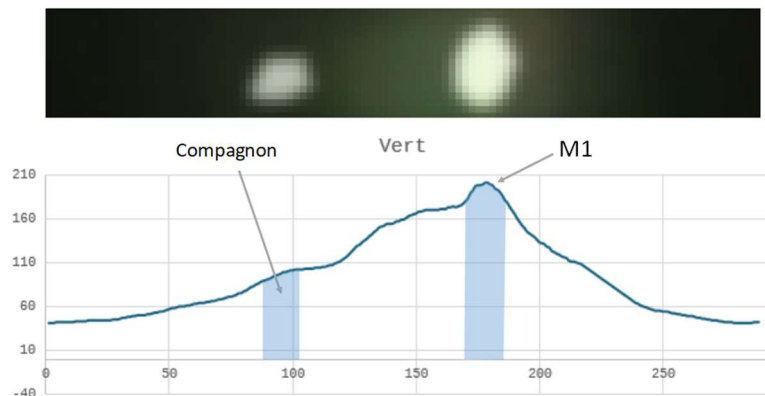
Essayons d'amplifier le signal dans les plages moyennes. Pour cela nous allons compresser la « crête » du signal, comme nous le ferions pour un signal audio :

Let's try to amplify the signal in the mid-range. To do this, we'll compress the signal's "peak," just as we would for an audio signal:



Le résultat est un peu plus probant, avec une délimitation bien nette de M1 (Cf. Analyse_M1b.xlsx) :

The result is somewhat more conclusive, with a very clear delimitation of M1.

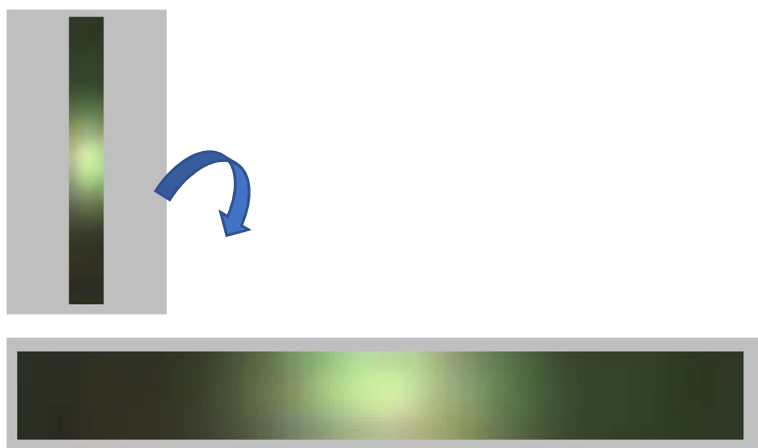


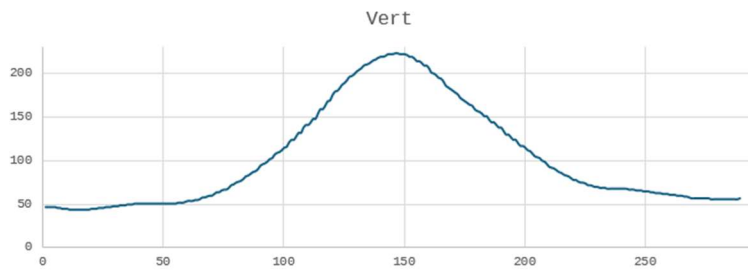
Nous pouvons contrôler le résultat en mettant en vis-à-vis du graphique l'image obtenue par seuillage.

Nous retenons qu'un profil de luminosité dissymétrique d'une étoile pourrait être un facteur général indiquant la présence d'un compagnon, même si celui-ci n'est pas facilement séparable optiquement.

En faisant une coupe à 90 degrés de la précédente, positionnée uniquement sur l'étoile à neutron, nous pourrions vérifier si l'absence de compagnon se traduit par une symétrie (Cf. Analyse_M1c.xlsx) .

We can verify the result by comparing the image obtained by thresholding to the graph. We note that an asymmetrical brightness profile of a star could be a general indicator of the presence of a companion, even if it is not easily optically separable. By taking a 90-degree cross-section of the previous image, focused solely on the neutron star, we could verify whether the absence of a companion results in symmetry.

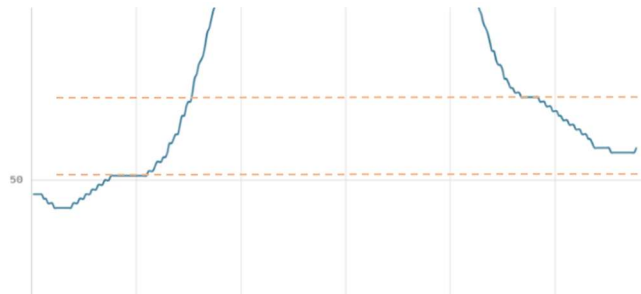




La courbe est quasi symétrique. Il n'y a à priori pas de compagnon en bas et en haut de l'étoile à neutron, dans l'orientation initiale de la photo.

Il y a tout de même un petit pallier décelable à droite (donc initialement en haut). En étirant le graphique, nous pouvons amplifier cela :

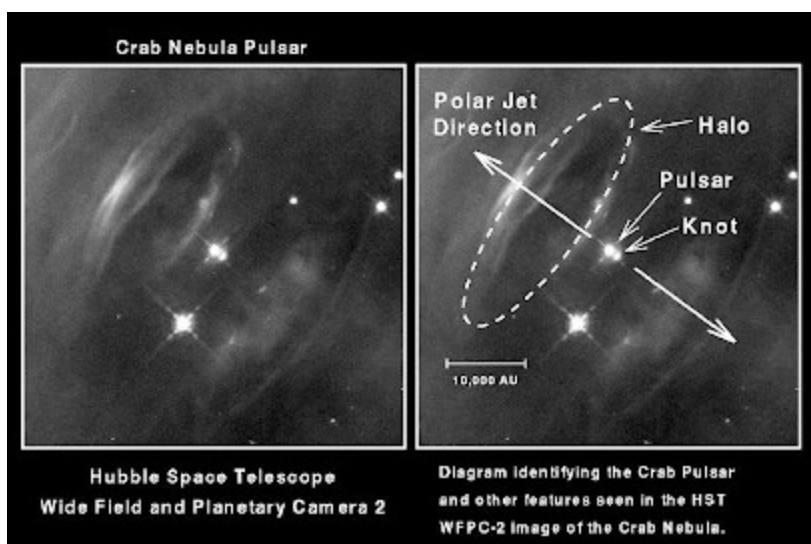
The curve is almost symmetrical. There are no apparent companions at the top or bottom of the neutron star in the initial orientation of the image. However, there is a small plateau detectable on the right (initially at the top). By stretching the graph, we can amplify this:



A ce stade nous ne savons pas si cela signifie quelque chose, du point de vue de la morphologie ou de la physique de l'étoile à neutron.

Nous savons grâce à Hubble que l'étoile à neutron émet un flux de particule à ses pôles. Ce flux s'accompagne de la formation d'un « nœud » ou « knot », visible sous la forme d'une excroissance :

At this stage, we don't know if this means anything, from the point of view of the morphology or the physics of the neutron star. We know from Hubble that the neutron star emits a flux of particles at its poles. This flux is accompanied by the formation of a "knot," visible as a protrusion:



L'irrégularité que nous avons détectée pourrait être liée à ce « nœud », il nous faudra approfondir cette question, idéalement avec un télescope de plus forte résolution.

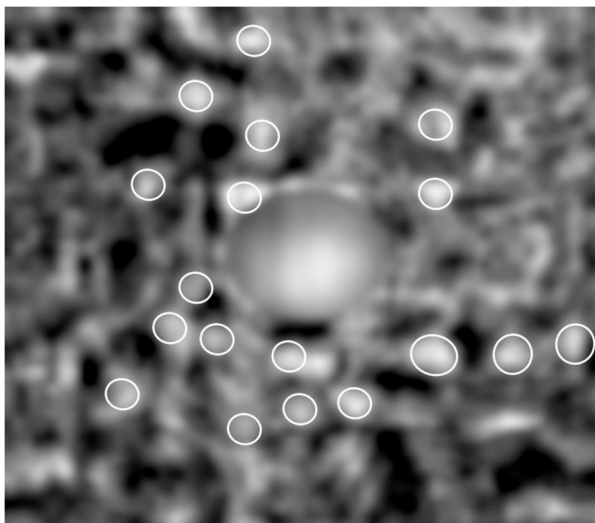
The irregularity we detected could be related to this "knot," we will need to investigate this further, ideally with a higher resolution telescope.

Analyse des interférences

Interference analysis

En accentuant la zone située autour de l'étoile, le centre de l'image étant effacé, on met en évidence des nœuds d'interférences :

By emphasizing the area around the star, with the center of the image erased, interference nodes are highlighted:

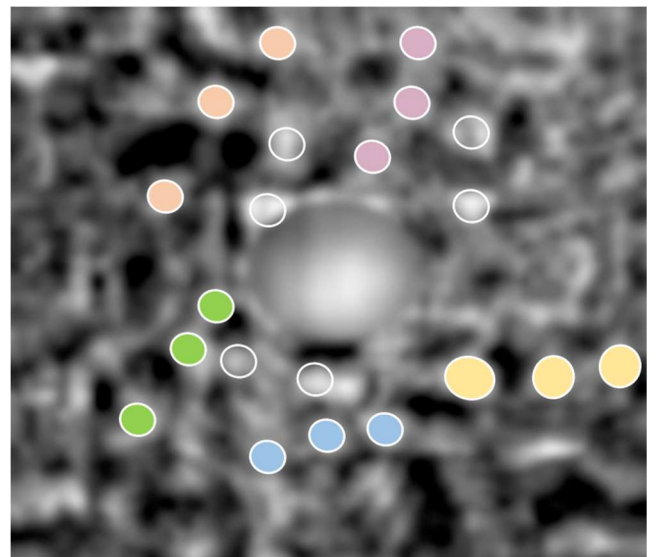


On retrouve une distribution des occurrences très ressemblante à celle trouvée pour Sigma Orionis :

Cela montre également que l'étoile a bien un compagnon.

The distribution of occurrences is very similar to that found for Sigma Orionis:

This also shows that the star does indeed have a companion.



8. Observation solaire

Solar observation

Si nous voulons analyser plus en détail la dynamique interne d'une étoile, la seule étoile accessible pour nous, c'est la plus proche, le soleil. Toutes les photos de ce chapitre et la mesure des rotations ont été réalisées par Jérôme Delaunay avec du matériel très accessible. Comme quoi il est possible de traiter certains sujets avec des moyens modestes.

En utilisant un filtre adapté (attention aux yeux !) nous pouvons très facilement observer et photographier le soleil et ses tâches.

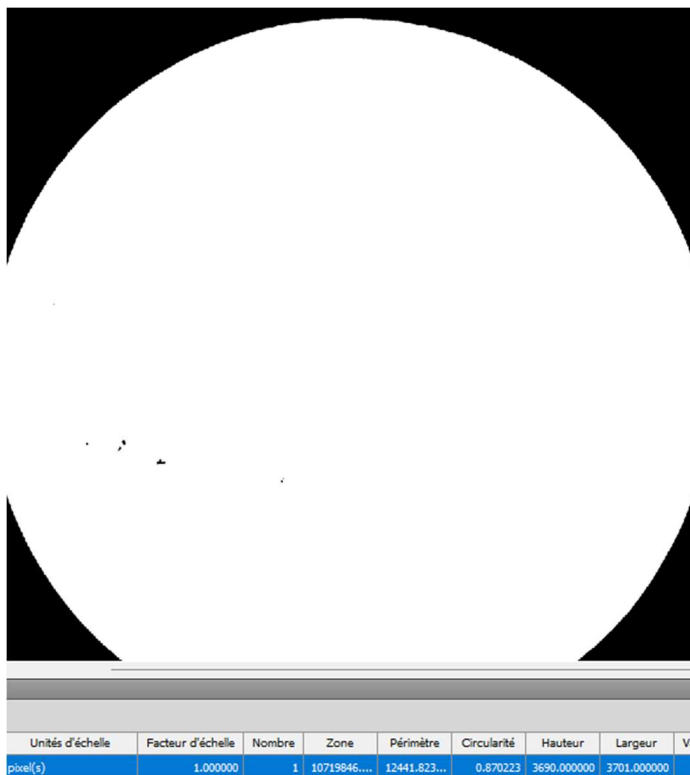
If we want to analyze the internal dynamics of a star in more detail, the only star accessible to us is the closest one: the Sun. All the photos in this chapter and the rotation measurements were taken by Jérôme Delaunay using very affordable equipment. This shows that it's possible to study certain subjects with modest means. By using a suitable filter (be careful with your eyes!), we can very easily observe and photograph the Sun and its sunspots.

Forme du Soleil

Shape of the Sun

Avec notre technique habituelle d'augmentation de la résolution de l'image et de seuillage, nous pouvons mesurer le Soleil :

Using our usual technique of increasing image resolution and thresholding, we can measure the Sun:



3701 pixels de large pour 3690 de haut soit une différence de 11 pixels. Cela représente une différence de 0,298 %.

Tout comme Jupiter, la nature gazeuse d'une étoile combinée à sa rotation fait que le Soleil n'a pas une forme tout à fait sphérique. Il est en effet légèrement aplati par la force centrifuge et à la forme d'un ellipsoïde.

3701 pixels wide by 3690 pixels high, a difference of 11 pixels. This represents a difference of 0.298%. Just like Jupiter, the gaseous nature of a star, combined with its rotation, means that the Sun is not perfectly spherical. It is, in fact, slightly flattened by centrifugal force and has the shape of an ellipsoid.

Anatomie des tâches solaires

Anatomy of sunspots

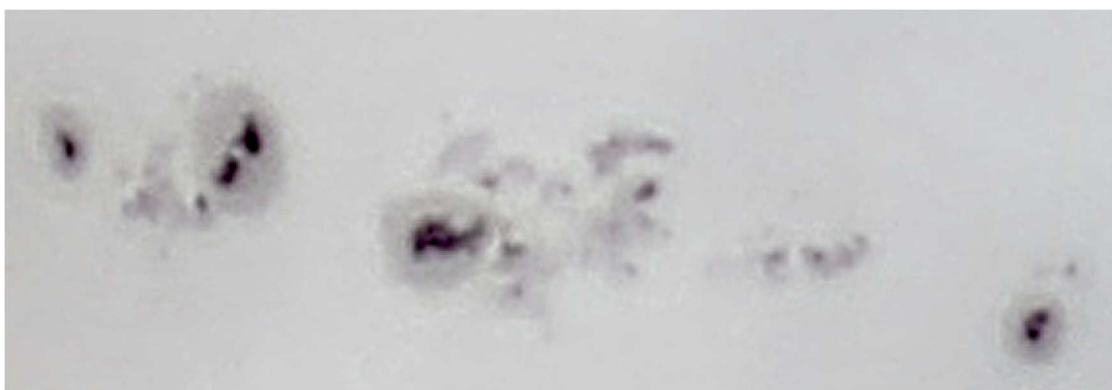
Avec une lunette achromatique 80/400 bon marché, le résultat est déjà très intéressant. Ici 7 photos ont été empilées le 7 décembre 2025 :

With an inexpensive 80/400 achromatic refractor, the result is already very interesting. Here, 7 photos were stacked on December 7, 2025:



En regardant plus en détail, et en améliorant un peu la netteté, la structure des tâches commence à se dévoiler :

Upon closer inspection, and with slightly improved sharpness, the structure of the tasks begins to reveal itself:



Chaque tâche est constituée d'une zone d'ombre et d'une zone de pénombre.

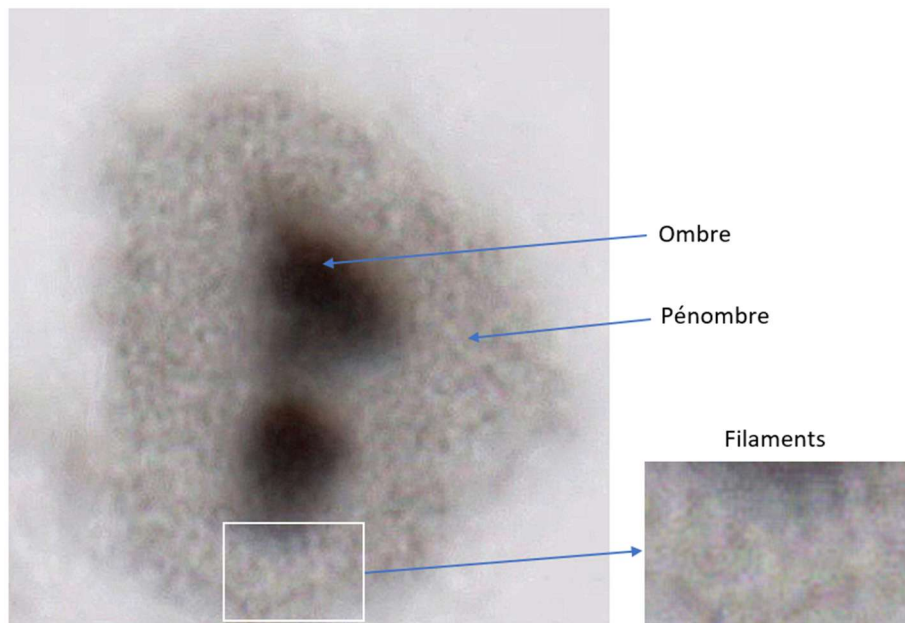
Au télescope Maksutov de 90 mm, formule optique dont le contraste est réputé très bon, cette structure se détaille un peu mieux :

Each spot consists of a shadow and a penumbra. With a 90mm Maksutov telescope, an optical design renowned for its excellent contrast, this structure becomes slightly more detailed:



La tâche 4296 nous permet de mettre en évidence les filaments :

Spot 4296 allows us to highlight the filaments:



Ces tâches sont liées au magnétisme solaire et apparaissent plus fréquemment quand l'intensité solaire augmente. Elles entraînent une augmentation du vent solaire, perçu sous la forme d'aurores boréales (Aurore Boréale du 17 novembre dans la Sarthe) :

These patches are linked to solar magnetism and appear more frequently when solar intensity increases. They lead to an increase in the solar wind, perceived as auroras (Aurora Borealis of November 17 in Sarthe):



Calcul de la rotation solaire

Calculating the solar rotation

La forme du Soleil nous indique qu'il est en rotation. Grâce au déplacement des taches, nous pouvons la mesurer. Photographions le soleil à quelques jours d'intervalle :

The shape of the Sun tells us that it is rotating. Thanks to the movement of sunspots, we can measure this rotation. Let's photograph the Sun a few days apart:

8 novembre

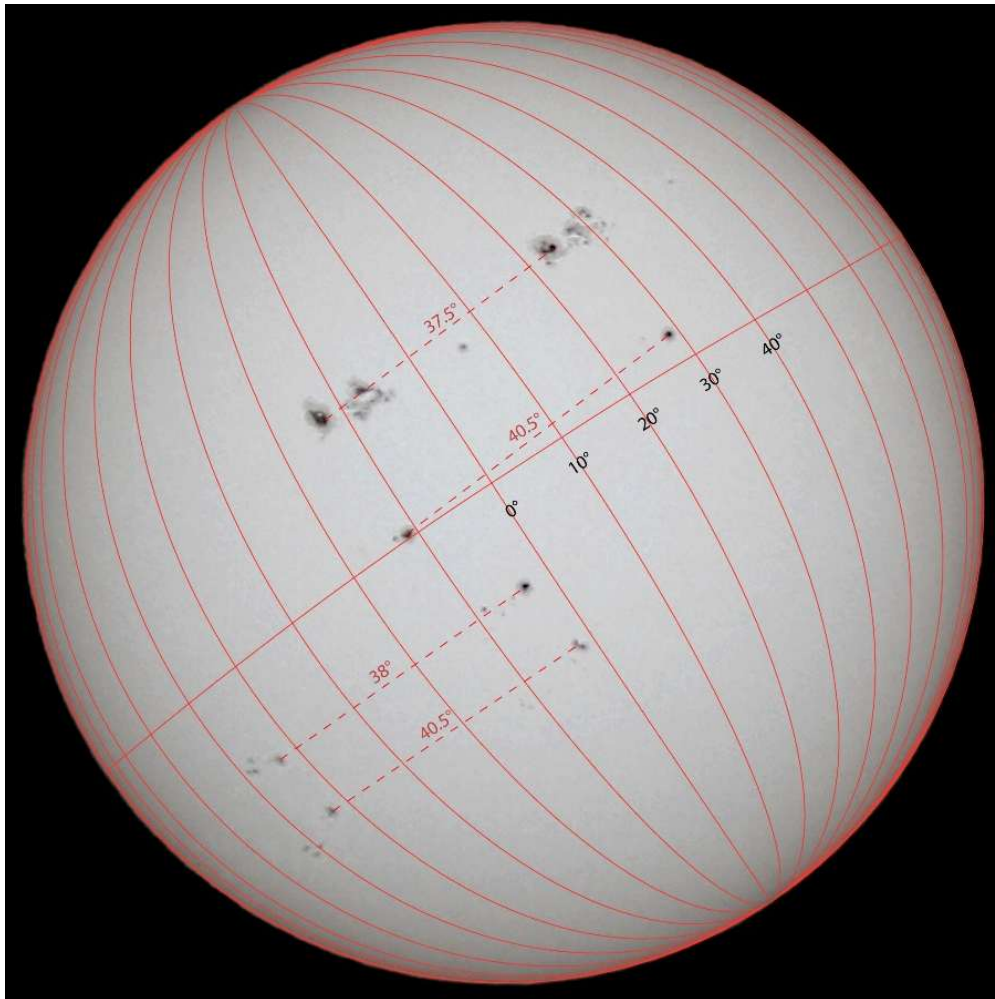


11 novembre



En superposant ces deux clichés à l'aide de claques, nous pouvons mesurer la rotation en degrés :

By superimposing these two images using slaps, we can measure the rotation in degrees:



Intervale de rotation : 72h et 24 minutes soit 72,40 h

Rotation en degré	Vitesse en degré / h	Rotation complète en h	Rotation complète en jours
37.50	0.518	695.04	28.96
40.50	0.559	643.56	26.81
38.00	0.525	685.89	28.58
40.50	0.559	643.56	26.81

Le Soleil étant un fluide, il y a des vitesses de rotation différenciées entre l'équateur et les pôles.

Since the Sun is a fluid, there are different rotation speeds between the equator and the poles.

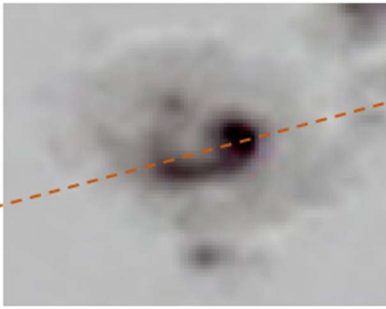
Rotation des tâches

Spot rotation

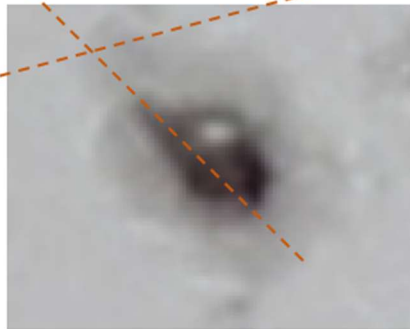
Les tâches ont en fait un double mouvement, elles tournent en même temps que le soleil, et elles tournent également sur elles-mêmes :

The spots actually have a dual movement; they rotate at the same time as the sun, and they also rotate on their own axes:

8 novembre

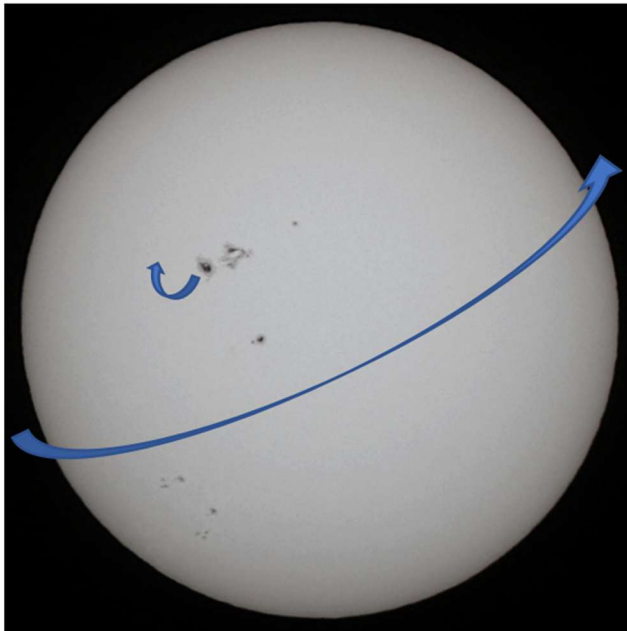


11 novembre



Ce mouvement de rotation des tâches pourrait être dû à deux causes : La rotation du soleil entrainant des mouvements de type cyclones, tout comme la Grande Tâche Rouge de Jupiter, où des perturbations locales.

This rotational movement of the spots could be due to two causes: The rotation of the sun causing cyclone-like movements, just like Jupiter's Great Red Spot, or local disturbances.



Néanmoins, le sens de rotation de la tâche devrait être dans l'ordre inverse s'il était un phénomène de type cyclone. La rotation locale des tâches est donc plutôt due à des phénomènes locaux.

However, the direction of spot rotation should be reversed if it were a cyclone-type phenomenon. Therefore, local spot rotation is more likely due to local phenomena.

Conclusion

Nous nous étions fixé comme objectif d'aller le plus loin possible dans l'analyse individuelle des étoiles, en diversifiant les approches et en étudiant des étoiles « exotiques ».

Nous avons suivi deux fils conducteurs majeurs : la caractérisation des étoiles doubles et l'étude des spectres. Sur ces deux sujets, nous avons atteint, non sans mal, la limite de ce qu'il est possible de faire avec relativement peu de moyens.

Pour aller plus loin sur les étoiles doubles, il faudrait plus de diamètre tout en obtenant des photos d'étoiles très nettes. Un télescope à longue focale de type Ritchey-Chrétien ou Cassegrain serait approprié. Au-delà de 200 mm, le prix est assez prohibitif et leurs longues focales nécessitent une monture au guidage très précis.

Pour obtenir des spectres avec une meilleure résolution et plus exploitables, un spectroscopie de précision et un logiciel dédié incluant un calibrage sur lampes de référence est nécessaire. Sans parler du prix, l'utilisation d'un tel matériel et surtout du logiciel associé est assez complexe.

Ces équipements spécialisés nécessitent d'avoir un réel projet scientifique, des moyens et des compétences pointues. Cela sort du cadre habituel de l'astronome amateur.

Soyons heureux d'avoir pu caractériser à moindre frais des étoiles avec un « cure-dent-scope » !

Nous continuerons de prendre le parti résolument optimiste que nous pouvons faire beaucoup avec peu. Avec des méthodes d'analyse pertinentes, il y a tant à apprendre même avec des photos à la qualité modeste. Bientôt nous poursuivrons nos découvertes avec les nébuleuses et les galaxies.

Our objective was to push the boundaries of individual stellar analysis as far as possible, diversifying our approaches and studying "exotic" stars.

We focused on two main areas: the characterization of binary stars and the study of their spectra. In both these areas, we reached, with considerable difficulty, the limits of what is achievable with relatively limited resources. To delve deeper into binary stars, a larger aperture would be necessary while still obtaining very sharp images of the stars. A long focal length telescope such as a Ritchey-Chrétien or Cassegrain would be suitable. Beyond 200 mm, the price is quite prohibitive, and their long focal lengths require a mount with very precise tracking.

To obtain higher-resolution and more usable spectra, a precision spectroscopy and dedicated software, including calibration using reference lamps, are essential. Aside from the cost, using such equipment, and especially the associated software, is quite complex.

These specialized instruments require a genuine scientific project, resources, and advanced skills. This falls outside the usual scope of amateur astronomy. Let's be glad we were able to characterize stars at minimal cost with a "toothpick-scope"!

We will continue to maintain our resolutely optimistic stance that we can achieve a great deal with very little. With appropriate analytical methods, there is so much to learn, even from photos of modest quality. Soon we will continue our discoveries with nebulae and galaxies.