

Une vie de recherches en astronomie

1950-2020

Marcelle Duflot (1928-2020)

Assistée d'André Duflot (1925-2016)

Sous la Direction de Charles Fehrenbach (1914-2008)

Analyse des vitesses radiales des étoiles du grand nuage de Magellan

"Les religions se dissipent, telle la brume du matin. Les royaumes
s'effondrent telle la dune sous le vent.

Seule la science s'inscrit dans le marbre de l'éternité"¹

¹ Ulugh Beg (1394-1449) petit-fils de Timour Leng (dit Tamerlan)- L'astronome de Samarcande Jean-Pierre Luminet

L'essentiel des recherches de Marcelle Duflot, assisté de son époux André, et sous la direction de Charles Fehrenbach porte sur l'étude des vitesses radiales dans le grand nuage de Magellan. Recherches effectuées à l'Observatoire de Marseille à partir de prises de vues réalisées avec le GPO2 et GPO3, à St Michel l'Observatoire en Provence, en Afrique du sud puis au Chili, de fin 1961 à 1990.

Le présent document contextualise ces recherches dans un cadre historique et géographique, avant d'en dévoiler les contenus les plus récents.

Marcelle Duflot est née à Marseille le 19 juillet 1928.

Après des études secondaires de lettres, elle s'est dirigée vers des études de mathématiques puis d'astronomie. Elle a obtenu le grade de docteur ès-sciences mathématiques le 17 mars 1961 avec deux thèses concernant pour la première « *les vitesses radiales obtenues à l'aide d'un grand prisme objectif de 40 cm de diamètre. Etude cinématique et photométrique d'un champ galactique* » et pour la seconde « *Les nuages de Magellan* ».



Marcelle Duflot – Observatoire de Marseille 1970 – Photo André Duflot

Titulaire des palmes académiques le 9 octobre 1981, inscrite au Who'se Who international 2000-2001, elle a obtenu le prix Lacaille de l'Institut de France, Académie des Sciences le 12 novembre 2014.

Ce document relate à la fois le contexte historique, scientifique et technique de ces recherches, pour ensuite décrire les hypothèses émises par Marcelle Duflot et jamais publiées jusqu'alors.



Marcelle Duflot et Charles Fehrenbach
Télescope² de 120cm
Observatoire de Haute-Provence
Photo 1950

² Leon Foucault conçoit le miroir de 120 cm vers 1865 mais meurt en 1868 avant de l'avoir terminé. Le télescope a été installé en 1875 à l'Observatoire de Paris avant d'être transféré après rénovation à l'Observatoire de Haute-Provence en 1941 où il fut mis en route le 7 août 1943.

LES NUAGES DE MAGELLAN D'HIER À AUJOURD'HUI

Depuis très longtemps les humains observent des objets remarquables dans le ciel de l'hémisphère sud. En 924, l'astronome perse Al-Soufi³ signale un amas d'étoiles qu'il nomme *Al Bakr (le bœuf blanc)* visible depuis le détroit de Bab el Mandeb à 12°15 de latitude nord et non visible depuis Bagdad. Par la suite, les navigateurs Amerigo Vespucci en 1504 puis Antonio Pigafetta lors de l'expédition de Fernand de Magellan entre 1519 et 1522 signalent l'observation d'objets qui prennent le nom de nuées ou nuages de Magellan.



Amerigo Vespucci
9 mars 1454 -22 février 1512



Antonio Pigafetta
1480-1534

Alexandre de Humboldt⁴ en évoque l'historique:

« Les deux Nuages de Magellan, qui vraisemblablement, reçurent d'abord de pilotes portugais, puis des Hollandais et des Danois le nom de Nuages du Cap, captivèrent l'attention du voyageur par leur éclat, par l'isolement qui les fait ressortir davantage, et par l'orbite qu'ils décrivent de concert autour du pôle austral, bien qu'à des distances inégales. Leur nom actuel a évidemment pour origine le voyage de Magellan, quoique ce ne soit pas lui qui les ait observés le premier. »



Alexandre de Humboldt
14 septembre 1769 - 6 mai 1859



Emmanuel Liais
15 février 1826 - 5 mars 1900

Emmanuel Liais⁵ dans son premier voyage au Brésil⁶ en fait une description⁷:

"Parmi les nébuleuses, il en est deux plus grandes et plus remarquables que toutes les autres, sans doute à cause de leur rapprochement, et qui ne peuvent manquer de frapper les regards des personnes les plus inattentives aux phénomènes célestes. Mais elles appartiennent au ciel austral, plus riche que le ciel boréal en phénomènes de belles étoiles. Ces deux nébuleuses qui ont l'aspect de deux nuages blancs, très brillants, sont appelées nuées de Magellan. Dans nos climats on ne voit rien de semblable. C'est aussi l'hémisphère austral qui nous présente la plus remarquable portion de voie lactée. Au milieu d'elle se montre une région noire, près de l'étoile triple α de la croix du sud que la lunette décompose en deux étoiles blanches

³ Les étoiles fixes – Al Soufi - 924

⁴ Friedrich Karl, Wilhelm, Heinrich Alexander, baron von Humboldt, plus connu sous le nom d'Alexander von Humboldt ou Alexandre de Humboldt, est un naturaliste, géographe et explorateur allemand - le *Cosmost.*iii, p. 403

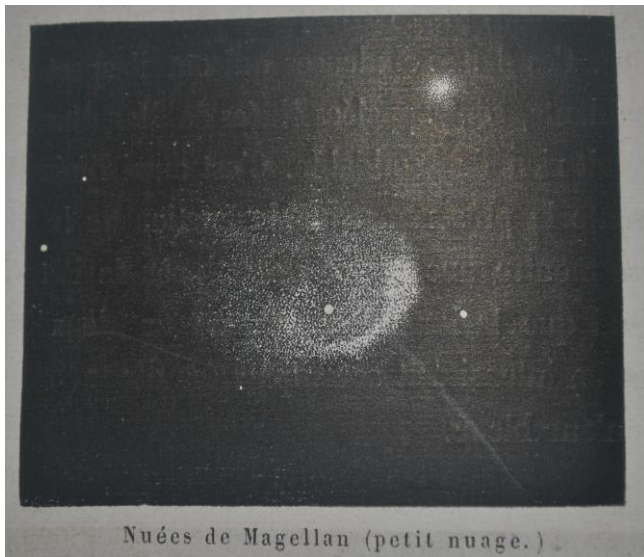
⁵ Emmanuel Liais est un astronome, explorateur, botaniste, homme politique et géographe français

⁶ 1858-1864. Il fera deux autres voyages en 1867-1871 puis 1874-1881

⁷ L'espace céleste et la nature tropicale – Description physique de l'univers d'après des observations personnelles faites dans les deux hémisphères, Paris, Garnier frères 1865 – Préface M. Babinet – dessins Yann' Dargent

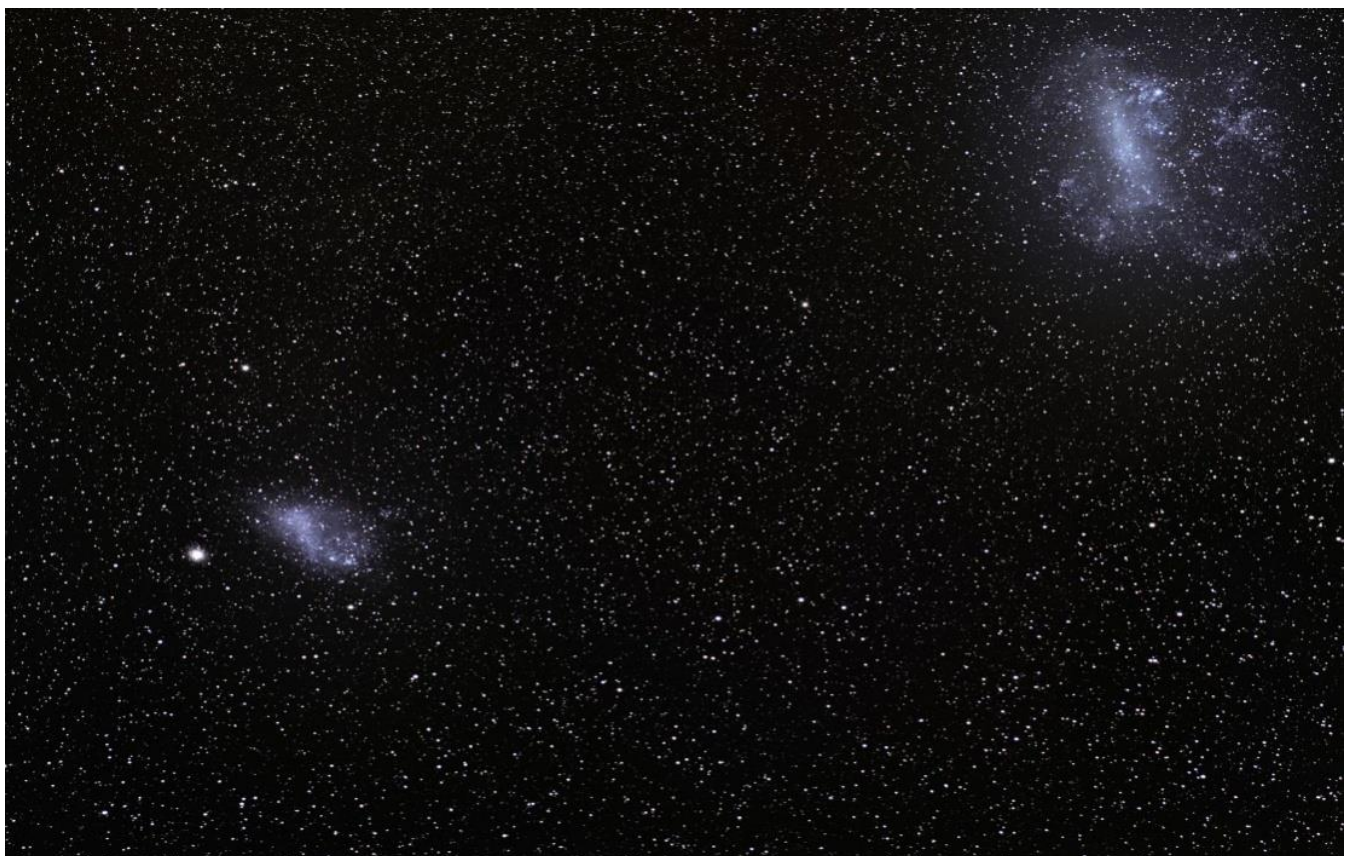
presque égales en intensité et accompagnées d'une autre petite étoile d'une belle couleur bleue."

Yann' Dargent dessine les nuées de Magellan qui illustrent l'ouvrage d'E.Liais:



Depuis les observations d'E.Liais, la connaissance des nuages de Magellan n'a pas cessé d'être complétée.

Nous savons aujourd'hui que le grand nuage (GNM) est situé à 162 000 années-lumière (1,53 milliard de Km)⁸ et est distant de 75 000 années-lumière du petit nuage (PNM).



⁸ Avec une précision de 1% - Source Observatoire de Paris –revue nature 14 mars 2019-

Les deux nuages continuent à fabriquer des étoiles, avec une très grande activité pour le GNM considéré comme *une pouponnière à étoiles*⁹. Certaines d'entre elle ont des masses de 100 fois notre soleil. Le GNM compte plus de 30 milliards d'étoiles et environ 10 fois moins pour le PNM.

Suite aux observations de Hubble, il est émis comme hypothèse que les deux nuages se sont rapprochés de notre galaxie¹⁰. Celle-ci les perturbe par son champ gravitationnel. Se déplaçant trop rapidement pour être gravitationnellement liés à elle, le GNM et le PNM seraient de nouveaux venus de l'espace et non de satellites subissant les forces de marées générées par la Voie Lactée¹¹.

En alternative à cette hypothèse, notre galaxie pourrait être beaucoup plus massive qu'évaluée jusqu'alors.

⁹ Anna F. McLeod, Megan Reiter, Rolf Kuiper, Pamela D. Klaassen & Christopher J. Evans - *Nature* volume 554, pages 334–336 - 15 February 2018

¹⁰ Gurtina Besla- *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* -publiée avec d'autres collègues dans *Astrophysical Journal -Futura Sciences* L.Sacco 20 septembre 2007-

¹¹ La voie lactée est un des bras facilement visible de notre galaxie spiralée dans laquelle se situe le système solaire.

HISTOIRE DES MESURE DES VITESSES RADIALES DES ETOILES

En 1823 Joseph Von Fraunhofer¹² utilise un prisme devant l'objectif du télescope pour ses premières études de spectroscopie visuelle.

Edward Pickering à l'université d'Harvard (USA) fut le premier à l'utiliser cette méthode en 1865 pour obtenir simultanément les spectres de plusieurs étoiles sur une même plaque photographique¹³.



Joseph Von Fraunhofer
6 mars 1787- 7 juin 1826



Edward Pickering
19 juillet 1846- 3 février 1919

A la même époque les travaux de Christian Doppler et Hippolyte Fizeau¹⁴ montrent l'influence d'un petit objet en orbite autour d'un plus massif, créant des changements de vitesse sur le plus grand.



Christian Andrea Doppler
29 novembre 1803- 17 mars 1853



Hippolyte Fizeau
23 septembre 1819 – 18 septembre 1896

L'idée d'utiliser un prisme et l'effet Doppler-Fizeau, pour mesurer les vitesses radiales simultanées de plusieurs étoiles en retournant celui-ci entre deux poses photographiques, fut proposée pour la première fois en 1896 par George Hale et F.L.O. Wadsworth¹⁵ (et sensiblement en même temps par Edward Pickering).

Karl Schwarzschild¹⁶ réalise les premières mesures avec cette méthode en 1913. Puis Charles Fehrenbach propose en 1947 d'utiliser un prisme à vision directe, composé de deux prismes de nature différente (crown et flint), montés tête-bêche, pour éliminer les distorsions du champ. Ainsi vont naître les petits et grands prismes objectifs.



Karl Schwarzschild
9 octobre 1873- 11 mai 1916



Charles Fehrenbach
29 avril 1914- 9 janvier 2008

¹² Fraunhofer découvre en 1814 les raies dites *de Fraunhofer* dans le spectre solaire. Il inventa le spectroscopie l'année suivante. Il fut en outre le premier à étudier systématiquement la diffraction de la lumière à l'aide de réseaux optiques (*diffraction de Fraunhofer*). Il mit à profit ces connaissances pour mesurer les propriétés physiques des verres optiques (indices de réfraction) avec précision. Il parvint ainsi à préparer des objectifs d'une qualité supérieure à tout ce qui s'était fait jusque-là.

¹³ Ces clichés allaient ensuite servir pour dresser le monumental catalogue Henri Drapper de types spectraux.

¹⁴ Le physicien autrichien Christian Andreas Doppler décrit le phénomène pour les ondes lumineuses en 1842, relayé en 1848 par le physicien français Hippolyte Fizeau qui généralisera le phénomène aux ondes électromagnétiques. Lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur d'une onde électromagnétique ou mécanique s'allonge ou se raccourcit, la fréquence du signal reçu diffère de celle du signal émis.

¹⁵ Yerkes Observatory

¹⁶ Qui est aussi le premier à avoir défini les lois d'interaction entre les champs magnétiques et la lumière, et à avoir décrit les phénomènes de courbure des rayons lumineux au voisinage de points gravitationnels, contribuant ainsi à fonder la théorie du trou noir (cf. Rayon de Schwarzschild) qui sera développée 50 ans après sa mort.

LES PRISMES OBJECTIFS AU SERVICE DES VITESSES RADIALES

Le petit prisme objectif (PPO), lunette de 17 cm est installé à l'OHP en 1947 mais limité à des magnitudes¹⁷ de 10 sur des champs stellaires de 4°x4°. Il est suivi en 1960 d'un grand prisme objectif (GPO) qui permet d'atteindre des magnitudes de 12 mais avec un champ de 2°x2°.

Le Grand Prisme Objectif du Professeur Fehrenbach permet deux prises photographiques de deux heures chacune avec les prismes crown et flint. L'écart des raies des deux prismes obtenus permet ensuite de mesurer la vitesse radiale. L'avantage majeur de cette méthode est d'obtenir un champ d'étoiles sur une seule plaque photographique.

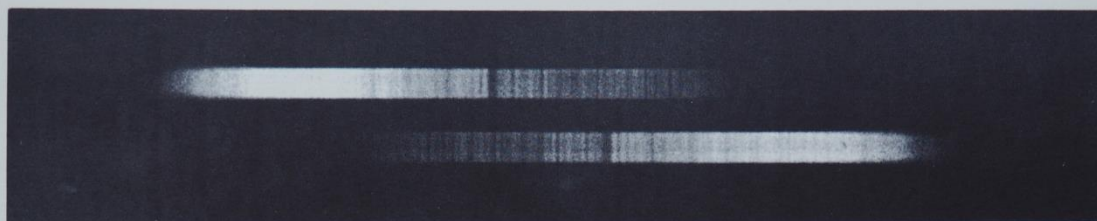


Fig. 1. Spectres obtenus avec le grand prisme objectif (Méthode du retournement) Agrandissement 11 x.

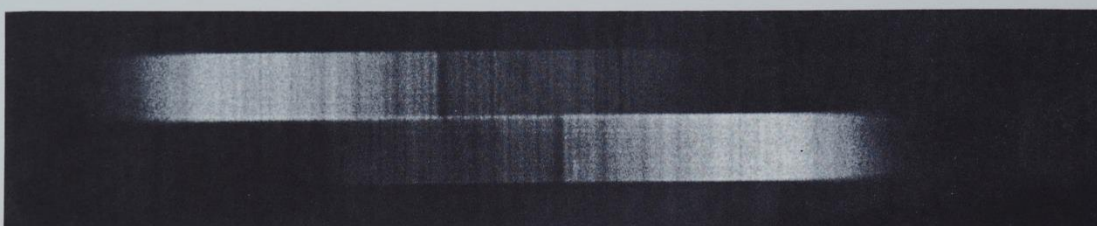


Fig. 1 bis

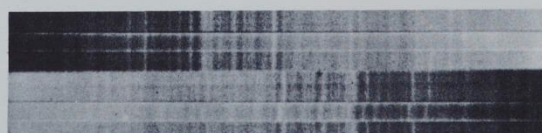


Fig. 7. Vue des spectres sur la table de mesure.

101

Un premier Grand Prisme Objectif (GPO1) de 40cm de diamètre, installé en 1960 à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) ne donne pas satisfaction¹⁸. Il est suivi du GPO 2 qui sert aux mesures de vitesses radiales dans la voie lactée avant d'être démonté et envoyé envoyé à l'observatoire de Zeekoegat en Afrique du sud en 1961¹⁹.

¹⁷ Intensité lumineuse des étoiles

¹⁸ Souvenirs de Marcelle Duflot 2019

¹⁹ En 1953, l'idée d'un observatoire austral permettant l'observation de la voie lactée et des nuages de Magellan était lancée au niveau Européen. La conférence de Groningen le 21 juin, évoquait un télescope de 3 mètres.

En 1954, la décision d'installer un observatoire Européen en Afrique du sud a été validée par douze astronomes de 6 pays Européens, conduisant en 1955 une équipe à partir avec un télescope de 25 centimètres pour y rechercher un site d'accueil entre Johannesburg, Pretoria au nord et la zone semi-désertique du grand Karoo au sud. En 1958, le choix se portait clairement sur la zone du grand Karoo près de Zeekoegat séparée au sud du petit Karoo par la montagne du Swartberg.

A l'OHP il sera remplacé par un appareil identique le GPO3.

Ces appareils sont constitués d'une double lunette montée sur un même berceau, l'une permettant l'observation et le suivi du champ d'observation choisi, et l'autre permettant la photographie²⁰ via les prismes.



GPO 2 à L'observatoire de haute Provence
Photos André Dufлот



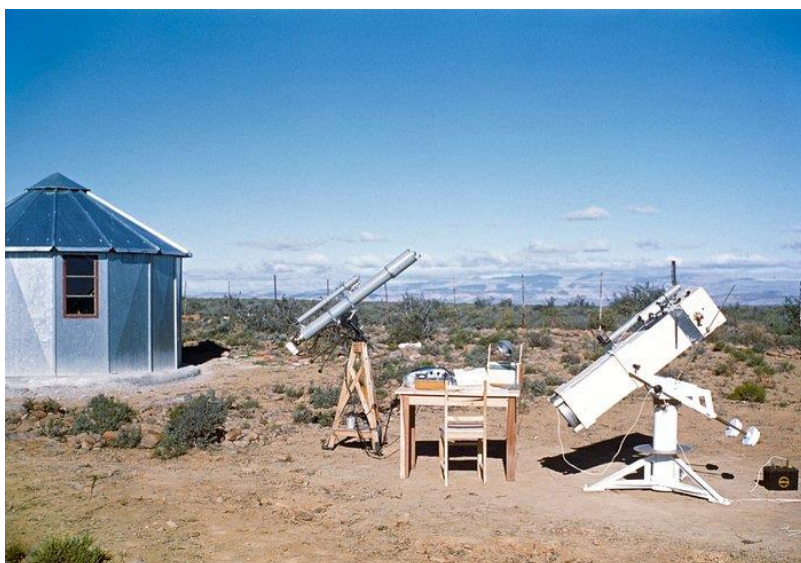
Prisme du GPO

²⁰ Sur plaque verre Kodak 16cm x 16 cm

LA STATION ASTRONOMIQUE DE ZEEKOEGAT²¹ EN AFRIQUE DU SUD

En 1953, l'idée d'un observatoire austral permettant l'observation de la voie lactée et des nuages de Magellan était lancée au niveau Européen. La conférence de Groningen le 21 juin de la même année, évoquait un télescope de 3 mètres.

En 1954, la décision d'installer un observatoire Européen en Afrique du sud a été validée par douze astronomes de 6 pays Européens, conduisant en 1955 une équipe à partir avec un télescope de 25 centimètres pour y rechercher un site d'accueil entre Johannesburg, Pretoria au nord et la zone semi-désertique du grand Karoo au sud. En 1958, le choix se portait clairement sur la zone du grand Karoo près de Zeekoegat séparée au sud du petit Karoo par la montagne du Swartberg.



Installation pour tests à Zeekoegat, Afrique du sud début 1961. A droite le télescope 25 cm de Danjon avec un petit photomètre à gauche pour mesurer la transparence atmosphérique.

En 1960 la création de l'observatoire austral n'étant toujours pas validée au niveau Européen, Charles Fehrenbach demande alors au ministère des fonds pour installer sur le site de Zeekoegat le GPO2 de l'observatoire de l'OHP. Il a au préalable demandé à Marcelle et André Duflot qui utilisent l'appareil d'assurer une première mission de six mois en Afrique du sud²².

En mai 1961, outre la coupole du GPO2, la station de Zeekoegat est équipée d'une maison pouvant loger une famille, une plus petite pour abriter des observateurs de passage et un grand garage/atelier. Une réserve d'eau est approvisionnée par un forage de 30 mètres et un groupe électrogène assure la fourniture en électricité²³.

²¹ L= 1h29,5 m E; I=-33,5°5' - Province du Cap

²² Demande de Ch. Fehrenbach à A. et M. Duflot lors du congrès de l'Union Astronomique Internationale (UAI) en 1958 – Souvenirs de Marcelle Duflot 2018 : *En 1958, nous sommes à Moscou pour le congrès international trisannuel. Au cours du voyage, nous avons séjourné à Leningrad que nous avons évidemment visitée. Il y avait à Moscou plusieurs très grands bâtiments (pour l'époque). Sans doute étions-nous logés dans l'un d'entre eux qui abritait l'Université. Nous étions, Mr Fehrenbach, André et moi sur une terrasse, et Mr Fehrenbach nous a demandé si nous accepterions de partir 6 mois en Afrique du Sud, pour étudier les Nuages de Magellan. Ce fut immédiatement OUI, seule condition : emmener les enfants. Ils avaient, en 1958, 4 et 2 ans.*

²³ SAO/NASA Astrophysics Data System - L'astronomie, Vol 77, p 89-97 March 1963
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963L Astr..77...89F/abstract>



La station de Zeekoegat en 1961 – Photo André Duflot



La coupole spécifique du GPO2 – Photo André Duflot



Marcelle, André Duflot et leurs deux enfants Zeekoegat 1961

Il faudra six mois et l'ingéniosité d'André Duflot, qui est aussi mécanicien, pour mettre en route l'instrument. Marcelle et André Duflot sont les premiers à travailler sur cette station qui deviendra le premier site de l'European Southern Observatory à sa création le 5 octobre 1962.

Cette première mission prévue initialement sur six mois durera un an.

A la mise en route du GPO, les résultats seront très vite remarquables. L'inspection rapide d'un premier cliché a permis de détecter 35 étoiles du GNM à grande vitesse dont seulement 3 étaient connues.

Plusieurs équipes de techniciens et astronomes marseillais vont se relayer à Zeekoegat jusqu'en 1966²⁴.

Ce sera le début des catalogues de vitesses radiales du GNM qui va durer jusqu'aux années 1990 au Chili²⁵.

²⁴ Des hommes, des télescopes, des étoiles - Ch. Fehrenbach – éditions du CNRS – 1990 réédition 2007

L'OBSERVATOIRE DE LA SILLA AU CHILI

L'histoire de l'European Southern Observatory et de l'observatoire de la Silla et du mont Paranal au Chili est largement décrite²⁶.

Le GPO2 sera transféré et mis en route sur le site de la Silla au Chili le 6 juin 1968. Il fonctionnera jusque au début du XXI siècle, continuant à assurer les prises de vues du GNM. Cet appareil est aujourd'hui démonté.

Il existe sur le site de l'ESO une fiche technique le concernant²⁷.

²⁵ En 1962 et 1963, les investigations eurent lieu pour décider d'un site au Chili. Et le 30 octobre 1964 un contrat était signé avec le gouvernement Chilien fixant le site de La Silla pour développer l'astronomie australe de l'ESO. Le choix d'abandonner l'Afrique du Sud au profit du Chili était guidé par une meilleure stabilité politique...

²⁶ Une fascination pour le ciel austral – Catherine Cesarsky et Claus Madsen mis en ligne le 3 janvier 2011 - <https://journals.openedition.org/histoire-cnrs/8743>

²⁷ <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/gpo/>

MESURES DES VITESSES RADIALES DU GRAND NUAGE DE MAGELLAN

MESURES REALISEES AU GPO

Les clichés sur verre de 2°x2° du GNM obtenus avec le GPO peuvent compter plus de 500 étoiles et parfois jusqu'à 1000 dans les régions denses. Il est facile de repérer sur ceux-ci les étoiles du GNM par leur vitesse car les étoiles de la voie lactée sont visibles sur les clichés, mais leurs vitesses sont inférieures dans un rapport de 10.

Ces clichés sont étudiés à l'Observatoire de Marseille. La mesure de la position des raies spectrales pour déterminer les VR demande une grande précision.

Marcelle Duflot explique²⁸:

"Il faut d'une part repérer la position des étoiles (en x/y) en déplaçant le cliché parallèlement à lui-même, d'autre part il faut repérer les raies spectrales. Ch. Fehrenbach imagine un astucieux spectrocomparateur²⁹. Des spectres de référence fixes, encadrent les spectres à mesurer et l'ensemble est projeté, agrandi 12 fois sur la table de mesure. La coïncidence entre l'étoile à mesurer et l'étoile de référence est assurée par la rotation d'une lame à faces parallèles. Les déplacements en x et y se font à l'aide de vis de précision."



Fig. 2. - Vue du spectrocomparateur n° 2.

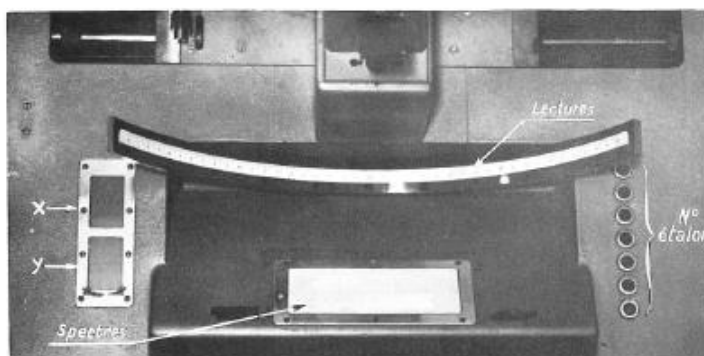


Fig. 3. - Aspect de la table de mesure.

Photos extraites de la publication OHP Volume 4 – N°11 et 12 – CNRS – La mesure des vitesses radiales au prisme objectif - 1^{er} trimestre 1958

"Ch.Fehrenbach a toujours suivi de très près le développement des moyens techniques. Nous aurons assez vite des machines à calculer Ferranti qui font les 4 opérations, mais avec du bruit. L'électronique n'est pas encore entrée dans le domaine courant. Puis les relevés x,y et les pointés des raies se feront sur des rouleaux de papier perforés. Les dépouillements des pointés se feront automatiquement. Tous les résultats seront consignés sur des cartes perforées puis ultérieurement sur des bandes magnétiques. Le service informatique est de plus en plus important. Dans les années 80, même les mesures seront impersonnelles. Les spectres sont enregistrés à l'aide de micro photomètres digitalisés et nous utilisons des programmes de dépouillement mis au point par R. Burnage à l'Observatoire de Haute-Provence".

²⁸ Souvenirs de Marcelle Duflot 2018

²⁹ Décrit dans le journal des observateurs (JOXXXVIII, 1955, n°7, p165 =Publ. OHP 3, n°24 à 27 –Voir aussi Publ. OHP 4, n°11 – Réalisation G Ray sous les directives de C.Fehrenbach – photos ci-dessus



Charles Fehrenbach (à droite), Marcelle Dufлот (au centre), le chef d'atelier Rey (à gauche), devant le spectrocomparateur Observatoire de Marseille - 1960

TRAVAUX DE L'EQUIPE FEHRENBACH-DUFLOT HISTORIQUE DU CATALOGUE DE VR DU GNM:

Les clichés pris à *Zeekeogat* à l'aide du GPO font l'objet d'une première note aux comptes rendus de l'académie des sciences d'août 1962 (tome 254, p 1380). Celle-ci présente la méthode de travail et signale l'étude en cours. Concernant le premier cliché les 10 étoiles qui ont des spectres plus avancés que A2 font l'objet d'une communication ESO N°1.

En 1963, sont publiées³⁰ les coordonnées de 103 étoiles à grandes vitesses sans la valeur VR. Celles-ci font aussi l'objet d'une communication ESO N°3.

C'est en 1965 que les premières publications de VR sont faites³¹ et font aussi l'objet d'une communication ESO N°6, suivie en 1970 d'une publication³² des coordonnées, sans VR, de:

495 étoiles à grandes vitesses appelées G

1830 étoiles à petites vitesses appelées P

³⁰ SAO/NASA Astrophysics Data System – Reconnaissance d'étoiles appartenant au grand nuage de Magellan à l'aide d'un prisme objectif à champ normal. Marcelle et André Dufлот et Charles Fehrenbach 1963 Vol 46 P109 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1963JO.....46..109D>

³¹ SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle et André Dufлот Vol 48 p199 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1965JO.....48R.185D>

³² SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Dufлот, Spécial supplément N°1 [https://ui.adsabs.harvard.edu/search/fq=%7B!type%3Dagp%20v%3D%24fq_database%7D&fq_database=database%3A%20astronomy&p_0&q=pubdate%3A%5B1970-01%20TO%201970-12%5D%20author%3A\(%22DUFLOT%22\)&sort=date%20desc%2C%20bibcode%20desc](https://ui.adsabs.harvard.edu/search/fq=%7B!type%3Dagp%20v%3D%24fq_database%7D&fq_database=database%3A%20astronomy&p_0&q=pubdate%3A%5B1970-01%20TO%201970-12%5D%20author%3A(%22DUFLOT%22)&sort=date%20desc%2C%20bibcode%20desc)

110 étoiles avec doutes appelées S

En 1973 une nouvelle publication³³ des coordonnées, sans VR, de:

88 étoiles à grandes vitesses numérotées de 501 à 588

253 étoiles à petites vitesses numérotées de 2001 à 2253

Des cartes d'identification sont également publiées³⁴.

Les VR sont publiées³⁵ en 1974 pour les étoiles G comprises entre 95 et 589
pour les étoiles P comprises entre 385 et 2254

Les dernières publications de 1981³⁶ et 1982³⁷ concernent, pour la première, sans VR:

167 étoiles à grande vitesse numérotées de 601 à 767

490 étoiles à petites vitesses numérotées de 2501 à 2990

Et pour la seconde un catalogue complet d'étoiles de type P du GNM avec leurs VR qui ont souvent été revues. Un certain nombre d'objets non stellaires (région HII, amas, nébuleuses planétaires..) ont été supprimés. Certaines étoiles G ont été corrigées en P et vice-versa.

Pour chaque d'étoile la VR est mesurée au moins sur trois clichés différents, et il est retenu la moyenne de ces mesures pour chacune d'elle, améliorant ainsi la précision.

Le GPO permet d'obtenir des spectres jusqu'à une magnitude de 13 où il n'y a pas d'étoiles rouges.

Deux articles annexes sont également publiés en 1976 et 1978:

-les étoiles de type WOLF-RAYET³⁸ visible sur les clichés³⁹

-des étoiles ou objets à émissions⁴⁰ de petits diamètres apparents⁴¹

CATALOGUE DE VR DE 1982

Le catalogue de vitesses radiales (VR) issues du GPO a été publié dans *Astronomy and Astrophysics*⁴² en 1982 pour 711 étoiles dites bleues, de type spectral O, B, A, F.

Les étoiles mesurées ont été positionnées sur les différentes cartes issues du catalogue du Smithsonian Observatory⁴³. Leur répartition est la suivante:

³³ SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Duflot 10, 231 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1973A%26AS...10..231F>

³⁴ <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1974A%26AS...16..365F>

³⁵ SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales au prisme objectif dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Duflot 13, 173 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1974A%26AS...13..173F>

³⁶ SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales au prisme objectif dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Duflot 46, 13 -1981 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1981A%26AS...46...13F>

³⁷ SAO/NASA Astrophysics Data System – Vitesses radiales au prisme objectif dans la direction du grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Duflot 48, 409 -1982 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1982A%26AS...48..409F>

³⁸ Une étoile Wolf-Rayet (WR) est une étoile chaude de plusieurs dizaines de masses solaires, qui durant une phase relativement brève de l'ordre du million d'années, se met à cracher la matière entourant son noyau sous forme de vents stellaires à hautes vitesses, laissant celui-ci à nu, avant d'exploser en supernova.

³⁹ SAO/NASA Astrophysics Data System – Les étoiles Wolf-Rayet dans le grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, M. Duflot, A Acker 24, 379 – 1976 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1976A%26AS...24..379F>

⁴⁰ Les sources radio stellaires, sources radio d'étoiles, étoiles radio sont des objets stellaires qui produisent des émissions de diverses fréquences radio constantes ou pulsées (exemples: les pulsars ou un type d'étoile à neutrons).

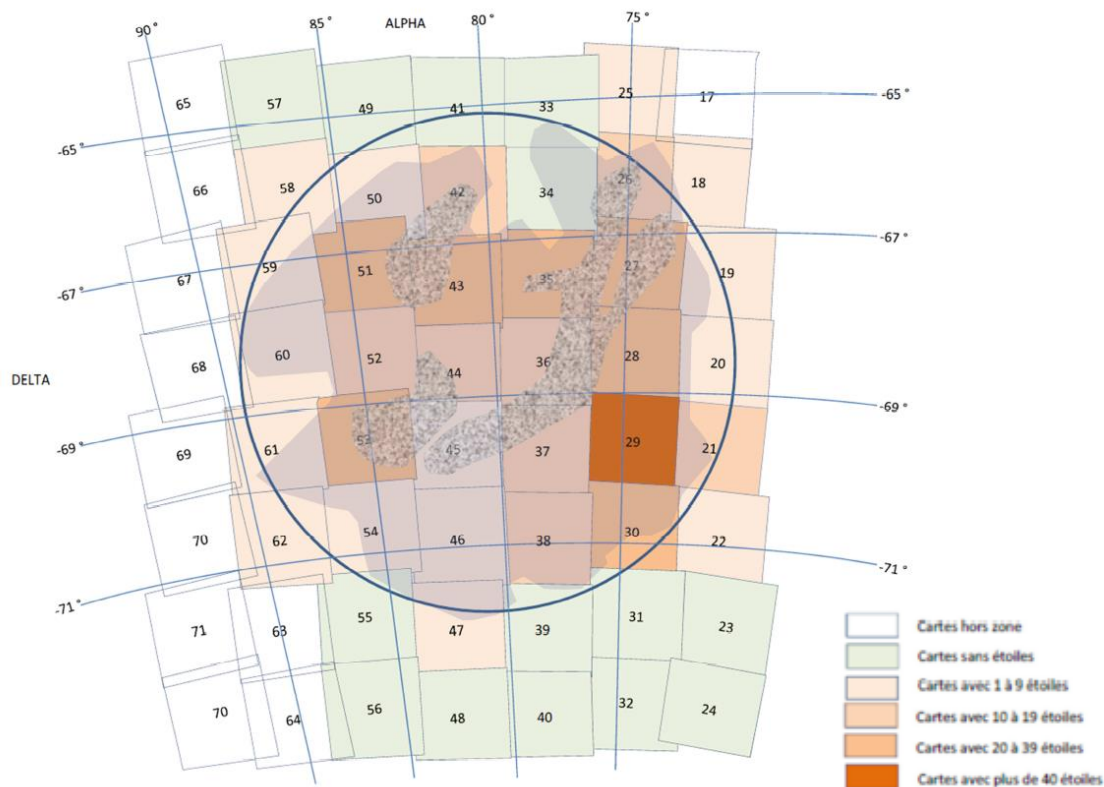
⁴¹SAO/NASA Astrophysics Data System – Objets à émission dans le grand nuage de Magellan. Ch. Fehrenbach, Marcelle Duflot, A Acker 33, 115 – 1978 <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1978A%26AS...33..115F>

⁴² Astronomy and Astrophysics est une revue scientifique européenne publiée des articles théoriques, observationnels et instrumentaux.

⁴³ Le Smithsonian Astrophysical Observatory est un centre de recherche de la Smithsonian Institution. Cette institution fut créée par le congrès des États-Unis en 1846 afin d'utiliser le legs fait par l'anglais James Smithson au gouvernement afin de fonder à Washington (District of

Carte N°	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nombre d'étoiles dans la carte	1	5	5	12	1	0	0	1	13	48	28	75	25	0	0	0	9	20	12	19	12	0	0
Carte N°	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	
Nombre d'étoiles dans la carte	0	11	34	13	2	5	2	0	0	6	32	12	22	2	0	0	0	1	1	9	1	1	

La figure suivante est un assemblage des cartes représentant la densité d'étoiles et leur position par rapport au GNM.



Columbia) un établissement pour le développement et la diffusion de la connaissance. Il édité en 1966 un catalogue d'étoiles dont est issu cette cartographie.

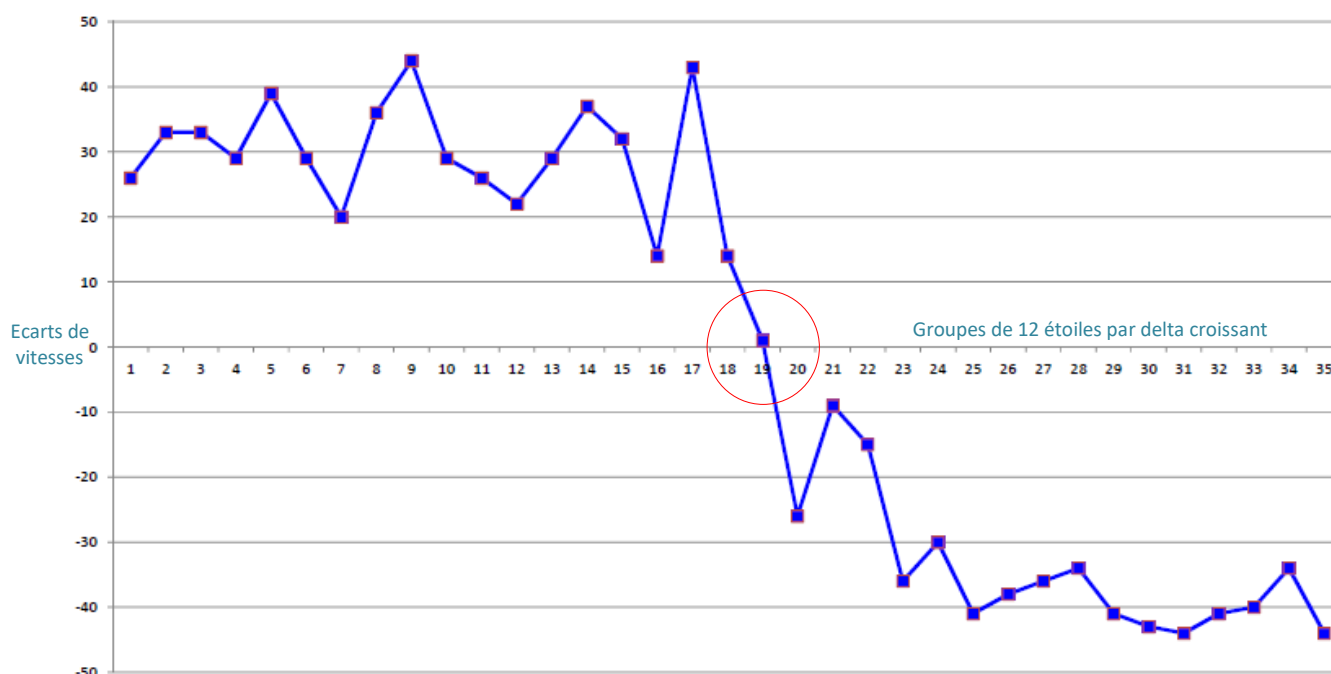
TRAVAUX et HYPOTHESES de Marcelle Duflot 1999-2020– 1ère partie-

Habituellement toutes les études sont réalisées selon les positions d'étoiles en alpha croissants. Marcelle Duflot a eu l'idée originale de travailler sur des graphiques en position delta croissants et d'établir un graphique delta croissant/vitesse relative et d'y placer les étoiles issues du catalogue du GPO.

Utilisant ce que les astronomes Feast et Chaheray ont montré dans les années 1950, c'est à dire que les étoiles des nuages de Magellan avaient de très grandes vitesses de 270 Km/s pour le GNM (et de 150 Km/s pour le PNM). Nous allons nous intéresser aux vitesses relatives des étoiles du GNM en prenant les écarts à cette vitesse moyenne: $E = VR - 270$.

De manière à obtenir plus de précision, Marcelle Duflot a regroupé les étoiles par ensembles de 12 en delta croissant.

Le graphique obtenu est remarquable car il apparait clairement un centre ou l'écart de vitesse est voisin de zéro.

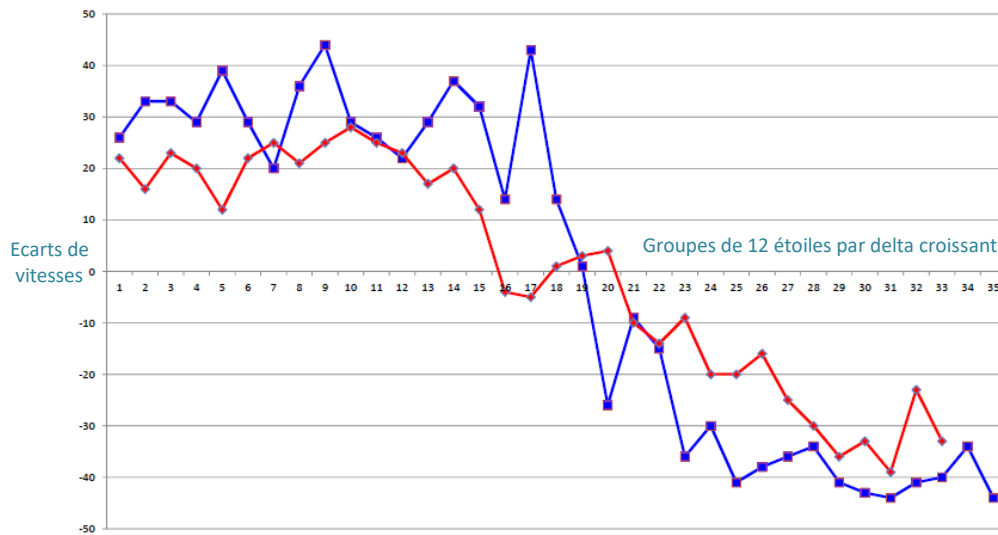


Pour valider cette découverte qui ne concerne les étoiles de magnitude supérieure à 13, Marcelle Duflot a réalisé le même travail avec les étoiles moins brillantes et rouges⁴⁴ mesurées à l'aide du CORAVEL⁴⁵.

La superposition des deux graphiques montre une évidente corrélation de résultats.

⁴⁴ De types spectral F, K, G, M

⁴⁵ Voir Annexe 1



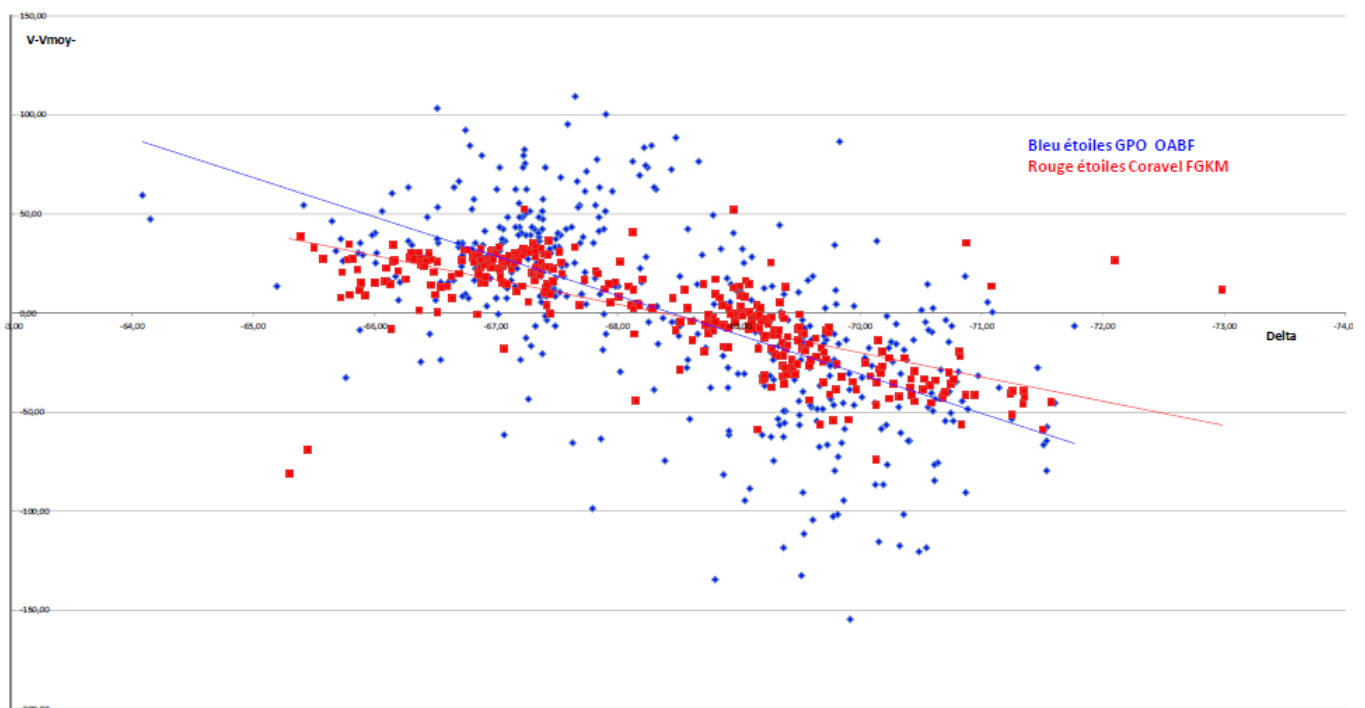
PREMIERE OBSERVATION

Bien que moins précis que le CORAVEL, le GPO donne des valeurs relatives fiables, qui pourraient sans doute être corrigées avec un étalonnage préalable, mais cette opération est d'un intérêt relatif. Il n'existe pas d'autre catalogue concernant les étoiles bleues que celui issu des mesures effectuées avec les clichés du GPO pris à Zeekoegath et à La Silla.

Ce résultat nous permet d'émettre l'hypothèse d'un centre de rotation du GNM, mais ne permet pas d'en situer sa position avec précision.

SECONDE OBSERVATION

Un nouveau graphique reprenant les écarts à la vitesse moyenne pour les étoiles bleues et rouge en fonction de leur position en delta donne le résultat suivant:



Ce graphique permet d'estimer un centre où les vitesses relatives sont très faibles (proche de 0) dans la zone:
 Delta entre 68,3 et -68,6
 V-Vmoy entre -40 et +40

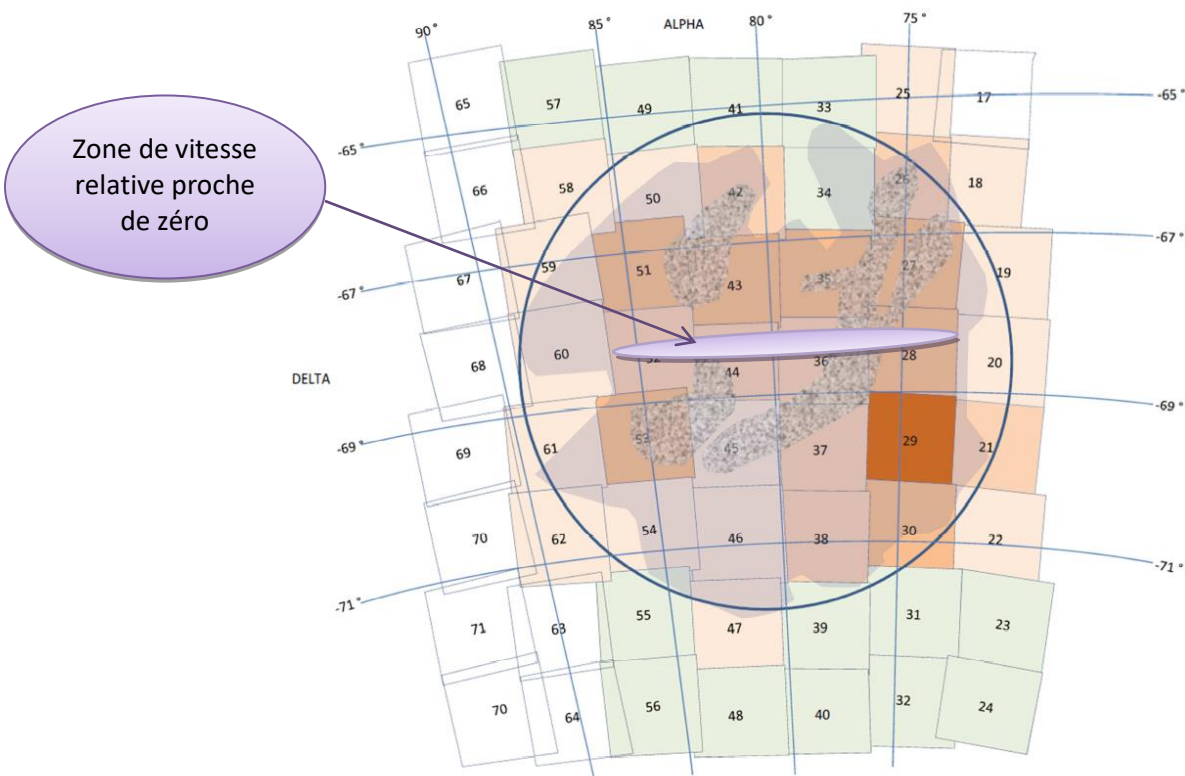
Le tri des étoiles répondant à ces critères donnent les candidats suivants:

ETOILES BLEUES				
N°	Delta	Alpha	V-Vmoy	Mag
G81	-68,30	73,79	-38,56	13,17
G143	-68,57	74,78	-27,56	13,40
G447	-68,58	85,77	-23,56	12,23
G453	-68,33	85,94	-15,56	12,70
G326	-68,51	82,42	-11,56	11,34
G49	-68,66	73,16	-10,56	13,30
G42	-68,51	73,00	-6,56	12,85
G124	-68,49	74,49	-4,56	13,06
G231	-68,45	77,87	-4,56	12,69
G179	-68,63	75,85	-3,56	11,76
G211	-68,37	76,91	-2,56	12,83
G278	-68,33	80,69	3,44	12,93
G147	-68,66	74,90	14,44	12,66
G161	-68,52	75,24	18,44	13,25
G160	-68,70	75,24	29,44	12,60
G59	-68,58	73,40	42,44	12,87

ETOILES ROUGES				
N°	Delta	Alpha	V-Vmoy	Mag
7286RM 1-706	-68,62	84,47	-13,76	13,30
7250RM 1-588	-68,62	83,27	-4,26	11,80
7014RM 1-40	-68,58	73,55	2,54	13,20
7324RM 2-47	-68,56	77,38	11,74	13,10
7329RM 2-73	-68,52	81,15	-4,56	13,10
7140RM 1-346	-68,52	81,21	-28,66	12,60
7291RM 1-724	-68,48	84,69	-9,16	13,20
7163RM 1-413	-68,46	82,17	7,14	12,70
7288RM 1-709	-68,29	84,48	2,54	12,10

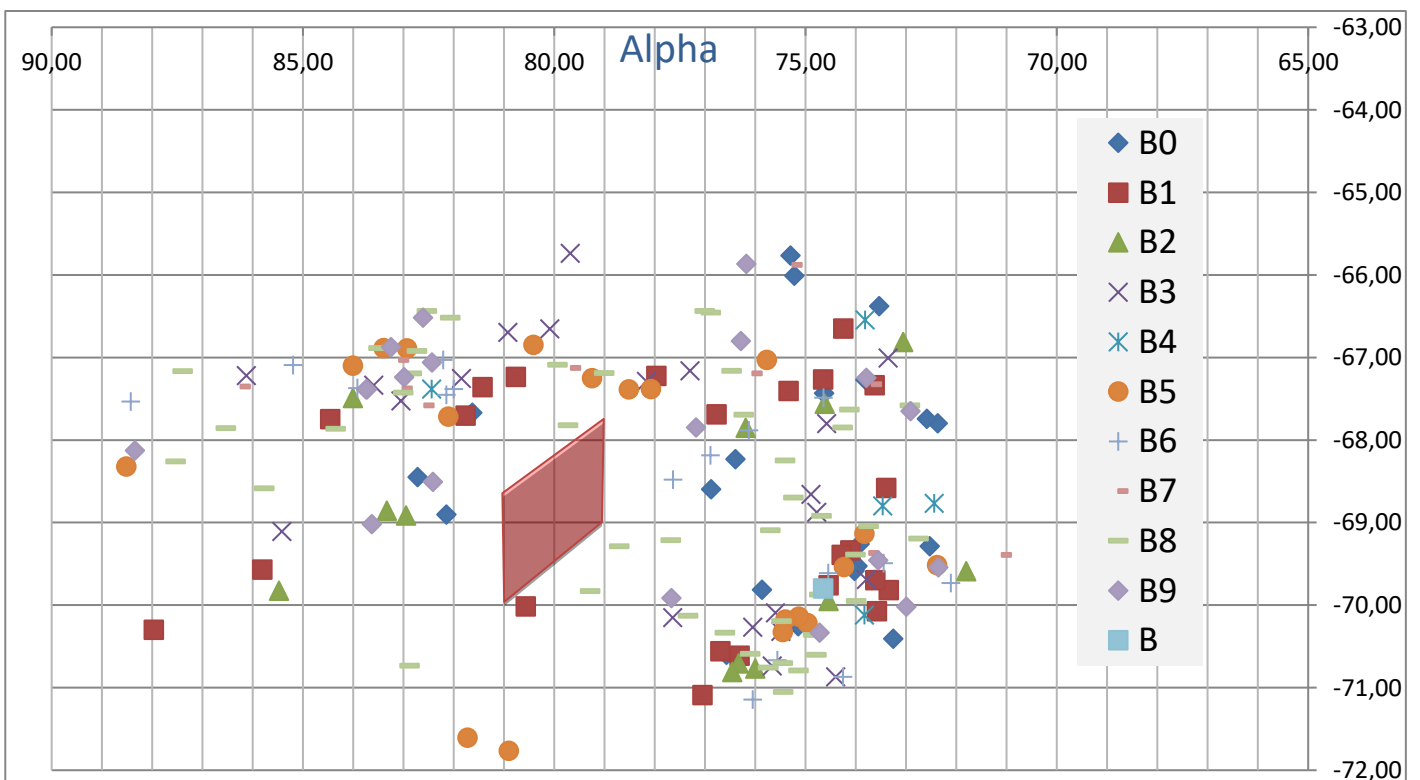
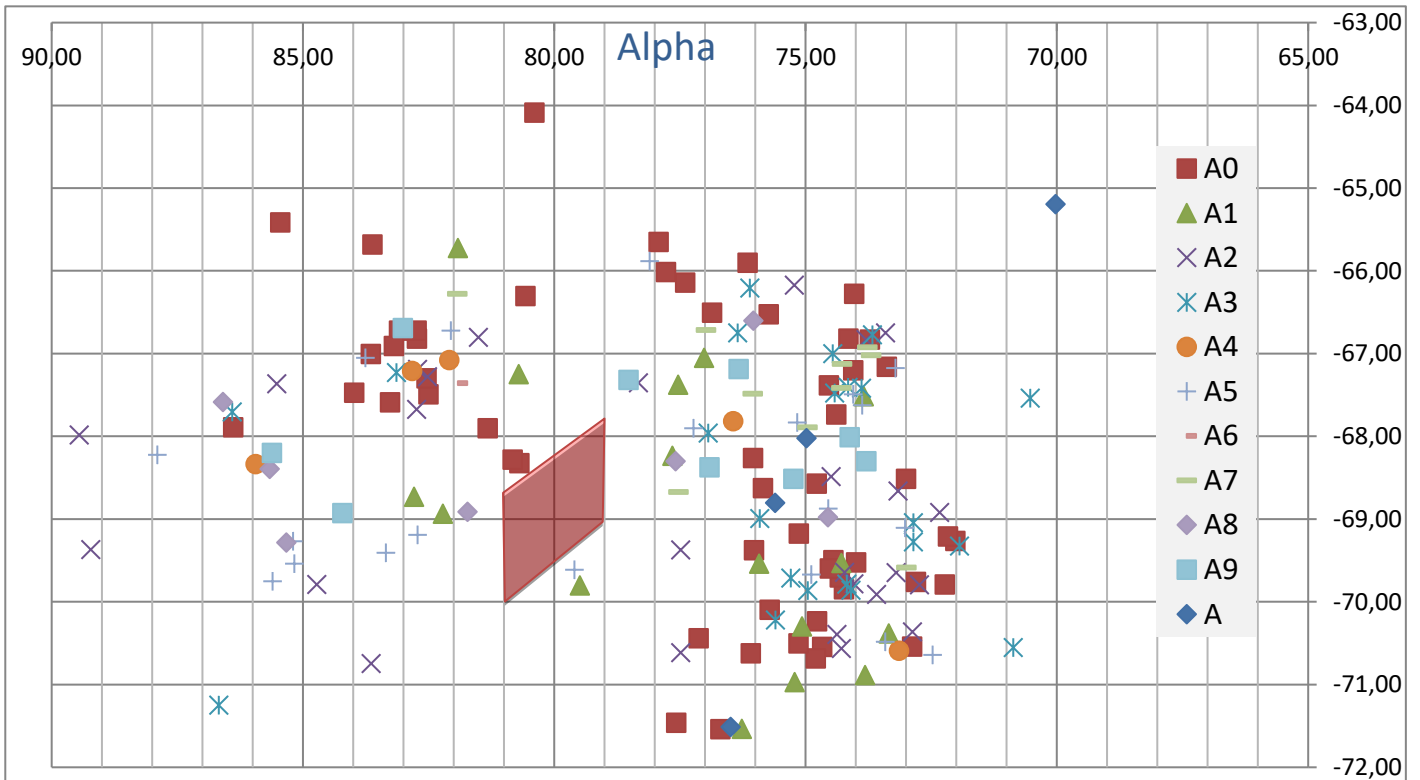
Sur ces tableaux, les valeurs observées en alpha sont comprises entre 73 et 86 degrés.
 Les magnitudes ne sont pas inférieures à 11,34 et leur moyenne est autour de 12,8.
 Concernant les étoiles bleues du GPO ce sont toutes des types A et B sauf la G231 de type F.

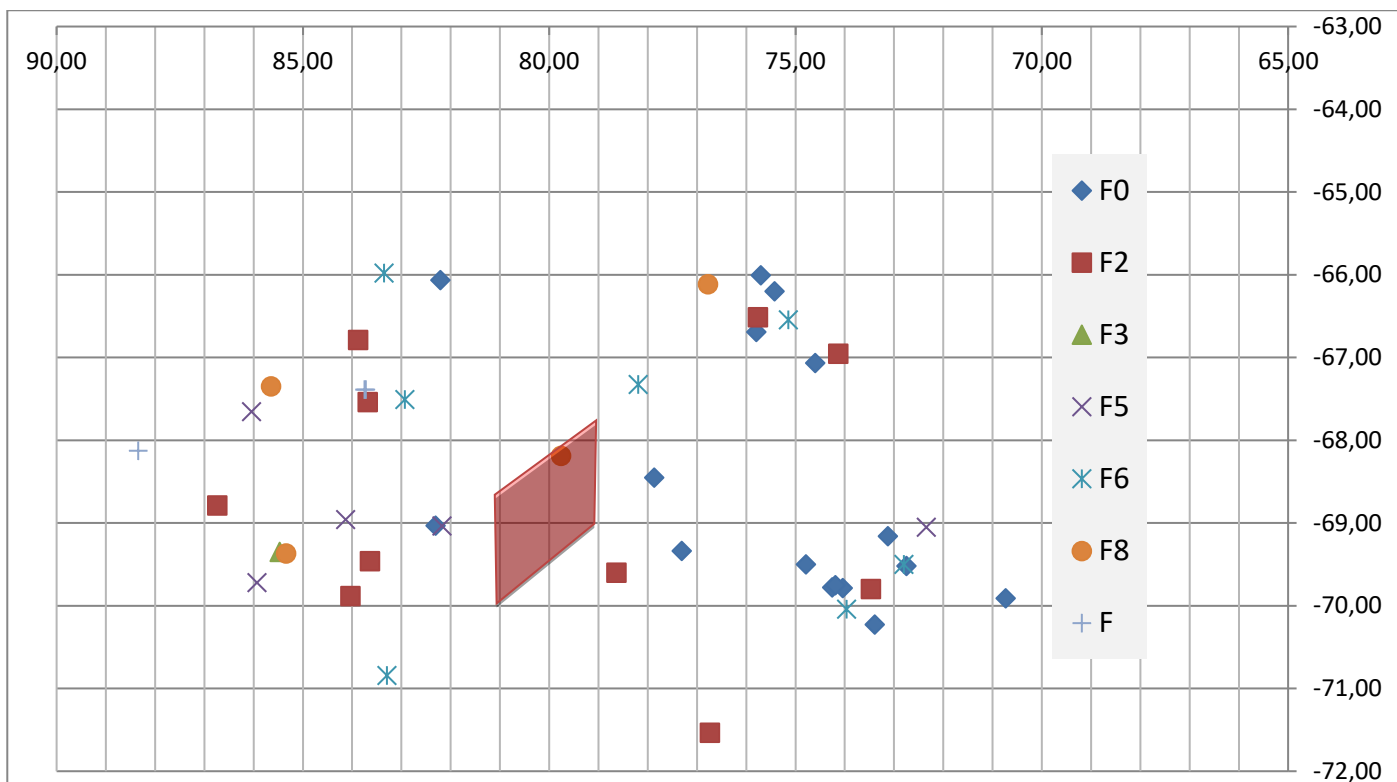
Rapportée à l'assemblage des cartes du Smithsonian Observatory, la zone se situe sur des cartes 52 / 44 / 36 / 28 (zone violette de la carte) ce qui laisse présager de la position de l'axe de rotation présumé en tridimensionnel.



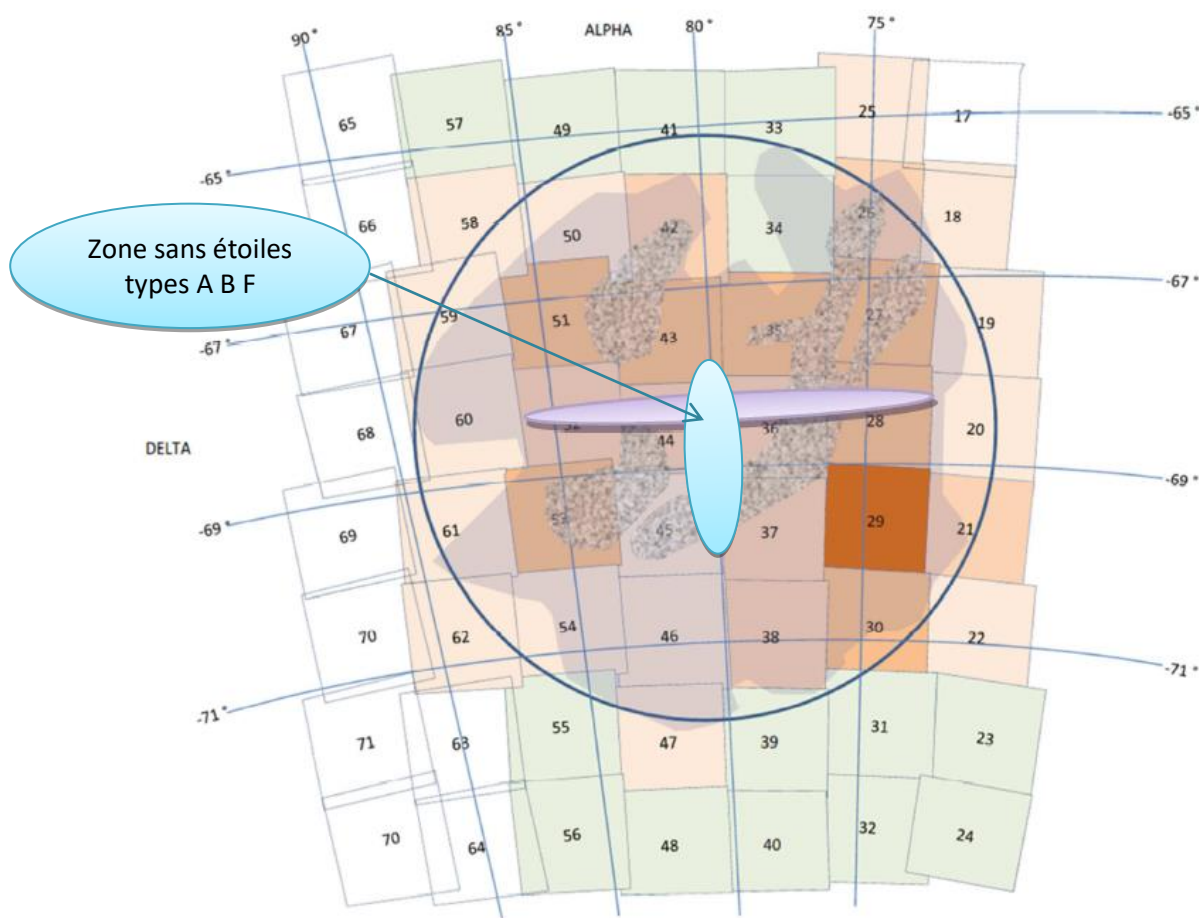
TRAVAUX et HYPOTHESES de Marcelle Duflot 1999-2020 – 2ère partie-

Une autre approche réalisée par Marcelle Duflot consiste à travailler sur le catalogue des étoiles issues du GPO par types spectraux O A B F, et d'observer leur répartition sur des graphiques de position α/δ . Ce travail montre une zone systématiquement vide d'étoiles. Il y a peu d'étoile de type O aussi nous retenons les graphiques des types A B F.





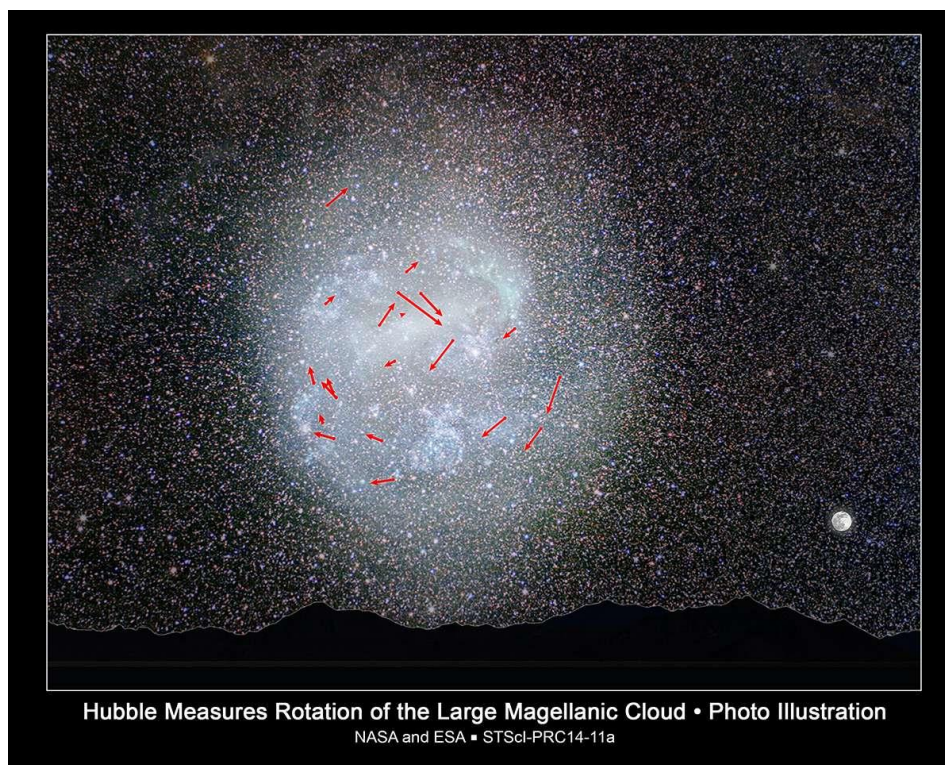
Cette zone recoupe la zone de vitesse nulle précédemment décrite. Voici sa position sur les cartes Smithsonian:



AUTRES TRAVAUX RECENTS SUR LE GNM

Une campagne d'observation à l'aide du télescope spatial Hubble⁴⁶ s'est déroulée, par intermittence sur une période de sept ans. Celle-ci a permis de déterminer avec la plus grande précision possible la période de rotation moyenne d'étoiles au sein du Grand Nuage de Magellan⁴⁷.

Ces observations qui offrent une première vision en trois dimensions des mouvements stellaires dans une galaxie semblent en cohérence avec les observations précédemment décrites.



Dès 2017, Marcelle Duflot avait émis l'idée, en conséquence à ses observations, que le centre du GNM pouvait être un *trou noir*⁴⁸. L'idée est alors restée sans suite.

La publication de Durham University de février 2019 évoque une forte densité du GNM et montre que le Grand Nuage de Magellan a deux fois plus de matière noire que ce que l'on pensait auparavant. Les chercheurs affirment⁴⁹ que le Grand Nuage de Magellan, qui a une

⁴⁶ Télescope spatial de 2,4 mètres de diamètre lancé par la navette Discovery le 24 avril 1990 et qui devrait revenir sur terre en 2020 - <https://hubblesite.org/>

⁴⁷ New analysis of the proper motions of the Magellanic Clouds using HST/WFPC2 - Nitya Kallivayalil, Roeland P. van der Marel, Jay Anderson, Gurtina Besla, and Charles Alcock - Volume 4, Issue S256 (The Magellanic System: Stars, Gas, and Galaxies) July 2008, pp. 93-98 - <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/new-analysis-of-the-proper-motions-of-the-magellanic-clouds-using-hst-wfpc2/801E9AAA51F2E16F18840F9B86D14441>

⁴⁸ Le concept de trou noir est né à la fin du XVIII^e siècle dans le cadre de la gravitation universelle d'Isaac Newton. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle et avec l'avènement de la relativité générale d'Albert Einstein qu'il devient réalité avec les travaux de Karl Schwarzschild. Le physicien américain John Wheeler en 1967 décrit une concentration de masse-énergie qui s'est effondrée gravitationnellement sous sa propre force d'attraction et qui est devenue si compacte que même les photons ne peuvent s'y soustraire. Une première observation de trou noir de 40 millions de fois la masse du soleil vient d'être publiée en juillet 2019 (VLT – MUSE – Abell 85).

⁴⁹ Durham University- revue *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* de février 2019

masse plus importante que prévu, perd rapidement de l'énergie et est condamné à entrer en collision avec notre galaxie d'ici 2 milliards d'années.

Cette hypothèse de trou noir dans la zone étudiée mériterait donc d'être étudiée.

E. Liais⁵⁰ évoquait à propos des nuages:

"Dans une bonne lunette, les nuées magellaniques se réduisent en une multitude d'amas de petites étoiles et de nébuleuses globulaires, qui ne sont probablement elles-mêmes que des amas secondaires plus condensés. Dans la grande nuée de Magellan se montre, toutefois, la belle nébuleuse de la dorade, dont nous avons donné le dessin amplifié. En tête de ce chapitre est figuré le fragment qui la contient. On y verra de quelle manière les deux nuages du ciel austral se transforment en étoiles et en nébuleuses. J'ai remarqué que derrière les astres définis existe encore un fond peu lumineux et inégal, indiquant que ce sont seulement les parties les plus rapprochées de la nébulosité générale qui sont résolues."

Ce "fond peu lumineux et inégal" qu'E. Liais observe avec sa lunette au Brésil dans les années 1860, ne préfigure-t-il pas les hypothèses d'aujourd'hui ?

⁵⁰ L'espace céleste et la nature tropicale – Description physique de l'univers d'après des observations personnelles faites dans les deux hémisphères, Paris, Garnier frères 1865

ANNEXE 1 -MESURES DES VITESSES RADIALES AVEC LE CORAVEL-

En 1953, l'anglais Peter Fellgett a l'idée de mesurer la vitesse radiale d'une étoile par la corrélation de son spectre avec celui d'une étoile de référence. Les premières expériences sont conduites par l'américain Horace Babcock en 1955. C'est l'anglais Roger Griffin qui réussit en 1967 à construire un instrument qui fonctionne et fournit directement la vitesse radiale. L'instrument de Griffin projette une partie du spectre de l'étoile produit par le spectrographe coudé du télescope de 90cm, installé à Cambridge en Angleterre, sur un négatif du spectre d'Arcturus pris avec le même instrument. Un masque contenant 240 trous est positionné avec précision pour correspondre aux raies d'absorption d'une étoile géante de type K2 (Arcturus).

La lumière venant du spectre passe à travers les trous amplifiée avec un photomultiplicateur. Le masque est déplacé à l'aide d'une vis micrométrique pour coïncider avec le spectre de l'étoile. La position du masque mesurée donne alors la vitesse de l'étoile par rapport à celle d'Arcturus, avec une erreur inférieure à 1 km/s.

Une équipe Franco-Suisse⁵¹ a construit en 1977 un nouvel instrument, appelé CORAVEL, inspiré du principe de Griffin, avec un réseau échelle fournissant un format spectral compact. Celui-ci permet d'utiliser le spectre en totalité (la référence est aussi Arcturus). Le grand domaine spectral permet d'utiliser l'information présente dans environ 1500 raies d'absorption (produites par des éléments métalliques, tel que le Fer, etc.) ce qui donne une précision d'environ 0.3 km/s (dispersion des mesures d'une étoile effectuées sur plusieurs nuits). Celle-ci peut atteindre 0.5 km/s pour des étoiles faibles de magnitude 13. Le CORAVEL permet un traitement informatisé de la mesure directe du profil de corrélation.



Le CORAVEL fut installé en 1977 sur le télescope Suisse de 1m à l'OHP, et a été utilisé jusqu'en 1996 par le groupe de Genève et celui de Marseille⁵².

Roger Griffin en a construit une copie pour Cambridge.

Le Coravel ne mesure pas d'étoiles de magnitudes aussi faibles (et donc plus brillantes) que le GPO du fait de sa référence à Arcturus.

Un deuxième CORAVEL copie de celui installé à l'OHP, a fonctionné entre 1981 et 1994 sur le télescope Danois de 1.54m à l'ESO à la Silla. Il a permis les mesures des vitesses radiales des étoiles rouges du GNM.

Il a été renvoyé en Suisse en 1998⁵³.

⁵¹ André Baranne, Michel Mayor et Adrien Poncet

⁵² Louis Prévot et Maurice Imbert

⁵³ <https://www.eso.org/public/france/teles-instr/lasilla/danish154/coravel/>