

Samuel Delaunay – *Astronome amateur*

Je fais de l'astrophysique

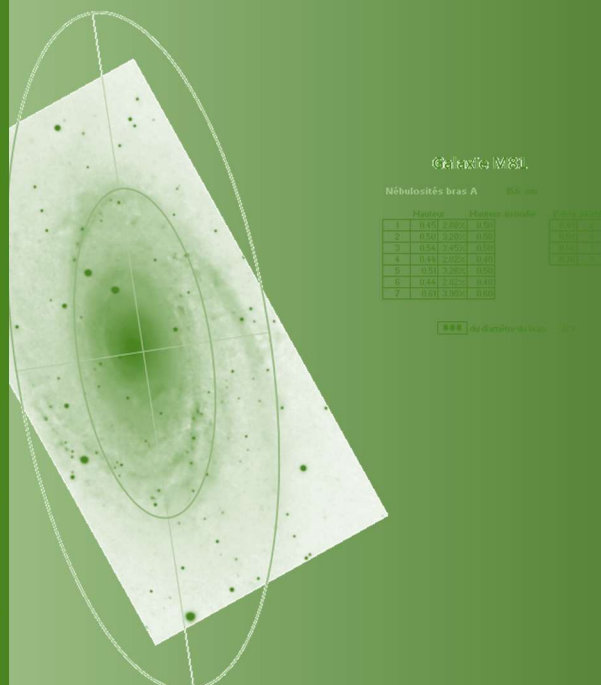
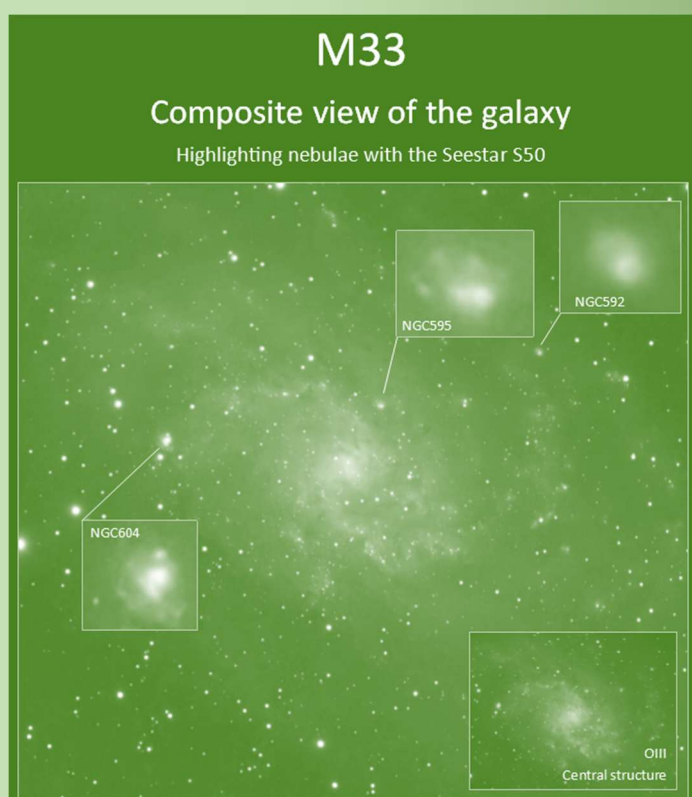
avec mon petit télescope

I do astrophysics with my little telescope

Livret III

Méthodes pratiques d'analyse des galaxies et des nébuleuses

Practical methods for analyzing nebulae and galaxies



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 :

Jérôme Delaunay, qui a réalisé le travail d'observation et d'analyse des amas de galaxies.

Méthodes pratiques d'analyse des nébuleuses et galaxies

Samuel Delaunay

Table des matières

Préambule : Nébuleuses et galaxies, des destins communs	5
1. Prérequis : analyse détaillée de la galaxie M33	6
Technique de prise de vue avec filtre	6
Traitement de l'image	7
Analyse d'une coupe avec un outil Excel	7
Analyse en supprimant les étoiles	9
Structure des bras spiraux	10
Détermination du centre de masse	13
Nébuleuses internes (Zones H II)	15
Répartition des nébuleuses	16
Nébuleuse initiale	19
2. Les processus dynamiques de créations d'étoiles à partir de nuages de gaz	19
3. L'interaction entre ces étoiles et les nuages de gaz (ionisation)	21
Raies d'émission de l'hydrogène	21
Répartition des types d'hydrogène ionisé	22
Niveau d'énergie, ionisation et couleur	23
Géométrie du front d'ionisation	23
Effet du front d'ionisation	29
4. Nuages de poussières sombres	30
5. L'interaction entre les étoiles plus massives et les plus jeunes étoiles (ionisation)	31
6. Le regroupement des galaxies en amas	32
Étude de l'amas de M101	33
Étude de l'amas de la Vierge	37
7. L'évolution des galaxies par fusion entre galaxies	43
8. Distribution fine de la matière dans les bras des galaxies	44
M106	44
M81	46
M31	47
NGC 3628 (Triplet du Lion)	48
M63	49

Synthèse sur la distribution de la matière	49
9. Divers phénomènes remarquables dans des galaxies.....	51
M82 et M106, émission d'hydrogène	51
M87, trou noir central	53
10. La mort des étoiles et la libération d'éléments plus lourds	54
Nébuleuses « planétaires »	54
Oxygène dans les galaxies	58
Conclusion	59

Préambule : Nébuleuses et galaxies, des destins communs

Il peut paraître incongru de mêler dans un même livret l'étude des nébuleuses, constituées de gaz, et des galaxies, constituées d'étoiles. Et pourtant, nous allons observer dans les nébuleuses, des formations d'étoiles, et dans les galaxies, des petites nébuleuses. Les étoiles sont en effet apparues au milieu de nuages de gaz qui se sont condensés.

Les nébuleuses que nous allons observer ne sont pas figées, des processus « dynamiques » s'y déroulent : créations d'étoiles, interactions entre étoiles et gaz, interactions entre étoiles, formation de futurs « Systèmes solaires » ... Autant de phénomènes qui existent aussi au sein des galaxies mais qui seront bien plus faciles à observer dans les nébuleuses qui sont proches de nous.

Concernant les galaxies, nous les étudierons en disséquant leur anatomie interne, en y mesurant la distribution de la matière et en analysant des amas de galaxies, un peu comme nous avons analysé des amas d'étoiles. Le cycle de vie des étoiles nous montrera qu'il y a aussi des zones gazeuses dans ces « superamas d'étoiles ».

Ces donc un récit quasiment chronologique qui s'offre à nous, de la naissance des étoiles dans les nébuleuses, à leur mort dans des galaxies.

Le maître mot de notre démarche sera « observer » : Examiner attentivement quelque chose, quelqu'un afin d'analyser, de comprendre, d'étudier (Larousse).

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/analyse-des-galaxies-et-des-nebuleuses>

Preamble: Nebulae and galaxies, shared destinies

It might seem odd to combine the study of nebulae—composed of gas—and galaxies—composed of stars—in a single booklet. Yet, we will observe star formation within nebulae, and small nebulae within galaxies. Indeed, stars emerged from within gas clouds that condensed.

The nebulae we will observe are not static; "dynamic" processes are at work within them: star creation, interactions between stars and gas, interactions between stars, the formation of future "solar systems," and so on. These phenomena also exist within galaxies but are far easier to observe in the nebulae located closer to us.

As for galaxies, we will study them by dissecting their internal anatomy, measuring the distribution of matter within them, and analyzing galaxy clusters—much as we analyzed star clusters. The stellar life cycle will reveal that gaseous regions exist within these "super-clusters of stars" as well.

Thus, an almost chronological narrative unfolds before us: from the birth of stars in nebulae to their death in galaxies.

The guiding principle of our approach will be "to observe": to examine something or someone closely in order to analyze, understand, or study it (Larousse).

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/analyse-des-galaxies-et-des-nebuleuses>

1. Prérequis : analyse détaillée de la galaxie M33

Prerequisite: detailed analysis of the M33 galaxy

Pour ce troisième livret, la progression sera un peu différente des deux autres : dans le Livret I, une méthode a été affinée étape par étape pour analyser des amas d'étoiles. Dans le livret II, des approches très différentes les unes des autres ont été décrites, sans lien entre elles.

Ici, nous avons pris le parti de mener deux sujets en parallèle, les galaxies et les nébuleuses. Par quoi commencer et avec quelles méthodes ?

Pour y voir plus clair, imaginer des méthodes accessibles et en évaluer l'intérêt et la faisabilité, je suis parti d'une galaxie très accessible techniquement, M33.

Le point de départ de mes livrets d'astrophysique a d'ailleurs été de photographier la galaxie M33 avec et sans filtre UHC et d'en faire une synthèse. En communiquant ce résultat dans divers groupes Facebook dédiés au Seestar S50, il y a eu beaucoup de réactions et de partages et suite à cela un astronome professionnel m'a suggéré d'écrire un mode opératoire. De fil en aiguille, c'est ainsi que sont nés mes Livrets d'Astrophysiques !

For this third booklet, the progression differs slightly from the previous two: Booklet I refined a step-by-step method for analyzing star clusters, while Booklet II described a series of distinct, unrelated approaches.

For this third booklet, I decided to pursue two topics in parallel: galaxies and nebulae. But where should I start, and which methods should I use?

To gain clarity, devise accessible methods, and assess their value and feasibility, I began with a galaxy that is technically very accessible: M33.

In fact, the starting point for my astrophysics booklets was photographing the M33 galaxy—both with and without a UHC filter—and creating a composite image. When I shared the result in various Facebook groups dedicated to the Seestar S50, it generated a great deal of reaction and sharing; subsequently, a professional astronomer suggested I write up a procedural guide. One thing led to another, and that is how my Astrophysics Booklets came to be!

Technique de prise de vue avec filtre

Shooting technique with a filter

Avec l'application du Seestar S50, quand on démarre les prises de vues sur une galaxie, le filtre UHC intégré n'est pas appliqué. Ceci car, habituellement, on veut obtenir toutes les couleurs naturelles des galaxies. C'est aussi révélateur qu'utiliser un tel filtre sur une galaxie n'est pas l'usage habituel.

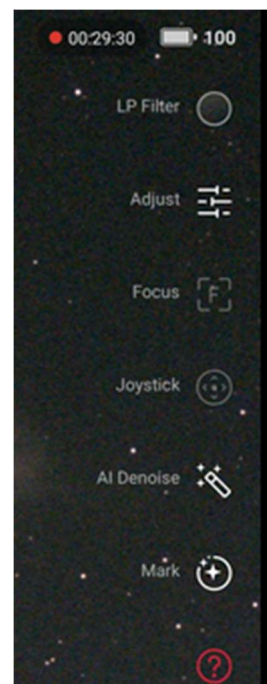
Pour forcer la mise en place du filtre, il faut stopper la prise de vue, cliquer sur le petit cercle « LP Filter » qui symbolise le filtre et redémarrer les prises de vues.

Ce filtre va préférentiellement laisser passer les longueurs d'onde correspondant à l'hydrogène (bande H-alpha) et à l'oxygène (bande OIII).

Ainsi nous aurons potentiellement une mise en évidence de ces gaz au sein de la galaxie.

When using the Seestar S50 app to start imaging a galaxy, the built-in UHC filter is not automatically applied. This is because the goal is typically to capture the galaxy's natural colors; indeed, using such a filter on a galaxy is not standard practice.

To manually engage the filter, you must stop the imaging process, tap the small "LP Filter" circle icon, and then restart the capture. This filter preferentially allows wavelengths corresponding to hydrogen



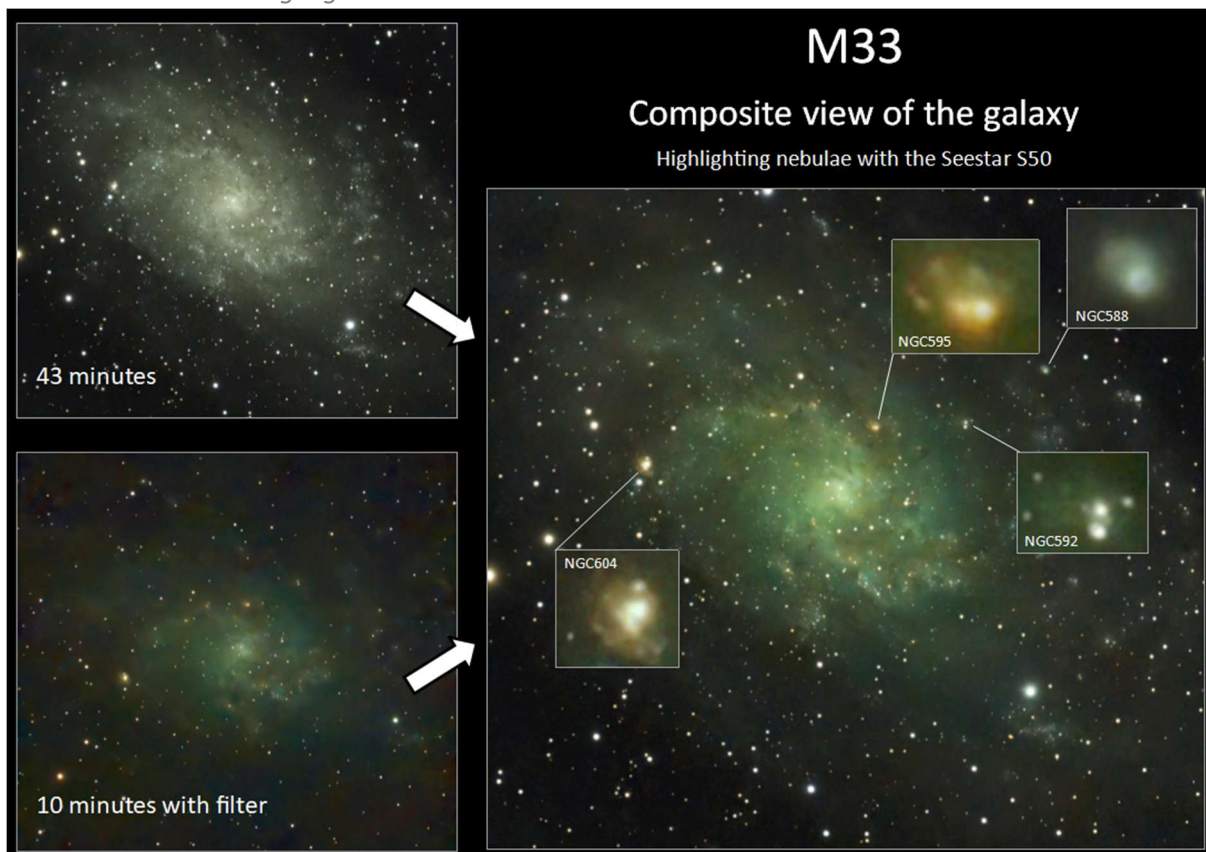
(H-alpha band) and oxygen (OIII band) to pass through. This can potentially reveal the presence of these gases within the galaxy.

Traitement de l'image

Image processing

Je vous partage la publication que j'avais faite pour montrer l'empilement de deux vues de M33 (avec et sans filtre) et la mise en évidence des nébuleuses :

I am sharing the post I made to show the stacking of two views of M33 (with and without a filter) and how the nebulae are highlighted:



Ceci est très facilement obtenu en empilant dans des calques les deux vues dans un logiciel type Photoshop ou GIMP. Nous reviendrons plus en détail sur les nébuleuses, mais nous pouvons déjà dire qu'un premier objectif est atteint : montrer qu'une galaxie comporte également des nébuleuses et que nous pouvons étudier ces objets en parallèle.

This is easily achieved by stacking the two views as layers in software such as Photoshop or GIMP. We will discuss nebulae in greater detail later, but we can already state that an initial objective has been met: demonstrating that a galaxy also contains nebulae and that we can study these objects in parallel.

Analyse d'une coupe avec un outil Excel

Analysis of a cross-section using an Excel tool

Pour aller plus loin, il nous faut, comme pour les étoiles et les spectres d'étoiles, transformer une photographie en données numériques exploitables.

Ma première idée était de réutiliser l'outillage Excel développé pour les spectres et d'y injecter les données d'une fine coupe de cette galaxie.

La technique est exactement la même que pour les spectres d'étoiles (cf. Livret II), on découpe une « bande » de la galaxie et on la transforme en données :

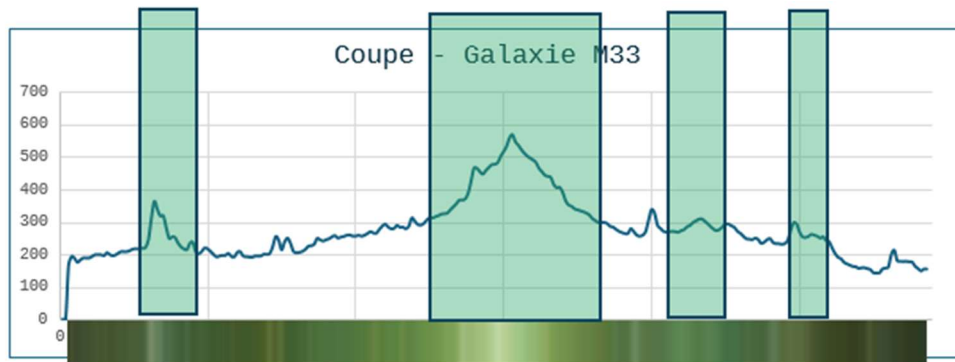
Coupe 5

Analyse_M33-coupe-5.xlsx

This tool is based on one of the early versions of the spectrum analyzer, from before the interface tab had been developed. However, it includes many features, such as color-based analysis and smoothing coefficients:



8



Les raies fines et claires dans la coupe utilisée sont les étoiles, et elles se traduisent par des pics fins et acérés. 119

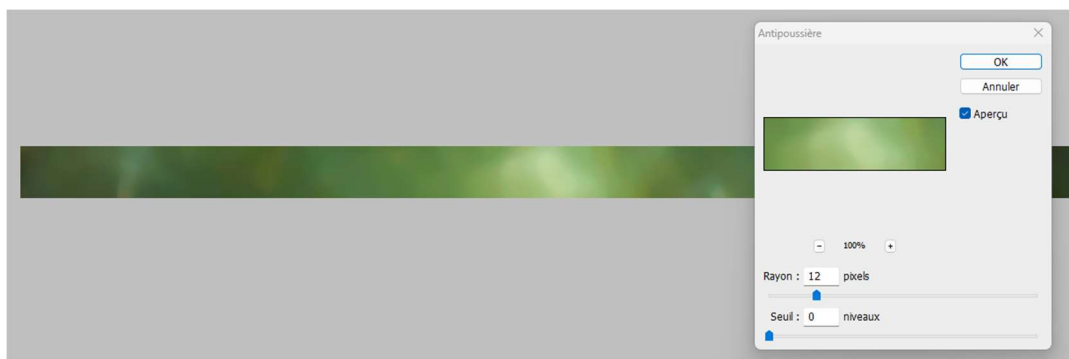
The fine, bright streaks in the diffraction pattern are the stars, and they appear as thin, sharp peaks.

Analyse en supprimant les étoiles

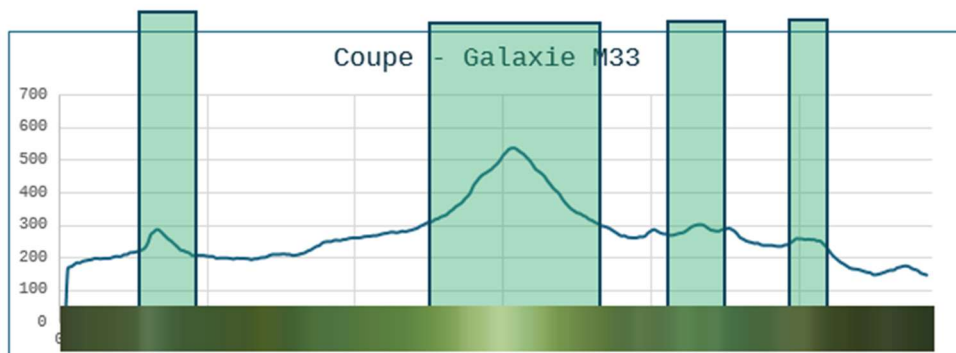
Analysis with stars removed

Pour nous concentrer sur les pics dus aux bras galactiques et non aux étoiles, on peut repartir d'une version « starless » de la coupe. Sans logiciel de traitement d'image astronomique, il est possible d'obtenir facilement cela avec une fonction qui supprime les pixels, ou groupes de pixels, présentant un fort contraste : c'est la fonction Antipoussière dans Photoshop.

To focus on the peaks caused by galactic arms rather than stars, we can start with a "starless" version of the cross-section. Even without specialized astronomical image processing software, this can easily be achieved using a function that removes high-contrast pixels or groups of pixels: the "Dust & Scratches" filter in Photoshop.



Analyse_M33-coupe-5-2.xlsx



Pour détecter et tracer automatiquement les bras, il faudrait faire une analyse de pentes, et déterminer sur quels points, encadrés de pentes positives et négatives, la pente est nulle, et faire de

même avec un grand nombre de coupes. J'avoue ne pas avoir eu le courage de me lancer dans un tel travail qui n'est pas facilement automatisable.

To automatically detect and trace the arms, one would need to perform a slope analysis—identifying points where the slope is zero, flanked by positive and negative slopes—and repeat this process across a large number of cross-sections. I admit I lacked the resolve to undertake such a task, as it does not lend itself easily to automation.

Structure des bras spiraux

Spiral arm structure

Pour analyser la structure complète de la galaxie M33, je suis donc parti sur une voie plus simple, mais tout de même outillée dans Excel.

To analyze the complete structure of the M33 galaxy, I therefore opted for a simpler approach, yet one still utilizing Excel tools.

Cf. M33_Analyse.xlsx, onglet « Analyse Bras ».

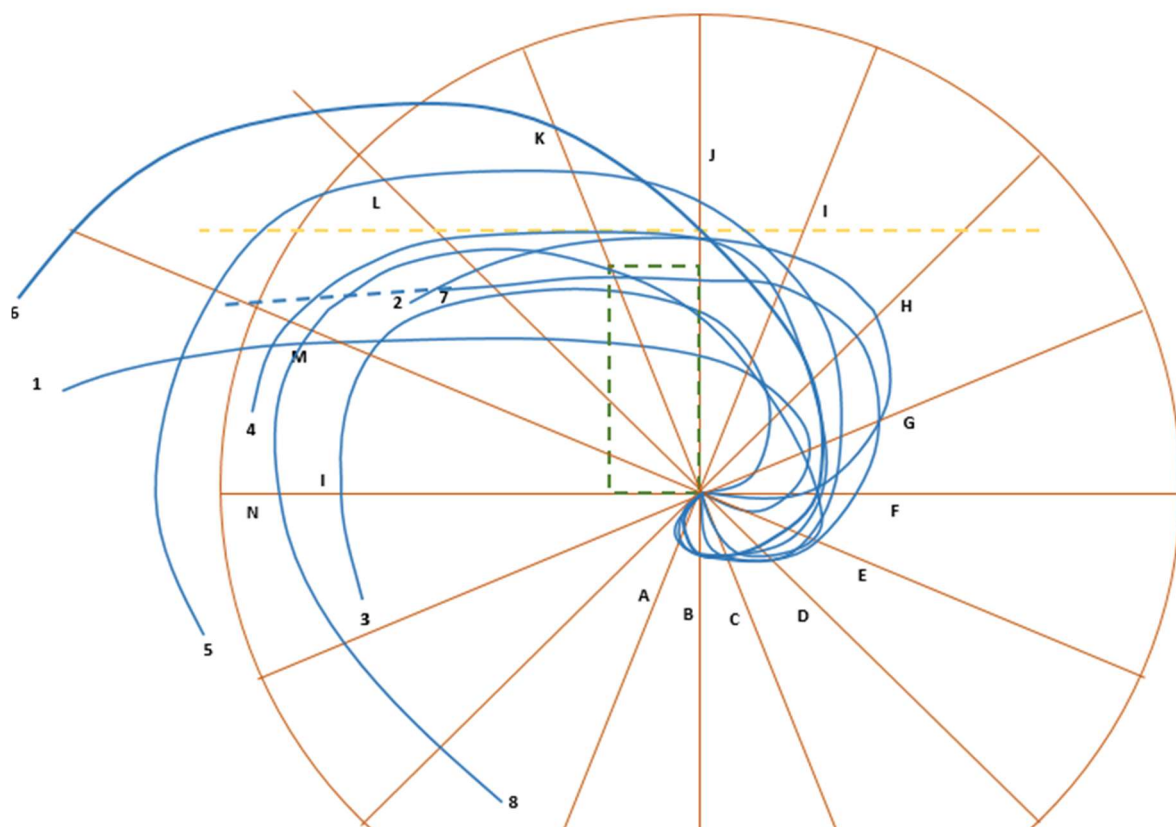
La première étape consiste à tracer les bras sur une photo de M33 :

The first step is to trace the arms on a photograph of M33:



Ceci fait, on recopie les tracés de ces bras sur un repère, en les positionnant tous à partir du centre de la grille et de manière à ce que leurs sommets soient tangents à une ligne horizontale :

Once this is done, the outlines of these arms are copied onto a coordinate system, positioning them all relative to the center of the grid such that their vertices are tangent to a horizontal line:



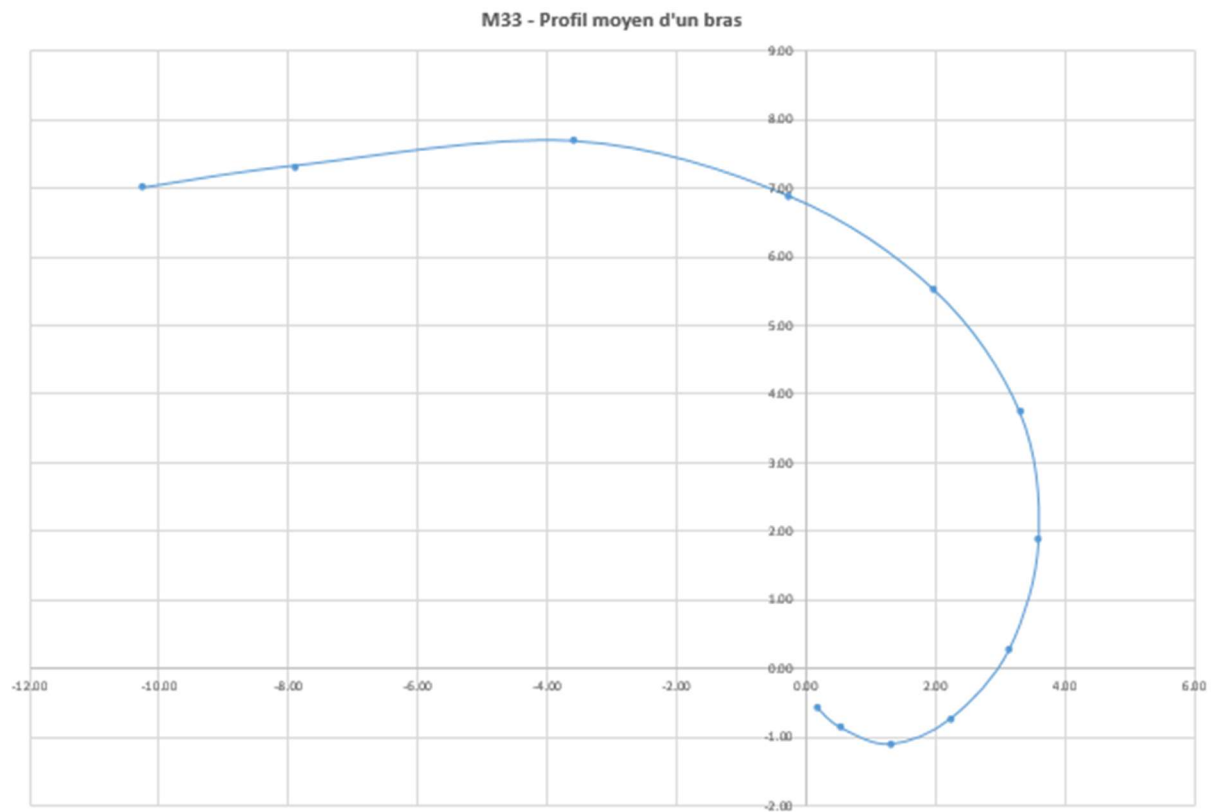
On reporte ensuite dans un tableau les coordonnées x et y des croisements des bras avec les segments du repère (on met des zéros s'il n'y a pas de valeurs) :

The x and y coordinates of the intersections between the arms and the segments of the reference frame are then recorded in a table (zeros are entered if there are no values):

	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
1		-11.35	-4.73	-1.89	0.00	1.40	2.73	3.40	2.65	1.55	0.00	0.00	0.00	
1		4.78	4.92	4.66	4.35	3.77	2.81	1.44	0.00	-0.68	0.00	0.00	0.00	
2		-6.95	-6.92	-3.10	0.00	2.86	5.58	5.68	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00	
2		7.02	7.02	7.88	8.04	7.47	5.55	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3		-10.34	-6.16	-2.53	0.00	2.19	2.21	1.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3		4.35	6.34	6.29	5.70	2.23	2.21	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4		-12.83	-7.97	-3.25	0.00	2.45	3.55	3.84	3.21	3.05	1.85	0.00	0.00	
4		5.38	7.99	8.21	8.01	6.28	3.49	1.64	0.00	-1.29	-1.80	-2.01	1.92	
5		-15.23	-9.87	-4.08	0.00	2.84	4.28	4.43	4.20	3.97	2.14	0.72	0.00	
5		6.36	9.80	10.07	9.20	7.01	4.25	1.83	0.00	-1.47	-2.07	-2.05	-1.92	
6		-19.64	-12.10	-4.61	0.00	2.25	3.46	3.86	3.65	2.67	1.78	0.72	0.00	
6		8.25	11.98	11.50	8.27	5.76	3.60	1.64	0.00	-1.13	-1.65	-1.92	-1.92	
7		-14.43	-6.53	-2.76	0.00	2.49	4.91	5.55	4.89	3.63	2.18	0.84	0.00	
7		7.38	8.01	8.26	8.19	7.99	6.43	3.77	0.00	-1.51	-2.03	-2.03	0.00	
8		-12.03	-7.54	-2.79	0.00	1.50	2.52	3.18	3.66	3.53	2.14	0.37	0.00	
8		5.12	7.53	7.00	5.53	3.93	2.51	1.29	0.00	-1.50	-2.04	-1.03	0.00	

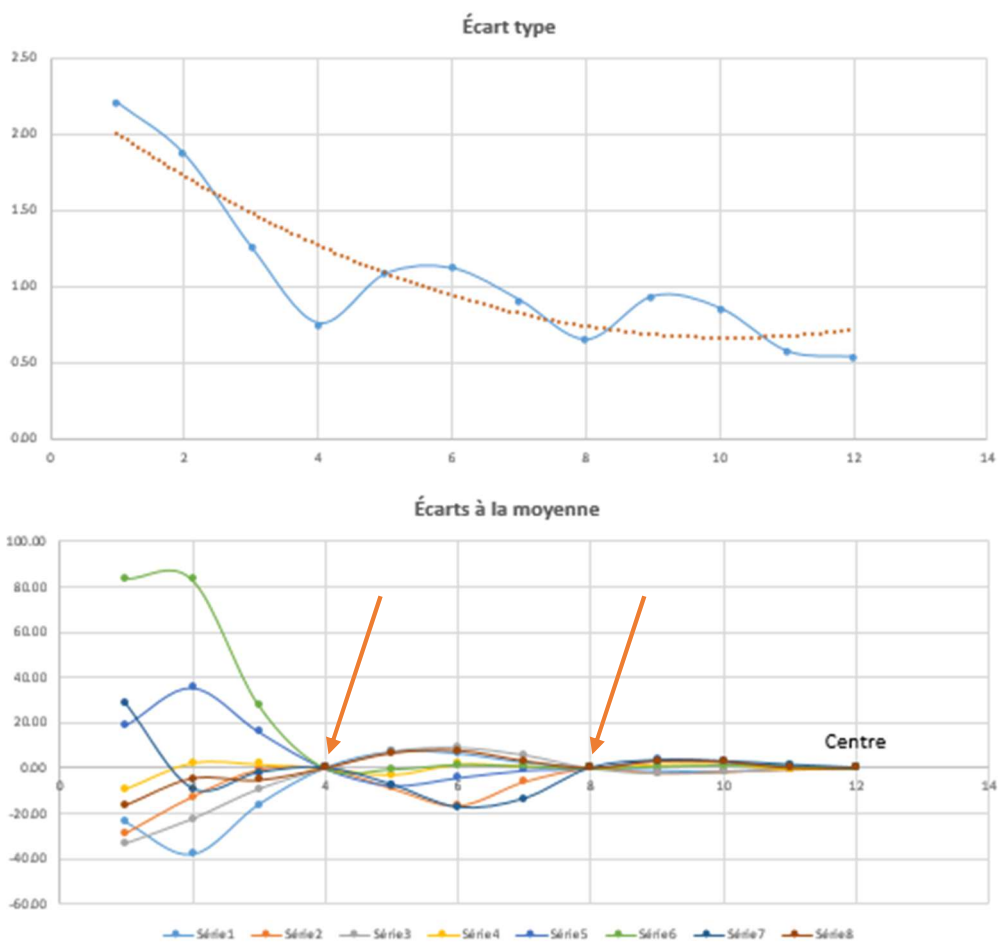
On obtient, par calcul des moyennes, le profil moyen d'un bras :

By calculating the averages, the average profile of an arm is obtained:



Ainsi que les écarts-types et les écarts avec la moyenne de chaque bras :

As well as the standard deviations and the deviations from the mean for each arm:



Cela nous donne une indication de l'homogénéité de la structure de cette galaxie.

Nous constatons que cette structure est relativement homogène, hormis dans le dernier tiers de la longueur des bras. Deux « nœuds » (flèches orange) apparaissent, découpant le graphique en périodes à peu près égales.

La distance entre les deux nœuds est d'environ $\frac{1}{3}$ de la longueur d'un bras.

Ces valeurs nous serviront de références pour une future comparaison avec d'autres galaxies.

This gives us an indication of the structural homogeneity of this galaxy.

We observe that the structure is relatively uniform, except for the final third of the arms' length. Two "nodes" (orange arrows) appear, dividing the graph into roughly equal segments. The distance between the two nodes is approximately one-third of an arm's length. These values will serve as a reference for future comparisons with other galaxies.

Détermination du centre de masse

Determination of the center of mass

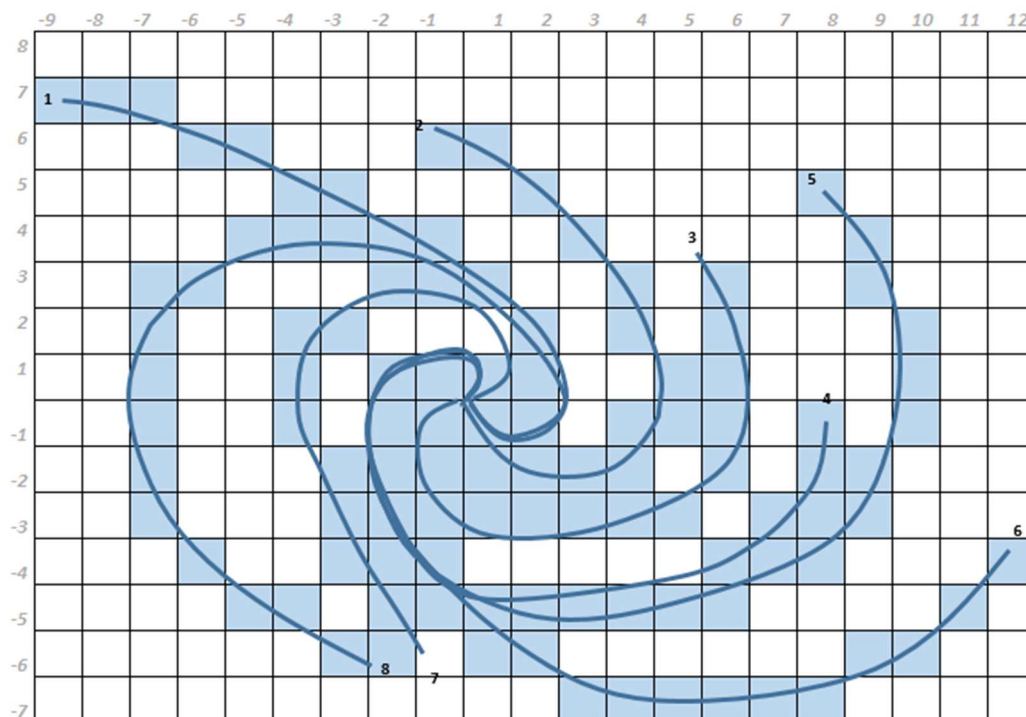
Cf. M33_Analyse.xlsx, onglet « Analyse Distribution ».

Pour calculer précisément la répartition des masses, il nous faudrait mesurer la « quantité de matière » des bras en différents endroits. Nous pourrions prendre comme mesures les largeurs et amplitudes des bras détectés avec l'outil d'analyse des coupes de galaxies.

Et si nous utilisions une méthode plus simple ?

Cette fois-ci, nous allons garder le positionnement initial du tracé des bras et le reporter sur un autre repère, où nous allons colorier en bleu les cellules traversées par un bras :

To calculate the mass distribution precisely, we would need to measure the "amount of matter" in the arms at various locations. We could use the widths and amplitudes of the arms—detected via the galaxy cross-section analysis tool—as our measurements. But what if we used a simpler method? This time, we will retain the initial positioning of the traced arms and map it onto a different coordinate system, where we will color the cells traversed by an arm in blue:



Nous recopions les cellules ainsi marquées dans le tableau ci-dessous, où nous pondérons l'analyse en indiquant le nombre de bras qui traversent chaque cellule :

We copy the cells marked in this way into the table below, where we weight the analysis by indicating the number of arms passing through each cell:

1	1	1																	
			1	1				1	1										
					1	1				1						1			
				1	1	1	2	2			1						1		
		1	1				1	2	3			1		1			1		
		1			1	1				2		1		1				1	
		1			1		2	2	3	2			1	1				1	
		1			1		2	1	3	2		1	1	1		1		1	
		1				1	2	1	1	1	1	1		1		1	1		
		1				1	2	1	1	1	1	1	1		1	1	1		
			1			1	2	2						1	1	1			1
				1	1		1	2	2	2	2	2	1	1					1
						1				1	1					1	1		
												1	1	1	1	1			

Avec ceci, nous calculons une moyenne pondérée des coordonnées pour obtenir le centre de masse :

Using this, we calculate a weighted average of the coordinates to obtain the center of mass:

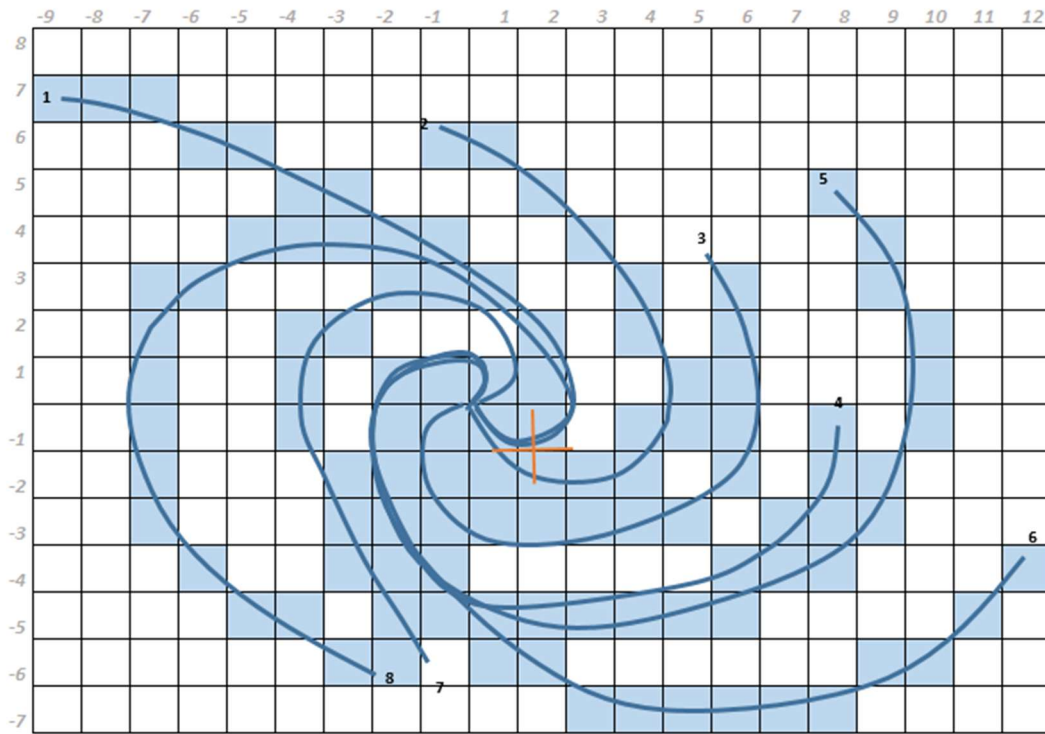
Moyenne X

1.44

-9	-8	-7																	
			-6	-5				-1	1										
					-4	-3				2						8			
					-5	-4	-3	-4	-2			3					9		
		-7	-6					-2	-2	3			4		6			9	
		-7			-4	-3				4		4		6				10	
		-7			-4		-4	-2	3	4			5	6				10	
		-7			-4		-4	-1	3	4		4	5	6		8		10	
		-7				-3	-4	-1	1	2	3	4		6		8	9		
		-7				-3	-4	-1	1	2	3	4	5		7	8	9		
			-6			-3	-4	-2						6	7	8			12
				-5	-4			-2	-2	2	4	6	8	5	6				11
						-3				1	2						9	10	
												3	4	5	6	7	8		

Nous faisons de même pour les valeurs en Y et reportons la localisation du centre de masse sur le premier repère (croix orange) :

We do the same for the Y-values and plot the location of the center of mass on the first coordinate system (orange cross):



Nous constatons que le centre de masse est légèrement décentré par rapport au bulbe de la galaxie.

Cela suggère le fait que cette galaxie est dans le champ gravitationnel d'une autre galaxie.

Il se peut aussi que cet écart soit dû à l'imprécision de notre méthode simplifiée. Nous y verrons plus clair en comparant avec d'autres galaxies.

We observe that the center of mass is slightly offset from the galaxy's bulge. This suggests that the galaxy lies within the gravitational field of another galaxy. Alternatively, this discrepancy could stem from the imprecision of our simplified method. Comparing it with other galaxies will provide greater clarity.

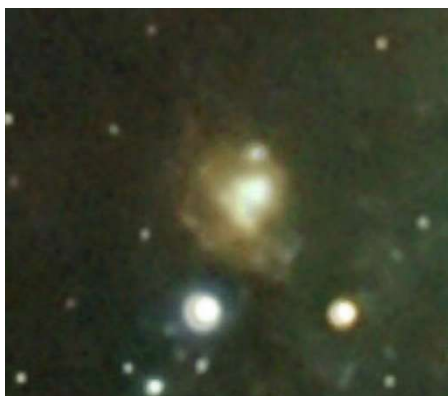
Nébuleuses internes (Zones H II)

Internal nebulae (H II regions)

Grace au filtre UHC, nous pouvons déceler et détailler plusieurs nébuleuses internes à la galaxie :

Thanks to the UHC filter, we can detect and resolve details in several nebulae within the galaxy:

NGC 604 :



NGC 595 :



NGC 588 :



NGC 592 :



Répartition des nébuleuses

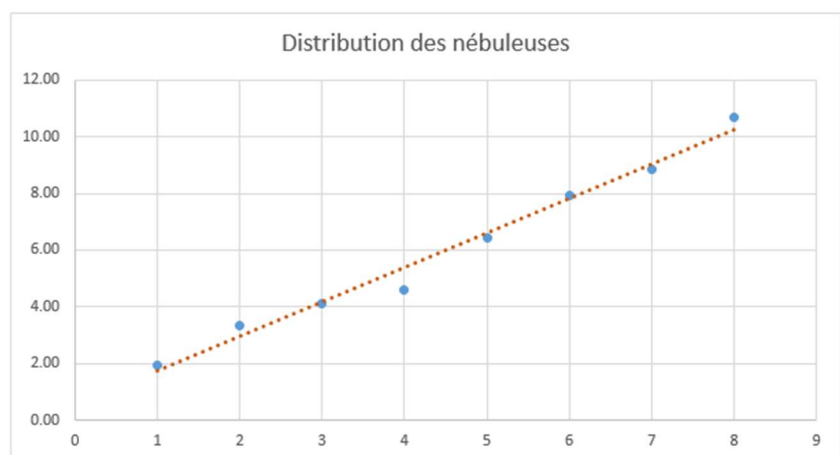
Distribution of nebulae

Afin de savoir s'il y a une position privilégiée des nébuleuses au sein de M33, mesurons leur distance au bulbe central et faisons-en un graphique (cf. onglet « Analyse Nébuleuses ») :

To determine whether the nebulae occupy a privileged position within M33, let us measure their distance from the central bulge and plot the results on a graph:



Nébuleuse	y	x	Distance
8	1.52	1.2	1.94
4	2.98	1.52	3.35
3	3.92	1.25	4.11
2	3.49	3	4.60
6	3.08	5.65	6.43
7	1.61	7.75	7.92
1	1.32	8.73	8.83
5	5.55	9.14	10.69



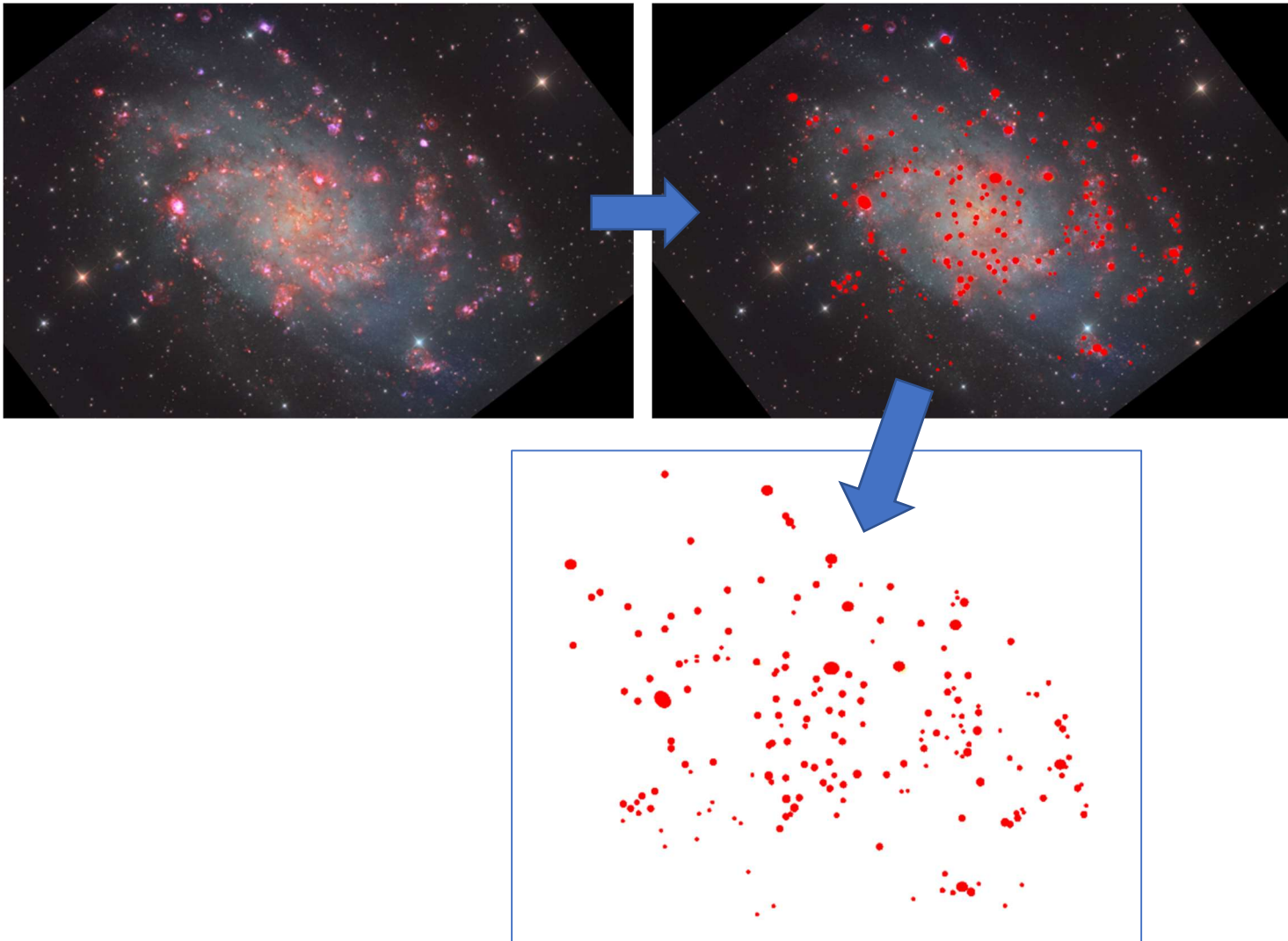
Avec les nébuleuses décelées, leur répartition en distance vis-à-vis du bulbe central est linéaire. Il n'y a pas de zone où elles seraient plus concentrées. Nous ne pouvons rien en conclure de particulier, alors allons plus loin avec une photographie à plus longue pause.

Regarding the detected nebulae, their distribution in terms of distance from the central bulge is linear; there is no zone of higher concentration. We cannot draw any specific conclusions from this, so let us take the next step with a longer-exposure photograph.

<https://www.facebook.com/steven.miller.116594>

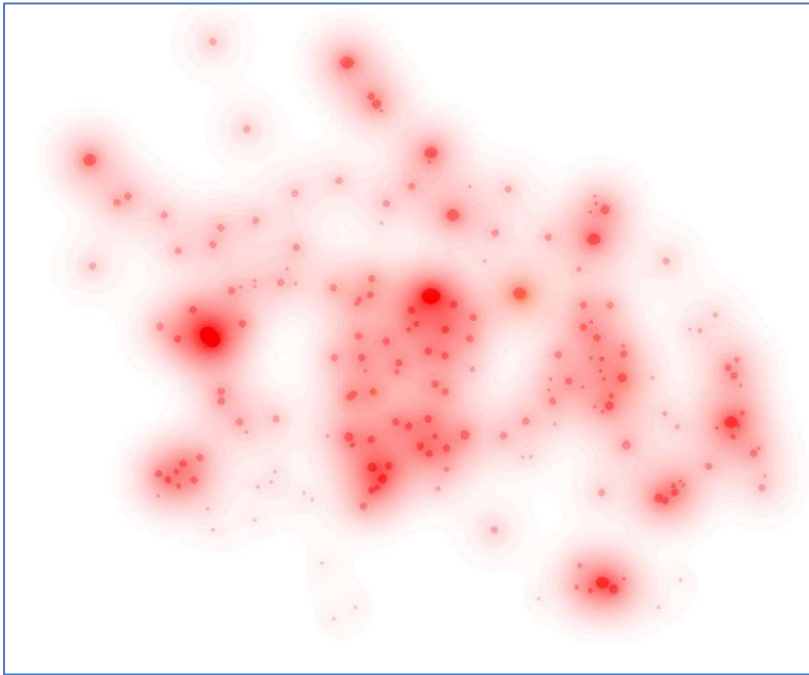
A partir d'une photographie de Steven Miller, marquons un maximum de nébuleuses :

Using a photograph by Steven Miller, let's mark as many nebulae as possible:



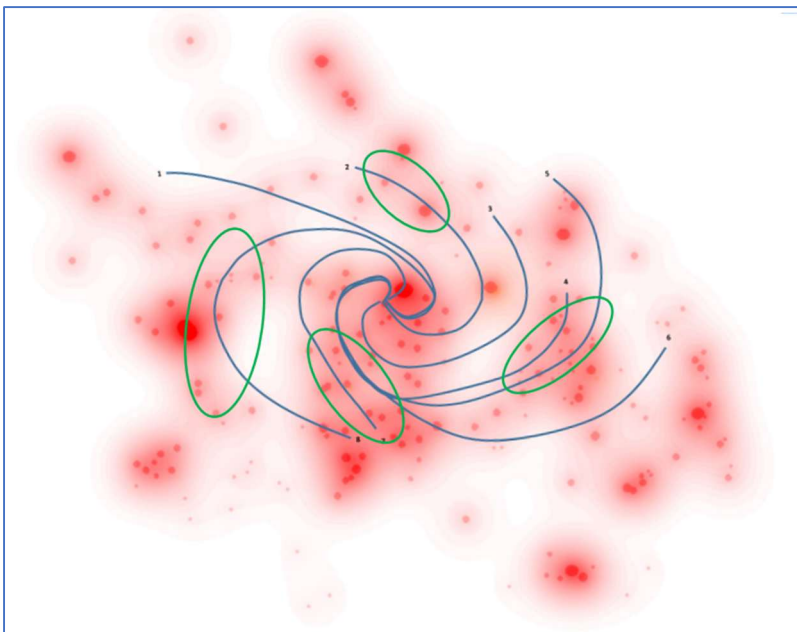
Afin d'apprécier la densité du gaz vis-à-vis de la structure de la galaxie, floutons un peu ce dessin en gardant en transparence l'image initiale (au moyen de claquages et de flou Gaussien dans Photoshop) :

To better appreciate the gas density in relation to the galaxy's structure, let's slightly blur this drawing while keeping the original image visible underneath (using layers and Gaussian blur in Photoshop):



En positionnant cette image en arrière-plan du tracé des bras, nous pouvons apprécier s'il y a un lien entre la structure de la galaxie et celle formée par les nébuleuses :

By positioning this image in the background of the spiral arm traces, we can assess whether there is a link between the structure of the galaxy and that formed by the nebulae:



Certains alignements de nébuleuses coïncident avec les bras (entourés en vert), et d'autres non.

Nous avons là deux structures relativement indépendantes, mais qui interagissent parfois. Il y a donc bien comme nous l'évoquions en préambule, une « double nature » des galaxies, amas d'étoiles et nébuleuse en même temps.

Some alignments of nebulae coincide with the arms (circled in green), while others do not. We are dealing here with two relatively independent structures that nevertheless interact at times. Thus, as we mentioned in the introduction, there is indeed a "dual nature" to galaxies—being simultaneously star clusters and nebulae.

Nébuleuse initiale

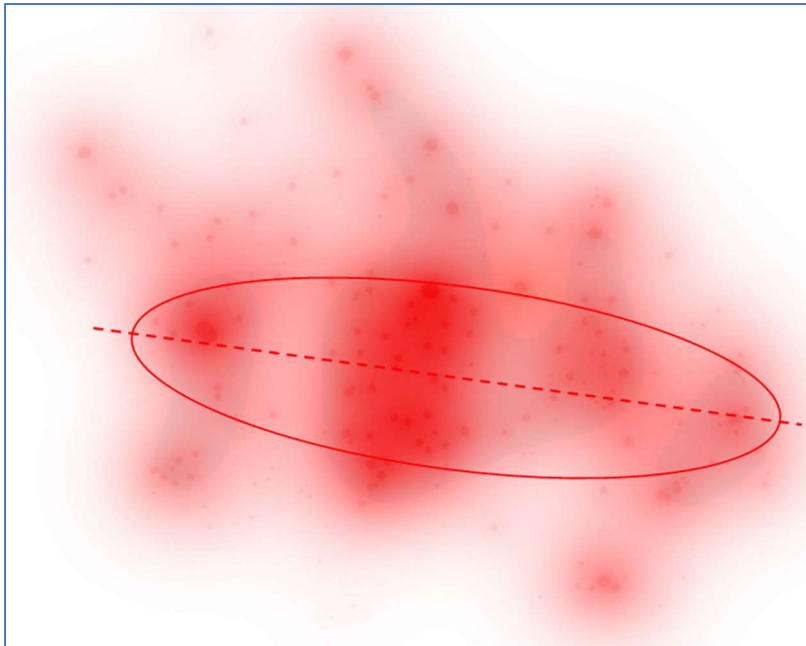
Initial nebula

Les étoiles se formant dans des nébuleuses, nous pouvons émettre comme hypothèse que tout ou partie des étoiles de la galaxie seraient nés dans une immense nébuleuse initiale. Les petites nébuleuses résiduelles étant ce qu'il en reste.

Since stars form within nebulae, we can hypothesize that all or some of the galaxy's stars originated in a vast initial nebula, with the small, residual nebulae being what remains of it.

En floutant encore notre dessin des nébuleuses, nous pouvons mettre en évidence une structure à plus grande échelle :

By further blurring our image of the nebulae, we can reveal a larger-scale structure:



Nous pouvons émettre l'hypothèse que cette structure gazeuse primitive se serait condensée en étoiles et aurait été découpée et déformée par les mouvements de la galaxie et l'attraction gravitationnelles des bras.

We can hypothesize that this primordial gaseous structure condensed into stars and was fragmented and distorted by galactic motions and the gravitational pull of the spiral arms.

2. Les processus dynamiques de créations d'étoiles à partir de nuages de gaz

The dynamic processes of star formation from gas clouds

Nous continuons dans l'étude du lien entre nébuleuse et étoiles des galaxies en recherchant une nébuleuse où se crée des étoiles.

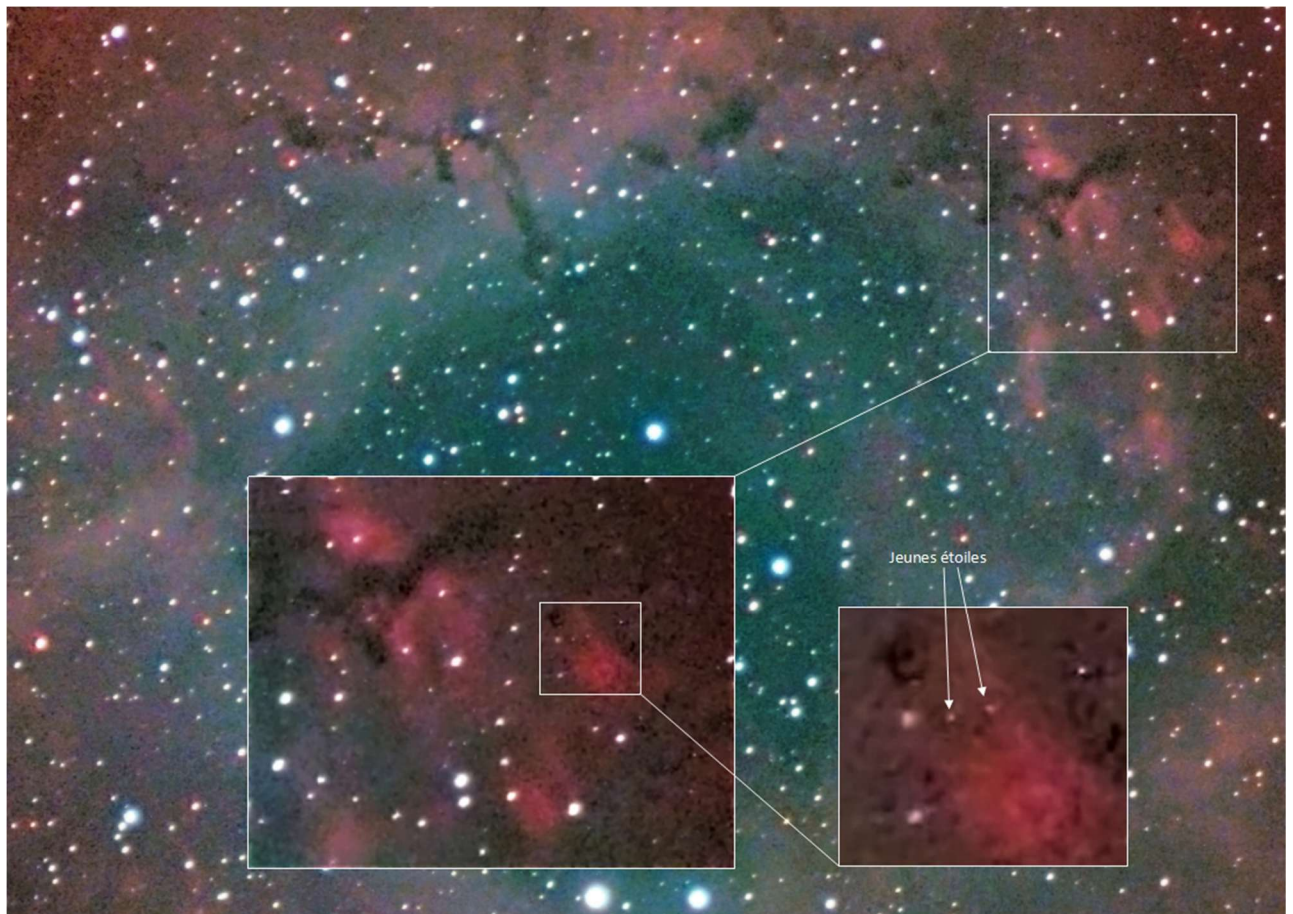
We are continuing our study of the link between nebulae and stars in galaxies by searching for a nebula where stars are forming.

Le phénomène de condensation de l'hydrogène en étoiles est un processus qui se déroule encore aujourd'hui dans des nébuleuses comme celle de la Rosette visible non loin d'Orion.

Pour obtenir plus de résolution qu'avec le Seestar, la nébuleuse de la Rosette est photographiée avec ma grande lunette 152/900 équipée d'un filtre UHC.

Zoomons sur une des régions génératrices d'étoiles :

The phenomenon of hydrogen condensing into stars is a process that is still taking place today in nebulae such as the Rosette Nebula, visible not far from Orion. To achieve higher resolution than with the Seestar, I photographed the Rosette Nebula using my large 152/900 refractor equipped with a UHC filter. Let's zoom in on one of the star-forming regions:



Après un traitement d'Accentuation dans Photoshop à moyenne échelle (16 pixels), il est intéressant de constater qu'autour des deux étoiles récemment créées, la densité de gaz est plus faible :

After applying medium-scale sharpening (16 pixels) in Photoshop, it is interesting to note that the gas density around the two newly created stars is lower:



Un phénomène d'enroulement de volutes de gaz est bien visible :

A phenomenon of gas-plume curling is clearly visible:



3. L'interaction entre ces étoiles et les nuages de gaz (ionisation)

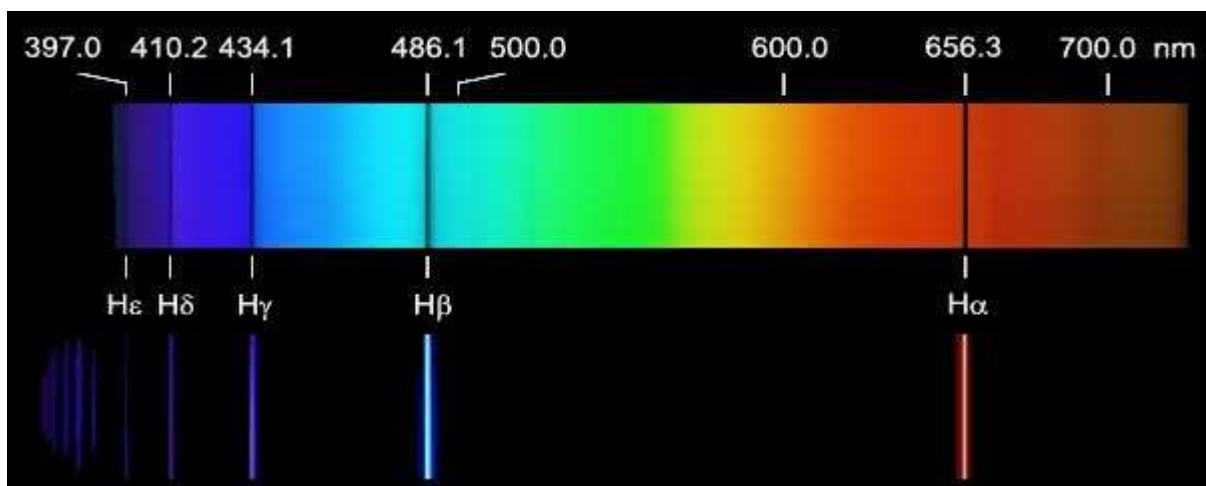
The interaction between these stars and the gas clouds (ionization)

Raies d'émission de l'hydrogène

Hydrogen emission lines

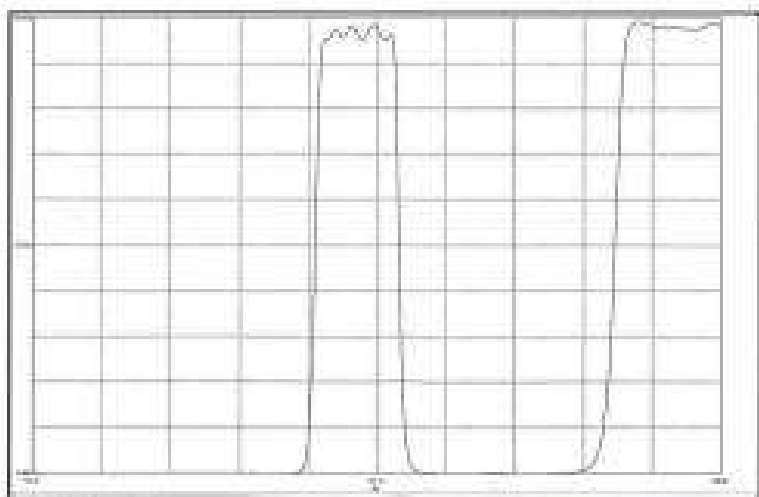
L'ionisation causée par de puissantes étoiles impacte les jeunes étoiles, mais également le gaz des nébuleuses. L'hydrogène a différentes couleurs selon son degré d'ionisation et émet alors de la lumière :

Ionization caused by powerful stars affects young stars as well as the gas in nebulae. Hydrogen exhibits different colors depending on its degree of ionization and emits light:



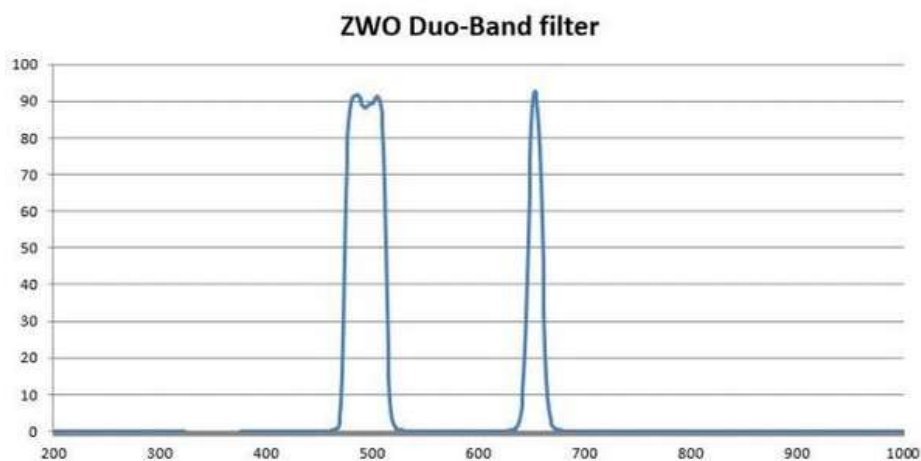
Le filtre UHC utilisé sur la grande lunette 152/900 est sélectif pour les raies Béta et Alpha, en cyan et en rouge.

The UHC filter used on the large 152/900 refractor is selective for the Beta and Alpha lines, in cyan and red.



Celui intégré au Seestar S50 n'est pas spécifié, il doit être très proche du filtre ZWO Duo-Band qui est plus sélectif :

The one built into the Seestar S50 is not specified; it is likely very similar to the ZWO Duo-Band filter, which is more selective:



C'est à cause de l'ionisation de l'hydrogène que nous voyons les nébuleuses.

It is because of the ionization of hydrogen that we see nebulae.

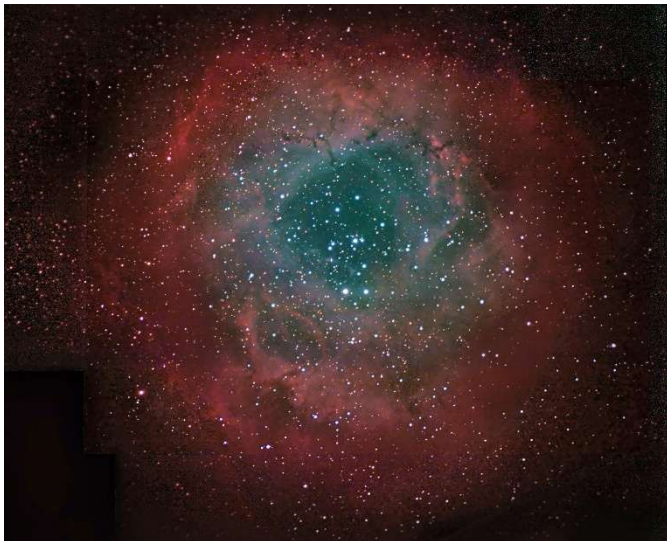
Répartition des types d'hydrogène ionisé

Distribution of ionized hydrogen types

Dans les nébuleuses de la Rosette et d'Orion (Lunette 152/900 + filtre UHC), il y a une zone bleu-vert centrale et une zone rouge périphérique :

In the Rosette and Orion nebulae (152/900 refractor + UHC filter), there is a central blue-green zone and a peripheral red zone:

La Rosette



Orion



Niveau d'énergie, ionisation et couleur

Energy level, ionization, and color

L'ionisation de l'hydrogène est causée par des fortes radiations d'étoiles situées dans les nébuleuses.

Les différents niveaux d'ionisation, et donc de couleurs, sont dus à des niveaux différents de radiations.

En physique, le niveau d'énergie d'une couleur est à relier à sa fréquence. Le bleu a une fréquence supérieure au rouge et traduit un niveau d'énergie plus élevé. Voilà pourquoi pour la Rosette et Orion, on a du bleu au centre : c'est là que sont les grosses étoiles les plus irradiantes.

Hydrogen ionization is caused by intense radiation from stars located within nebulae. The varying levels of ionization—and consequently the different colors—result from varying levels of radiation.

In physics, the energy level of a color is linked to its frequency. Blue has a higher frequency than red, corresponding to a higher energy level. This explains why the Rosette and Orion nebulae appear blue at their centers: that is where the massive, highly radiating stars are located.

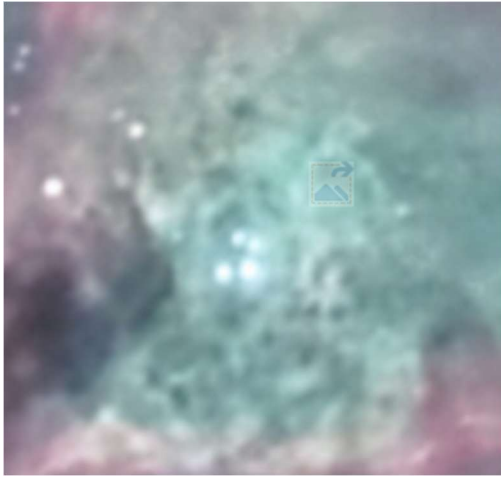
Géométrie du front d'ionisation

Ionization front geometry

La limite entre deux zones ionisées de niveau d'énergie différent, ou entre une zone ionisée et une non-ionisée est un front d'ionisation. À partir des étoiles irradiantes, ce front avance vers la périphérie.

Si nous observons le cœur de la galaxie d'Orion, nous visualisons les étoiles du trapèze, déjà décrites dans notre Livret II :

The boundary between two ionized zones of different energy levels, or between an ionized zone and a non-ionized one, is an ionization front. Originating from the irradiating stars, this front advances toward the periphery. If we observe the core of the Orion Nebula, we can see the Trapezium stars, already described in our Booklet II:

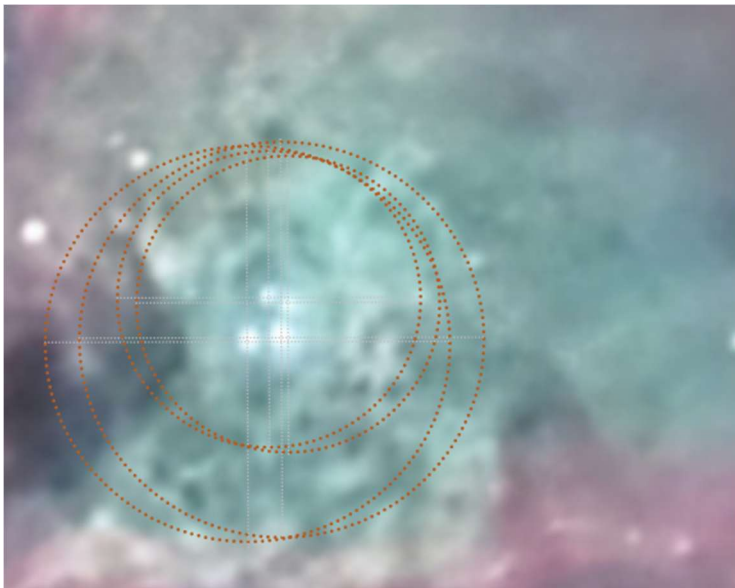


Quelle est la géométrie de ce front d'ionisation ?

What is the geometry of this ionization front?

Nous pourrions nous attendre à ce qu'il progresse de manière homogène, à partir des étoiles du trapèze et vers la périphérie. Pour cela, traçons autour de chaque étoile un cercle de diamètre proportionnel à son diamètre :

We might expect it to progress uniformly, starting from the Trapezium stars and moving towards the periphery. To do this, let us draw a circle around each star with a diameter proportional to its own diameter:

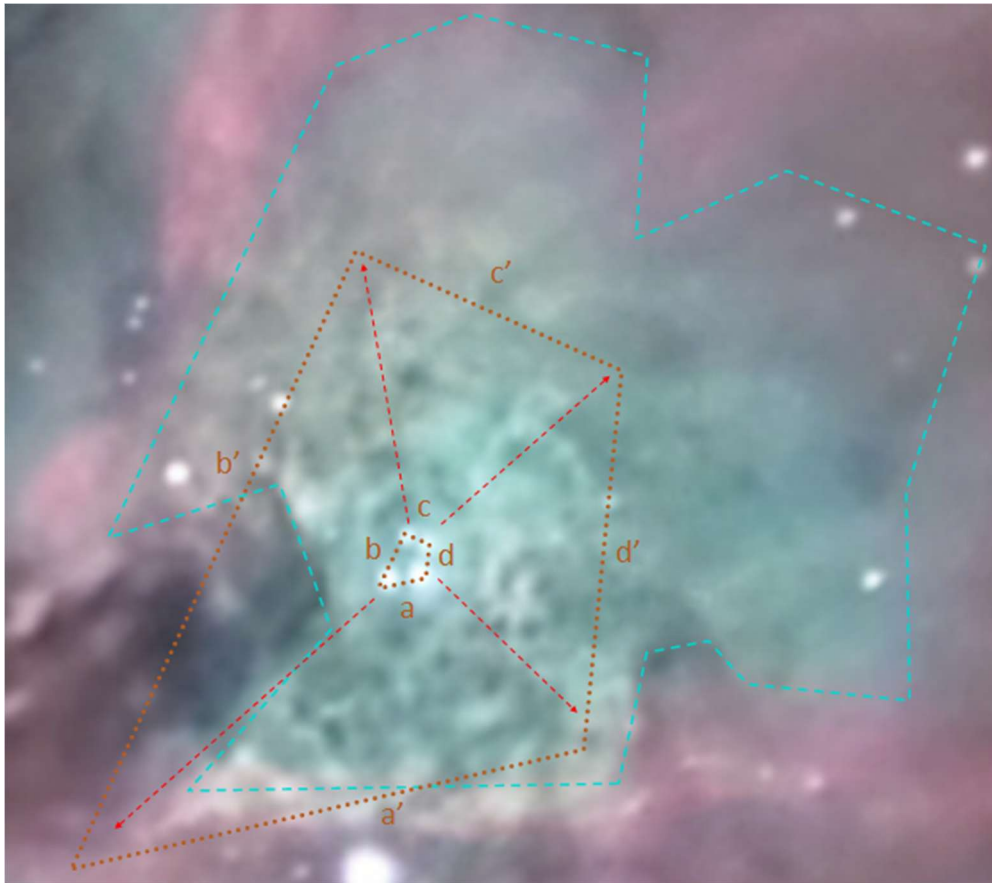


Manifestement, cela ne correspond pas à la géométrie de la surface ionisée observée.

Essayons une autre approche en comparant la géométrie du trapèze avec celle de la zone ionisée :

Clearly, this does not correspond to the geometry of the observed ionized surface.

Let us try another approach by comparing the geometry of the trapezoid with that of the ionized zone:



En traçant la géométrie du Trapèze, et en augmentant ses dimensions, nous constatons que le segment a' est proche du front réel d'ionisation. Les segments b' et d' sont parallèles à certains bords tracés en cyan. Il semble donc que la vitesse du front n'est pas homogène, elle progresse plus vite sur les côtés b, c et d .

Si nous prenons l'hypothèse que cette vitesse dépend du milieu, cela veut dire que la zone située entre a et a' serait de densité supérieure au reste de la nébuleuse. L'écart relatif entre la forme agrandie du Trapèze et la géométrie constatée de la zone ionisée permet de définir des niveaux de densité différents.

By plotting the geometry of the Trapezium and scaling up its dimensions, we observe that segment a' lies close to the actual ionization front. Segments b' and d' are parallel to certain edges drawn in cyan. It therefore appears that the front's speed is not uniform; it advances more rapidly along sides b, c , and d .

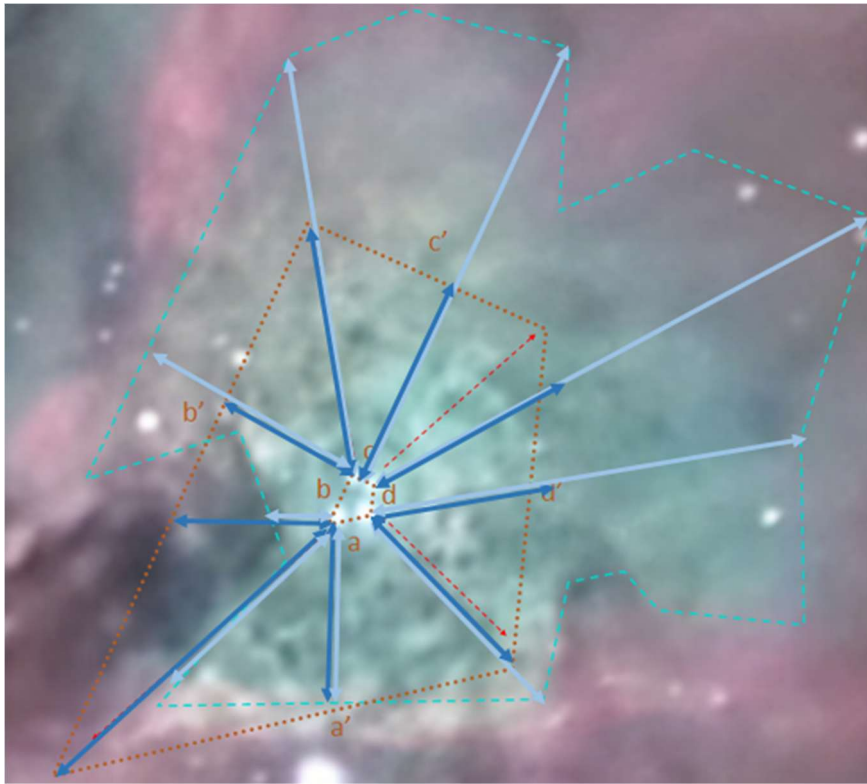
If we hypothesize that this speed depends on the medium, it implies that the zone between a and a' has a higher density than the rest of the nebula. The relative discrepancy between the scaled-up shape of the Trapezium and the observed geometry of the ionized zone allows for the definition of varying density levels.

Tracé des vecteurs (Cf. Analyse_nébuleuse.xlsx, onglet « Modèle 1 ») :

(En bleu foncé, géométrie théorique, en bleu clair, géométrie constatée)

Vector plot (see Analyse_nébuleuse.xlsx, "Modèle 1" tab):

(Dark blue: theoretical geometry; light blue: observed geometry)



Calcul des longueurs des vecteurs et de leurs différences :

Calculation of vector lengths and their differences:

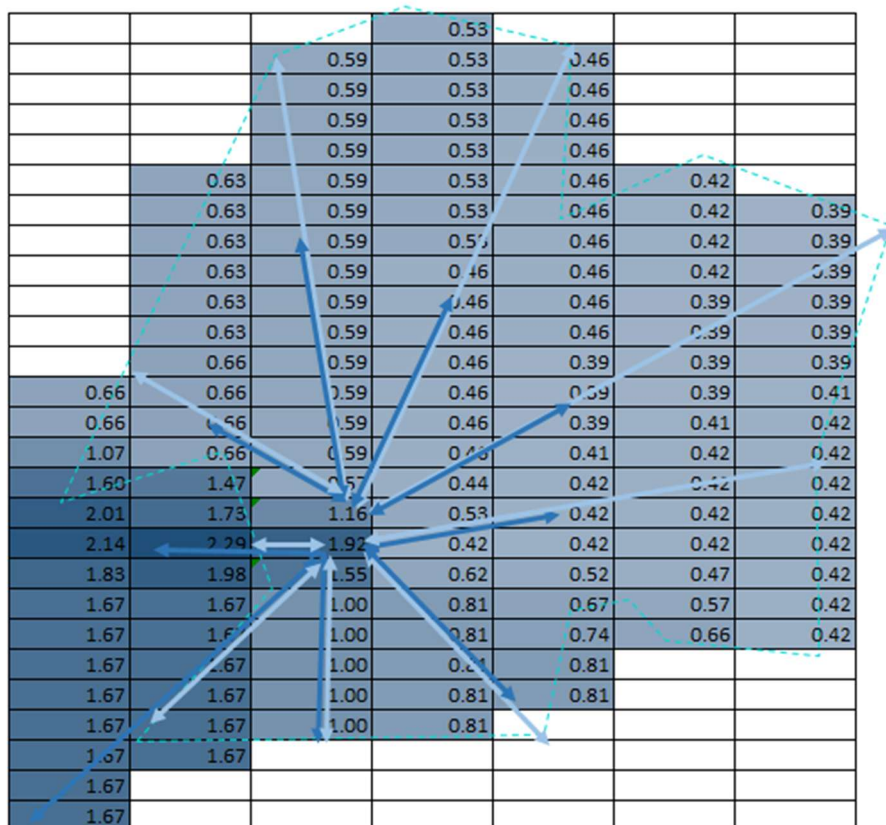
Vecteur théorique		Longueur
4.61	0.78	4.68
3.72	1.76	4.12
1.95	3.55	4.05
0.59	3.44	3.49
2.74	2.67	3.83
3.29	0.07	3.29
4.62	5.06	6.85
0.06	3.00	3.00
1.37	2.45	2.81

Vecteur constaté		Longueur
7.78	1.25	7.88
8.15	3.80	8.99
4.95	9.19	10.44
1.38	8.12	8.24
3.39	3.26	4.70
3.29	0.07	3.29
2.80	2.99	4.10
0.00	1.31	1.31
2.13	3.70	4.27

Ratio des longueurs (Densités relatives)
0.59
0.46
0.39
0.42
0.81
1.00
1.67
2.29
0.66

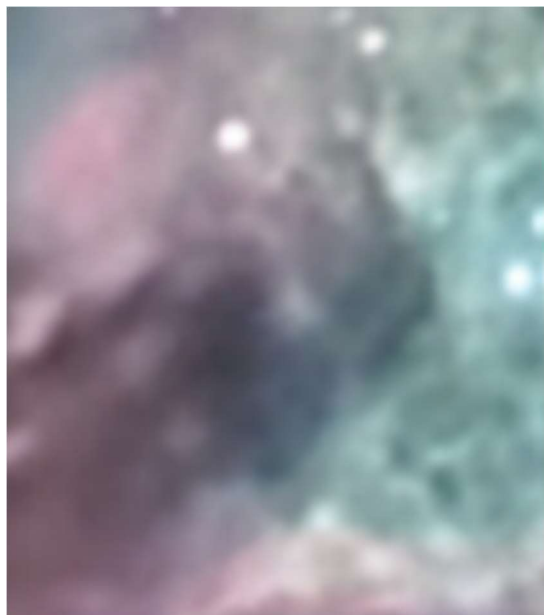
En reportant ces ratios sur le tracé, et en extrapolant les cellules vides par moyennes entre cellules adjacentes, nous obtenons une cartographie de la densité gazeuse, soulignée par une mise en forme conditionnelle :

By plotting these ratios and extrapolating the empty cells using the averages of adjacent cells, we obtain a gas density map, highlighted by conditional formatting:



La partie la plus foncée à gauche, donc la partie la plus dense, correspond donc sur notre photographie à une zone de poussières sombres et non à une zone vide :

The darkest part on the left—and thus the densest part—corresponds in our photograph to a region of dark dust, rather than an empty area:

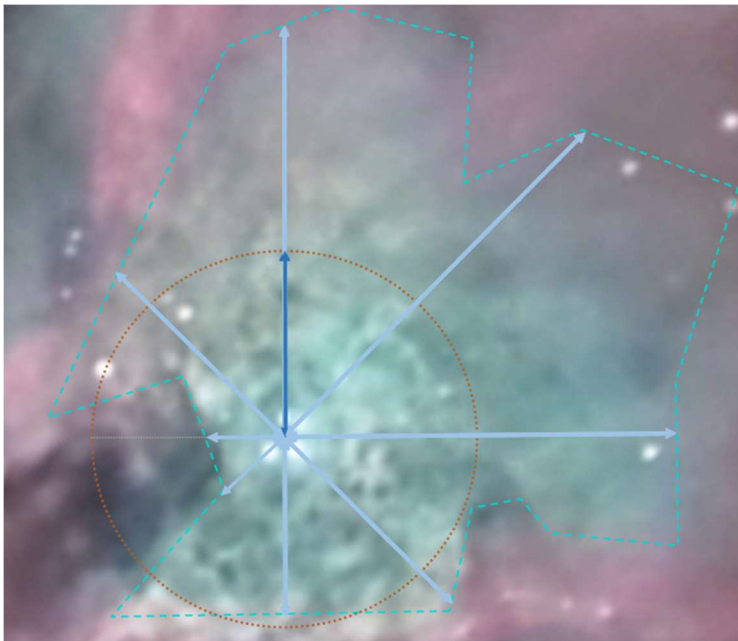


Ces poussières sombres auraient donc freiné et stoppé la progression du front d'ionisation ?

So, did this dark dust slow down and halt the advance of the ionization front?

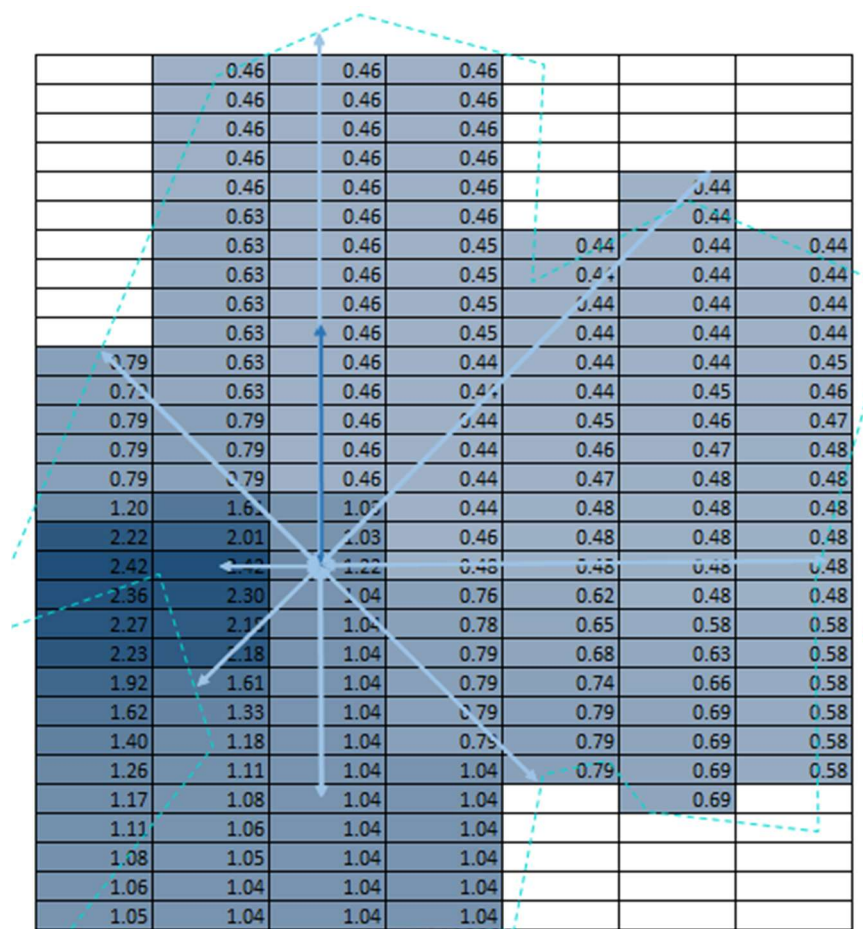
Néanmoins, cette modélisation à partir d'une forme trapézoïdale, dont le résultat est assez séduisant, comporte une faille : la propagation n'y est pas sphérique à partir de chaque étoile. Or, à priori, une étoile émet des rayonnements dans toutes les directions. Reprenons un modèle circulaire en le simplifiant, les étoiles du Trapèze sont considérées comme étant une source ponctuelle unique (Cf. Analyse_nébuleuse.xlsx, onglet « Modèle 2 ») :

However, this model based on a trapezoidal shape—while yielding an appealing result—has a flaw: the propagation from each star is not spherical. Yet, in principle, a star emits radiation in all directions. Let us return to a simplified circular model, treating the Trapezium stars as a single point source (see *Analyse_nébuleuse.xlsx*, "Modèle 2" tab):



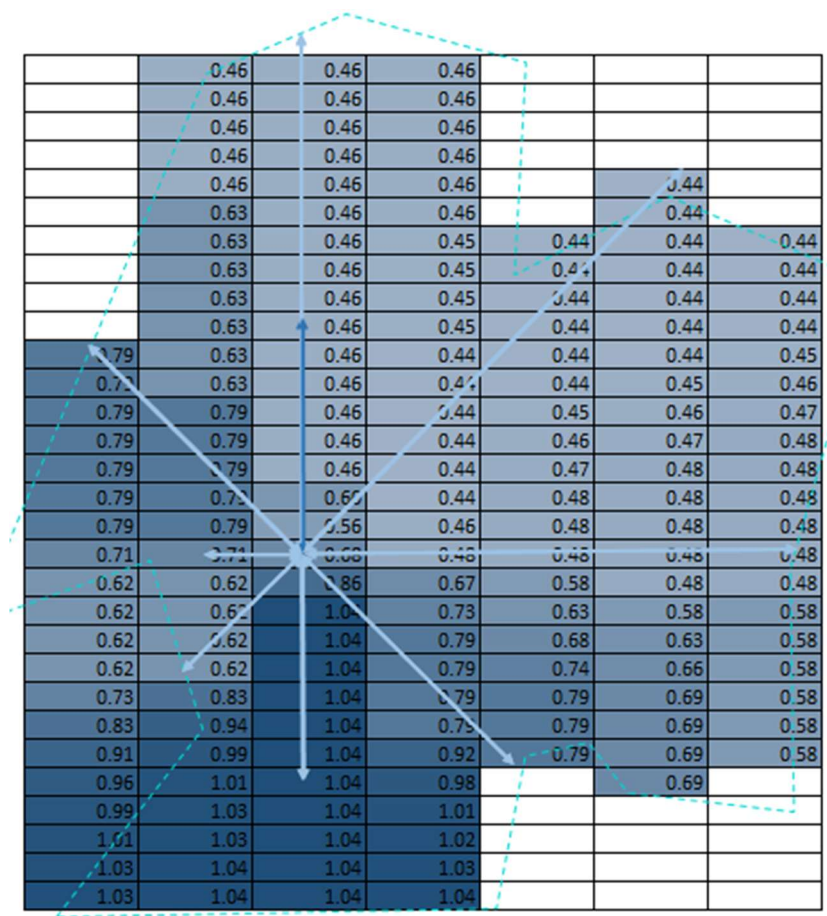
Le résultat est un peu plus en phase avec la forme de la zone sombre :

The result is slightly more in line with the shape of the dark area:



Si nous considérons que la zone sombre est en avant-plan et cache une zone ionisée, il nous faut corriger notre modèle. Prenons pour hypothèse que la densité du gaz au niveau de la zone sombre est la moyenne des densités constatées :

If we consider that the dark zone is in the foreground and obscures an ionized zone, we must correct our model. Let us assume that the gas density in the dark zone is the average of the observed densities:



Cette dernière version est plus en phase avec la photographie du cœur d'Orion, en particulier la partie basse à la forme triangulaire caractéristique.

This latest version is more in line with the photograph of the Orion core, particularly the lower section with its characteristic triangular shape.

Effet du front d'ionisation

Effect of the ionization front

Le front d'ionisation engendre une pression sur le gaz environnant et forme une zone plus dense, la « barre d'Orion ».

The ionization front exerts pressure on the surrounding gas and forms a denser zone, the "Orion Bar."

<https://www.irap.omp.eu/2021/05/le-satellite-webb-de-la-nasa-etudiera-linfluence-du-rayonnement-des-etoiles-massives-sur-leur-environnement/>



Cette pression favorise la condensation du gaz pour former de nouvelles étoiles que nous voyons sous la forme de petits points rouges (Photo Hubble/NASA) :

This pressure promotes the condensation of gas to form new stars, which we see as small red dots (Hubble/NASA photo):



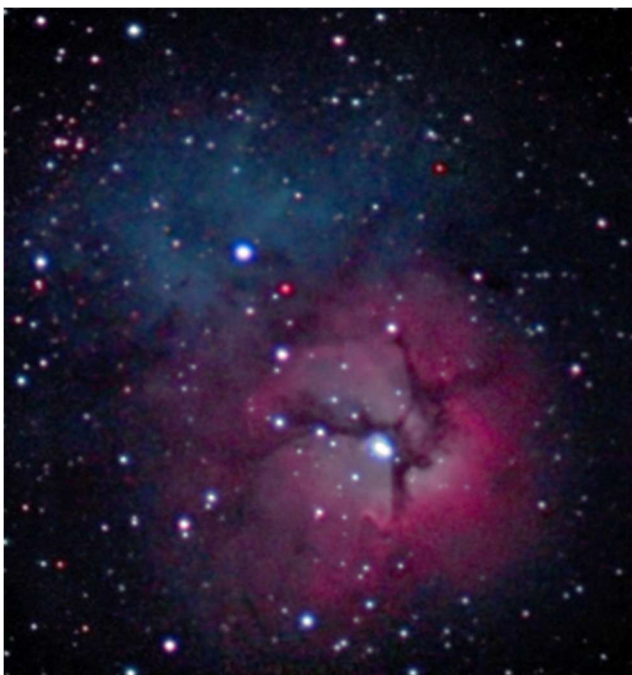
4. Nuages de poussières sombres

Dark dust clouds

Continuons sur cette question des poussières sombres avec d'autres exemples.

Dans la Nébuleuse Trifide, M20, des barres de matières sombres semblent n'avoir pas eu d'effet sur le front d'ionisation qui est plus homogène que celui d'Orion :

Let us continue with the subject of dark dust, looking at further examples. In the Trifid Nebula (M20), bands of dark material appear to have had no effect on the ionization front, which is more uniform than that of Orion:



Cela conforte notre modèle de M42 où la matière sombre n'a pas d'incidence sur le front d'ionisation. Dès lors, une formation comme la célèbre Tête de Cheval, doit être interprétée comme étant un nuage de matière sombre qui cache une partie de la nébuleuse située en arrière-plan :

This reinforces our model of M42, in which dark matter has no effect on the ionization front. Consequently, a formation such as the famous Horsehead Nebula must be interpreted as a cloud of dark matter obscuring part of the nebula located in the background:



5. L'interaction entre les étoiles plus massives et les plus jeunes étoiles (ionisation)

The interaction between the most massive stars and the youngest stars (ionization)

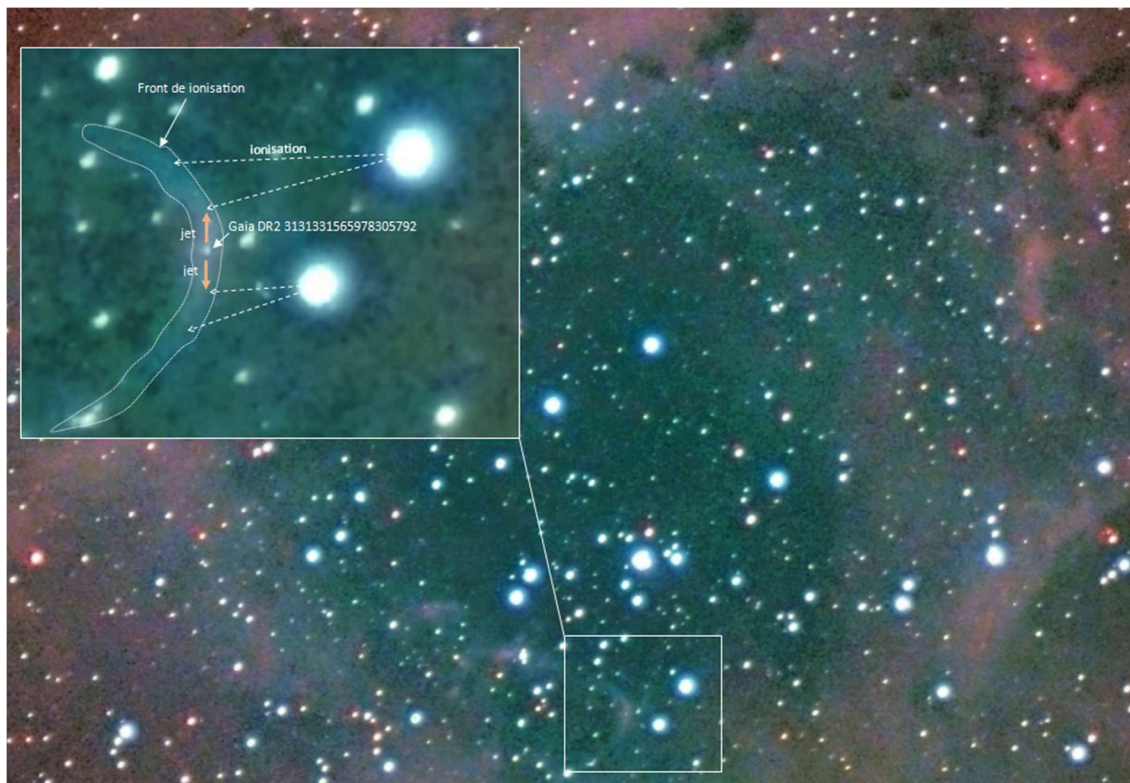
Certaines jeunes étoiles tournent très rapidement sur elle-même. Le fort champ magnétique induit entraîne un flux sortant de particules aux pôles, formant un courant « jet ». Ce phénomène est bien visible dans la Rosette :

Some young stars rotate very rapidly. The resulting strong magnetic field drives an outflow of particles at the poles, forming a "jet" stream. This phenomenon is clearly visible in the Rosette Nebula:



Parfois ce courant est lui-même impacté et ionisé par le vent solaire d'une grosse étoile proche, donnant un profil d'arc au courant-jet :

Sometimes, this current is itself impacted and ionized by the solar wind from a large nearby star, giving the jet stream an arc-like profile:



L'ionisation ne concerne donc pas seulement l'hydrogène des nébuleuses, mais aussi des étoiles.

Nous verrons dans un quatrième Livret consacré au Système Solaire, que lors de la formation d'un proto-système solaire dans Orion, l'ionisation concerne aussi la matière qui aurait pu devenir des planètes. Il semble donc y avoir quelques cas où de la matière non-gazeuse soit ionisée.

Ionization therefore affects not only the hydrogen in nebulae but also that in stars. In a fourth booklet dedicated to the Solar System, we will see that during the formation of a protosolar system in Orion, ionization also affects the material that could have become planets. There appear, then, to be instances where non-gaseous matter becomes ionized.

6. Le regroupement des galaxies en amas

The grouping of galaxies into clusters

Les galaxies, tout comme les étoiles, se regroupent en amas, et en amas d'amas pour former des structures à très grandes distances. Nous allons commencer par étudier un amas pour lequel nous pouvons analyser en détail la galaxie principale, avant d'aller vers de plus grands regroupements.

Galaxies, like stars, gather into clusters—and clusters of clusters—to form structures spanning vast distances. We will begin by studying a cluster where we can analyze the central galaxy in detail, before moving on to large

r groupings.

Étude de l'amas de M101

Study of the M101 cluster

La Galaxie M101, bien que peu brillante, est relativement accessible et comme nous la voyons de manière bien perpendiculaire, sa géométrie est facilement analysable.

Cette photographie a demandé 360 minutes de pauses au Seestar S50, dont 260 minutes avec le filtre UHC :

Although not particularly bright, the M101 galaxy is relatively accessible, and since we view it almost face-on, its geometry is easy to analyze. This photograph required 360 minutes of exposure time with the Seestar S50, including 260 minutes using the UHC filter:

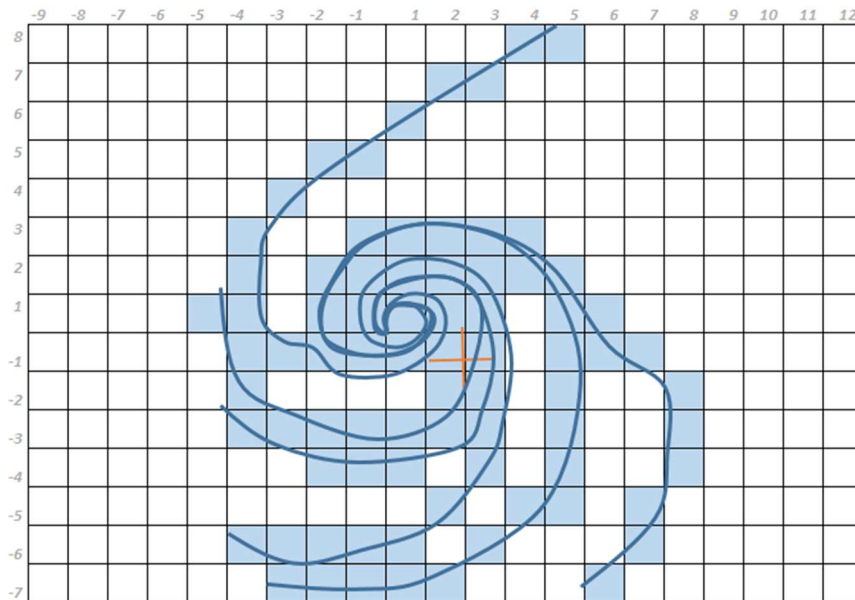


Nous allons dans un premier temps analyser en M101 comme nous l'avions fait pour M33, avant de nous intéresser aux interactions avec les galaxies voisines.

Cf. M101_Analyse.xlsx, onglet « Analyse Distribution M101 ».

En traçant les bras de la galaxie et en les reportant sur une grille où nous pondérons la masse en comptant le nombre de bras qui traversent chaque cellule, nous obtenons :

We will first analyze M101, just as we did for M33, before examining the interactions with neighboring galaxies. See M101_Analyse.xlsx, "Analyse Distribution M101" tab. By tracing the galaxy's arms and mapping them onto a grid—where we weight the mass by counting the number of arms passing through each cell—we obtain:



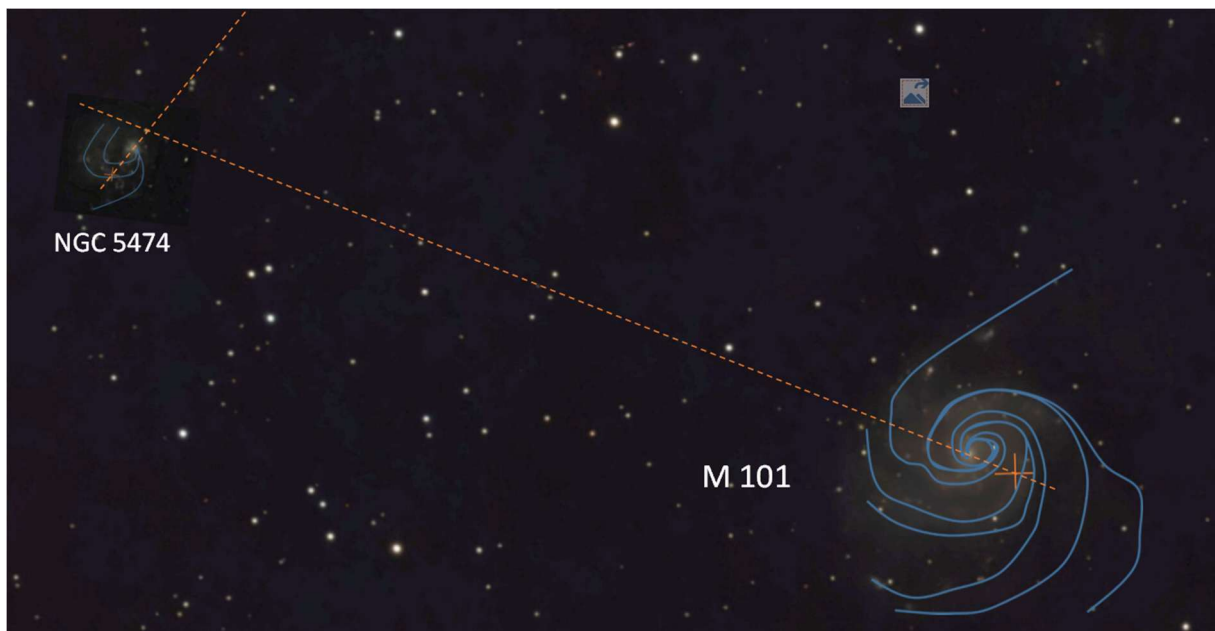
Le centre de gravité (croix orange) est décentré du bulbe galactique.

Un des bras (le plus à droite) apparaît comme perturbé.

The center of gravity (orange cross) is offset from the galactic bulge. One of the arms (the one furthest to the right) appears disturbed.

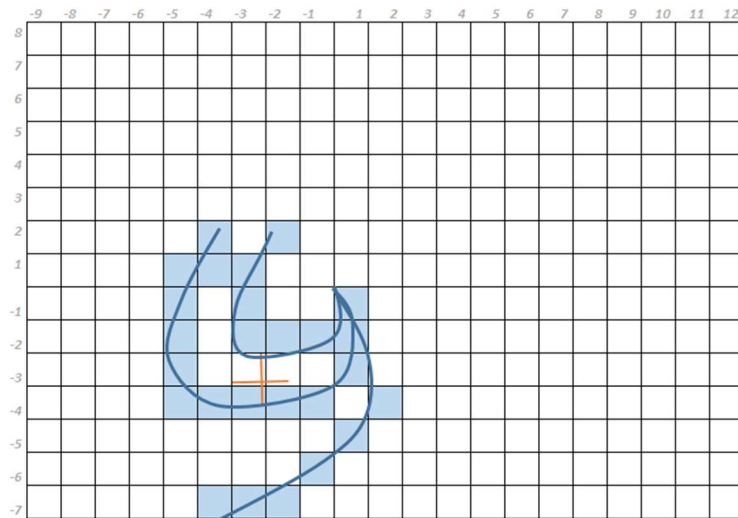
Si nous traçons un axe reliant ce centre de masse au centre du bulbe galactique, nous pointons en direction de NGC 5474 :

If we draw a line connecting this center of mass to the center of the galactic bulge, we point towards NGC 5474:



Analysons maintenant NGC 5474 pour déterminer son centre de masse (Cf. M101_Analyse.xlsx, onglet « Analyse Distribution-NGC ») :

Let us now analyze NGC 5474 to determine its center of mass (see M101_Analyse.xlsx, "Analyse Distribution-NGC" tab):



Cette petite galaxie est extrêmement perturbée, son bulbe est en bordure de la galaxie et une grande partie de sa masse excentrée.

L'axe entre le centre de masse et le bulbe ne pointe pas vers une autre galaxie :

This small galaxy is extremely disturbed; its bulge lies at the edge of the galaxy, and a large part of its mass is offset. The axis connecting the center of mass and the bulge does not point toward another galaxy:



Une telle disposition paraît incongrue : si M101 et NGC5474 sont en interaction gravitationnelle, cette force devrait décaler leur masse vers la galaxie adjacente et non vers l'extérieur. Ce binôme paraît donc instable.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que les décalages des masses se seraient fait alors que ces deux galaxies étaient plus proches et positionnées différemment :

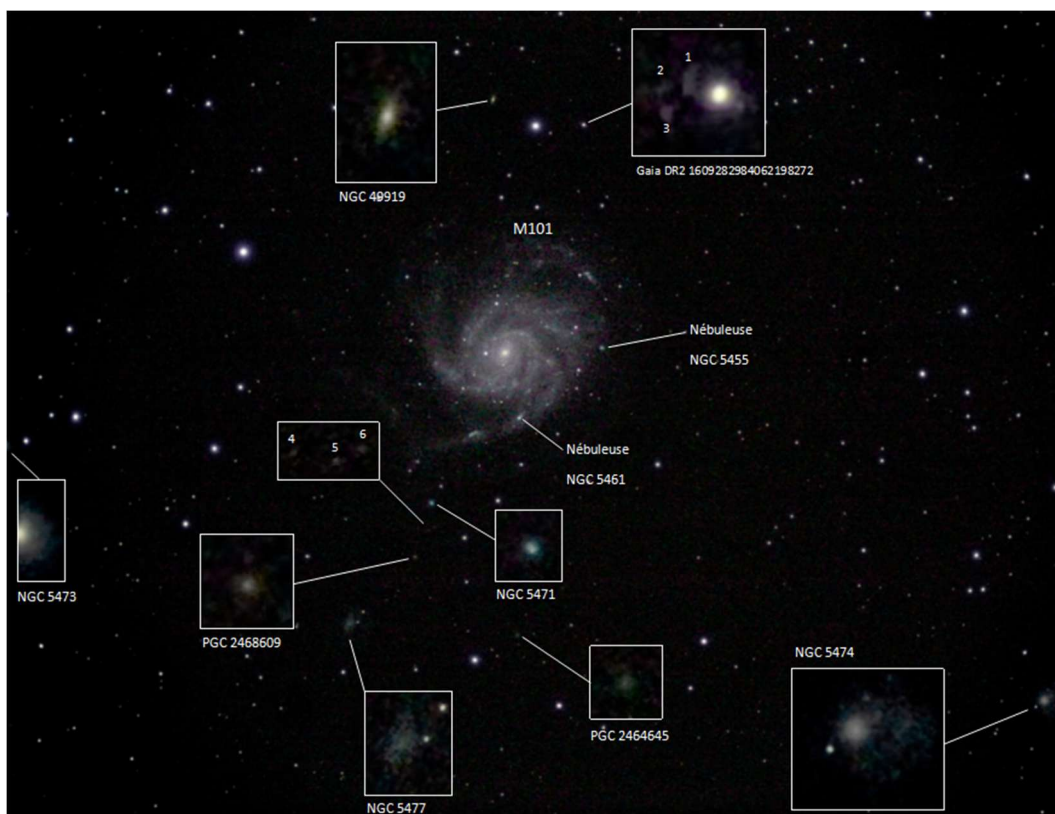
Such an arrangement seems incongruous: if M101 and NGC 5474 are gravitationally interacting, this force should shift their mass toward the adjacent galaxy rather than outward. This pair therefore appears unstable. We might hypothesize that the mass shifts occurred when these two galaxies were closer together and differently positioned:



Depuis ce croisement, les deux galaxies auraient continué leur course, chacune tournoyant en étant encore déformé par leur rencontre.

Cette interaction gravitationnelle nous permet d'affirmer que ces deux galaxies appartiennent à un même groupe de galaxies. Essayons d'observer d'autres galaxies qui feraient également partie de ce groupe, en observant un champ plus large (Lunette 152/900) :

After this encounter, the two galaxies presumably continued on their paths, each spinning while still bearing the distortions caused by their meeting. This gravitational interaction allows us to conclude that these two galaxies belong to the same galaxy group. Let us try to observe other galaxies that might also be part of this group by viewing a wider field (using the 152/900 refractor):



Attention, l'image est inversée (haut/bas et droite/gauche) par rapport à celle du Seestar)

Nous avons un lot de galaxies réparties autour de M101, qui paraît être le centre de l'amas.

Ceci à condition de démontrer que chacune des galaxies satellites est bien en interaction gravitationnelle avec M101, comme nous l'avons fait pour NGC 5474.

Note that the image is inverted (top/bottom and right/left) compared to the Seestar image. We have a group of galaxies distributed around M101, which appears to be the center of the cluster. This is subject to demonstrating that each of the satellite galaxies is indeed gravitationally interacting with M101, as we did for NGC 5474.

Étude de l'amas de la Vierge

Study of the Virgo Cluster

Passons à un amas plus conséquent avec l'amas de la Vierge. Nous allons nous intéresser tout d'abord à plusieurs régions remarquables avant de prendre du recul pour apprécier l'amas dans sa globalité.

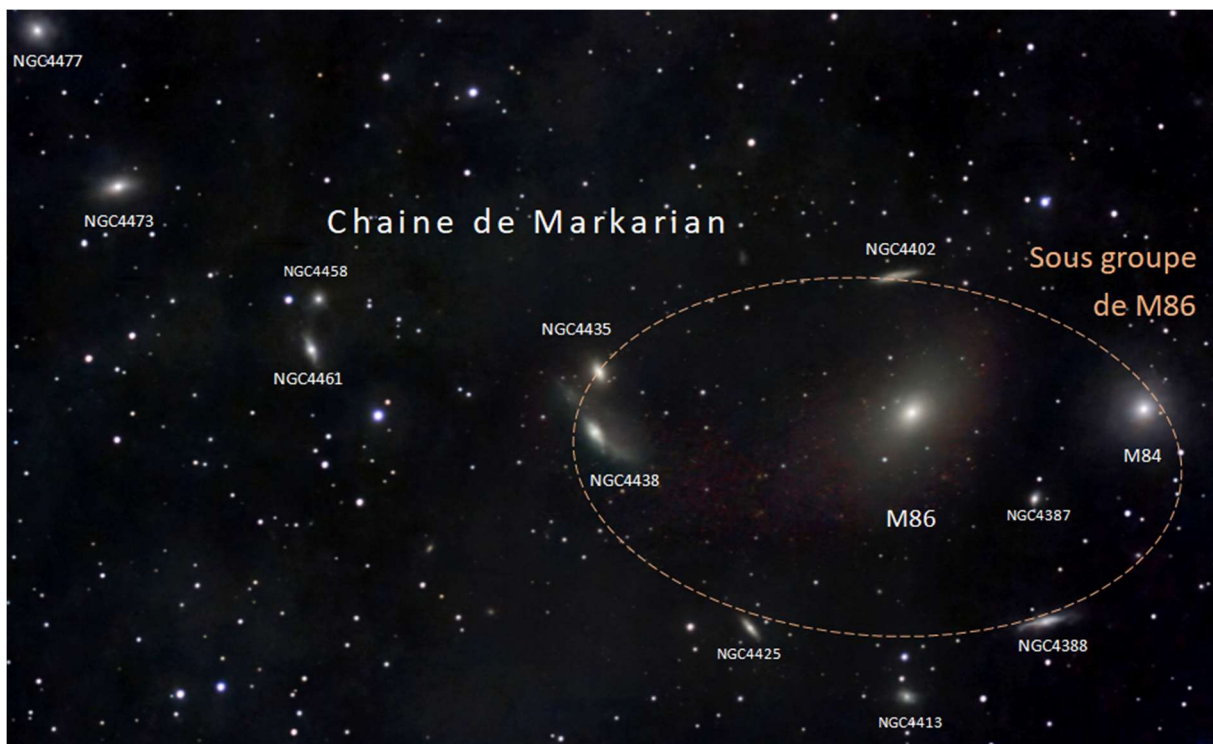
Let us move on to a more substantial cluster: the Virgo Cluster. We will first focus on several remarkable regions before stepping back to appreciate the cluster as a whole.

Sous-groupe de M86

Subgroup of M86

Cette formation est plus connue sous le nom de Chaîne de Markarian. Cette chaîne comporte deux structures : un alignement de galaxies, et le sous-groupe de M86 composé de M86 et de plusieurs galaxies satellites.

This formation is better known as Markarian's Chain. The chain comprises two structures: an alignment of galaxies and the M86 subgroup, consisting of M86 and several satellite galaxies.

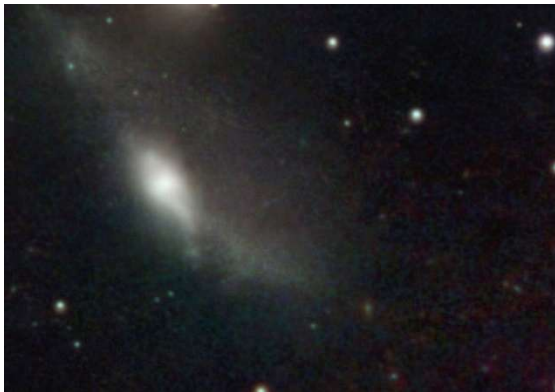


Ces galaxies sont proches et en interaction conduisant à des « ponts » de matière, notamment entre M86 et NGC4438 qui est très déformée. La matière déplacée l'est vers M86, c'est donc une configuration plus stable que la paire M101-NGC5474 vue précédemment.

These galaxies are nearby and interacting, resulting in "bridges" of matter—notably between M86 and the highly distorted NGC 4438. The displaced material is drawn toward M86, making this a more stable configuration than the previously observed M101–NGC 5474 pair.

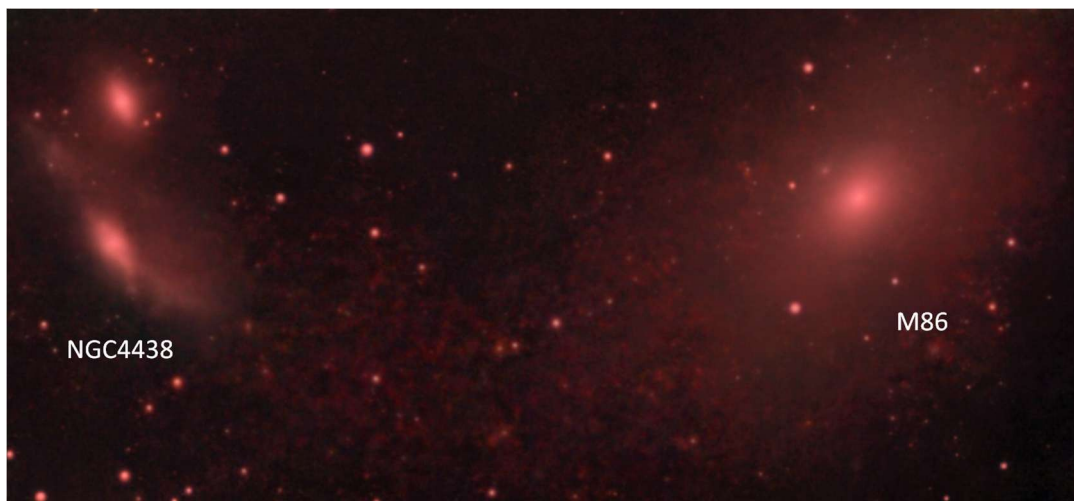
Déformation de NGC4438 :

Deformation of NGC 4438:



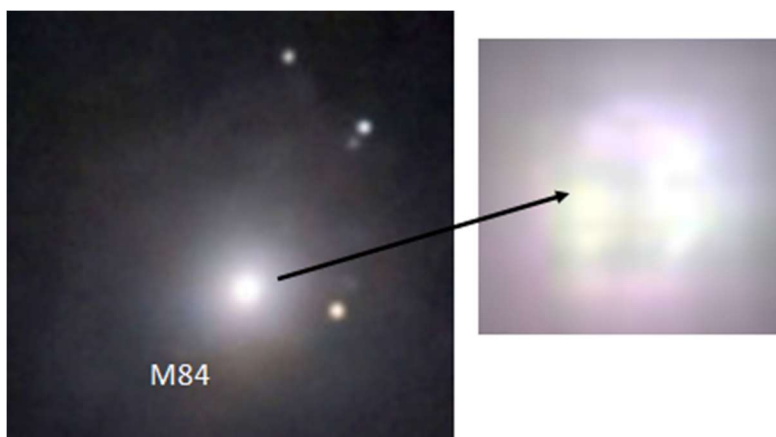
Pour mettre en évidence cet échange de matière, il faut pousser le niveau dans le rouge et jouer sur le contraste (Seestar S50 avec filtre UHC) :

To highlight this exchange of material, you need to push the levels into the red and adjust the contrast (Seestar S50 with UHC filter):



Notons une galaxie présentant des barres de matière sombre, M84 :

Let us note a galaxy exhibiting dark matter bars: M84.



Sous-groupe de M87

M87 subgroup

Prenons un peu de recul en constituant une vue panoramique plus large, au moyen de nombreuses prises de vue au Seestar S50. Ces vues sont positionnées sur une vue d'ensemble réalisée avec une lunette 80/400 (Photo Jérôme Delaunay).

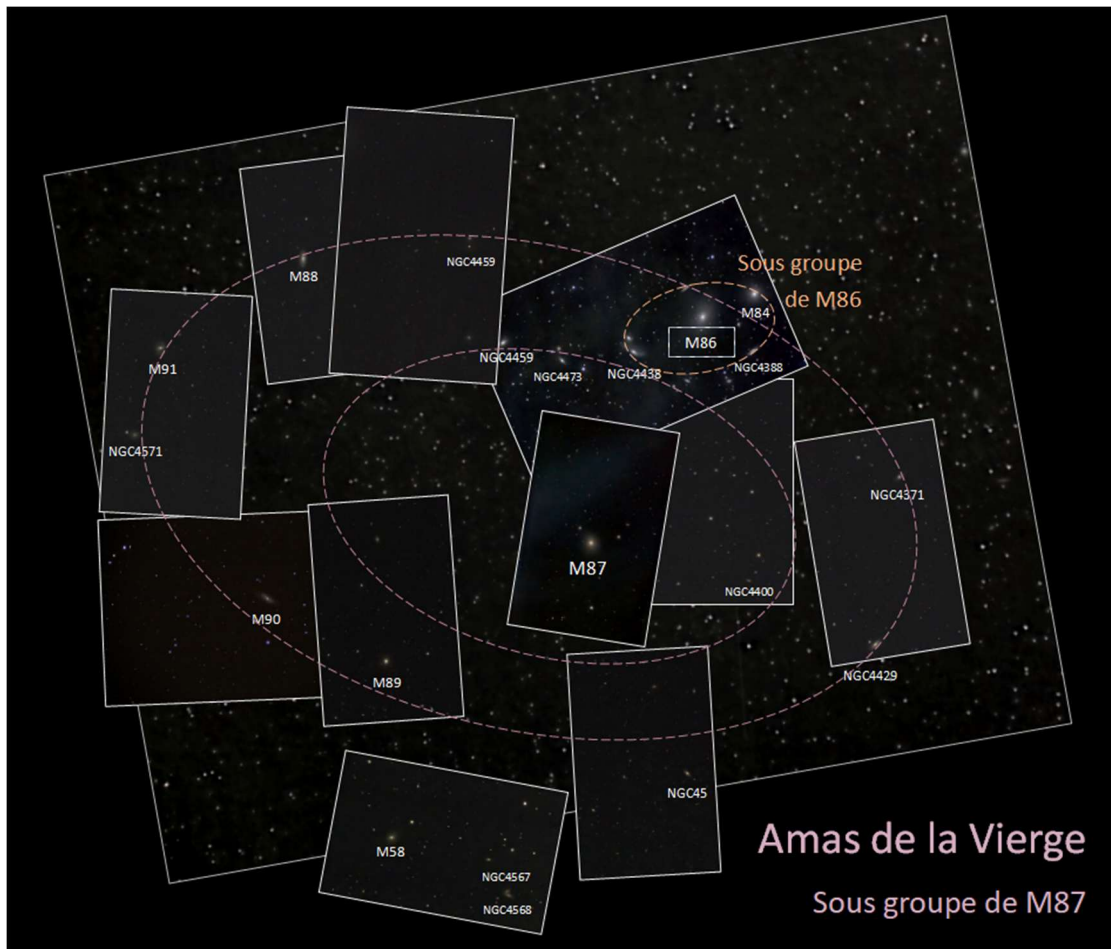
Nous constatons que le sous-groupe de M86 et la chaîne de Markarian sont satellites d'une grosse galaxie centrale, M87 :

Let us step back and create a wider panoramic view by combining numerous shots taken with the Seestar S50. These views are positioned over an overview image captured with an 80/400 refractor (Photo: Jérôme Delaunay). We can see that the M86 subgroup and Markarian's Chain are satellites of a large central galaxy, M87:



La détermination des trajectoires de révolutions ne nous est pas accessible (Il faudrait une spectrométrie très précise des galaxies pour déterminer leurs vitesses par mesure du décalage dans le rouge.). Néanmoins, nous pouvons proposer une estimation en traçant des éclipses qui passent par un nombre maximal de galaxies :

Determining orbital trajectories is beyond our reach (highly precise galaxy spectrometry would be required to determine their velocities by measuring redshift). Nevertheless, we can propose an estimate by tracing ellipses that pass through the maximum number of galaxies:



Nous avons une rotation du sous-groupe de M86 sur lui-même, et il tourne autour de M87 avec les autres galaxies.

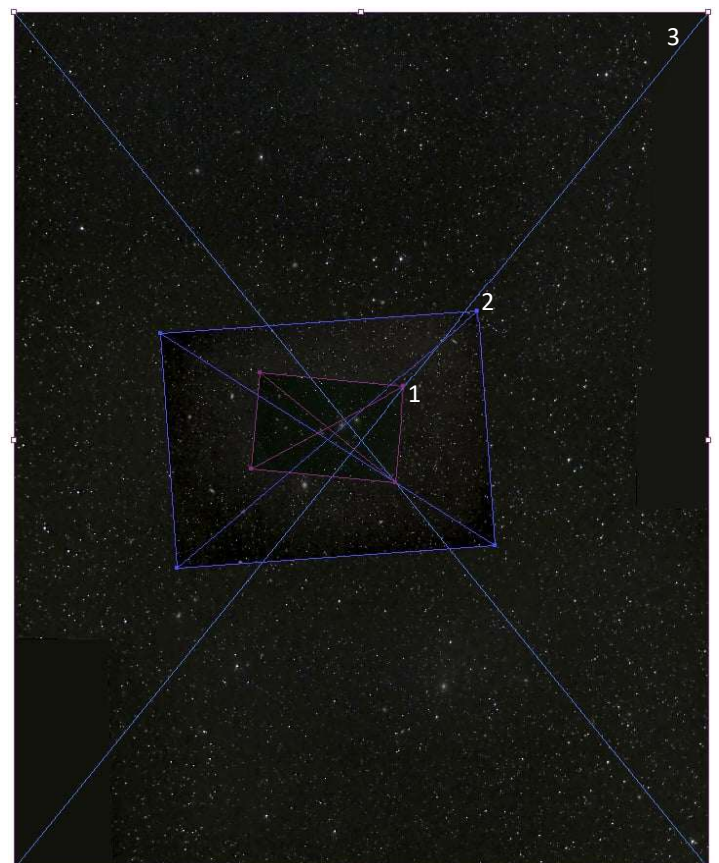
We have a rotation of the M86 subgroup about its own center, and it orbits M87 along with the other galaxies.

Prenons encore du recul avec une vue à champ large composée de plusieurs séries de photos. Le résultat final est la combinaison de vues à différentes focales :

- 1 - Champ central chaîne de Markarian 400 mm
- 2 - Zone centrale élargie 210 mm
- 3 - Champ large 3 x 100 mm

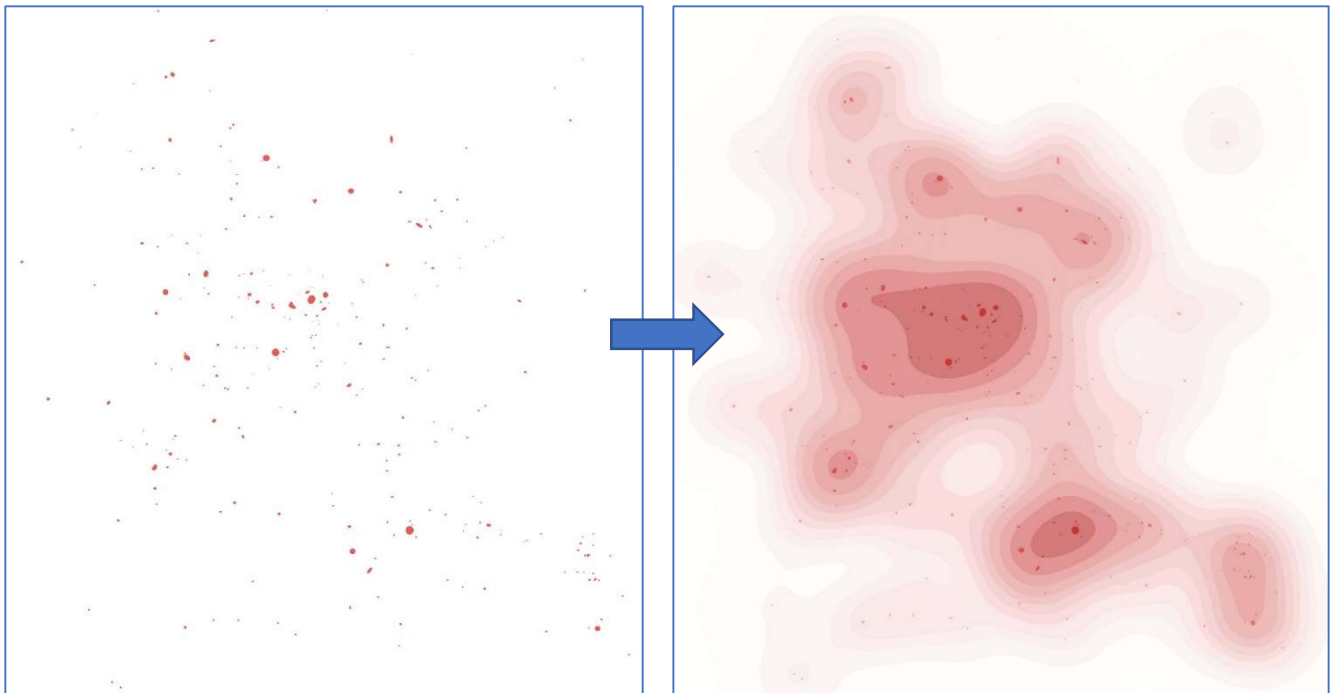
Let us step back further and plot all the visible galaxies on a panoramic view composed of several views taken with the 80/400 telescope:

- 1 - Markarian's Chain central field (400 mm)
- 2 - Enlarged central area (210 mm)
- 3 - Wide field (3 x 100 mm)



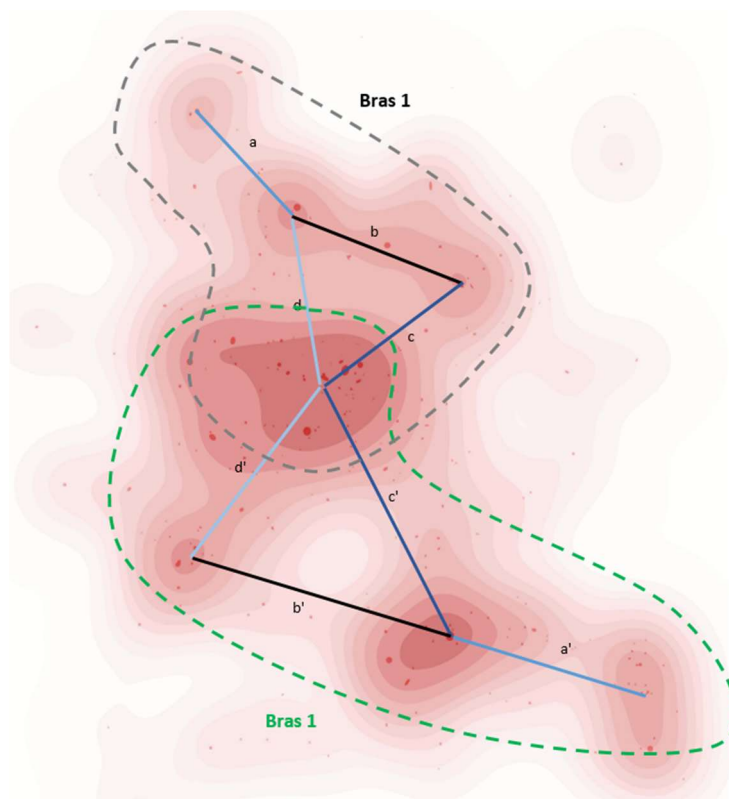
Ce travail conséquent de repérage de 300 galaxies a été effectué par Jérôme Delaunay, mon frère, qui m'a rejoint dans mes travaux et m'aide sur des sujets qui demandent beaucoup de données et de temps. En reprenant uniquement le tracé des galaxies, et en le floutant à différentes échelles dans des calques Photoshop, on obtient une représentation de la densité de matière dans l'amas. Cette méthode est comparable à celle utilisée pour avoir une vue de la répartition du gaz dans M33.

This substantial task of locating 300 galaxies was carried out by my brother, Jérôme Delaunay, who has joined me in my work and assists with projects requiring significant time and data. By isolating the outlines of the galaxies and blurring them at various scales using Photoshop layers, one obtains a representation of the matter density within the cluster. This method is comparable to the one used to visualize the distribution of gas in M33.



La structure de l'amas ressemble à celui d'une galaxie, avec des « bras » en rotation autour d'un bulbe central :

The structure of the cluster resembles that of a galaxy, with "arms" rotating around a central bulge:



Au sein de chaque bras, la géométrie est relativement homogène :

Within each arm, the geometry is relatively uniform:

Bras 1		Hauteur	Longeur	Tangente	Moyenne	Ecart
a		2.55	2.37	3.48	4.27	
b		1.63	4.16	4.47		4.5%
c		2.54	3.39	4.24		-0.9%
d		4.06	0.69	4.12		-3.6%

Bras 2		Hauteur	Longeur	Tangente	Moyenne	Ecart
a'		1.45	4.72	4.94	6.23	
b'		1.91	6.32	6.60		6.0%
c'		6.09	3.11	6.84		9.8%
d'		4.17	3.18	5.24		-15.8%

La distance entre le centre de chaque sous-amas définit une longueur d'onde à grande échelle.

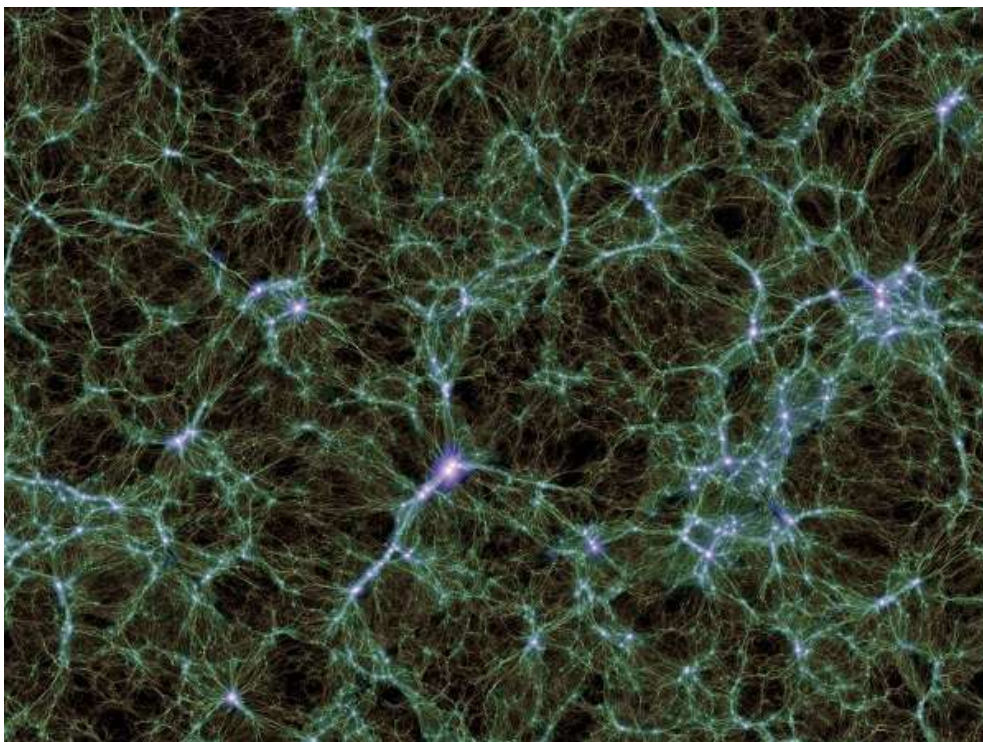
La longueur moyenne de 4.27 correspond à deux fois la longueur de la chaîne de Markarian soit 40 millions de Parsecs.

Bien sûr, cette analyse est à prendre avec précautions, l'amas n'est pas forcément plan et les distances perçues peuvent en être affectées.

The distance between the centers of each sub-cluster defines a large-scale wavelength. The average length of 4.27 corresponds to twice the length of Markarian's Chain—that is, 40 million parsecs. Of course, this analysis should be treated with caution; the cluster is not necessarily planar, and perceived distances may be affected by this.

Nous retrouvons un petit aperçu de la structure en filaments des supers-amas de galaxies qui a été modélisée par un groupe de chercheurs :

We see a brief glimpse of the filamentary structure of galaxy superclusters, as modeled by a group of researchers:



(Crédit TNG collaboration)

7. L'évolution des galaxies par fusion entre galaxies

Galaxy evolution through galaxy mergers

Revenons à la question des interactions gravitationnelles entre galaxies avec des galaxies qui fusionnent à un stade plus avancé que les interactions vues précédemment.

Le nom qui nous vient immédiatement à l'esprit est M51 et son satellite NGC5195, donc l'aspect est connu au-delà des astronomes amateurs (Au Seestar S50) :

Let us return to the subject of gravitational interactions between galaxies, looking at galaxies merging at a more advanced stage than the interactions previously discussed. The name that immediately comes to mind is M51 and its satellite NGC 5195—an object whose appearance is familiar to more than just amateur astronomers (captured here with the Seestar S50):



Une partie de la matière déplacée est en périphérie et non entre les deux bulbes. Ce mouvement a dû se faire quand le couple de galaxies était dans une autre position. Leur rotation et de probables rebonds ont dispersé cette matière en périphérie. Il y a un bras commun entre les deux galaxies : la fusion est à un stade avancé et la matière dispersée va se stabiliser en rotation autour de la galaxie complètement fusionnée.

Some of the displaced material lies at the periphery rather than between the two bulges. This movement must have occurred when the pair of galaxies was in a different position; their rotation and likely gravitational rebounds scattered this material outward. A shared arm connects the two galaxies, indicating that the merger is at an advanced stage; the scattered material will eventually settle into a stable orbit around the fully merged galaxy.

De même que le front d'ionisation observé dans M42, ce mouvement entraîne une compression du gaz contenu dans les galaxies. On observe de nombreuses nébuleuses actives, et de jeunes étoiles rouges (Photo Hubble/NASA) :

Just like the ionization front observed in M42, this movement causes compression of the gas within the galaxies. Numerous active nebulae and young red stars can be observed (Hubble/NASA photo):



8. Distribution fine de la matière dans les bras des galaxies

Fine distribution of matter in galaxy arms

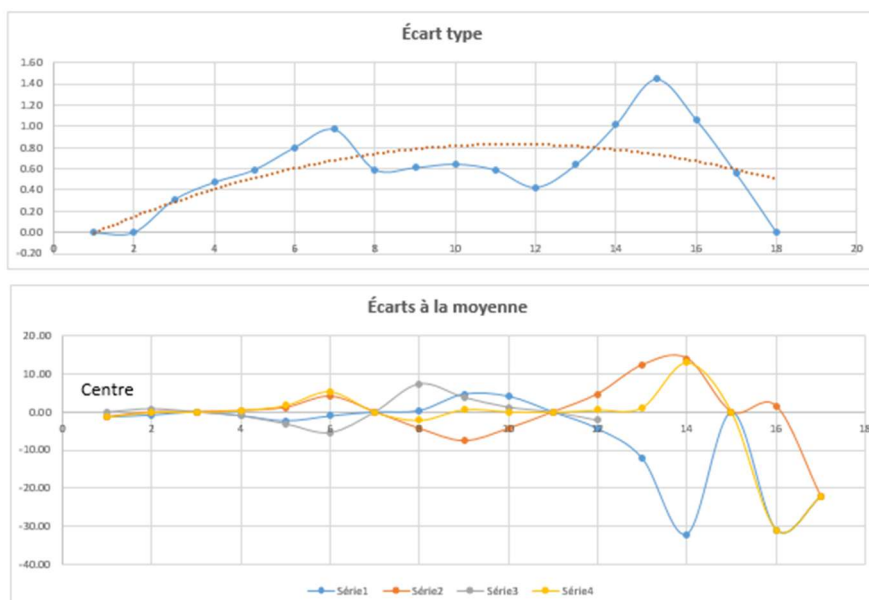
Nous avons à plusieurs reprises étudié la répartition de la matière dans les galaxies pour en estimer le centre de masse. Nous allons maintenant nous intéresser à la distribution de la matière au sein des bras et voir si cette distribution est homogène ou pas.

We have repeatedly studied the distribution of matter in galaxies to estimate their center of mass. We will now focus on the distribution of matter within the arms and see whether or not this distribution is homogeneous.

M106

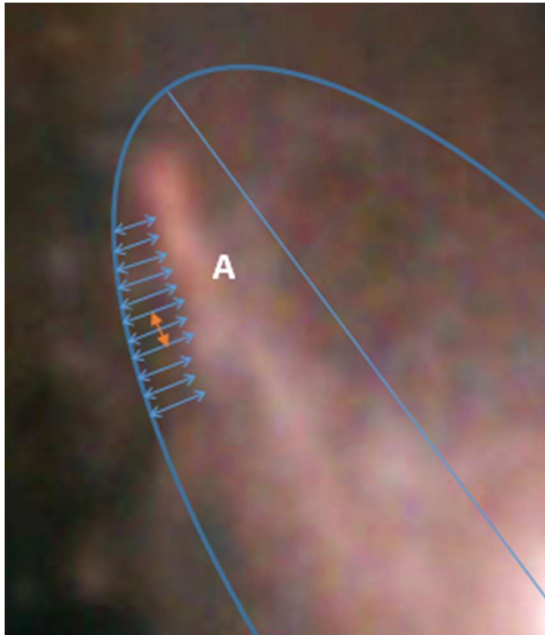
Dès le premier coup d'œil, nous voyons que cette galaxie est perturbée : les bras ont une géométrie très hétérogène. Cf. M106_Analyse.xlsx, l'analyse de distribution montre un écart-type et des écarts à la moyenne un peu chaotiques :

At first glance, we can see that this galaxy is disturbed: the arms exhibit a highly irregular geometry. See M106_Analyse.xlsx; the distribution analysis reveals a somewhat chaotic standard deviation and deviations from the mean:



Intéressons-nous au bras le plus déformé. Pour cela, nous allons mesurer l'écart entre son profil et celui d'une ellipse parfaite (Cf. Ondulations_bras_M106.xlsx, onglet « Analyse 1 ») :

Let us focus on the most distorted arm. To do this, we will measure the deviation between its profile and that of a perfect ellipse (see Ondulations_bras_M106.xlsx, "Analyse 1" tab):



À cette plus petite échelle d'analyse, la forme du bras semble déformée selon une fréquence relativement constante :

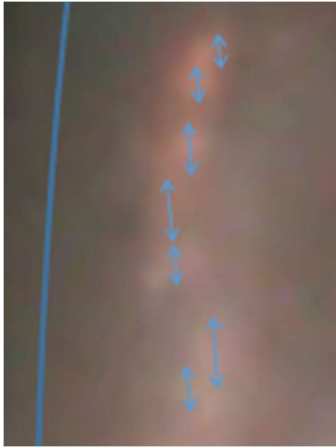
At this smaller scale of analysis, the shape of the arm appears deformed at a relatively constant frequency:



La période (flèche bleue) représente 3,3 % de la taille de l'ellipse de référence. Cette ellipse englobe les bras visibles.

Le bras qui est déformé comporte aussi des zones de densités différentes. Dans l'onglet « Analyse 2 », nous mesurons la période moyenne entre ces zones :

The period (blue arrow) represents 3.3% of the size of the reference ellipse. This ellipse encompasses the visible arms. The deformed arm also contains zones of varying densities. In the "Analysis 2" tab, we measure the average period between these zones:



Nous trouvons une valeur de 1,58 %.

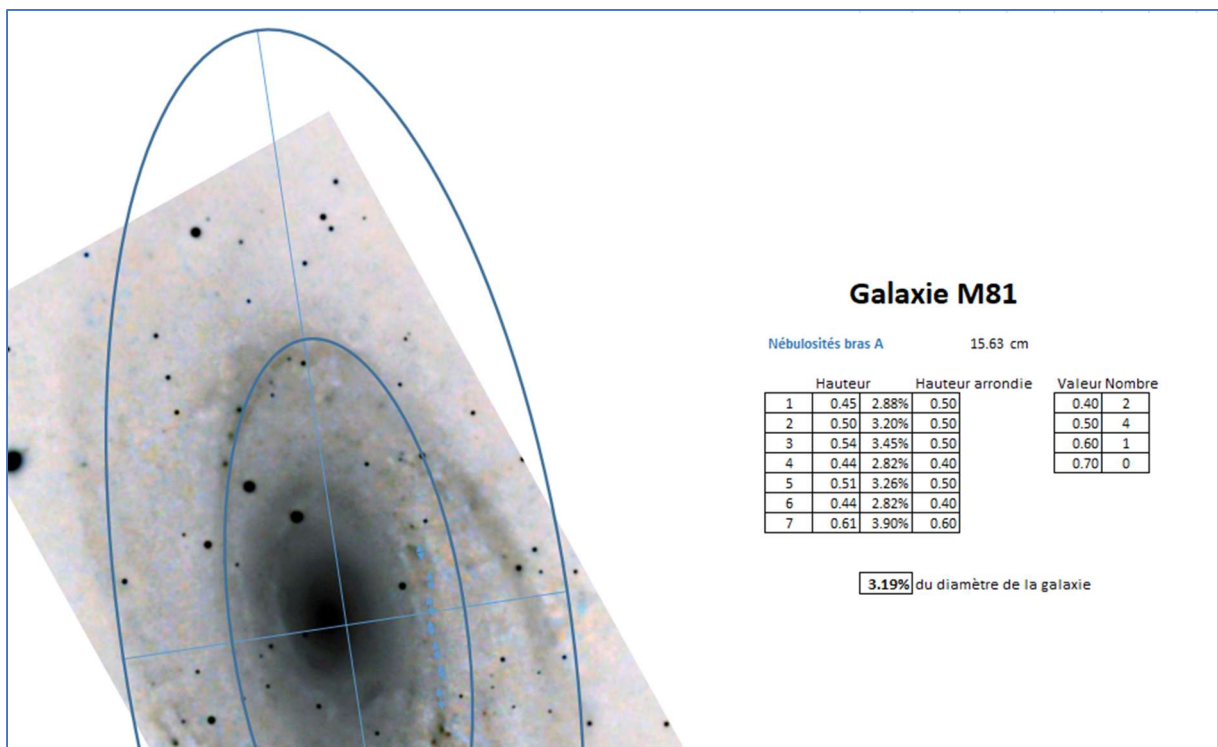
Il semble donc que la morphologie fine des bras de galaxies soit due à des mécanismes ondulatoires.

We find a value of 1.58%. It therefore appears that the fine morphology of galaxy arms is due to wave-like mechanisms.

M81

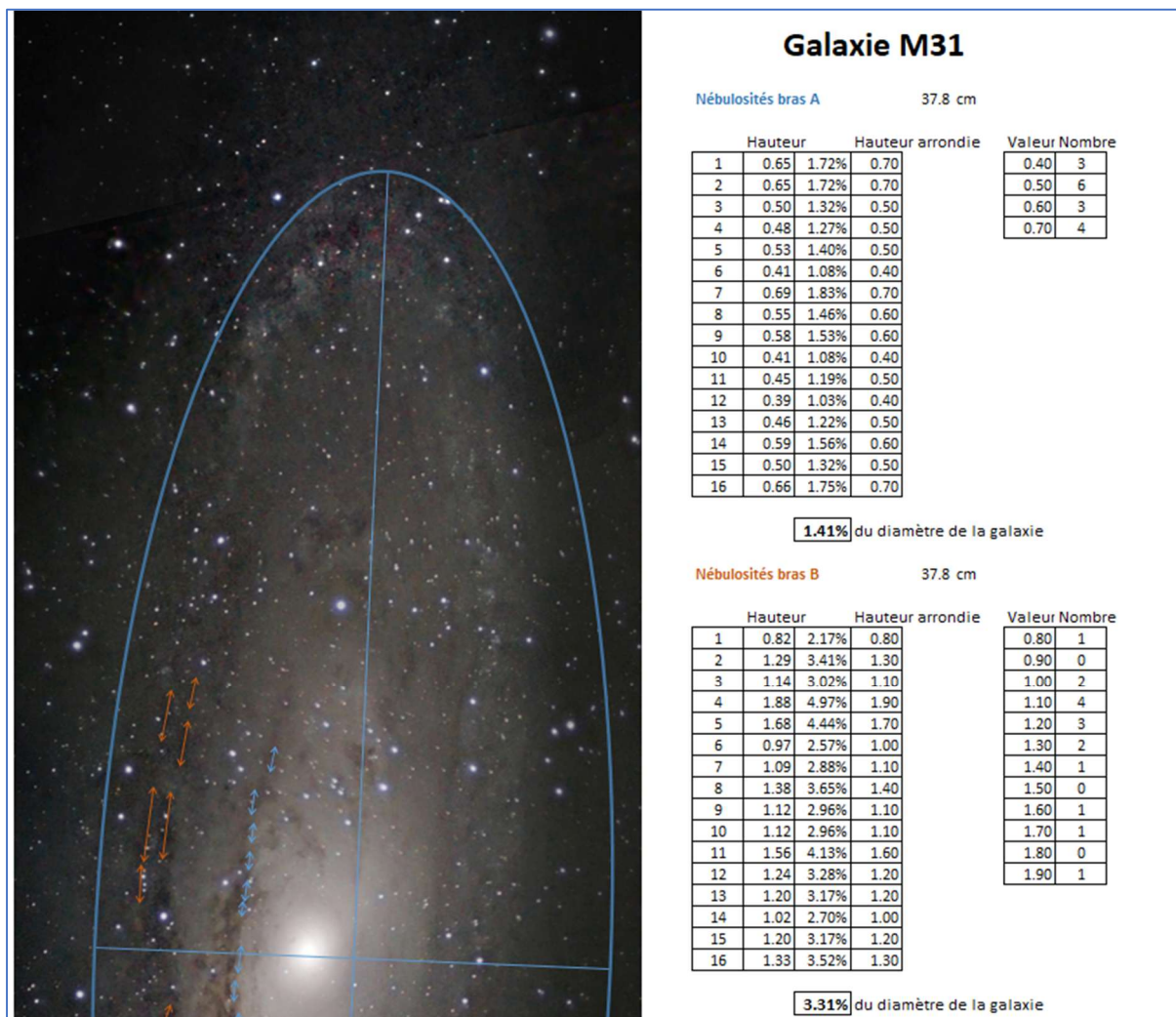
En procédant de même avec M81, nous trouvons une valeur de période proche de celles de M106 (Cf. M81_Distribution_bras.xlsx) :

By applying the same procedure to M81, we find a period value close to those of M106 (see M81_Distribution_bras.xlsx):



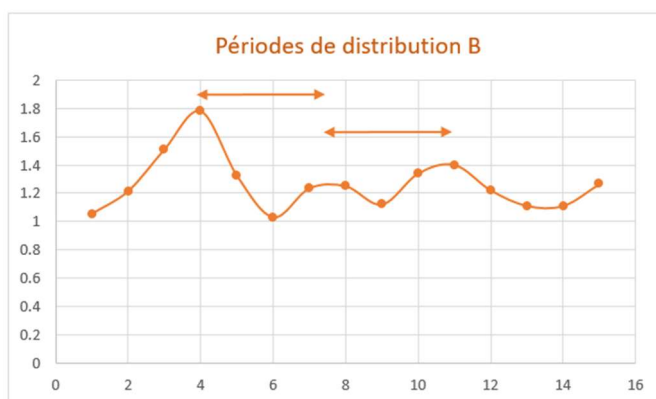
Pour M31, le niveau de détail de l'image permet de faire de telles mesures sur deux bras (Cf. M31_Distribution_bras.xlsx) :

For M31, the level of detail in the image allows such measurements to be made on two arms (see M31_Distribution_bras.xlsx):



Il n'y a qu'avec cette galaxie, plus facilement mesurable que les autres, que les variations de hauteur des nébulosités montrent des périodes régulières, au moins pour un bras :

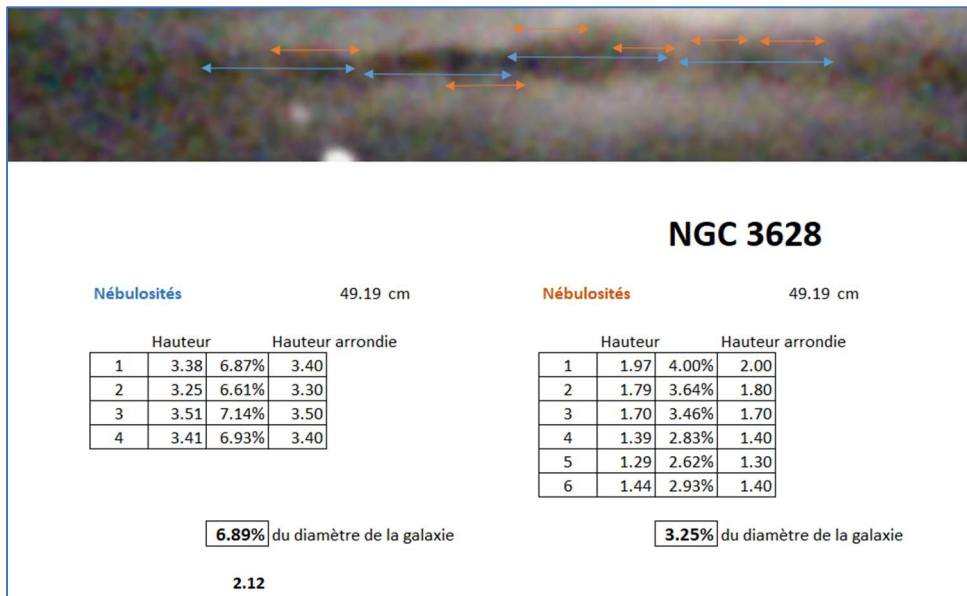
Only with this galaxy—which is more easily measurable than the others—do the variations in the height of the nebulosities exhibit regular periods, at least for one arm:



NGC 3628 (Triplet du Lion)

Cette plus petite galaxie étant vue sur la tranche, il nous faut adapter notre méthode (Cf. NGC3628_Distribution.xlsx). Dans un premier temps, nous mesurons la période des nébulosités. Il semble qu'il y ait en fait plusieurs périodes :

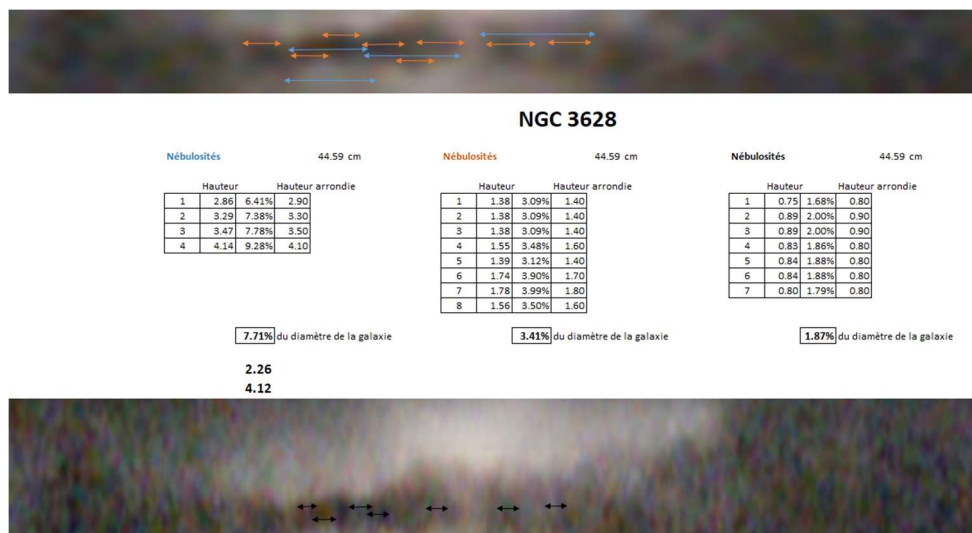
Since this smaller galaxy is viewed edge-on, we need to adapt our method (see NGC3628_Distribution.xlsx). First, we measure the period of the nebulosities. It appears that there are actually several periods:



Le rapport entre ces périodes est de 2,12, ce qui est proche de 2, nombre que l'on retrouve en musique concernant une note et son octave. Y aurait-il des phénomènes de résonance harmonique au sein des bras de galaxies ?

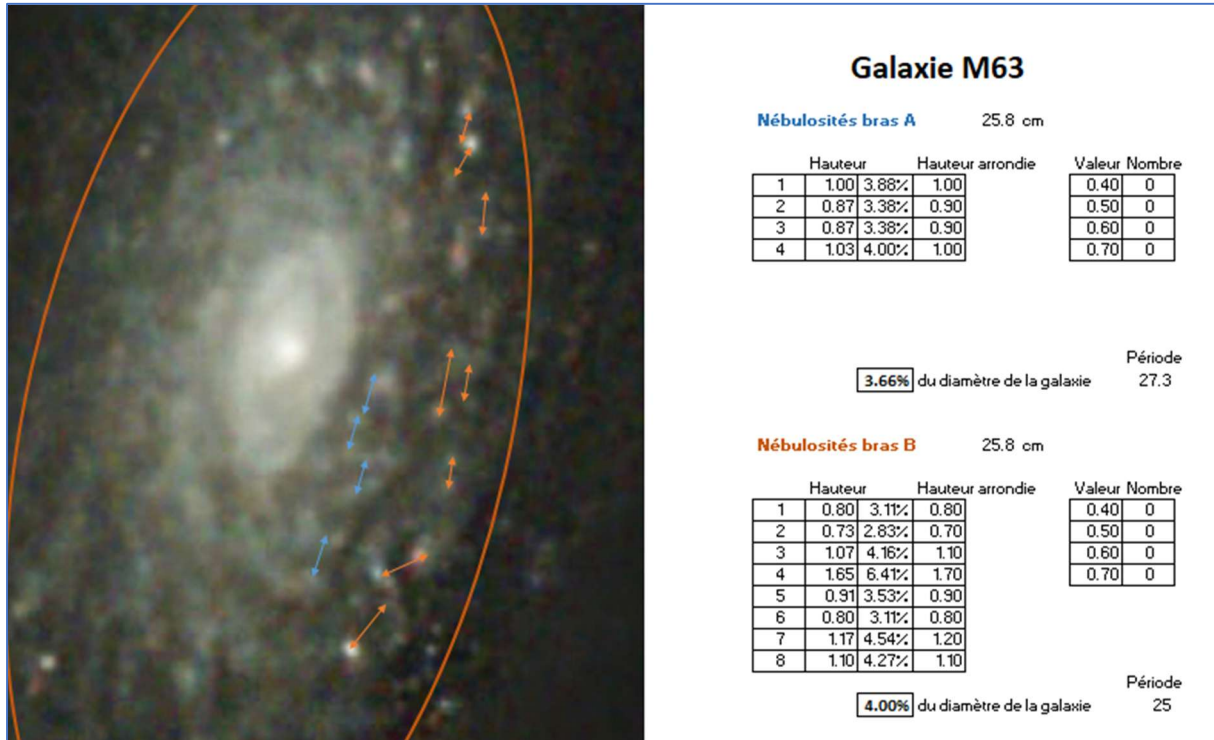
Afin de nous en assurer, deux nouvelles analyses sont faites. Une en floutant légèrement l'image pour atténuer le bruit, et une autre avec une photographie faite par un autre astronome amateur (Cf. NGC3628_Distribution-2.xlsx). Nous trouvons alors 3 périodes, avec des rapports proches de l'octave musicale.

The ratio between these periods is 2.12, a figure close to 2—the ratio found in music between a note and its octave. Could harmonic resonance phenomena be occurring within galactic arms? To verify this, two further analyses were conducted: one using a slightly blurred image to reduce noise, and another using a photograph taken by a different amateur astronomer (see NGC3628_Distribution-2.xlsx). We identified three periods, with ratios close to the musical octave.



Pour finir avec ces mesures, M63 nous montre une structure où les bras sont peu visibles. Le disque galactique est entièrement découpé en petites zones et selon des fréquences régulières.

To conclude with these measurements, M63 reveals a structure in which the spiral arms are barely visible. The galactic disk is entirely segmented into small zones arranged at regular intervals.



Synthèse sur la distribution de la matière

Summary of the distribution of matter

En approfondissement cette question, il s'avère que cette distribution obéissant à une plage de pourcentages assez proche est due à un phénomène périodique de compression du gaz initial au sein des galaxies. L'instabilité de Jeans (James Jeans, astronome britannique 1877-1946), décrit la période entre deux zones d'effondrement gravitationnel au sein du nuage de gaz initial à la naissance d'une galaxie. Jeans calcule la masse minimale pour obtenir un tel effondrement.

Upon closer examination, it turns out that this distribution—which falls within a fairly narrow percentage range—results from a periodic phenomenon involving the compression of the initial gas within galaxies. Jeans instability (named after the British astronomer James Jeans, 1877–1946) describes the interval between regions of gravitational collapse within the initial gas cloud during a galaxy's formation. Jeans calculated the minimum mass required for such a collapse to occur.

$$\lambda J = c^2 / G \times \Sigma$$

avec :

λJ : période

c^2 vitesse du son dans le gaz : 8000 m/s pour M63

speed of sound in the gas

Σ densité de surface du gaz : $20 M_0 / \text{pc}^2$ parsec le long des segments de bras *gas surface density*

M_0 / pc^2 : masses solaires par parsec carré *solar masses per square parsec*

G constante gravitationnelle : $6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ *gravitational constant*

Pour M63 cela donne donc :

For M63, this therefore gives:

1 masse solaire = $1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$

1 parsec = $3,086 \times 10^{16} \text{ m}$

$\Sigma = 20 \times (1,989 \times 10^{30} \text{ kg} / (3,086 \times 10^{16} \text{ m})^2 = 4,17 \times 10^{-3} \text{ kg} / \text{m}^2$

$\lambda J = 8000^2 / 6,674 \times 10^{-11} \times 4,17 \times 10^{-3} = 2,299 \times 10^{20} \text{ m} = 745 \text{ parsecs}$

Avec nos mesures expérimentales, nous pouvons, en notant la taille des galaxies, estimer la taille en parsec d'une nébulosité de matière et calculer la marge d'erreur avec des valeurs données par la littérature :

Based on our experimental measurements, by noting the size of the galaxies, we can estimate the size of a cloud of matter in parsecs and calculate the margin of error using values from the literature:

	diamètre galaxie (k parsec)	Période % d	Période mesurée (k parsec)	Période théorique (k parsec)	Marge d'erreur	
M81	28.0	3.19%	0.89	0.85	5.08%	
M63a	30.0	3.66%	1.10	0.75	47.38%	x 1,5
M63b	30.0	4.00%	1.20	0.75	61.07%	
NGC 3628a	35.0	1.87%	0.65	0.65	0.69%	
NGC 3628b	35.0	3.41%	1.19	0.65	83.62%	x 2
NGC 3628c	35.0	7.71%	2.70	0.65	315.15%	x 4
M106a	40.0	1.62%	0.65	0.75	-13.02%	
M106b	40.0	1.55%	0.62	0.75	-16.78%	
M31a	47.0	1.41%	0.66	1.00	-33.73%	
M31b	47.0	3.31%	1.56	1.00	55.57%	x 1,5
		3.17%	1.12	0.78	44.27%	

Il semble que nos mesures soient en moyenne un peu trop grandes. Pour M81, NGC3628 (plus petite période) et M86 les valeurs sont proches. Pour NGC3628, nous avons une valeur très proche et deux autres périodes avec des rapports d'octaves. Pour M63 et M81 nous avons une période 1,5 fois moindre et une valeur erronée. Le ratio de 1,5 entre une période harmonique et sa fondamentale est un rapport de quinte.

It appears that our measurements are, on average, slightly too large. For M81, NGC3628 (shorter period), and M86, the values are close. For NGC3628, we obtained one very close value and two other periods related by octave ratios. For M63 and M81, we found a period 1.5 times shorter and one erroneous value. The 1.5 ratio between a harmonic period and its fundamental corresponds to a perfect fifth.

Si nous corrigeons les valeurs en octaves et en quintes du facteur constaté, la marge d'erreur globale devient très satisfaisante :

If we correct the octave and fifth values based on the observed factor, the overall margin of error becomes very satisfactory:

Période corrigée % d	Période corrigée (k parsec)	Marge d'erreur
3.19%	0.89	5.08%
2.44%	0.73	-1.74%
4.00%	1.20	61.07%
1.87%	0.65	0.69%
1.71%	0.60	-8.19%
1.93%	0.67	3.79%
1.62%	0.65	-13.02%
1.55%	0.62	-16.78%
1.41%	0.66	-33.73%
2.21%	1.04	3.71%
2.19%	0.77	-0.79%

Ce travail sera à poursuivre avec un télescope de plus forte résolution pour mieux distinguer cette fréquence de distribution et pouvoir mesurer plus fiablement des périodes. Nous obtenons régulièrement des périodes avec un rapport de quinte ou d'octave avec la période théorique.

This work will need to be continued using a higher-resolution telescope to better distinguish this distribution frequency and to measure periods more reliably. We consistently obtain periods that stand in a fifth or octave ratio to the theoretical period.

9. Divers phénomènes remarquables dans des galaxies

Various remarkable phenomena in galaxies

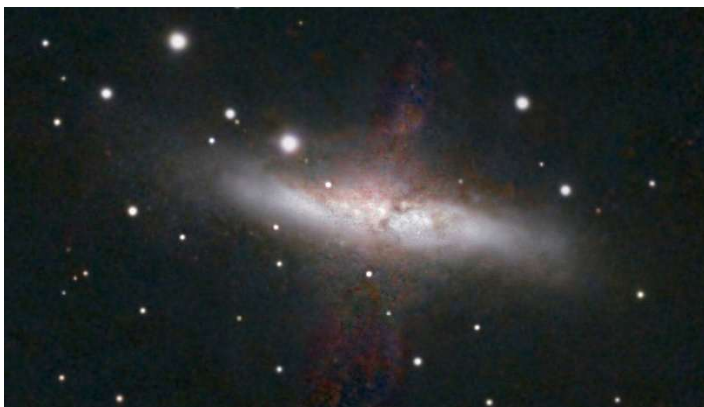
Avec les galaxies, nous ne sommes jamais au bout de nos surprises ! Il y en a tellement que nous en trouvons toujours qui ont des comportements particuliers.

M82 et M106, émission d'hydrogène

M82 and M106, hydrogen emission

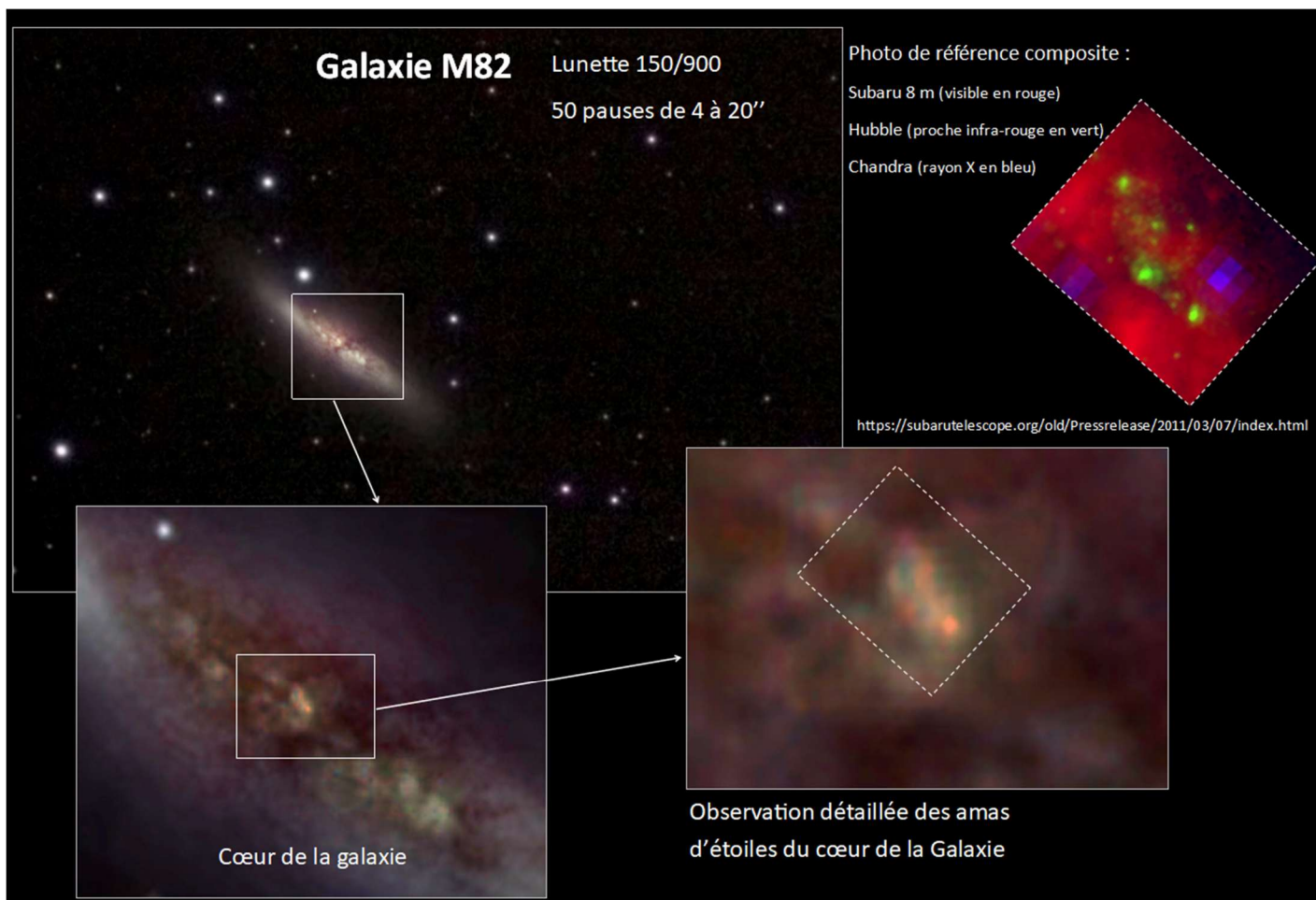
Au milieu de M82, de puissantes étoiles génèrent un vent solaire tellement fort qu'il propulse de l'hydrogène ionisé en rouge hors de la galaxie (Seestar S50).

At the heart of M82, powerful stars generate a solar wind so strong that it propels red-glowing ionized hydrogen out of the galaxy (Seestar S50).



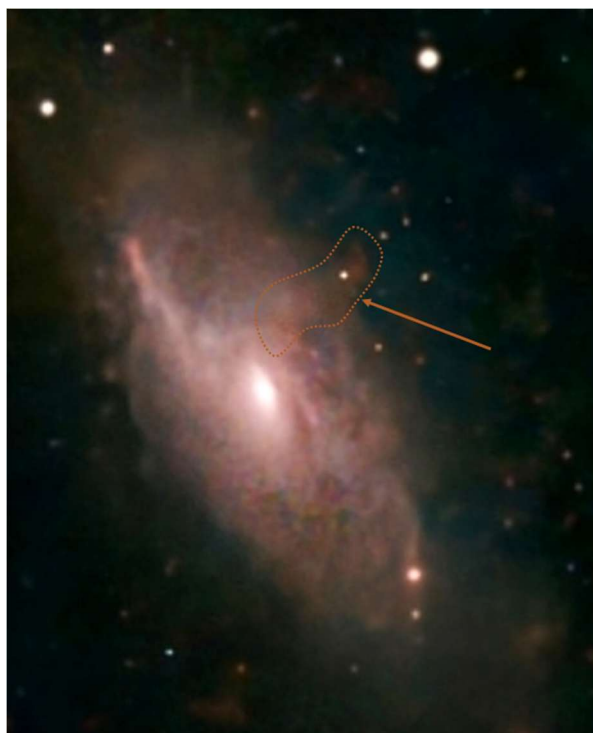
Essayons de détecter les amas de ces étoiles (Lunette 150/900) :

Let's try to detect the clusters of these stars (150/900 refractor):



Pour M106, ce flux d'hydrogène est beaucoup plus difficile à mettre en évidence. Avec plus d'une heure de pause au Seestar avec le filtre UHC le jet d'hydrogène est tout juste visible :

For M106, this hydrogen stream is much more difficult to detect. With an exposure of over an hour using the Seestar and the UHC filter, the hydrogen jet is barely visible:



M87, trou noir central

M87, central black hole

Nous avons déjà évoqué M87, centre de gravité de l'amas de la Vierge. Cette galaxie de forte masse héberge le plus lourd trou noir connu.

Cet objet tourne rapidement sur lui-même et comme pour les jeunes étoiles de la Rosette, cette rotation entraîne la génération d'un champ magnétique qui expulse sur son axe des particules chargées en un jet de matière.

Deux photographies sont utilisées, une du Seestar et une au Newton 254/1200 (Photo Jérôme Delaunay).

We have already mentioned M87, the center of gravity of the Virgo Cluster. This massive galaxy harbors the most massive black hole known. This object spins rapidly, and—much like the young stars in the Rosette Nebula—this rotation generates a magnetic field that ejects charged particles along its axis in a jet of matter. Two photographs are used: one from a Seestar and one from a 254/1200 Newtonian telescope (photo by Jérôme Delaunay).

Seestar S50

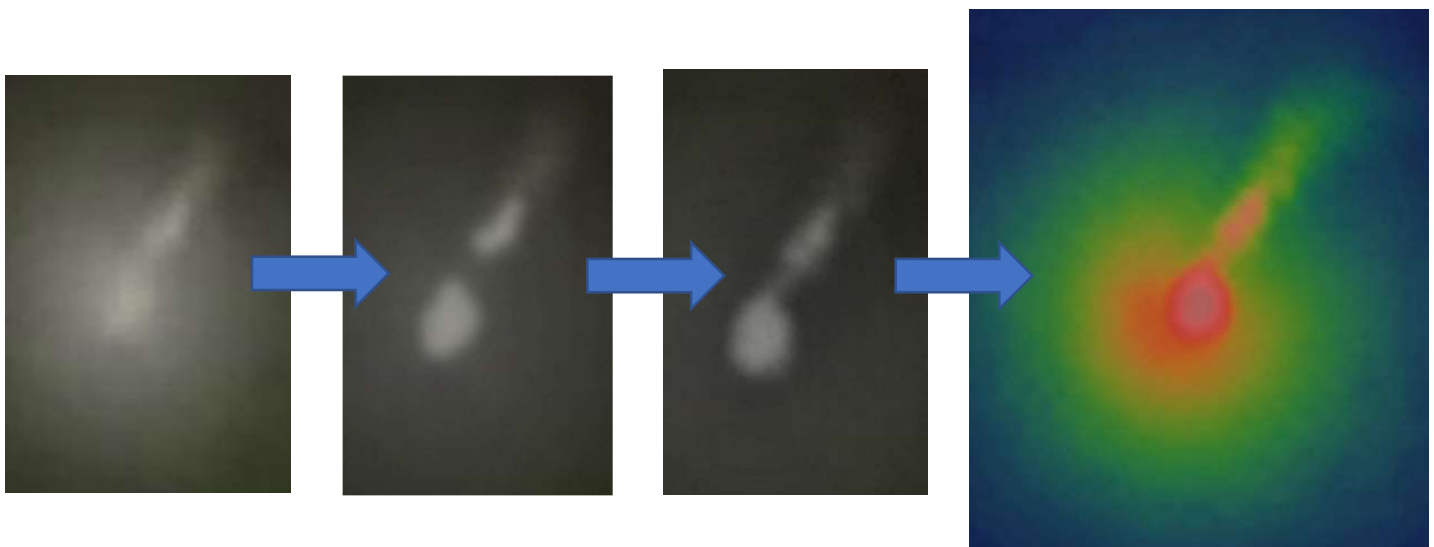


Newton 254/1200



Avec divers traitements (accentuation, seuillage, addition puis colorisation artificielle avec l'IA Gemini), nous parvenons à mettre ce jet en évidence.

Through various processing steps (sharpening, thresholding, addition, and subsequent artificial colorization using the Gemini AI), we are able to make this jet stand out.



C'est le seul artefact dû à un trou noir qui nous paraît accessible à l'astronome amateur.

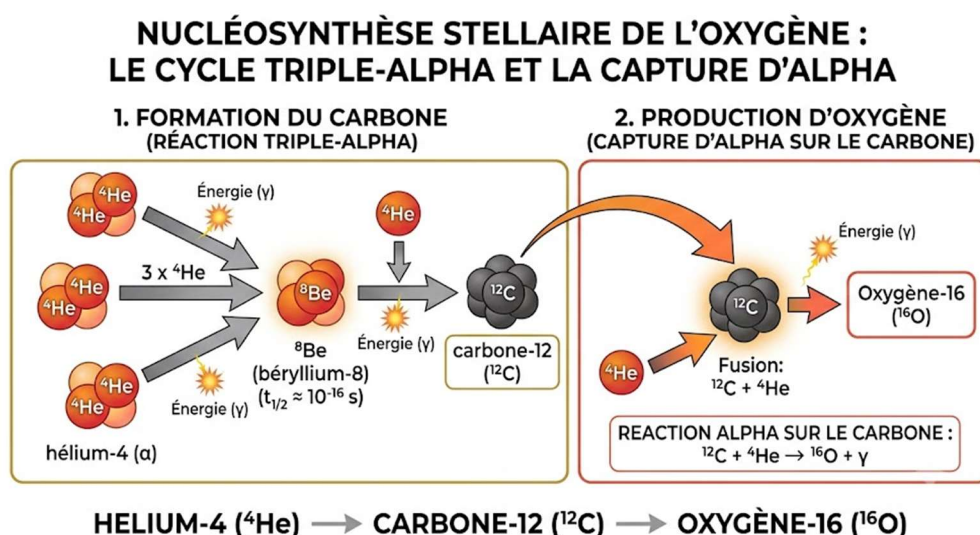
It is the only black-hole-related artifact that appears accessible to the amateur astronomer.

10. La mort des étoiles et la libération d'éléments plus lourds

The death of stars and the release of heavier elements

Nous avons plusieurs fois décrit la naissance des étoiles. Pour celles qui dépassent 8 masses solaires, les réactions thermonucléaires se termineront pas la fusion de l'hélium en carbone puis du carbone en oxygène (Image générée dans Gemini) :

We have described the birth of stars on several occasions. For those exceeding eight solar masses, thermonuclear reactions will culminate in the fusion of helium into carbon, followed by carbon into oxygen (Image generated in Gemini):



Avec le filtre UHC, nous pouvons détecter l'oxygène dont la raie OIII est proche de celle de l'hydrogène Béta.

With the UHC filter, we can detect oxygen, the OIII line of which is close to the Hydrogen-beta line.

Nébuleuses « planétaires »

"Planetary" nebulae

Cette dénomination historique est erronée, car il ne s'agit nullement de planètes, mais de nébuleuses issues d'explosions d'étoiles.

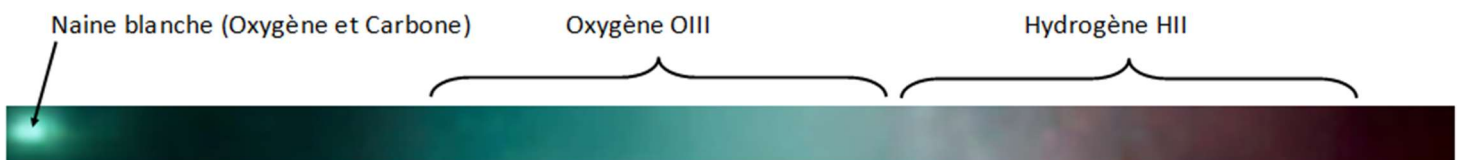
La nébuleuse M57 montre en bleu-vert l'oxygène libéré lors du processus.

This historical name is incorrect, as they are not planets at all, but nebulae resulting from stellar explosions. The M57 nebula displays, in blue-green, the oxygen released during the process.



Du centre vers la périphérie, nous avons :

From the center to the periphery, we have:



La nébuleuse M27 a un aspect plus irrégulier, la matière s'est dispersé sur des directions privilégiées. On a au final une répartition non-uniforme de l'hydrogène et de l'oxygène selon une symétrie à deux axes :

The M27 nebula has a more irregular appearance; the material has dispersed along preferred directions. The result is a non-uniform distribution of hydrogen and oxygen, following a two-axis symmetry:



Comme pour les étoiles du trapèze d'Orion, l'idée d'un rayonnement non-uniforme nous gêne concernant une étoile. Qu'est-ce qui aurait pu orienter la matière dans des directions précises ?

Cette propagation explosive se faisant dans le vide, nous devons écarter ici l'influence du milieu.

Il reste donc l'hypothèse de forces telles que la gravité, ou la force électromagnétique :

Une gravité initiale, non-uniforme dans toute les directions, pourrait s'expliquer par le fait que l'étoile initiale ait été une étoile double.

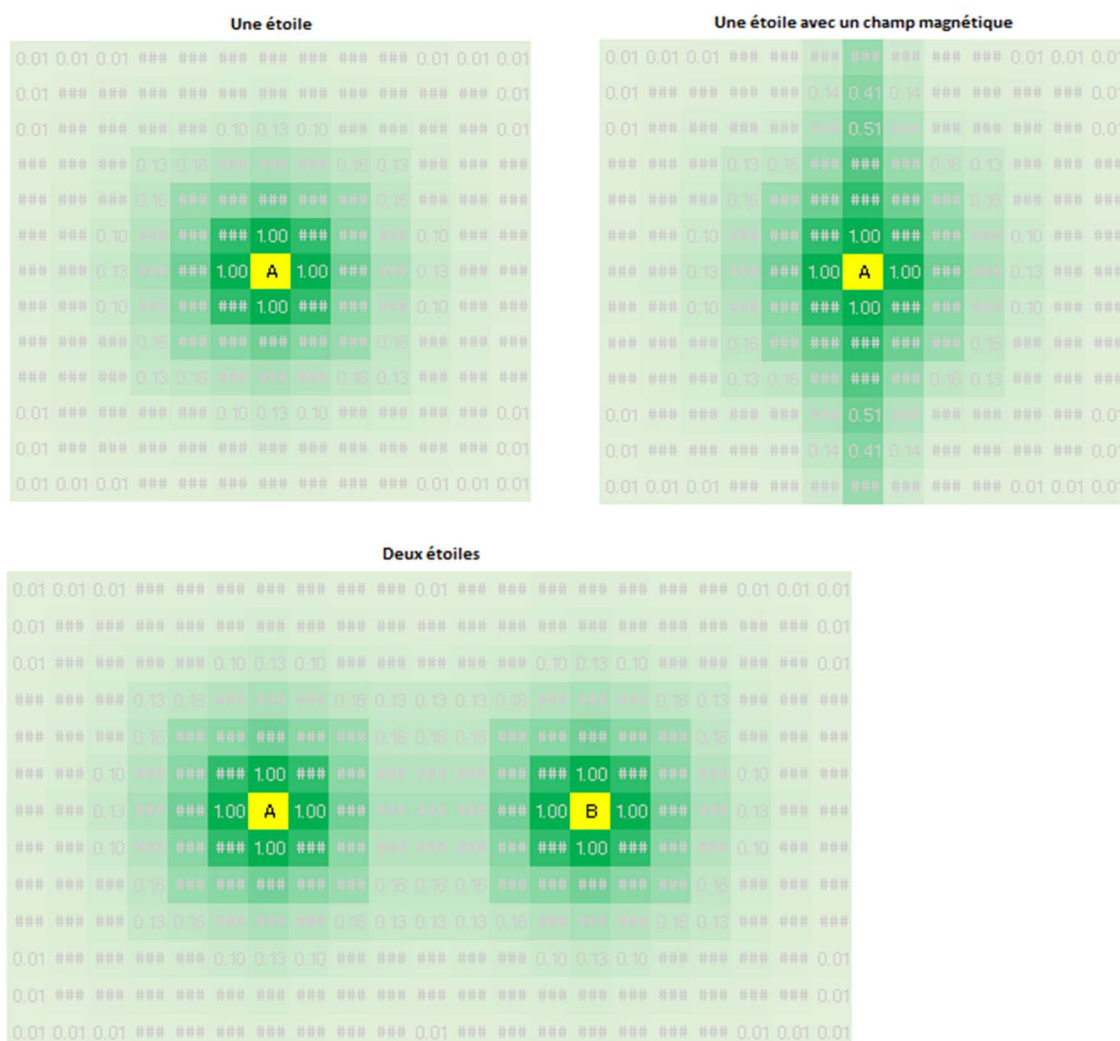
Un champ électromagnétique existant, comparable à celui créant les courants-jets des étoiles de la Rosette, aurait pu exister au moment de l'explosion de l'étoile et privilégier une direction de propagation.

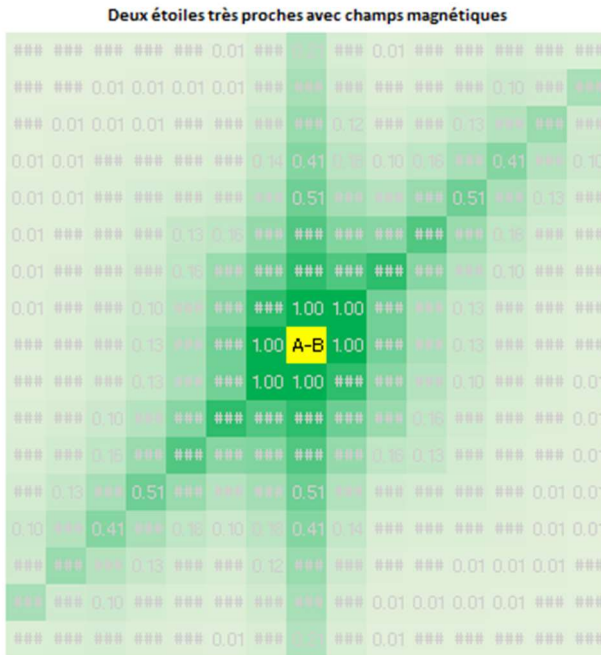
Essayons de modéliser cela de la manière la plus simple possible avec diverses combinaisons, étoile seule ou double, avec ou sans champ magnétique (Cf. Modélisation_M27.xlsm) : As with the stars of the Orion Trapezium, the concept of non-uniform radiation presents a challenge when considering a single star. What could have directed the material along specific paths? Since this explosive expansion occurs in a vacuum, we can rule out the influence of the surrounding medium.

This leaves the hypothesis of forces such as gravity or electromagnetism:

- *An initial gravitational pull—non-uniform across all directions—could be explained if the progenitor was a binary star system.*
- *A pre-existing electromagnetic field—similar to the one generating the jets in the Rosette Nebula stars—might have been present at the time of the explosion, favoring a specific direction of expansion.*

Let us attempt to model this as simply as possible using various combinations: single star versus binary system, and with or without a magnetic field (see Modélisation_M27.xlsm):

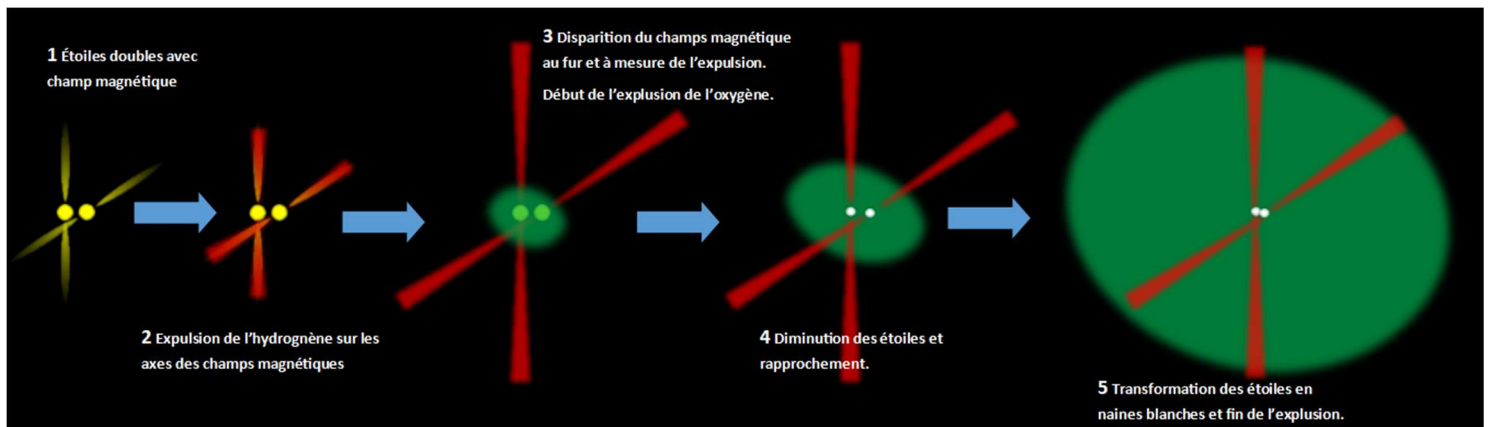




La seule combinaison qui donne une géométrie proche de M27 est obtenue avec deux étoiles ayant chacune un champ magnétique et un axe différent.

Ce qui est étonnant, c'est que l'hydrogène est très orienté dans sa diffusion et l'oxygène beaucoup moins. Imaginons ce qui aurait pu se passer si l'expulsion de l'oxygène avait eu lieu après celui de l'hydrogène :

The only combination that yields a geometry resembling M27 is obtained with two stars, each possessing a distinct magnetic field and axis. What is striking is that the hydrogen is highly directional in its dispersal, whereas the oxygen is far less so. Let us imagine what might have happened if the oxygen had been expelled after the hydrogen:



Bien sûr, à force d'empiler des hypothèses, il ne saurait s'agir ici d'une démonstration scientifique, c'est plutôt l'imagination d'un scénario supposé possible !

Of course, given the accumulation of hypotheses, this cannot be considered a scientific proof; rather, it is the imagining of a scenario deemed possible!

Oxygène dans les galaxies

Oxygen in galaxies

Au sein d'une galaxie, de nombreuses étoiles ont éjecté leurs gaz. Si nous augmentons légèrement la saturation du vert, M101 montre la présence d'oxygène, surtout à la base des bras :

Within a galaxy, many stars have ejected their gas. If we slightly increase the green saturation, M101 reveals the presence of oxygen, especially at the base of the arms:



Cet oxygène pourra être recyclé en participant à la création de plus grosses étoiles de masse suffisamment grande pour déclencher la fusion l'oxygène en éléments plus lourds (Silicium puis Souffre et jusqu'au Fer).

This oxygen can be recycled by contributing to the formation of larger stars—stars massive enough to trigger the fusion of oxygen into heavier elements (silicon, then sulfur, and up to iron).

Conclusion

Nous avons décrit un processus global de transformation de la matière partant de l'hydrogène, qui se condense pour former des étoiles, lesquelles forment des galaxies. La densité du gaz et les fronts d'ionisation concourent à cette création.

Les créations initiales ont eu lieu dans d'immenses nébuleuses dont il reste des reliquats actifs dans les galaxies.

Les Galaxies elles-mêmes sont mouvantes et en transformation permanente de par leurs interactions entre-elles.

Les galaxies présentent des formes variées, dues aux interactions gravitationnelles, et aussi des détails morphologiques dues à des phénomènes internes de nature périodique. Elles se regroupent en amas et en super amas qui donne un aspect filamentaire, à très grande échelle, à la distribution de la matière dans l'Univers.

Un recyclage des éléments se poursuit dans des étoiles plus lourdes, qui transforment la matière en nouveaux éléments.

Ce troisième volet raconte donc une histoire cohérente, mais qui pourrait être à complétée avec divers sujets tels que le devenir des éléments plus lourds, l'analyse des vitesses des galaxies, etc. Sujets moins accessibles à l'astronome amateur. Il reste cependant du travail à notre portée : cartographie d'amas de Galaxie, analyse de galaxies « exotiques », recherche de zones de formations d'étoiles ... Je n'ai pas ici livré tous mes travaux et d'autres sont en cours ... à suivre.

We have outlined a comprehensive process of matter transformation starting with hydrogen, which condenses to form stars that, in turn, form galaxies. Gas density and ionization fronts both contribute to this process.

The initial formations occurred within immense nebulae, active remnants of which still exist within galaxies.

Galaxies themselves are dynamic and constantly evolving due to their interactions with one another.

Galaxies exhibit diverse shapes resulting from gravitational interactions, as well as morphological details stemming from internal, periodic phenomena. They congregate into clusters and superclusters, creating a filamentary structure in the distribution of matter across the Universe on a vast scale.

Element recycling continues within massive stars, which transform matter into new elements.

This third installment thus tells a coherent story—though one that could be further enriched by topics such as the fate of heavier elements, the analysis of galactic velocities, and so forth; subjects that are less accessible to the amateur astronomer. Nevertheless, there is still work within our reach: mapping galaxy clusters, analyzing "exotic" galaxies, searching for star-forming regions... I have not presented all my work here, and further projects are underway... stay tuned.