

# MESURE DE LA VITESSE D'EXPANSION DE L'UNIVERS

## Le Projet

La mesure de la vitesse d'expansion de l'Univers occupe une place prépondérante dans l'astronomie moderne. En effet, les travaux sur l'expansion réalisés depuis les années 1920 ont permis d'estimer l'âge de l'Univers et de mettre en évidence sa composition d'ensemble. Le futur de l'Univers sera dicté par sa vitesse d'expansion. On comprend donc pourquoi la mesure de ce taux, la constante  $H_0$  de Hubble-Lemaître, revêt un tel intérêt.

Il existe à l'heure actuelle 2 méthodes principales pour faire ces mesures : une méthode basée sur l'observation du fond cosmologique de micro-ondes (donc d'objets très lointains), et une méthode « classique » basée sur l'observation d'objets cosmologiquement proches. Dans cette seconde méthode, on essaye d'estimer la distance d'une source par des moyens indirects et on mesure sa vitesse d'éloignement par spectroscopie. Le rapport de ces deux mesures donne une estimation de  $H_0$ .

Au cours de la période 2020/21, un membre du club Ciel d'Aunis mené un projet d'estimation de  $H_0$  selon la méthode « classique » et en s'appuyant autant que possible sur ses propres observations.

## La méthode classique

Le principe en est donc simple : il faut trouver des objets suffisamment lointains pour que leur vitesse par rapport à nous soit principalement due à l'expansion de l'Univers et de trouver un moyen de mesurer leur distance. La constante  $H_0$  est alors obtenue en divisant la vitesse par la distance.

La difficulté principale de cette approche est que l'on est confronté à un dilemme suivant l'objet observé: soit l'objet est proche et on peut mesurer avec précision sa distance, mais alors sa vitesse sera polluée par des mouvements qui n'ont pas de rapport avec l'expansion de l'Univers. Soit l'objet est lointain et l'expansion de l'Univers est le facteur prédominant de sa vitesse, mais alors la distance de l'objet est difficile à estimer. Une vitesse se mesurant facilement par spectroscopie, on voit donc que pour la mesure de  $H_0$ , la difficulté principale réside dans la mesure de la distance d'objets lointains.

Pour cette raison, les astronomes font ces observations par étapes : ils commencent par des objets proches (Céphéides par exemple) dont on peut observer directement la distance. Ces étoiles servent alors à mesurer la distance de galaxies voisines. Cette connaissance permet alors de calibrer d'autres « chandelles standards » visibles à plus grande distance. Ils utilisent ensuite ces nouvelles « chandelles standards » pour estimer la distance d'objets plus lointains (amas de galaxies à quelques dizaines / centaines de millions d'année-lumière).

## Méthodologie

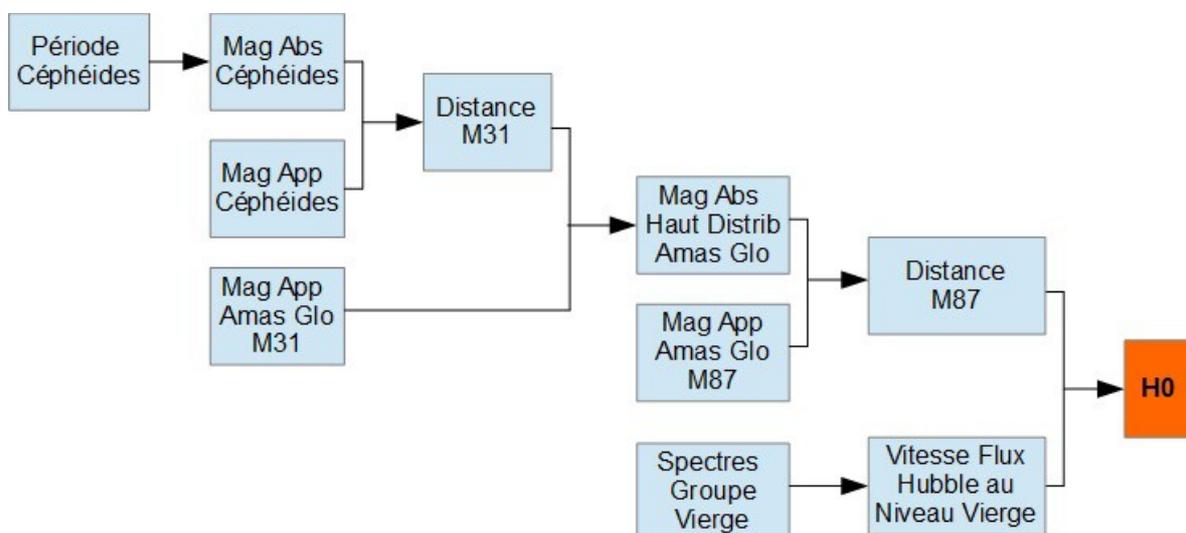
Pour mener à bien le projet, je me suis servi de la galaxie M31 comme première étape. Avec du matériel d'amateur, il est possible d'observer individuellement les Céphéides les plus brillantes (type I). En réalisant plusieurs observations sur une certaine durée, on peut estimer la période de ces étoiles. Ces étoiles variables ont deux particularités qui les rendent très intéressantes pour ce genre d'étude : elles sont brillantes et la période de leur variation (la durée d'un cycle complet) est liée à leur éclat intrinsèque par une relation établie par Henrieta Lewitt. Si l'on arrive à mesurer leur

période, on peut calculer leur éclat intrinsèque (magnitude absolue), et en la comparant à la magnitude apparente, on en déduit leur distance, donc celle de M31.

La seconde étape dans le projet est la mesure de la distance et de la vitesse de l'amas de la Vierge. A sa distance (environ 50 millions d'année-lumière), il n'est pas possible avec du matériel d'amateur d'observer des Céphéides. En revanche, il est possible d'y observer des amas globulaires. Donc si on fait l'hypothèse que les populations d'amas globulaires sont similaires dans l'environnement de M31 et dans l'amas de la Vierge, alors on pourra estimer la distance de la Vierge en analysant un échantillon d'amas globulaires.

Pour finaliser le projet, il restera à mesurer la vitesse d'ensemble de l'amas de la Vierge, que l'on assumera comme dépendant essentiellement de l'expansion de l'Univers.

Le diagramme ci-dessous illustre l'enchaînement des observations et mesures :



## Matériel

Les observations à réaliser sont de deux types : des mesures de photométrie et des mesures de vitesse par spectroscopie. Pour la photométrie des Céphéides dans M31 et des amas globulaires dans la Vierge, je me suis servi d'un C14 ouvert à  $f/7,3$  et d'une caméra ZWO ASI 1600MM. La photométrie des amas globulaires de M31 a été faite avec un C11 ouvert à  $f/7$  et une caméra ZWO ASI 294MC. Enfin la spectroscopie de l'amas de la Vierge a été réalisée avec un Alpy600 monté derrière le C14.



Les traitements d'images et l'extraction des données ont été réalisés avec PixInsight, AstroImageJ et Isis. Au total environ 50 heures d'observation ont été nécessaires et sans doute au moins le double pour la réduction et l'analyse des données.

### **Mesure de la distance de M31 par observation des Céphéides**

Pour les Céphéides de type I, la relation entre la période de l'étoile et sa magnitude absolue est donnée par :

$$M_{\text{abs}} = -2,43 * [\log(P) - 1] - 4,05 \quad \text{où } M_{\text{abs}} \text{ est la magnitude absolue et } P \text{ la période en jours}$$

Le champ cible que j'ai choisi pour ce travail est celui de NGC206, une zone active de formation d'étoiles avec de nombreuses géantes et, parmi elles, plusieurs Céphéides. Ce champ a aussi l'avantage d'avoir été bien documenté dans un excellent post Astrosurf de Mathieu Conjat sur l'observation de ces étoiles.

Pour l'identification des étoiles cibles, je me suis aussi beaucoup servi d'Aladin qui fournit de nombreux catalogues, dont un en particulier (Cepheids in M31 – Andromeda Cepheid Sample (Kodric+, 2018) – Main Catalog) qui indique l'amplitude de la variabilité de l'étoile. Cet élément est

important car beaucoup des étoiles listées montrent des variations faibles (inférieures à 0,1 mag) ce qui rend la photométrie difficile pour des objets de magnitude 18-21 pour les plus brillants. Dans ce catalogue, j'ai donc choisi de suivre 8 Céphéides.

L'image ci-dessous montre le champ étudié. Le temps de pose moyen de ces observations a été de 1h30 par nuit, sans filtre. Anotées sont les Céphéides cibles ainsi que les étoiles de référence pour la mesure des magnitudes. Les données des étoiles de référence proviennent du catalogue Gaia.

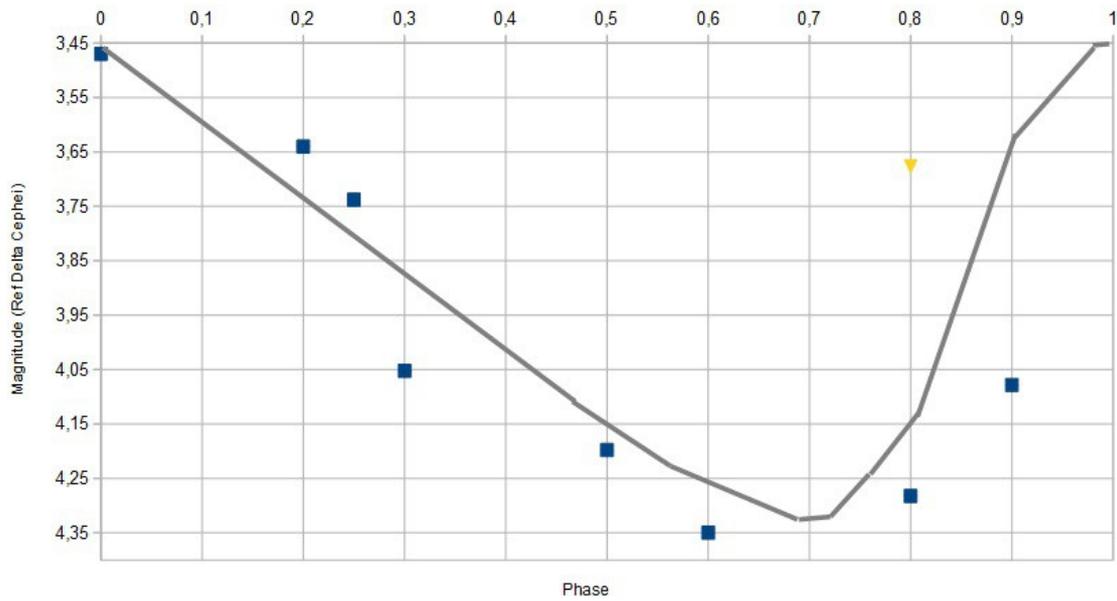


L'analyse des résultats montre que l'écart type des mesures réalisées avec AstroImageJ est de 0,05 magnitude et que ce résultat est obtenu de façon consistante au cours des différentes nuits. Cette valeur est à mettre en regard de l'amplitude de variation de l'ordre de 0,3 magnitude, ce qui donne un SNR d'environ 6 pour la détection de la variabilité... pas loin de la limite de ce qui est raisonnable!

Les observations se sont étalées sur 2 mois et demi avec, malheureusement, de nombreuses coupures dues à une météo défavorable. Seules 9 observations ont pu être faites ce qui a rendu la détermination des périodes relativement difficiles. La courbe ci-dessous illustre l'analyse des mesures dans le cas de l'étoile 2149 du catalogue. La ligne continue est une courbe de référence assez standard pour ces étoiles, avec une montée en luminosité rapide suivie d'une baisse progressive. Les points correspondent à mes mesures sur l'étoile en question.

2149

Période 79 jours



Les mesures de période-luminosité sur les 8 Céphéides ainsi que la mesure de leur éclat apparent donnent une distance moyenne pour M31 de 2,09 millions d'année-lumière (Mal). C'est 17% de moins que la valeur de 2,51 Mal communément admise et souligne la qualité modeste de mes mesures.

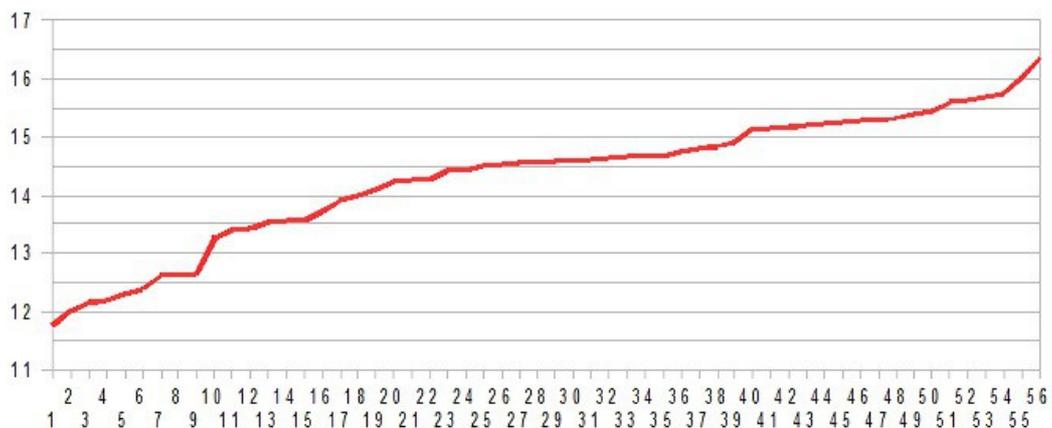
### Observation et calibration des amas globulaires comme «chandelles standards»

Pour l'observation photométrique des amas globulaires, j'ai utilisé une l'image ci-dessous, prise dans le cadre d'un projet parallèle d'imagerie de M31 au C11. Les indications en rouge sont les flux de lumière mesurés par AstroImageJ pour quelques uns des amas.



Au total, 56 amas globulaires ont été observés dans ce champ. Leur identification a été faite grâce au catalogue «M31GC Revised Bologna Catalog of M31 globular clusters (Galletti+, 2004) » consultable sur Aladin.

J'ai ensuite simplement tracé le graphe de la magnitude visuelle de ces amas, après tri par ordre croissant. On obtient alors la courbe suivant :

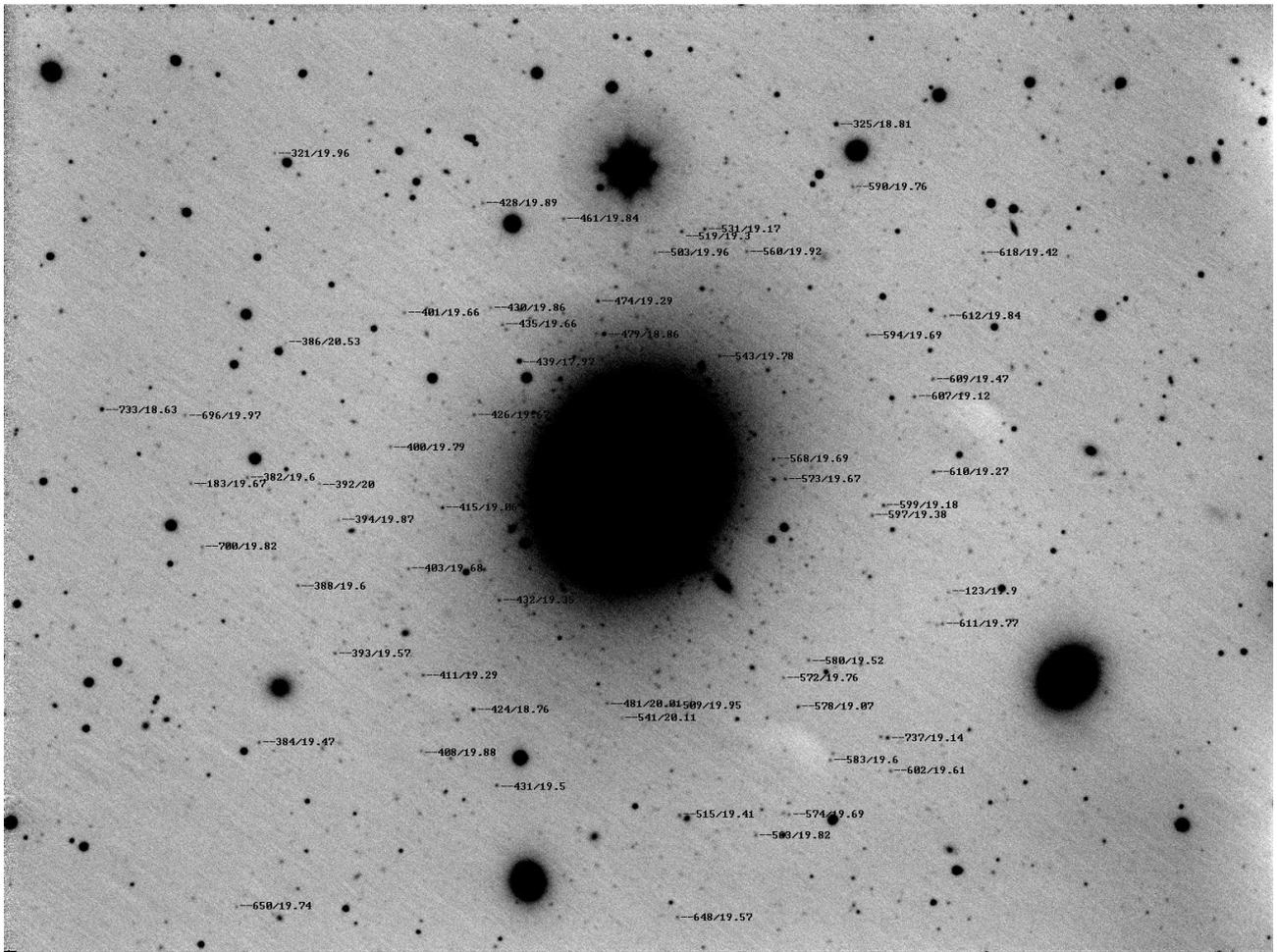


Le partie en bas à gauche de la courbe représente les amas les plus brillants avec une magnitude apparente de 12. En se basant sur la distance estimée de 2,09 Mal, on en déduit que ces objets ont une magnitude absolue de l'ordre de -12, soit une luminosité d'environ 5 millions de fois celle du Soleil et environ 1500 fois la luminosité d'une Céphéide de type I.

## Observation des amas globulaires de M87 et estimation de sa distance

Maintenant que la distance de M31 est estimée et que la calibration en magnitude absolue des amas globulaires principaux est réalisée, la phase suivante consiste en la mesure photométrique de la population des amas globulaires de M87, ou tout du moins, de la partie « haute » de cette population comprenant les amas les plus riches et brillants.

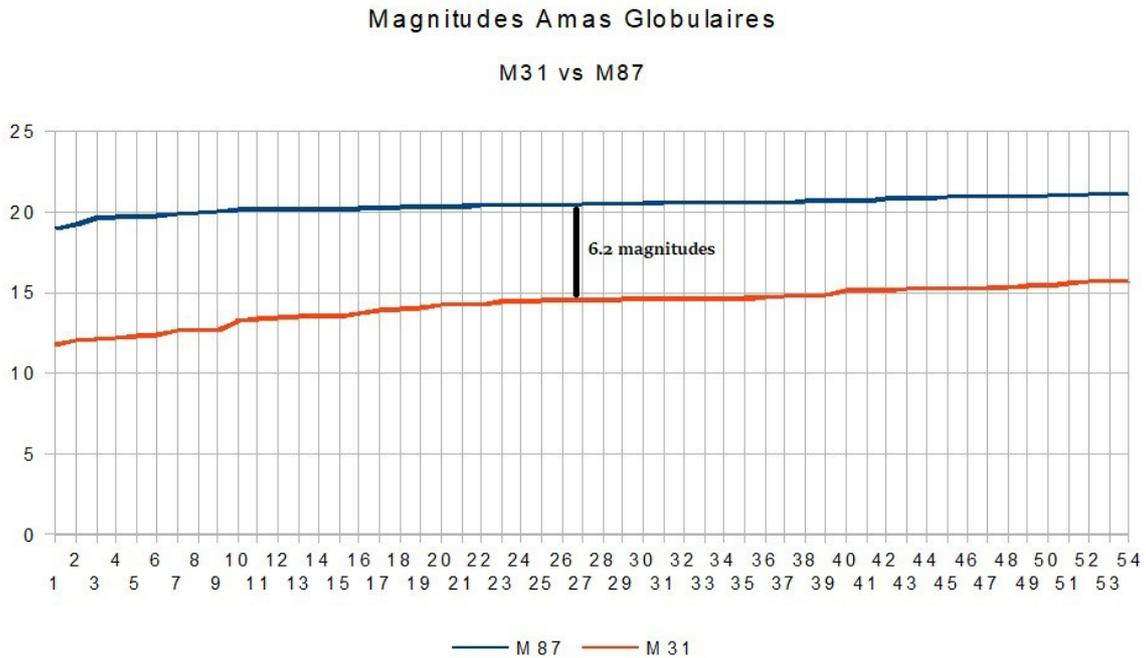
Pour ce faire, j'ai réalisé une image de M87 en posant 4h au C14 à f/7. Cette image (ci-dessous) permet de faire de la photométrie sur un certain nombre de sources dans la périphérie de la galaxie, jusqu'à une magnitude (non filtrée) de 21,2.



Une fois de plus, Aladin a permis de consulter un catalogue des amas globulaires identifiés dans cette région du ciel : « Spectroscopic and photometric data for all M87 globular clusters and ultracompact dwarfs (table9) (Strader+, 2011) » qui a permis l'identification des amas. Les identifiants sur l'image ci-dessus sont ceux du catalogue de Strader et les magnitudes indiquées viennent aussi de ce catalogue. Cependant, pour mon projet, je n'ai pas pris directement ces valeurs. J'ai calibré l'image en magnitude sur un certain nombre d'étoiles à l'aide des données Gaia. J'ai ensuite estimé les magnitudes d'une cinquantaine d'amas globulaires et ai recréé, pour M87, un graphique similaire à celui obtenu pour les amas de M31.

En superposant ces deux graphiques, comme montré ci-dessous, on observe que les courbes de population des amas dans les deux galaxies sont assez similaires, mais décalées d'environ 6,2

magnitudes en moyenne. J'interprète alors ce décalage comme une indication de la différence de distance entre les deux systèmes.

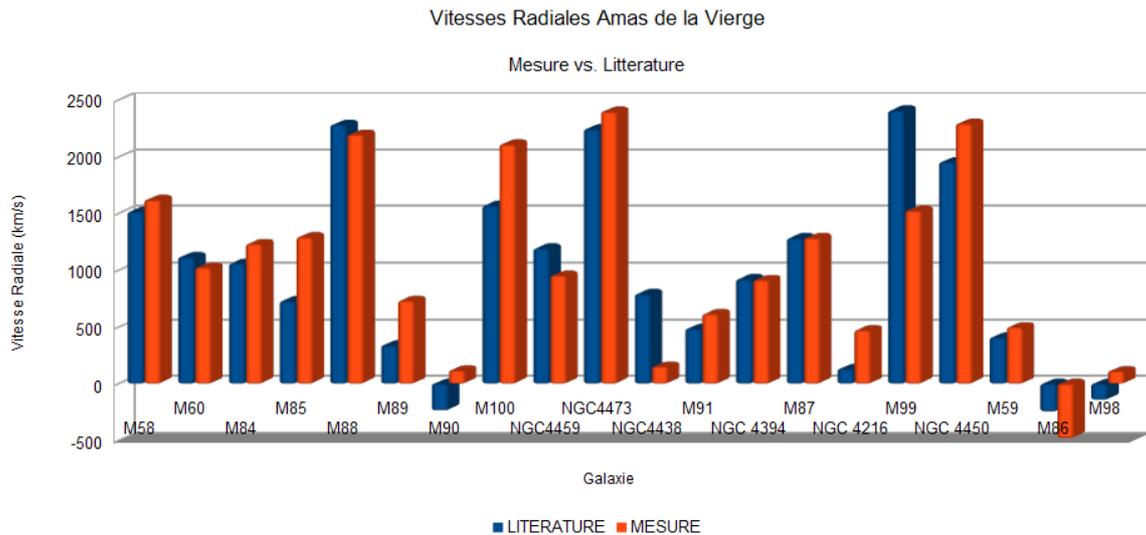


Un delta de magnitude de 6,2 correspond à un rapport de luminosités de 300, et donc un rapport de distance de 17,3 entre M31 et M87. Ce rapport permet d'estimer la distance nous séparant de M87 à  $17,3 \times 2,09 = 36,3$  Mal. Ce chiffre est à rapprocher des 54 Mal estimé par les professionnels, soit une erreur de 1/3 entre mes mesures et la valeur communément acceptée. La moitié environ du budget de cette erreur provient de la sous-estimation de la distance de M31, l'autre moitié provient du process d'estimation de la distance à base des amas globulaires.

### Mesure de la vitesse radiale de l'amas de la Vierge

Pour cette dernière phase du projet, je me suis servi d'observations que j'avais réalisées dans le cadre d'un projet de mesure de la masse sombre dans l'amas de la Vierge. Ce projet avait inclus la mesure de la vitesse radiale d'une vingtaine de galaxies de l'amas et avait permis de mettre en évidence la vitesse globale de l'amas.

Le diagramme ci-dessous montre les valeurs de vitesses radiales mesurées avec Isis ainsi que celles relevées dans la littérature pour ces mêmes galaxies.



La moyenne des vitesses de mesures s'établit à 1053 km/s et représente la vitesse de récession d'ensemble de l'amas de la Vierge, correction faite des mouvements de la Voie Lactée dans le Groupe Local. Cette valeur est consistante avec les mesures professionnelles avec une marge de quelques pourcents.

### Estimation de la constante de Hubble-Lemaître et remarques

Il ne reste maintenant plus qu'à diviser la vitesse de récession de l'amas de la Vierge par sa distance exprimée en méga-parsec pour avoir une idée de la constante H0. Le projet donne alors une valeur de H0 égale à :

$$H_0 = V_r / D = 1053 \text{ km/s} / (36,3 \text{ Mal} / 3,26 \text{ al/pc}) = 94,6 \text{ km/s/Mpc}$$

(pc = parsec, Mpc = méga-parsec)

Cette valeur surestime d'environ 1/3 la valeur de 70km/s vers laquelle les différentes méthodes professionnelles convergent.

Bien que le projet soit basé sur un nombre certain de raccourcis, d'hypothèses simplificatrices et d'incertitudes de mesures, le résultat est grosso-modo en ligne avec la valeur actuelle de H0. Si l'on voulait aller plus loin, il faudrait reprendre la mesure des Céphéides, qui est certainement celle la plus entachée d'erreur, et chercher aussi des sources plus lointaines que l'amas de la Vierge, ne serait-ce que pour avoir confirmation de la linéarité de la loi de Hubble-Lemaître. En effet, je n'ai effectivement réalisé qu'une seule mesure pour estimer H0, donc rien ne me permet d'affirmer que ce paramètre est constant dans l'espace assez proche !

### Conclusion

Les moyens à la disposition des amateurs sont très conséquents : optiques et mécaniques de qualité, caméras sensibles, spectroscopes simples d'utilisation, accès à nombre de bases de données pros, excellents logiciels de traitement et d'analyse des images, matériel disponible à notre convenance... bref, toutes les conditions sont réunies pour faire de la science en amateur. C'est une activité à la fois ludique et pleine d'enseignements. Elle permet aussi de mieux apprécier la créativité des astronomes ainsi que les avancées extraordinaires qu'ils réalisent.