

LA CONSTANTE DE HUBBLE ET L'ÂGE DE L'UNIVERS

PRELIMINAIRE

En commençant cet exposé, je voudrais évoquer l'objectif essentiel poursuivi par le CLEA : contribuer à la **formation de l'esprit scientifique**, à travers une science particulière, l'astronomie, qui, autant par son objet que par ses méthodes propres, ou encore l'intérêt qu'elle suscite, nous semble particulièrement adaptée.

Beaucoup plus que sur la simple diffusion d'un ensemble de connaissances, nous en avons tous la conviction au sein du CLEA, l'enseignement scientifique porte (ou devrait porter...) en premier lieu sur les méthodes. La façon dont le scientifique appréhende le monde est l'un de nos **modes de connaissances** ; et il est le bien commun de tous. Enseignants et chercheurs, nous avons le devoir de le rendre accessible au plus grand nombre. Ce travail d'appropriation est lent et doit se faire sans complaisance. Je suis convaincue qu'il relève de la responsabilité des enseignants mais aussi de celle des chercheurs, dont on attend qu'ils exposent et rendent intelligibles les résultats de leur travail.

Enseignants, nous mettons l'accent sur la méthode expérimentale, sur la démarche historique, sur le décloisonnement des disciplines et le travail en équipes pédagogiques, sur la variété des méthodes didactiques, comme par exemple l'utilisation du travail manuel comme moyen d'accès à un savoir abstrait.

Aujourd'hui, c'est en chercheur que je m'adresse à vous. Je vais présenter des résultats de travaux récents, qui portent sur un domaine particulièrement fascinant, et dans lequel je travaille, celui de la cosmologie : quelles contraintes sur l'âge de l'Univers et sur les "modèles cosmologiques" apportent les déterminations récentes de la "constante de Hubble", déterminations qui reposent elles-mêmes sur des mesures de distances ?

Les media l'abordent régulièrement, sous un titre accrocheur (et pour le moins étonnant !) régulièrement repris : "l'Univers est-il plus jeune que ce qu'il contient ?". Ils le font généralement à l'instigation de chercheurs soucieux d'assurer soit leur propre publicité, soit celle de coûteux instruments dont ils veulent justifier le financement. La façon ultra-simplifiée dont ces résultats sont présentés, me semble à peu près totalement dépourvue de signification, parce qu'elle expose **une** mesure, présentée comme spectaculaire, interprétée dans le cadre d'un **modèle implicite** sous-jacent, et sensée apporter la réponse définitive au problème étudié. Elle nous conduit à réfléchir à ce qu'est la démarche de la science, qui repose sur une succession de modèles (qui n'épuisent jamais la complexité du réel) et dépendent d'un **ensemble de paramètres**. En isoler un et un seul, me semble opacifier complètement la démarche. Une part de l'incompréhension du monde dans lequel nous vivons me semble relever des tentatives d'interprétation reposant sur l'exhibition **du seul** paramètre sensé être la cause du phénomène considéré (les taux d'intérêt élevés présentés comme la cause du chômage me semble parfaitement illustrer la vanité d'une telle conception). **On ne peut éviter la complexité** ; mais on ne doit pas s'en effrayer, il est possible de la comprendre, puis de la surmonter, à condition d'accepter un certain effort.

Je voudrais, dans l'exposé qui suit, expliciter ce propos.

LES MODELES COSMOLOGIQUES ET L'ÂGE DE L'UNIVERS

Depuis qu'Einstein a développé la théorie de la Relativité générale et que les observations rassemblées par Edwin Hubble ont montré que les spectres des galaxies sont pratiquement tous décalés vers les grandes longueurs d'onde (soit vers le rouge, dans le domaine visible), on dit que l'Uni-

vers est en expansion. Le modèle sous-jacent à cette description est celui bien illustré par Béatrice Sandré, qui a cousu une succession de boutons sur une bande élastique ; la bande est un modèle (à une seule dimension) de l'Univers ; les boutons représentent les galaxies. Quand on tire sur l'élastique, ce qui simule l'Univers en expansion, les boutons-galaxies s'éloignent les uns des autres, tout en restant immobiles dans l'élastique-Univers. Un observateur situé sur l'un quelconque des boutons verrait tous les autres s'éloigner de lui. Du fait de cette expansion de l'Univers lui-même, et bien que les galaxies soient (en première approximation) immobiles, leur spectre présente un décalage vers les grandes longueurs d'onde, dû à ce que la période d'une onde émise est perçue plus longue, la distance entre l'émetteur et l'observateur, et en conséquence la durée de parcours du signal lumineux, ayant augmenté pendant la durée de cette période ; par abus de langage, puisque la galaxie est en fait immobile, on parle d'une "vitesse cosmologique" V_{cos} de la galaxie, identifiée au paramètre vitesse radiale V_r , déduite de l'utilisation formelle de la relation Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}$$

écrite ici dans le cas non relativiste où V_r est très inférieure à la vitesse c de la lumière.

La constante de Hubble fixe le taux d'expansion de l'Univers ; à l'époque actuelle, notée t_0 , elle s'exprime en fonction de la vitesse cosmologique et de la distance d de la galaxie par la relation :

$$H_0 = \frac{V_{\text{cos}}}{d}$$

On a pris l'habitude, depuis Hubble, d'exprimer V_{cos} en km s^{-1} et d en Mpc ($1\text{Mpc} = 10^6$ parsecs) et donc H_0 en $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Cependant, H_0 a la dimension de l'inverse d'un temps. On appelle "temps de Hubble" son inverse, $t_H = 1/H_0$. C'est l'âge qu'aurait l'Univers si l'expansion s'était effectuée toujours au même rythme (Figure 1).

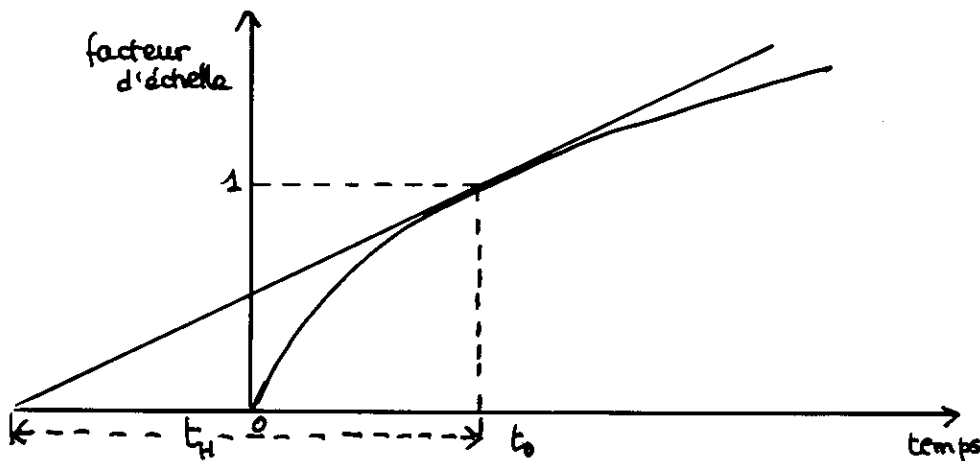


Figure 1: Variations du facteur d'échelle de l'Univers (qui mesure la distance entre deux galaxies et qui est pris égal à 1 à l'époque actuelle) en fonction du temps. L'âge actuel t_0 de l'Univers est la durée qui nous sépare du moment où le facteur d'échelle était nul (big bang). Dans les modèles de Friedman, la courbe conserve toujours sa concavité vers le bas et $t_0 < t_H$. C'est seulement dans les modèles à constante cosmologique non nulle que la concavité de la courbe peut s'inverser au cours du temps, ce qui entraîne $t_0 > t_H$. C'est le cas des modèles de Lemaitre. La constante cosmologique se comporte comme une interaction répulsive qui provoque à un moment donné une accélération de l'expansion.

Les modèles cosmologiques reposent sur un certain nombre d'hypothèses. Les plus simples supposent qu'à grande échelle l'Univers est **homogène et isotrope**. Cette propriété semble vérifiée dans l'état actuel de nos connaissances, à une échelle assez grande, qui dépasse celle des superamas. Ces modèles homogènes sont caractérisés par trois paramètres : la valeur actuelle de la **constante de Hubble**, H_0 , la valeur actuelle du **paramètre de densité** de l'Univers, Ω_0 , qui est le rapport de la masse volumique moyenne actuelle de l'Univers ρ_0 à la valeur dite "critique" ρ_c de cette masse volumique [celle qui sépare un modèle d'Univers en perpétuelle expansion ($\rho < \rho_c$) d'un modèle d'Univers destiné à se contracter à partir d'un certain temps ($\rho > \rho_c$)] et la **constante cosmologique**, Λ . Dans les modèles à constante cosmologique nulle, appelés "modèles de Friedman", l'expansion se ralentit régulièrement au cours du temps ; il en résulte que, dans ces modèles, l'âge t_0 de l'Univers est toujours inférieur au temps de Hubble, t_H . Un modèle de Friedman est donc caractérisé par deux paramètres, H_0 et Ω_0 .

On considère souvent le modèle de Friedman particulier, appelé "modèle standard" dont la densité a la valeur critique (le paramètre de densité Ω_0 est donc fixé égal à 1). Dans ce modèle particulier, l'âge t_0 de l'Univers est égal aux deux tiers du temps de Hubble :

modèle standard : $\Omega_0 = 1$; $\Lambda = 0$; $t_0 = \frac{2}{3} t_H$
--

Le tableau 1 ci-dessous donne des exemples de valeurs du temps de Hubble t_H et de l'âge t_0 de l'Univers, pour différentes valeurs de la constante de Hubble. C'est la comparaison de cette dernière valeur t_0 à l'âge des objets les plus vieux que l'on connaisse qui fixe une limite supérieure acceptable de la constante de Hubble, dans le cadre du modèle cosmologique choisi : à savoir le modèle standard (à un seul paramètre libre). Si l'on se place dans le cas d'un modèle de Friedman plus général, la comparaison doit porter sur le temps de Hubble t_H .

Les plus vieux objets connus sont des amas globulaires d'étoiles, dont l'âge est évalué à partir des modèles de structure interne : on le fixe actuellement à $(14 \pm 2) 10^9$ ans.

H_0 ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$)	500	100	80	70	50
t_H (10^9 ans)	2	10	12,5	14,3	20
t_0 (10^9 ans)	1,3	6,7	8,5	9,5	13,5

Tableau 1

La valeur $H_0 = 500$ est donnée ici à titre historique : c'est celle qu'avait déterminé Hubble vers 1930. On voit qu'elle est incompatible, dans tout modèle de Friedman, avec l'âge de la Terre. Les déterminations actuelles de H_0 se situent dans la fourchette 50 - 100. On comprend donc l'ampleur du problème posé, puisque, à l'intérieur de cette fourchette, les valeurs élevées sont incompatibles avec l'âge des plus vieilles étoiles. Nous voyons en particulier que le modèle standard implique une valeur de la constante de Hubble de l'ordre de 50 ; la valeur 70 y est exclue dans la fourchette d'incertitudes sur t_0 .

COMMENT DETERMINER LA VALEUR DE H_0

La détermination de H_0 est simple dans son principe : il suffirait de mesurer d'une part la vitesse cosmologique V_{cos} et d'autre part la distance d d'une galaxie pour en déduire H_0 qui est le rap-

port de ces deux quantités. Cette détermination nécessite donc des mesures de **vitesse radiales** et des mesures de **distances**. Les mesures de vitesses radiales reposent sur l'effet Doppler-Fizeau que ces dernières provoquent dans le spectre de raies des galaxies ; les mesures de distance sur des critères qui permettent de deviner la luminosité L (puissance totale rayonnée) d'une étoile de la galaxie (ou de la galaxie elle-même), que l'on compare à la valeur apparente de cette luminosité (éclat apparent E). Si la lumière ne subit aucune interaction sur son parcours (mais cette hypothèse est loin d'être vérifiée, et l'extinction subie par le rayonnement sur son parcours doit faire l'objet de délicates corrections) :

$$E = \frac{L}{4 \pi d^2}$$

Dans l'échelle des magnitudes, où E est mesuré par m et L par M , cette relation devient

$$m - M = 5 \log d - 5 = \mu \quad (\text{où } d \text{ est exprimé en parsec})$$

Les **mesures de distances** reposent donc sur des étalons dont la luminosité est connue, et qui sont identifiables par des propriétés accessibles à l'observation ; on les appelle parfois des "chandelles standard". [En gros, on mesure l'éclat apparent E d'une ampoule électrique et on lit à **distance** l'indication " $L=100 \text{ W}$ " portée sur elle.]

La calibration de la luminosité d'une "chandelle" repose sur son observation dans notre propre Galaxie, et sur des distances stellaires, qui ne sont connues avec précision qu'assez près de nous. D'un autre côté, il est intéressant que ces chandelles soient intrinsèquement très lumineuses, car on pourra les observer dans une galaxie extérieure, à de grandes distances. Malheureusement, les étoiles intrinsèquement lumineuses sont très rares (ce sont des étoiles à relativement très courte durée de vie ; il y en a donc peu "en vie" à chaque instant). Elles sont donc, statistiquement, absentes d'un volume d'espace trop petit, et donc en particulier du voisinage immédiat de notre système solaire : nous ne disposons donc pas d'une très bonne calibration de leur luminosité, parce que nous ne connaissons pas suffisamment bien leur distance.

La **détermination de la vitesse cosmologique** se fait à partir du spectre de la galaxie, dont le décalage des raies par rapport au spectre de référence fournit la composante de vitesse radiale globale. Si la galaxie est animée par rapport à l'observateur d'une vitesse particulière V_{part} (qui peut résulter d'un mouvement aléatoire et/ou d'un mouvement d'ensemble), on mesure :

$$V_{\text{rad}} = V_{\text{cos}} + V_{\text{part}}^r$$

où V_{part}^r est la composante radiale de V_{part} . Dans le "modèle" de l'élastique on peut imaginer les boutons cousus avec un grand pied qui leur permet de se déplacer légèrement par rapport à leur point de fixation. Faute de connaître ces mouvements particuliers, on s'adresse à des galaxies suffisamment éloignées pour que la composante particulière de leur vitesse soit négligeable devant la composante cosmologique.

Voilà donc une première difficulté du problème : pour éliminer les mouvements particuliers, c'est-à-dire pour qu'il soit licite d'assimiler la vitesse radiale observée à la composante cosmologique, on doit s'adresser à des galaxies suffisamment éloignées. Par contre, on ne mesure avec précision que les distances de galaxies assez proches, de telle sorte qu'on puisse y observer les étoiles chandelles individuellement et mesurer leur éclat apparent avec précision.

Beaucoup de travaux se sont développés dans ce domaine au cours des 20 dernières années ; il est irritant que leurs conclusions nous laissent toujours dans la même incertitude : H_0 dans la fourchette 50 - 100. Est-ce à dire que nous nos connaissances n'ont pas progressé, alors que nos moyens d'observation (télescopes et systèmes récepteurs) l'ont fait, d'une façon spectaculaire ?

En réalité, c'est notre connaissance des mouvements particuliers des galaxies qui s'est profondément modifiée : alors qu'on ne connaissait aux galaxies, dans les années 1970, que des mouve-

ments aléatoires, d'intensité au plus égale à 50 km s^{-1} , on a mis en évidence des mouvements particuliers d'ensemble (c'est-à-dire que des galaxies, localisées dans la même région du ciel, sont animées de vitesses similaires, dirigées dans la même direction) pouvant atteindre plusieurs centaines de km par seconde (700 ou 800). Cette découverte est fondamentale pour la cosmologie, puisqu'elle révèle la présence de grandes concentrations de masses, responsables de ces mouvements. Mais elle complique aussi beaucoup le problème de la détermination de H_0 : on doit s'adresser à des galaxies beaucoup plus éloignées que ce qu'on croyait, pour qu'il soit licite d'assimiler la vitesse radiale mesurée V_r à la vitesse cosmologique V_{cos} , ce qui suppose que la composante radiale de la vitesse particulière soit négligeable devant V_{cos} . Ainsi, à mesure que les progrès techniques permettaient d'étendre (par un facteur de l'ordre de 10) la profondeur des mesures de distances, la découverte de l'importance des mouvements particuliers repoussait d'un facteur similaire la valeur de la distance à partir de laquelle la mesure de H_0 est possible : au total, on n'a rien gagné !

Je me bornerai dans ce qui suit à mentionner 3 des critères de distance qui sont les plus utilisés : la relation période-luminosité-couleur des étoiles variables céphéides, la luminosité des supernovae de type Ia à leur maximum d'éclat et la relation "Tully-Fisher". Ils sont appliqués à deux catégories : les galaxies de l'amas de la Vierge et des échantillons profonds de galaxies isolées.

LA DISTANCE DE L'AMAS DE GALAXIES DE LA VIERGE ET LA DETERMINATION DE H_0

Un amas de galaxies étant constitué de galaxies situées toutes à la même distance, et animées de la même vitesse cosmologique, il devrait permettre de déterminer la valeur de la constante de Hubble avec une plus grande précision : on applique la relation d'expansion de l'Univers, $V_{\text{cos}} = H_0 \cdot \langle d \rangle$, où $\langle d \rangle$ est la valeur moyenne des distances individuelles, supposées toutes égales entre elles, aux erreurs de mesure près (et en négligeant l'effet de profondeur dans l'amas), et où V_{cos} est la valeur moyenne des vitesses radiales des galaxies de l'amas. L'amas de galaxies le plus proche de nous est situé dans la direction du ciel délimitée par la constellation de la Vierge.

Récemment, le télescope Canada-France-Hawaï de 3,6 m, puis le télescope spatial Hubble ont permis d'observer des étoiles variables céphéides dans deux galaxies spirales de l'amas de la Vierge, respectivement NGC 4571 et M 100 : ce sont les galaxies les plus éloignées dans lesquelles cette mesure ait été effectuée à ce jour.

Le critère de distance lié aux céphéides

Les céphéides sont des étoiles dans les régions externes desquelles s'instaure un régime de pulsations périodiques : au cours de la phase de contraction, la température des régions superficielles s'élève, ce qui conduit à un accroissement de la luminosité ; puis lui succède une phase d'expansion, pendant laquelle la température et donc la luminosité décroissent ; on considérera dans ce qui suit une valeur moyenne de cette luminosité, entre son maximum et son minimum, caractérisée par la magnitude absolue médiane $\langle M \rangle = (M_{\text{max}} - M_{\text{min}})/2$.

Les modèles théoriques de structure interne des céphéides expliquent que la période P des pulsations est liée à la luminosité moyenne de l'étoile, correspondant à tout le domaine spectral ; l'observation la caractérise par sa magnitude absolue médiane $\langle M \rangle$ mesurée dans un domaine limité de longueur d'onde, sélectionné par un filtre, et sa couleur C (caractérisée par la différence des magnitudes apparentes mesurées dans deux bandes spectrales différentes, par exemple $C = (B-V)$ ou $(V-I)$ (cf. ci-dessous). On note $f(P, \langle M \rangle, C)$ cette relation qui joue le rôle de critère de distance : en effet P et C peuvent se déduire de la simple observation à distance, et la relation f , une fois calibrée sur des étoiles de distance connue, permet de "deviner" $\langle M \rangle$; il suffit alors de mesurer la magnitude

apparente médiane $\langle m \rangle$ pour en déduire le module de distance $\mu = \langle m \rangle - \langle M \rangle$. La relation f est telle que plus l'étoile est intrinsèquement lumineuse, plus sa période est élevée. En fait, bien qu'il n'y ait qu'une seule relation théorique entre la période, la couleur et la luminosité totale de la galaxie (intégrée sur toute la bande spectrale), il y a autant de relations $f(P, \langle M \rangle, C)$ que l'on choisit de bandes passantes pour mesurer $\langle M \rangle$.

Dans le cas de δ Céphée, qui est le prototype de cette famille, la température observée varie entre 5000 et 6000 K. La figure 2 montre la localisation dans le diagramme magnitude-couleur des céphéides de différentes périodes et l'effet de la couleur $C = (B-V)$ qui élargit la bande du diagramme où sont localisées les céphéides.

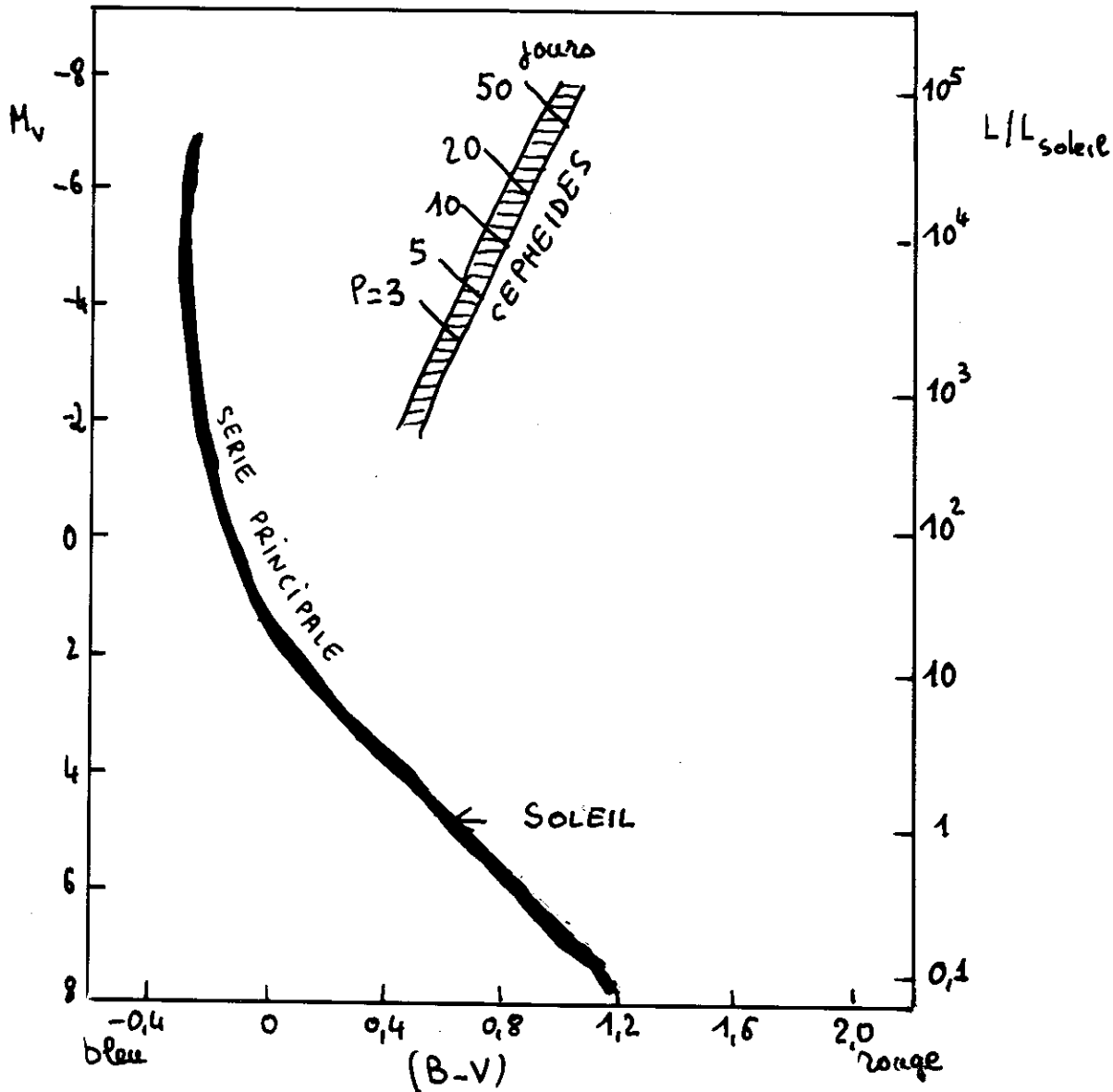


Figure 2 : Diagramme couleur-magnitude des étoiles. En abscisse l'indice de couleur $(B-V)$ et en ordonnées la magnitude absolue (à gauche) et la luminosité, exprimée en unité de la luminosité solaire (à droite). La plupart des étoiles sont sur la série principale. Les céphéides occupent la zone hachurée : on a indiqué leurs périodes. On voit que des céphéides de même période n'ont pas la même luminosité (moyenne) si leurs couleurs sont différentes ; on voit aussi que les céphéides sont d'autant plus lumineuses que leur période est plus grande.

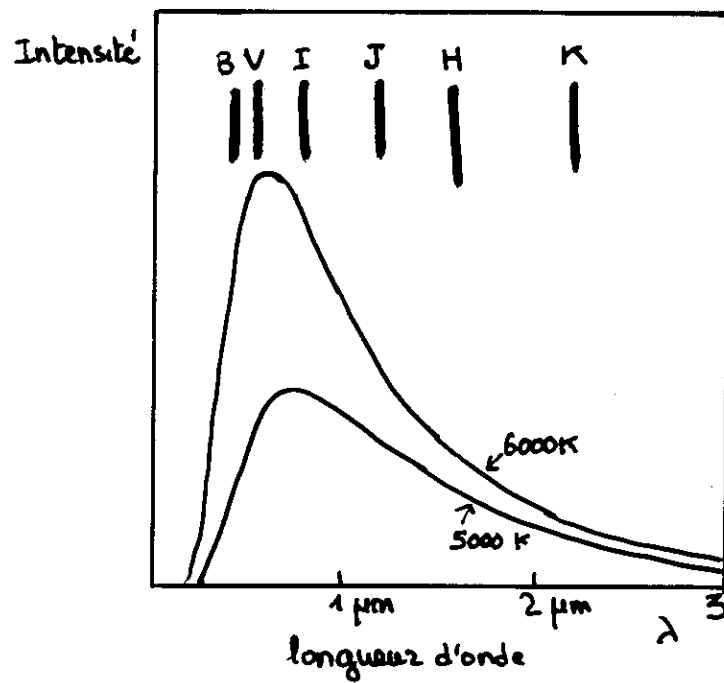


Figure 3 : Au cours du cycle des pulsations la température effective de la céphéide passe de 5 000 à 6 000 K. On a représenté les variations d'intensité du corps noir correspondant, en fonction de la longueur d'onde, ainsi que les centres des différents filtres utilisés. On voit que B, V et I sont proches des maxima des courbes, donc bien adaptés à la bonne détection du rayonnement. Par contre, le filtre K se trouve dans la partie lointaine des ailes aux grandes longueurs d'onde

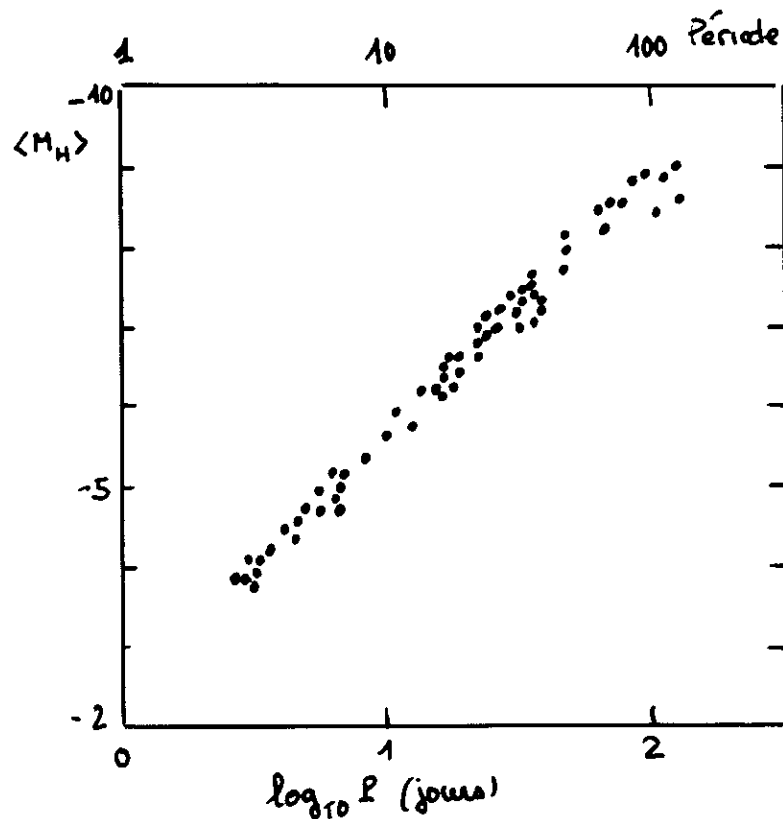


Figure 4 : Relation entre la magnitude absolue moyenne en bande H et la période des pulsations pour des céphéides appartenant à notre Galaxie, au Grand et au Petit Nuage de Magellan. La dispersion autour d'une droite moyenne est très faible.

La figure 3 montre comment les différents filtres utilisés pour l'observation se situent par rapport au rayonnement de l'étoile dans l'une ou l'autre de ces deux phases extrêmes. Les filtres dans lesquels on mesure les magnitudes B (dans le bleu) et V (pour visible, en fait dans le jaune) sont les mieux adaptés du point de vue de l'intensité du rayonnement mesuré, mais l'extinction de la lumière par les poussières interstellaires y est relativement importante ; en outre, cette extinction est sélective en longueur d'onde, elle modifie donc la couleur observée. Les filtres qui définissent les magnitudes J, et surtout H et K, situés dans l'infrarouge, ont l'avantage de sélectionner des rayonnements qui subissent très peu ou pas d'extinction ; par ailleurs, la figure 3 nous montre que l'amplitude des variations y devient très faible (les deux courbes deviennent très proches) ; on voit sur la figure 4 que la relation f devient indépendante de la couleur en bande H où elle s'exprime par une simple relation linéaire entre la magnitude médiane $\langle M_H \rangle$ et le logarithme de la période P . Par contre, ces filtres ne mesurent qu'une fraction faible du rayonnement émis, et sont inopérants dans l'exemple qui nous intéresse ici ; dans les autres bandes, les mesures doivent donc être corrigées des effets d'extinction : d'une part dans la relation $f(P, \langle M \rangle, C)$, on doit corriger la couleur observée, par exemple (B-V) ou (V-I), et d'autre part dans la relation $\mu = \langle m \rangle - \langle M \rangle$, on doit corriger la valeur observée de $\langle m \rangle$, par exemple $\langle V \rangle$.

Ainsi, on doit préciser, quand on mentionne la très grande précision du critère de distance lié aux céphéides, la bande spectrale utilisée (H) ; en bande B, V ou I, la précision n'est pas aussi bonne.

Mesures de la distance de l'amas de la Vierge et détermination de H_0 par la méthode des céphéides

Venons-en maintenant aux "scoops" récents. Une première équipe a détecté depuis le sol (Hawaï) 3 étoiles céphéides dans la galaxie NGC 4571 et en a déduit que sa distance était $14,9 \pm 1,2$ Mpc ; peu de temps après, une seconde équipe a détecté, grâce au télescope spatial Hubble un grand nombre de céphéides de périodes comprises entre 20 et 50 jours dans la galaxie M 100. Les incertitudes sur chacune des observations individuelles donnant lieu aux courbes de lumière observées sont très faibles ; celle sur le résultat final qui donne une distance de $17,1 \pm 1,8$ est dominée pour l'essentiel par les corrections d'extinction. On notera la plus grande prudence de ces derniers auteurs qui affectent leur résultat d'une plus grande barre d'erreurs que leurs collègues...

Ces deux résultats successifs ont fait l'objet de deux campagnes correspondantes d'annonce, pratiquement identiques, dans la grande presse : l'univers n'aurait que 8 milliards d'années, ce qui le rendrait "plus jeune que ce qu'il contient"... Il est intéressant de discuter comment on a pu passer de la mesure effectuée, à savoir, chaque fois, la distance d'une galaxie de l'amas de la Vierge, à cet âge de l'Univers. La première étape consiste à considérer que la distance de la galaxie observée s'identifie à celle de l'amas ; la seconde repose sur la détermination de la vitesse cosmologique de l'amas : les deux équipes ont adopté la même valeur (largement admise par tous) de la valeur observée du décalage spectral moyen de l'amas traduit en une vitesse égale à $1000 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$. Mais cette vitesse observée n'est pas la vitesse cosmologique, parce que notre Galaxie (et plus précisément le groupe de galaxies auquel elle appartient, qu'on appelle Groupe local), par rapport auquel ces observations sont effectuées est animé d'une vitesse particulière (due à l'attraction que l'amas de galaxies de la Vierge exerce sur lui) ; la composante radiale de cette vitesse est mal connue, évaluée entre 100 et 400 km s^{-1} , ce qui conduit à V_{cos} entre 1100 et 1400 km s^{-1} . En choisissant une vitesse de 1300, les premiers auteurs ont déterminé la valeur de $H_0 = 87 \pm 7$; les seconds ont choisi une vitesse de 1400 et annoncé $H_0 = 82 \pm 17$ (en soulignant le bon accord de cette détermination avec la précédente...). Dans le modèle cosmologique standard, implicitement choisi, il en résulte l'âge de l'univers an-

noncé : $t_0 = 8$ milliards d'années.

Les présentations des résultats ont évacué la différence de distances des deux galaxies, d'une part en insistant sur les barres d'erreurs et d'autre part en concentrant l'effet d'annonce sur H_0 , sans mentionner comment la vitesse cosmologique a été déterminée, puis sur l'âge de l'univers, déterminé dans un modèle particulier. En choisissant une vitesse cosmologique égale à 1100 au lieu de 1400, la valeur $H_0 = 82 \pm 17$ devient 65 ± 13 et $t_H = 15$ milliards d'années : difficile de conclure que l'univers est "trop jeune", même dans le modèle standard, où $t_0 = 11$ milliards d'années.

En outre, on n'a jamais mentionné le doute que beaucoup portent sur l'appartenance de NGC 4571 à l'amas proprement dit : cette galaxie fait partie d'un sous groupe à l'intérieur de l'amas, dont beaucoup pensent qu'il est situé en avant de lui. C'est par exemple toujours dans ces galaxies, et particulièrement dans NGC 4571 que l'on parvient à observer, depuis le sol, des étoiles individuelles, ce qui n'est pas étonnant si la galaxie est plus proche.

Quelques mois plus tard, une troisième équipe a pu observer des céphéides, toujours grâce au télescope spatial, dans la galaxie M 96, située dans le groupe de galaxies Leo I. En utilisant le rapport habituellement admis de la distance de l'amas de la Vierge à celle du groupe de Leo I, mais ce point est contestable, ils obtiennent une distance de l'amas de la Vierge $18,3 \pm 1,1$ Mpc, d'où $H_0 = 69 \pm 8$, avec une vitesse cosmologique de 1300. Prudents, les auteurs concluent... qu'on ne peut pas conclure à un désaccord entre les modèles de Friedman et l'âge de l'Univers donné par les amas globulaires les plus vieux... ce qui n'a pas empêché les mêmes media (en particulier "le Monde" dans sa page faite en collaboration avec la revue scientifique "Nature" où tous ces résultats ont été publiés) de répéter que ... "l'Univers est plus jeune que ce qu'il contient" !

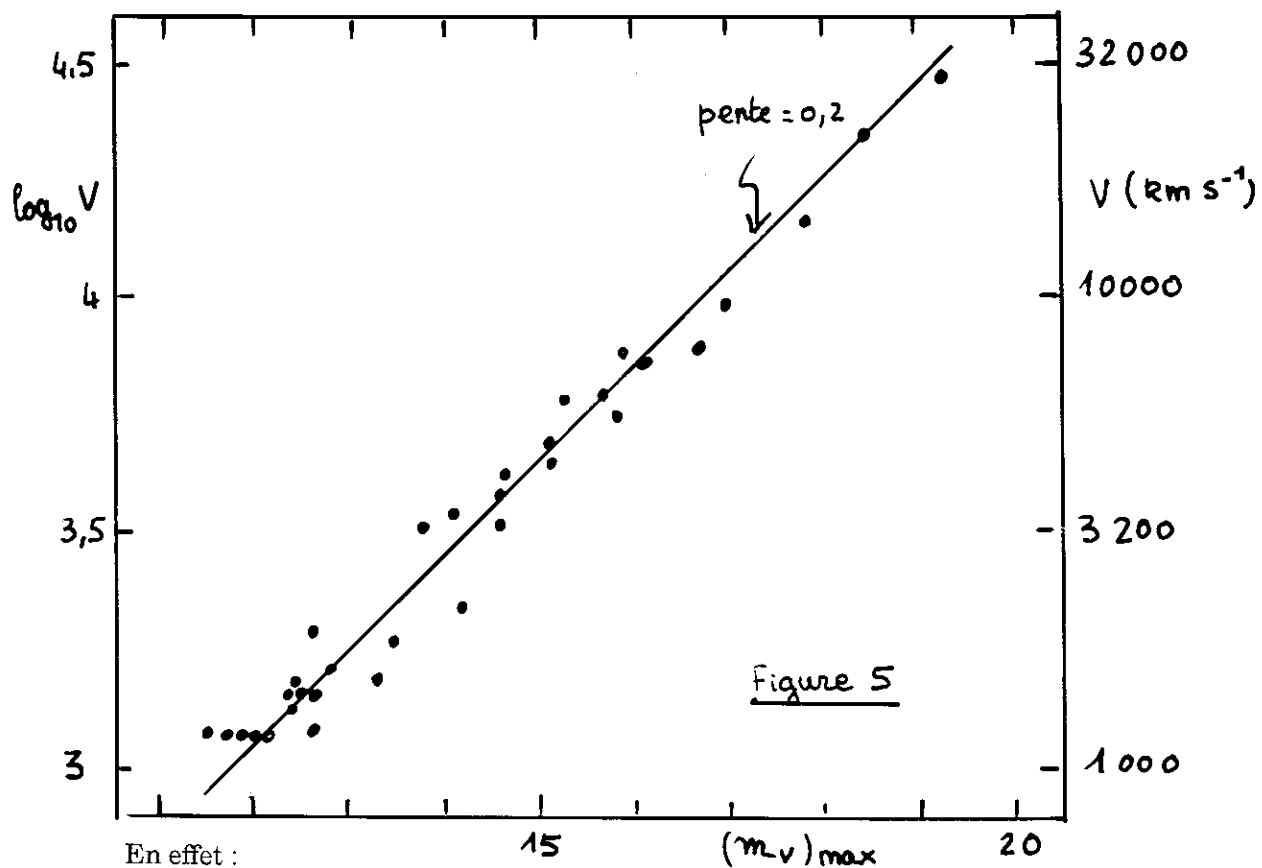
Conclusion

L'amas de la Vierge ne peut nous renseigner sur la valeur de H_0 que si deux conditions sont remplies : (i) mieux connaître la vitesse particulière de notre Groupe local de galaxies et (ii) mesurer la distance de plusieurs galaxies membres de cet amas.

LES SUPERNOVAE DE TYPE Ia ET LA VALEUR DE H_0

Les supernovae sont, potentiellement, les indicateurs de distance les plus prometteurs, du fait de leur grande luminosité qui les rend observables à de très grandes distances.

Les supernovae de type I sont les plus lumineuses ; elles concernent une population d'étoiles vieilles et sont produites dans un système binaire, avec transfert de masse. Les supernovae de type Ia constituent une sous classe homogène des supernovae de type I : elles sont caractérisées par leur spectre qui ne comporte, dans le visible, ni les raies de l'hydrogène ni celles de l'hélium. Elles résultent de l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche composée de carbone et d'oxygène, et qui a accreté suffisamment de masse en provenance de son étoile compagnon pour atteindre la masse limite, dite de Chandrasekhar, maximale possible pour une naine blanche ($1,4 M_\odot$) ; leur magnitude absolue est remarquablement constante au maximum d'éclat. Cela peut s'établir par l'observation (sans pour autant calibrer cette valeur) dans un amas de galaxies ou en utilisant la vitesse cosmologique comme indicateur de distance, en sélectionnant des galaxies de vitesse de récession suffisamment élevée. Dans la figure 5, ou diagramme de Hubble, on a porté la vitesse de récession, en échelle logarithmique, en fonction de la magnitude apparente observée (en bande V), m_V . La pente observée est 0,2 : elle correspond à ce à quoi on s'attend si la magnitude absolue M_V est la même pour toutes les supernovae.



En effet : $m_V - M_V = 5 \log d + 25$ (d en Mpc) : $V_{\cos} = H_0 d$ d'où $5 \log d = 5 \log V_{\cos} - 5 \log H_0$
 et $m_V = 5 \log V_{\cos} + M_V + 25 - 5 \log H_0$
 ou : $\log V_{\cos} \approx \log V_r^{\text{obs}} = 0.2 m_V + K$; avec $K = 0.2 [M_V + 25 - 5 \log H_0] = 0.653$

La faible dispersion des observations autour de la relation linéaire observée confirme que M_V garde bien toujours à peu près la même valeur pour toutes les supernovae.

L'interprétation de cette stabilité de la magnitude absolue maximale se trouve dans la source d'énergie responsable de la courbe de lumière ; elle est due au déclin radioactif d'une masse totale de l'ordre de $0,6 M_{\odot}$ de ^{56}Ni qui se transforme en ^{56}Co .

Jusqu'ici, on manquait de calibration (observation d'une supernova de ce type dans une galaxie de distance connue ou dans notre Galaxie) ; cette situation vient de changer, grâce à l'observation de céphéides par le télescope spatial Hubble dans 6 galaxies spirales comportant des supernovae (tableau 2).

SN Ia*	Galaxie	$M_B(\text{max})$	$M_V(\text{max})$
1937C	IC4182	$-19,65 \pm 0,18$	$-19,64 \pm 0,13$
1895B	NGC5253	$-19,80 \pm 0,28$	-----
1972E	NGC5253	$-19,55 \pm 0,23$	$-19,50 \pm 0,21$
1981B	NGC4536	$-19,29 \pm 0,13$	$-19,32 \pm 0,12$
1960F	NGC4496	$-19,52 \pm 0,14$	$-19,61 \pm 0,20$
1990N	NGC4639	$-19,30 \pm 0,23$	$-19,39 \pm 0,23$
1989B	NGC3627	$-19,51 \pm 0,26$	$-19,49 \pm 0,25$

* Chaque supernova est référencée par l'année où elle a été découverte, la lettre A désignant la première de l'année, B la seconde etc...

Tableau 2

On en déduit une valeur moyenne de la magnitude absolue de la supernova à son maximum qui vaut respectivement -19,52 en bande B et -19,49 en bande V.

La relation de la figure 5, qui conduisait à $K = 0,2[M_V + 25 + 5 \log H_0] = 0,653$, entraîne donc : $H_0 = 57 \pm 8$.

Conclusion

Les supernovae conduisent à une valeur de H_0 plus faible que celle obtenue à partir de l'amas de la Vierge. L'avantage de cette méthode est qu'elle utilise des supernovae observées à de très grandes vitesses de récession (plus de $30\,000 \text{ km s}^{-1}$, comme on peut le voir sur la figure 5) pour lesquelles il est totalement licite d'assimiler la vitesse radiale observée à la vitesse cosmologique. Il reste à confirmer que toutes les supernovae de type Ia ont strictement la même magnitude absolue à leur maximum ; certains auteurs avancent une corrélation entre $M_V(\text{max})$ et la composition chimique, que pourraient expliquer des raisons théoriques. Ils avancent alors une valeur de H_0 qui pourrait atteindre 65, mais qui ne peut être réconciliée avec celle annoncée à partir des observations de céphéides dans l'amas de la Vierge.

UN CRITERE DE DISTANCE SECONDAIRE : LA RELATION TULLY-FISHER

Quand une galaxie est trop éloignée pour qu'on puisse y observer les étoiles individuellement, on utilise des critères de distance empiriques qui portent sur sa luminosité (ou sa magnitude absolue, M) globale. Les astronomes Brent Tully et Rick Fisher ont montré, il y a une vingtaine d'années, que la magnitude absolue globale d'une galaxie spirale est reliée à la vitesse circulaire maximale, V_m , selon la relation appelée "Tully-Fisher" ou, plus rapidement "TF", de la forme :

$$M = a \log V_m + b$$

car, dans une galaxie spirale, les étoiles et les nuages de gaz sont répartis pour l'essentiel dans un disque, où ils sont animés de mouvements circulaires autour du centre de ce disque ; la loi $V(r)$ qui décrit l'intensité V de cette vitesse en fonction de la distance r au centre est appelée "courbe de rotation". On observe que ces courbes de rotation ont la forme générale indiquée sur la figure 6 ; elles présentent un maximum, noté V_m , qui est relié à la masse totale de la galaxie : plus la galaxie est massive, plus V_m est grand ; la relation TF traduit donc une corrélation entre la masse et la luminosité de la galaxie ; cependant, notre manque de connaissance de la masse non lumineuse et de sa distribution ne permet pas de préciser l'expression de la masse en fonction de V_m , et de ce fait, le critère de distance que constitue la relation TF reste empirique.

En effet, cette relation peut jouer le rôle de critère de distance, puisqu'il est possible de mesurer V_m , sans connaître la distance, et d'en déduire M , donc le module de distance $\mu = m - M$, par la mesure de la magnitude apparente globale, m . Elle est calibrée (c'est-à-dire qu'on détermine les deux paramètres a et b) à partir des galaxies de distance connue par un critère de distance dit "primaire" (par exemple, celui reposant sur les céphéides) ; c'est pour cette raison qu'on qualifie le critère lié à cette relation de secondaire.

Il constitue un outil de très grande portée, relativement facile à mettre en oeuvre, grâce à la radioastronomie ; l'hydrogène interstellaire, présent partout dans les disques des galaxies spirales, se manifeste par la raie qu'il émet à la longueur d'onde de 21 cm. Un radiotélescope qui "voit" la galaxie comme une source ponctuelle, observe une raie élargie du fait des composantes radiales des vitesses du gaz ; aux effets d'inclinaison du plan du disque sur le plan du ciel près, l'élargissement total $\Delta\lambda$ de la raie fournit V_m par la relation Doppler-Fizeau : $\Delta\lambda/\lambda = 2 V_m/c$.

Les premiers travaux reposant sur l'utilisation de la relation TF, appliquée à des échantillons de quelques centaines de galaxies ont d'abord conduit à une valeur de H_0 , calculé comme

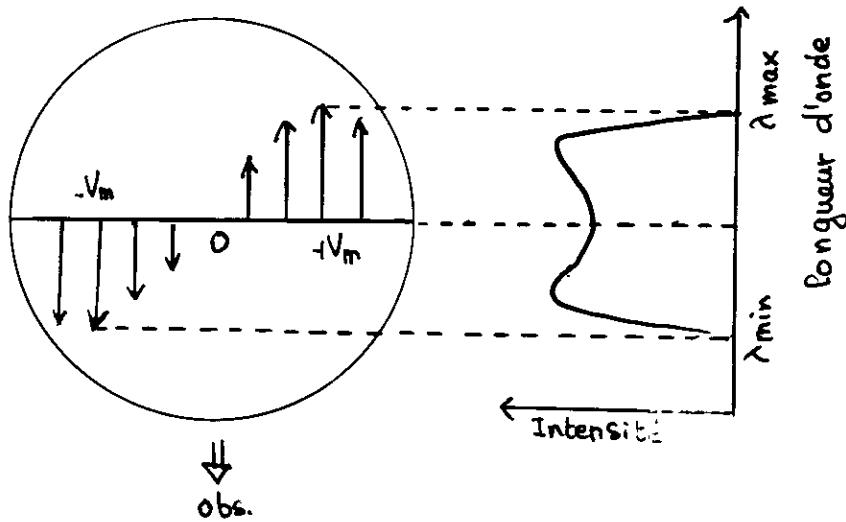


Figure 6: On a représenté, sur le disque de la galaxie, la composante radiale maximale de la vitesse circulaire à différentes distances du centre, pour un observateur situé dans le plan de ce disque, dans la direction indiquée par la flèche. Cette vitesse radiale V_r peut prendre toutes les valeurs entre $-V_m$ et $+V_m$, ce qui implique que la raie rayonnée à la longueur d'onde $\lambda_0 = 21$ cm par le gaz hydrogène présent dans le disque, est perçue par l'observateur à des longueurs d'ondes $\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 V_r / c$ pouvant prendre toutes les valeurs comprises entre $\lambda_{min} = \lambda_0 - \lambda_0 V_m / c$ et $\lambda_{max} = \lambda_0 + \lambda_0 V_m / c$. Un radiotélescope qui "voit" la galaxie comme un point observe donc une raie globale, élargie par effet Doppler-Fizeau, que l'on peut considérer comme composée par un ensemble de raies élémentaires observées aux différentes longueurs d'ondes $\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 V_r / c$. L'extension maximale de cette raie est donc égale à $\lambda_{max} - \lambda_{min} = 2 \lambda_0 V_m / c$, ce qui permet de déterminer V_m .

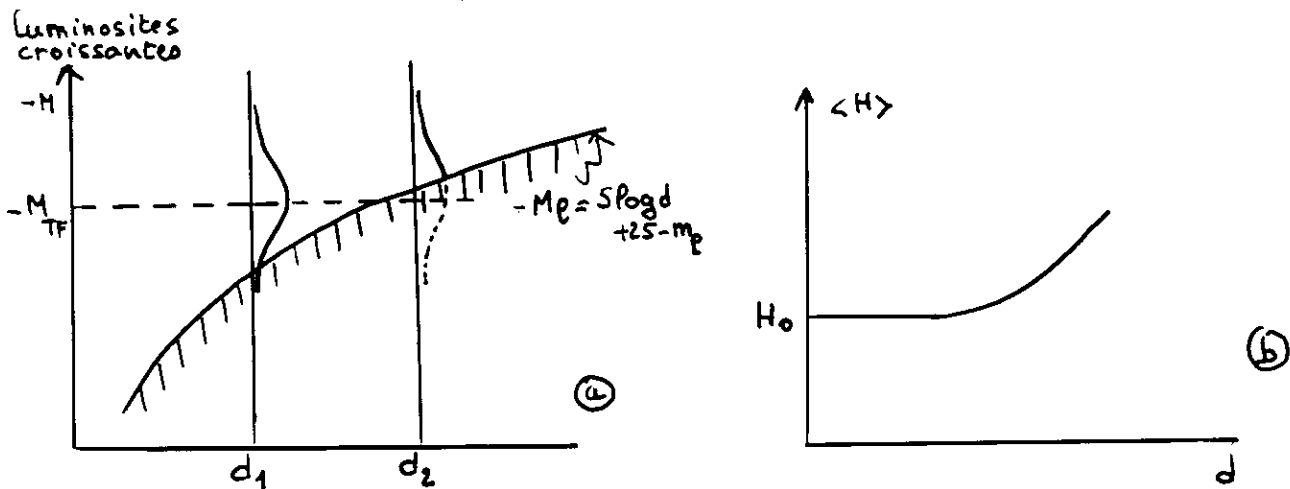


Figure 7-a Un ensemble de galaxies situées à la distance d , ont en moyenne la magnitude absolue M_{TF} donnée par la relation "Tully-Fisher"; cependant certaines sont plus lumineuses, d'autres le sont moins, ce qui est représenté par la courbe en cloche, appelée fonction de luminosité. La limitation en magnitude apparente m_p provoque une coupure en magnitude absolue qui devient de plus en plus sévère à mesure que la distance augmente : seules les galaxies plus lumineuses que $-M_1 = 5 \log d + 25 - m_p$ sont observées. Tant que les observations portent sur l'ensemble de la fonction de luminosité, il est licite d'attribuer la magnitude absolue M_{TF} en moyenne à l'échantillon. Ce n'est plus vrai dans le cas de la distance d_2 : les galaxies sont, en moyenne plus lumineuses que la valeur qu'on leur attribue ce qui conduit à sous-estimer leur distance moyenne en lui attribuant la valeur d_{TF} , et à surestimer la valeur moyenne $\langle H \rangle$ (7-b) en effectuant la moyenne de V_{cos}/d_{TF} . Seule la partie de la courbe "en plateau" pour les faibles valeurs de la distance, permet de déterminer correctement $\langle H \rangle = H_0$.

moyenne du rapport V_p/d pour l'échantillon, de l'ordre de 100.

Notre équipe a montré, il y a 10 ans, que cette valeur est surestimée, à cause d'un effet statistique, illustré sur la figure 7. Nos catalogues sont limités en magnitude apparente : si m_l est la magnitude limite du catalogue à partir duquel ont été effectuées les mesures radio fournissant V_m , à une distance d donnée, seules les galaxies plus lumineuses que $-M_l = -m_l + 5 \log d - 25$ ont été observées, et sont donc présentes dans l'échantillon. Or, la relation TF n'est pas une relation exacte : toutes les galaxies de même V_m (donc, en gros, de même masse), n'ont pas exactement la même magnitude absolue M_{TF} , celle qui résulte de la relation TF, certaines étant plus lumineuses, d'autres l'étant moins. On voit alors que lorsqu'on attribue à chacune de ces galaxies de même V_m la magnitude absolue M_{TF} , on sous-estime la luminosité de certaines, et on surestime la luminosité d'autres ; en calculant H_0 comme une moyenne de V_p/d , on a pensé, à tort, qu'il y a eu compensation par effet de moyenne. Ce n'est pas vrai, car l'échantillon contient plus de galaxies plus lumineuses que M_{TF} que de galaxies moins lumineuses ; on voit sur la figure 7 que la fonction de luminosité des galaxies de V_m donné, situées toutes à la même distance d a son aile inférieure coupée, cette coupure devenant de plus en plus sévère à mesure que croît la distance. La distance d_{TF} attribuée à ces galaxies est donc, en moyenne sous-estimée, puisqu'on sous-estime leur luminosité (une ampoule électrique de 200 watts nous donne la même impression qu'une ampoule de 100 watts si elle est située 4 fois plus loin : si on lui attribue 100 W au lieu des 200, on sous-estime sa distance par un facteur 4). Sous-estimant d , on surestime H_0 (voir la figure 8).

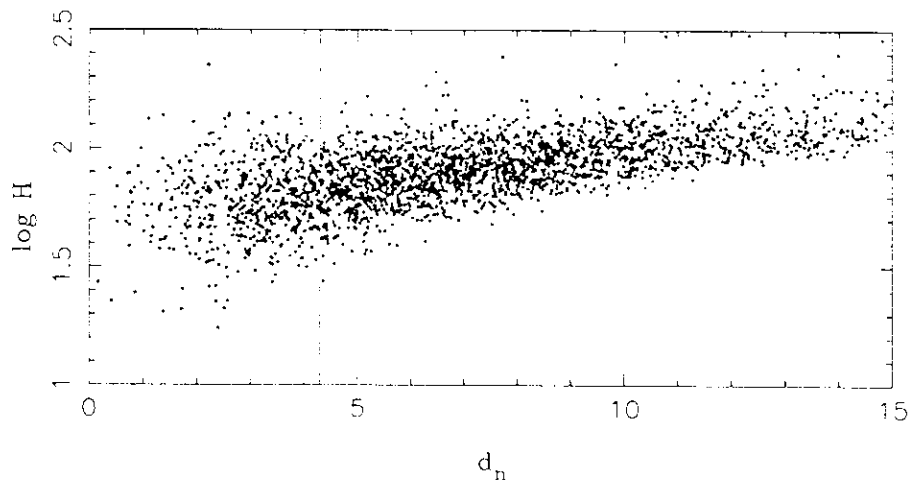


Figure 8 : le logarithme du rapport $H = V_{\cos}/d_{TF}$ pour les 5000 galaxies de l'échantillon est porté en fonction de la distance cinématique (calculée dans une échelle arbitraire à partir de la vitesse et d'une valeur arbitraire de la constante de Hubble). On voit que l'échantillon est complet pour les distances plus petites que la limite indiquée par la droite verticale en tirets ; au-delà, il devient de plus en plus sévèrement tronqué dans sa partie inférieure ; c'est-à-dire que les faibles valeurs de H manquent. On ne peut donc espérer déterminer une valeur exacte de H_0 par moyenne $\langle H \rangle$ de H qu'en se limitant à la partie de l'échantillon située à gauche du trait en tirets. On notera que la distance cinématique n'intervient pas dans la détermination de H_0 : elle a servi uniquement à déterminer le sous-échantillon utile.

On ne peut déterminer correctement H_0 par moyenne de V_r/d_{TF} qu'en se limitant aux galaxies assez proches pour que la limitation en magnitude apparente n'affecte pas la détection de la fonction de luminosité autour de M_{TF} . Mais alors se pose le problème de l'assimilation de V_r à V_{cos} ... Pour le surmonter, il faut augmenter la magnitude limite, c'est-à-dire travailler avec des échantillons plus profonds. Beaucoup s'y sont employés au cours de ces 10 dernières années (c'est le cas de notre équipe, à Nancay), et l'on dispose aujourd'hui, rassemblées dans la base de données extragalactiques LEDA, constituée à l'observatoire de Lyon par l'équipe de Georges Paturel, de plus de 5000 galaxies dont la distance d_{TF} est déterminée : en se limitant aux quelques centaines de galaxies pour lesquelles la limitation en magnitude apparente n'induit pas une limitation en magnitude absolue trop contraignante, on est en passe de déterminer une valeur de H_0 insensible aux effets des vitesses particulières, parce que ce sous-échantillon de quelques centaines de galaxies s'étend à de grandes vitesses radiales (4000 à 5000 km s⁻¹).

CONCLUSION GENERALE

Pour résumer :

- La distance n'est pas le seul paramètre qui conditionne la valeur de H_0 : la vitesse cosmologique en est un second, tout aussi important.
- La découverte de la grande amplitude des mouvements particuliers des galaxies entraîne qu'il faut s'adresser à des galaxies lointaines pour que la vitesse radiale mesurée par effet Doppler-Fizeau puisse s'identifier à leur vitesse cosmologique.
- La nature de la chandelle standard est complexe ; même quand nous avons une bonne connaissance théorique de la propriété qui sert de critère de distance, il convient de discuter l'importance relative des différents paramètres dont elle dépend.
- On ne passe de la connaissance de H_0 à celle de l'âge de l'Univers que dans le cadre d'un modèle cosmologique.
- A l'image de cette discussion, comment réagir au débat qui fleurit en ce moment dans les media : on y compare la situation en France (du chômage et une bonne protection sociale) et aux Etats-Unis (pratiquement pas de chômage et pas de protection sociale), et on conclut que pour diminuer le chômage il faudrait diminuer la protection sociale... Est-ce que notre responsabilité d'éducateurs ne serait pas d'inculquer au futur citoyen cette idée-clef qu'**un problème complexe ne peut se comprendre (et en conséquence se résoudre) que par la prise en compte de l'ensemble des paramètres dont il dépend ?**

Lucienne Gouguenheim

Note de la rédaction : ce texte reprend les termes de la conférence prononcée par notre présidente lors de l'Assemblée Générale du CLEA, le 17 Novembre 1996 au lycée d'Orsay.

Mettez votre planétaire à l'heure

Voici les longitudes héliocentriques des planètes le 19970101 à 0 h UT :

Mercure 95.2°	Vénus 227.6°	Terre 100.6°	Mars 143.8°
Jupiter 297.9°	Saturne 7.2°	Uranus 304.4°	Neptune 297.4°