

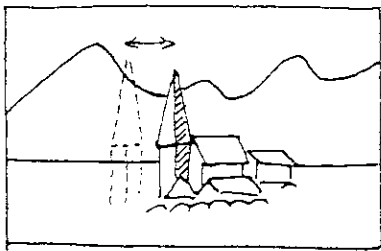
LA RELATION DE TULLY-FISHER ET LA DETERMINATION DES DISTANCES EXTRAGALACTIQUES

Nous nous proposons de faire un exercice pratique sur la détermination des distances extragalactiques. Nous commencerons par présenter la méthode employée, puis, à partir de données réelles, nous essayerons de calculer la distance de galaxies lointaines.

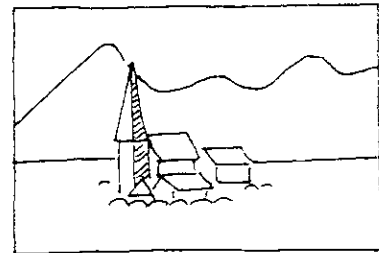
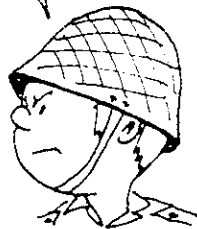
I-INTRODUCTION

La difficulté de la détermination des distances astronomiques vient de ce qu'il n'est pas question de reporter notre mètre étalon le long de la ligne de visée. Pour essayer de saisir concrètement la difficulté transposons au quotidien: demandons nous comment déterminer la distance des villages voisins sans quitter notre appartement. Deux étapes sont nécessaires.

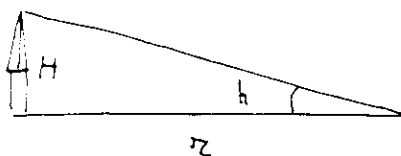
1) La distance du village le plus proche est obtenue par la méthode de triangulation chère aux artilleurs, en visant par exemple, le clocher du village depuis deux fenêtres de notre appartement. Du déplacement angulaire apparent du clocher et de la distance entre nos deux fenêtres nous déduisons la distance qui nous sépare jusqu'à l'église, sans autre postulat que le bon vieux postulat d'Euclide. Notons au passage (cette remarque aura une grande importance pour la suite) que la hauteur vraie du clocher pourra alors se calculer par la mesure de la hauteur apparente (angle sous lequel on voit le clocher).



Chef, le point de repère se déplace!



2) Pour un village plus lointain aucun déplacement angulaire apparent n'est mesurable. Il nous faut procéder autrement. Si nous supposons que tous les clochers de villages sont identiques à celui dont nous avons déterminé la hauteur vraie à l'étape 2, alors la mesure de la hauteur apparente d'un quelconque clocher nous donne sa distance. La difficulté est donc de connaître a priori la hauteur vraie du clocher lointain.



*Si je mesure h
Si je connais H
je déduis la distance
 $r = \frac{H}{\tan \alpha}$*



Revenons à notre problème extragalactique. En utilisant les deux étapes que nous venons de voir les astronomes sont arrivés à connaître les distances de quelques galaxies proches, les GALAXIES ÉTALONS. Ils ont pu obtenir ainsi leur magnitude absolue (rappelons que la magnitude absolue n'est autre que la magnitude apparente qu'elles auraient si elles étaient toutes placées à la même distance de 10 parsecs).

Comment allons nous utiliser ces quelques galaxies étalons pour calculer les distances des galaxies plus lointaines?

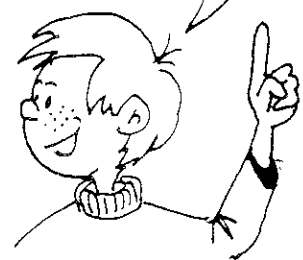
S'il était possible de connaître a priori la magnitude absolue des galaxies lointaines, la simple mesure de leur magnitude apparente nous donnerait leur distance au moyen de la relation classique:

$$m - M = 5 \log r + 5 \quad (1)$$

où m est la magnitude apparente mesurée, M la magnitude absolue que nous supposons connue, et r la distance exprimée en parsec (1 pc = 3,26 année lumière). Cette relation (1) exprime que l'éclat apparent décroît comme l'inverse du carré de la distance (voir l'encadré 1).

Le problème est donc posé: Comment obtenir la magnitude absolue d'une galaxie lointaine? C'est la relation de Tully-Fisher qui va nous permettre de résoudre ce problème. Cependant pour comprendre l'origine de cette relation nous devons faire un petit tour du côté de la radioastronomie.

Msiem! Si je comprends bien la magnitude absolue c'est comme la hauteur vraie du clocher du village (*)



(*) Notez que cette phrase serait incompréhensible en dehors du contexte.

ENCADRE 1 -----

La magnitude m d'une source est définie, à une constante près, par:

$$m = -2.5 \log E + cte \quad \text{où } E \text{ est l'éclat apparent de la source}$$

On définit alors la magnitude absolue M

$$M = -2.5 \log E_0 + cte \quad E_0 \text{ est l'éclat qu'aurait la source à la distance de } 10 \text{ pc (1 pc = 3,26 a.l.)}$$

Or l'éclat varie comme l'inverse du carré de la distance r :

$$E = k/r^2 \quad \text{d'où on déduit: } E/E_0 = (10/r)^2$$

en prenant les logarithmes et en multipliant par $-2,5$ on a:

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad r \text{ en pc}$$

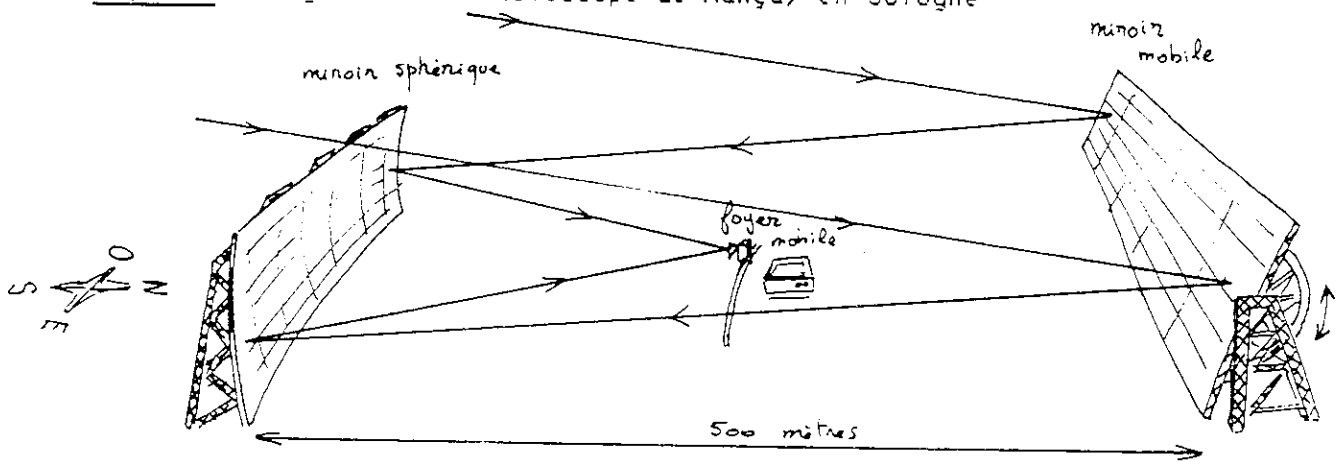
On sait mesurer m pour une source; si on connaît M on peut alors calculer la distance r . LA DIFFICULTE EST DE CONNAITRE M !

II- UN PEU DE RADIOASTRONOMIE

L'hydrogène est le constituant fondamental de l'Univers. En 1944 l'astronome Van der Hulst montra qu'il était possible d'observer le rayonnement émis par l'hydrogène atomique neutre. En effet, l'atome d'hydrogène neutre a deux états d'énergie selon que le spin du noyau et celui de l'électron sont parallèles ou antiparallèles. Quand l'atome passe d'un état à l'autre il y a émission d'un rayonnement à la longueur d'onde 21,1 cm. Pour un atome donné cette émission se produit seulement tous les onze millions d'années. Mais heureusement il y a beaucoup d'atomes d'hydrogène neutre, en particulier dans certaines galaxies.

Pour observer un rayonnement si peu énergétique, il faut des miroirs de très grande surface. Par exemple le radiotélescope de Nançay en Sologne (figure 1) a un miroir de 7000 mètres-carrés de surface utile. En revanche la surface du miroir n'a pas besoin d'être finement polie. Un simple grillage suffit pour réfléchir des ondes aussi grandes.

figure 1: Le grand radio-télescope de Nançay en Sologne



Revenons aux galaxies. L'hydrogène neutre contenu dans une galaxie émet un rayonnement. En l'absence de tout mouvement cette émission serait mesurée exactement à la longueur d'onde 21,1 cm. Mais les galaxies se meuvent et tournent sur elles-mêmes. Or le rayonnement est affecté par ces mouvements en vertu de l'effet Doppler-Fizeau: Si la partie émissive se rapproche de nous le rayonnement est vu à une longueur d'onde plus petite; à l'inverse si la partie émissive s'éloigne de nous le rayonnement est vu à une longueur d'onde plus grande.

Une galaxie vue de face produit une raie d'émission simple comme celle représentée à la figure 2. Le rayonnement n'est en général pas centré sur 21,1 cm car la galaxie peut avoir un mouvement d'ensemble. Mais la rotation de la galaxie ne change pas la forme de la raie. La raie n'est pas infiniment étroite car les nuages d'hydrogène neutre ont des mouvements d'agitation.

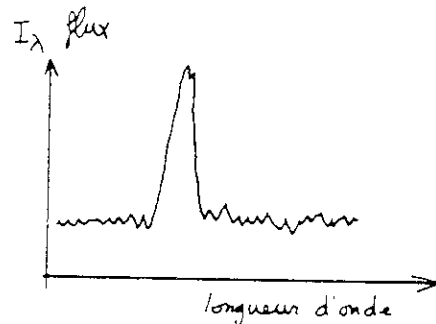


figure 2

Pour une galaxie vue sous un certain angle d'inclinaison la forme de la raie d'émission est modifiée par la rotation (figure 3). Plus précisément, la largeur W de la raie est une fonction de la répartition de l'hydrogène neutre dans la galaxie, de la vitesse de rotation et de l'angle sous lequel on voit la galaxie.

Essayons de calculer la vitesse de rotation de la galaxie. Un calcul simple montre (voir encadré 2) que l'on a :

$$W_0 = W / (1 - (b/a)^2)^{1/2} \quad (2)$$

où W_0 est égal au double de la vitesse maximum de rotation; a et b sont les axes de l'ellipse représentant le contour apparent de la galaxie.

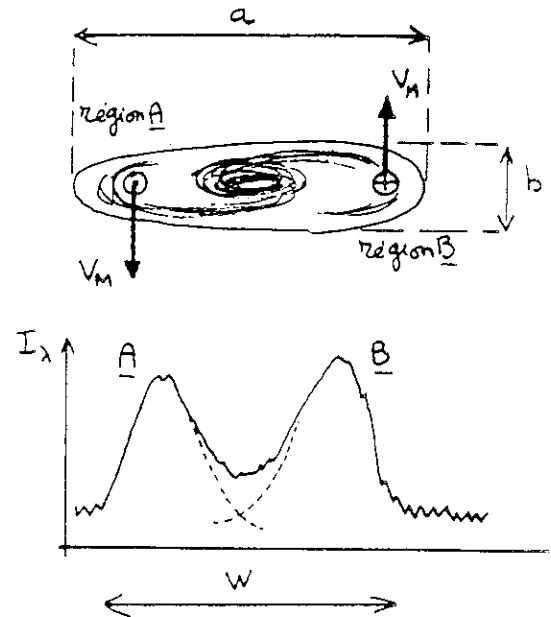
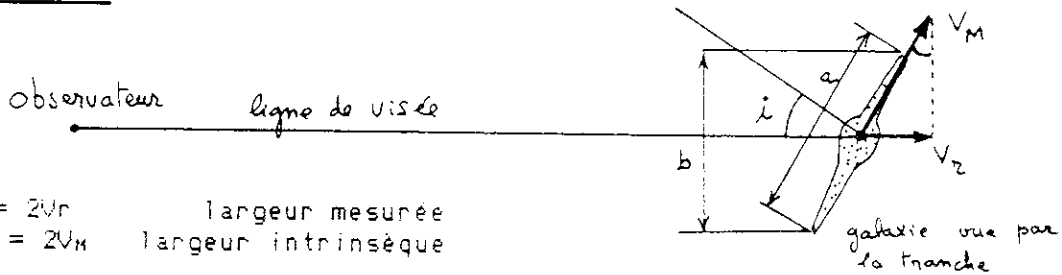


figure 3

En 1975 les astronomes Brent Tully et Richard Fisher ont trouvé une relation reliant W_0 et la magnitude absolue d'une galaxie. Cette relation est très intéressante; elle signifie que la mesure de W_0 nous donne la magnitude absolue M de la galaxie et, rappelez vous, c'est justement la quantité dont nous avons besoin pour pouvoir déduire la distance d'une galaxie.

Encadré 2



$w = 2V_r$ largeur mesurée
 $W_0 = 2V_M$ largeur intrinsèque

V_r est la composante de V_M le long de la ligne de visée (composante radiale). On a donc :

$$V_M = V_r / \sin i$$

Or si la galaxie est un disque mince on a : $\cos i = b/a$

De ces quatre relations on déduit facilement la relation cherchée :

$$W_0 = W / (1 - (b/a)^2)^{1/2}$$

III- LA RELATION DE TULLY-FISHER

Pour bien comprendre le calcul de la distance d'une galaxie lointaine à partir de la relation de Tully-Fisher je vous propose un exercice pratique. Cet exercice comprendra deux étapes:

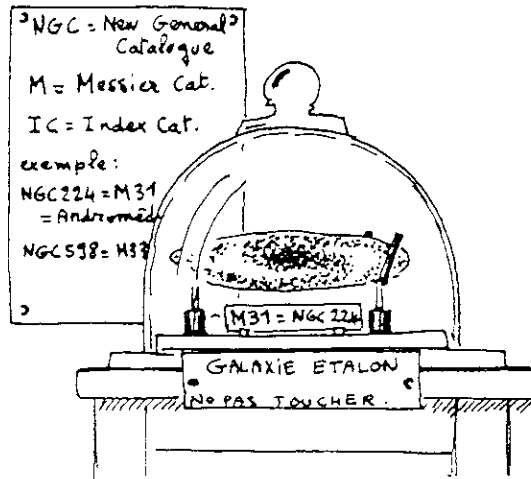
- 1) établissement de la relation de TF avec les galaxies-étalons
- 2) application de cette relation à la détermination de la distance de galaxies lointaines.

III-1 Etablissement de la relation de TF

A la figure 4 nous avons reproduit les raies d'émission de l'hydrogène neutre pour six galaxies étalons utilisées par Tully et Fisher. Pour ces mêmes galaxies nous donnons ci-après (table 1): la magnitude absolue et les dimensions apparentes des axes tels qu'elles étaient connues en 1975.

Table 1: Galaxies-étalons

galaxie	M mag.	a	b	W km/s	logWo
M 31	-20,59	197	92	534	2,78
M 33	-19,73	83	53	204	2,42
NGC2366	-16,62	10	5	110	2,11
NGC2403	-19,23	29	15	265	2,49
NGC4236	-18,14	26	9	196	2,32
IC2574	-17,02	16	8	130	2,18



Sur les spectres vous pouvez vous amuser à mesurer les largeurs W, par exemple à un niveau de 20% du niveau maximum (ce niveau a été marqué d'un trait horizontal).

Nous avons deux remarques à faire concernant ces spectres:

- L'axe des abscisses est gradué en Km/s. En effet, il est d'usage en radioastronomie d'exprimer une longueur d'onde L en terme de vitesse radiale V au moyen de la relation Doppler-Fizeau $V = C (L - L_0) / L_0$. Dans cette relation, C est la vitesse de la lumière et L₀ la longueur d'onde au repos (21,1 cm).

- Certaines raies (par exemple pour IC 2574) sont tronquées à cause de l'absorption par l'hydrogène neutre de notre propre Galaxie (HI local). Dans un tel cas il faut compléter la partie manquante en supposant par exemple que la raie est symétrique.

Quand vous aurez mesuré W il vous suffira de calculer Wo avec la relation 2. Le résultat est donné dans le tableau 1 (pour les paresseux). Finalement, portez sur un graphique les valeurs de M en fonction de log Wo. Les points se placent sur une droite (figure 5) répondant à peu près à l'équation:

$$-M = 6,0 \log Wo + 4,0 \quad (3)$$

C'est la relation de Tully-Fisher.



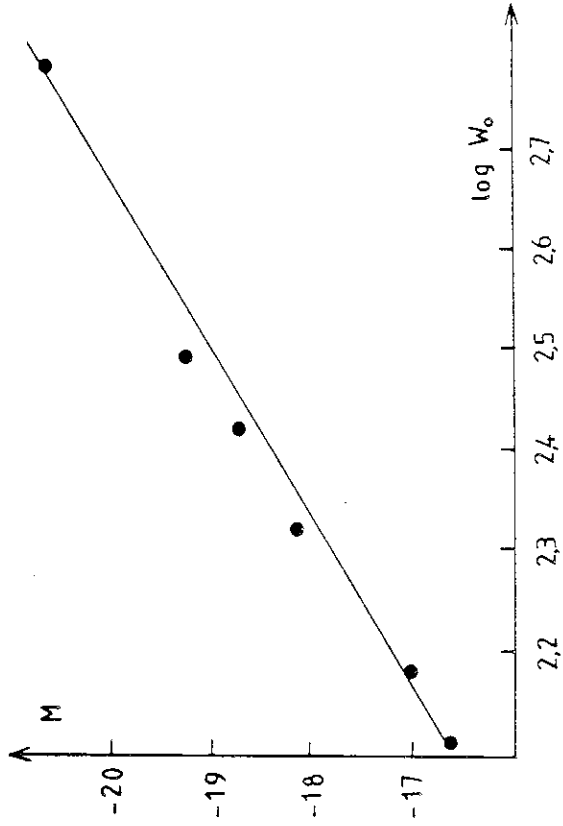
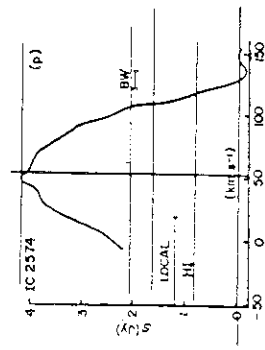
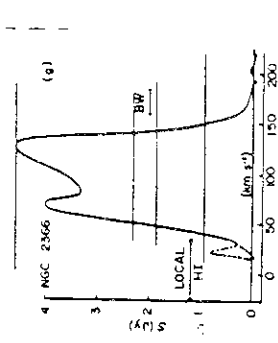
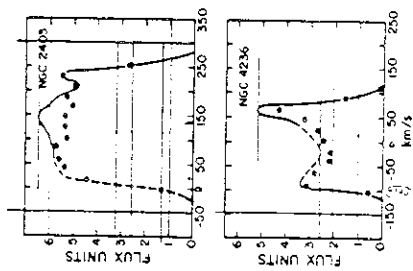
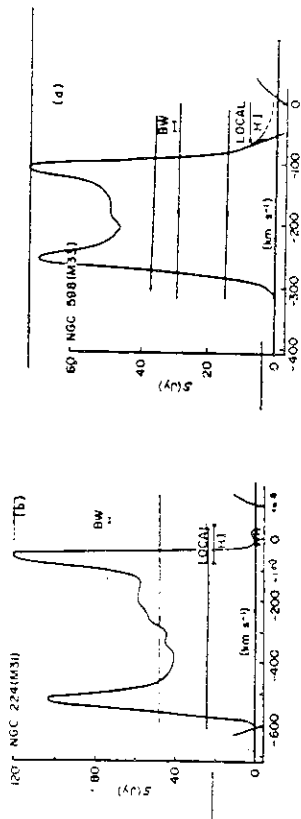


figure 5

figure 4

III-2 Application au calcul de la distance de l'amas VIRGO

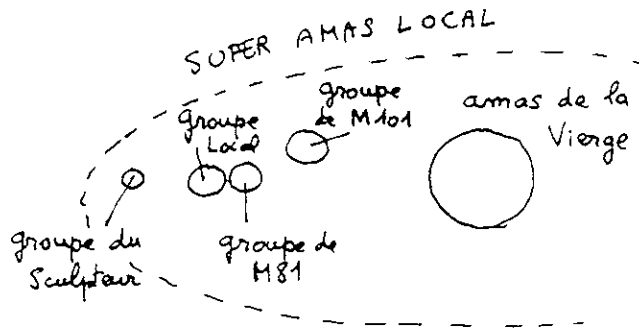
Près du pôle Nord de notre Galaxie il y a un amas de galaxies très peuplé, l'amas Virgo. Depuis les travaux de l'astronome Gérard de Vaucouleurs on sait que l'amas Virgo est le centre d'une super-condensation (le Super Amas Local) à l'intérieur de laquelle notre Groupe Local, auquel appartient notre galaxie, n'est qu'un élément minuscule.

Comme application de la relation Tully-Fisher nous allons calculer la distance nous séparant de l'amas Virgo.

Pour huit galaxies appartenant à l'amas Virgo nous donnons dans la table 2: la largeur de la raie de l'hydrogène neutre W_0 , obtenue comme précédemment et la magnitude apparente m (corrigée des effets d'absorption). Cette magnitude, de même que W_0 , est mesurable depuis le sol.

Table 2: Galaxies de l'amas Virgo

galaxie	m mag.	W_0 km/s
NGC4178	11,3	293
4192	10,3	465
4206	11,6	301
4501	9,8	592
4532	12,2	294
4535	10,3	436
4651	11,1	440
4654	10,8	368



En utilisant la relation de TF que vous avez trouvée (relation 3) vous calculerez la magnitude absolue M à partir de la largeur W_0 . Vous appliquerez alors la relation (1); m et M étant connus vous déduirez facilement la distance r , en million de parsecs (Méga parsec = Mpc). La moyenne de toutes les valeurs de $m-M$ est trouvée égale à $\langle m-M \rangle = 30,5$, soit une distance de $\langle r \rangle = 12,6$ Mpc (i.e. 41 millions d'années-lumière).

Quand nous regardons une galaxie de Virgo nous la voyons telle qu'elle était il y a environ 40 millions d'années.

G. Paturol
Observatoire de Lyon

