

LE SYSTÈME PHOTOMÉTRIQUE U. B. V. ⁽¹⁾

Le système international. — Le système photométrique international, concrétisé par la Séquence Polaire nord, comprend 2 échelles de magnitudes :

1° Les magnitudes photographiques (m_{pg}) déterminées sur des plaques dites « ordinaires », sensibles aux radiations ultraviolettes, violettes et bleues, jusqu'à 0,51 μ environ.

2° Les magnitudes photovisuelles (m_{pv}), mesurées sur des plaques orthochromatiques, sensibles dans le jaune, jusqu'à 0,59 μ , avec un maximum vers 0,55 μ ; on associe ces plaques et un filtre jaune qui arrête les radiations de longueur d'onde inférieure à 0,49 μ ⁽²⁾.

On appelle indice de couleur international, la différence C entre la magnitude photographique et la magnitude photovisuelle ou visuelle :

$$C = m_{pg} - m_{pv}$$

D'après la convention de Pickering, les étoiles de 6^e magnitude, de type spectral AO, ont en moyenne un indice de couleur nul (congrès de l'U.A.I. à Rome, en 1922).

Le système international a été universellement utilisé pendant plusieurs décennies et jusqu'à ces dernières années, dans de très nombreux travaux de photométrie photographique. L'établissement de la Séquence Polaire (échelle photographique et photovisuelle) avait d'ailleurs exigé des travaux considérables effectués principalement au Mont Wilson (SEARES), à Harvard (MISS LEAVITT), ainsi qu'à Yerkes, Greenwich, Göttingen et Potsdam.

Depuis quelques années, la photométrie photo-électrique, de précision très supérieure à la photométrie photographique, a montré que la Séquence Polaire était devenue insuffisante. Celle-ci ne contient pas notamment d'étoiles moins avancées que le type AO et ne peut être extrapolée avec une précision suffisante pour les étoiles O et B non rougies par absorption interstellaire et il n'a pas été tenu compte des classes de luminosité. Les magnitudes de la Séquence Polaire ne sont pas ramenées hors de l'atmosphère ; elles sont affectées de l'absorption atmosphérique moyenne au Mont Wilson. En outre un léger voile absorbant recouvre cette région du ciel et rougit les étoiles de la Séquence Polaire.

Généralités sur le système U.B.V. — Un système photométrique fondamental doit nécessairement comprendre :

1° Les magnitudes et les indices de couleur d'étoiles, non rougies par absorption interstellaire, appartenant à toutes les séquences du diagramme HERTZSPRUNG-RUSSELL : série principale, géantes, supergéantes, sous-naines, naines blanches, avec si possible représentation de tous les types spectraux.

⁽¹⁾ Voir p. 122 la signification de ces trois lettres.

⁽²⁾ Les magnitudes visuelles (m_v) sont pratiquement équivalentes aux magnitudes photovisuelles, le maximum de sensibilité de l'œil étant situé vers 0,55 μ .

2° Les magnitudes et les indices de couleur d'étoiles rougies par absorption interstellaire, de types spectraux et classes de luminosité connus.

3° Une série d'indices de couleur s'étendant de l'ultraviolet à l'infrarouge, tels que ceux déterminés par STEBBINS et WHITFORD par la photométrie en 6 couleurs, de sorte que les réductions au système fondamental puissent être faites par interpolation et non par extrapolation.

4° Une détermination du zéro de l'échelle des indices de couleur par rapport à une certaine catégorie d'étoiles prises comme référence, très bien défi-

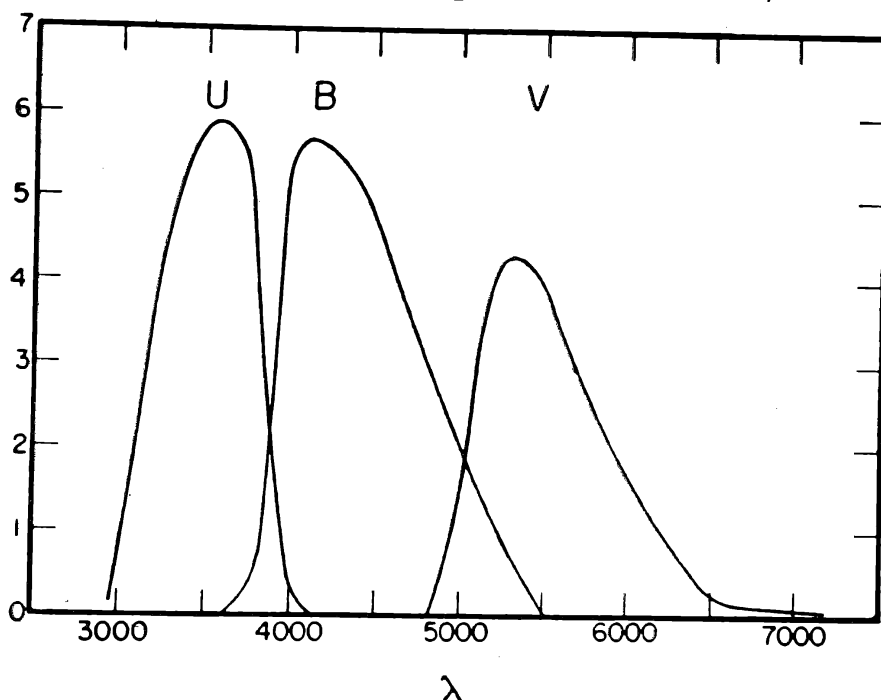


Fig. 57. — Courbe de sensibilité du photomètre à énergie égale pour toutes les radiations.

nies du point spectroscopique (type spectral et classe de luminosité) et dont la distribution énergétique spectrale est bien connue.

De plus, ces étoiles doivent être nombreuses.

Des étoiles groupées dans une petite région du ciel, comme la Séquence Polaire, ne peuvent satisfaire simultanément à ces 4 conditions. La condition I par exemple, étoiles non rougies, ne peut être réalisée que par des étoiles relativement peu lointaines, donc brillantes et éparpillées sur toute la sphère céleste.

Pour la commodité des observations, il est nécessaire de compléter la liste des étalons fondamentaux ou primaires, par des étalons secondaires, étroitement groupés sur la sphère céleste, mais ne remplissant pas simultanément les 4 conditions ci-dessus. Des amas galactiques de population I (amas ouverts) étudiés avec toute la précision possible conviennent généralement très bien. Dans tous les cas, les magnitudes sont ramenées hors de l'atmosphère.

C'est en application de ces principes que H. L. JOHNSON et W. W. MORGAN ont établi, aux observatoires de McDonald et de Yerkes, en 1950-1953, un nouveau système photométrique, en 3 couleurs, généralement désigné par les abréviations U.B.V. (U = ultraviolet, B = bleu et V = visible ou jaune).

La figure 57 représente les courbes de réponse du photomultiplicateur utilisé (IP 21 de la R.C.A.), associé aux 3 filtres : ultraviolet (Corning 9863, ou Schott UG 1), bleu (Corning 5030 + Schott GG 13 ou Schott BG 12 + Schott GG 13) et jaune (Corning 3384 ou Schott OG 4). L'amplificateur, construit par JOHNSON, présente une très grande stabilité, un gain élevé et donne une réponse parfaitement linéaire. Aux 3 régions spectrales découpées par les filtres, correspondent les systèmes de magnitudes suivantes :

magnitude ultraviolettes	U λ_e pour les étoiles AO	0,368 μ
magnitudes bleues	B λ_e pour les étoiles AO	0,445 μ
magnitudes jaunes	V λ_e pour les étoiles AO	0,546 μ

dont les différences définissent les 2 indices de couleur U - B et B - V.

Les étalons primaires de ce système comprennent 290 étoiles brillantes qui satisfont aux conditions exigées ; ils sont complétés par des séquences secondaires, choisies dans 4 amas ouverts : Praesepe, les Pléiades, M 36 et NGC 2362, soit au total plus de 450 étoiles appartenant au nouveau système de classification spectral de Yerkes (système M.K. de MORGAN et KEENAN).

Par convention, le zéro des indices de couleur du système photométrique U.B.V. est fixé par la valeur moyenne des indices de couleur, hors de l'atmosphère, des 6 étoiles brillantes suivantes (AO V dans le système M.K.) : α Lyrae, γ Ursae majoris, 109 Virginis, α Coronae borealis, γ Ophiuchi et HR 3314, et pour lesquelles les 2 indices de couleur sont nuls :

$$U - B = B - V = 0$$

De plus, dans ce système, les étoiles géantes KO III ont un indice moyen $B - V = 1,01$. Ainsi, le zéro d'une part et l'échelle des indices $B - V$ d'autre part, satisfont à la définition du zéro et de l'échelle du système international : les magnitudes jaunes V sont donc pratiquement les magnitudes photovisuelles m_{pv} de la Séquence Polaire.

Relation entre les indices de couleur et la magnitude absolue. — Beaucoup d'étalons fondamentaux qui sont des étoiles brillantes, ou très brillantes, ont des parallaxes ϖ connues avec précision ce qui a permis de déterminer leur magnitude absolue M par la relation :

$$M = m + 5 + 5 \log \varpi,$$

valable en l'absence d'absorption.

Pour plus de précision, Johnson et Morgan n'ont tout d'abord considéré que des étoiles de parallaxe $\varpi \geq 0'',10$, donc situées au plus à 10 parsecs du Soleil. Mais il n'y a pas d'étoiles O et B à moins de 10 parsecs du Soleil,

aussi pour combler cette lacune, des étalons secondaires ont dû être utilisés : amas galactiques des Pléiades, de Preasepe et NGC 2362, dont la série principale s'étend de BI à MO.

La figure 58 représente le diagramme magnitude absolue visuelle M_v en fonction de l'indice de couleur $B - V$, analogue au diagramme Hertzsprung-

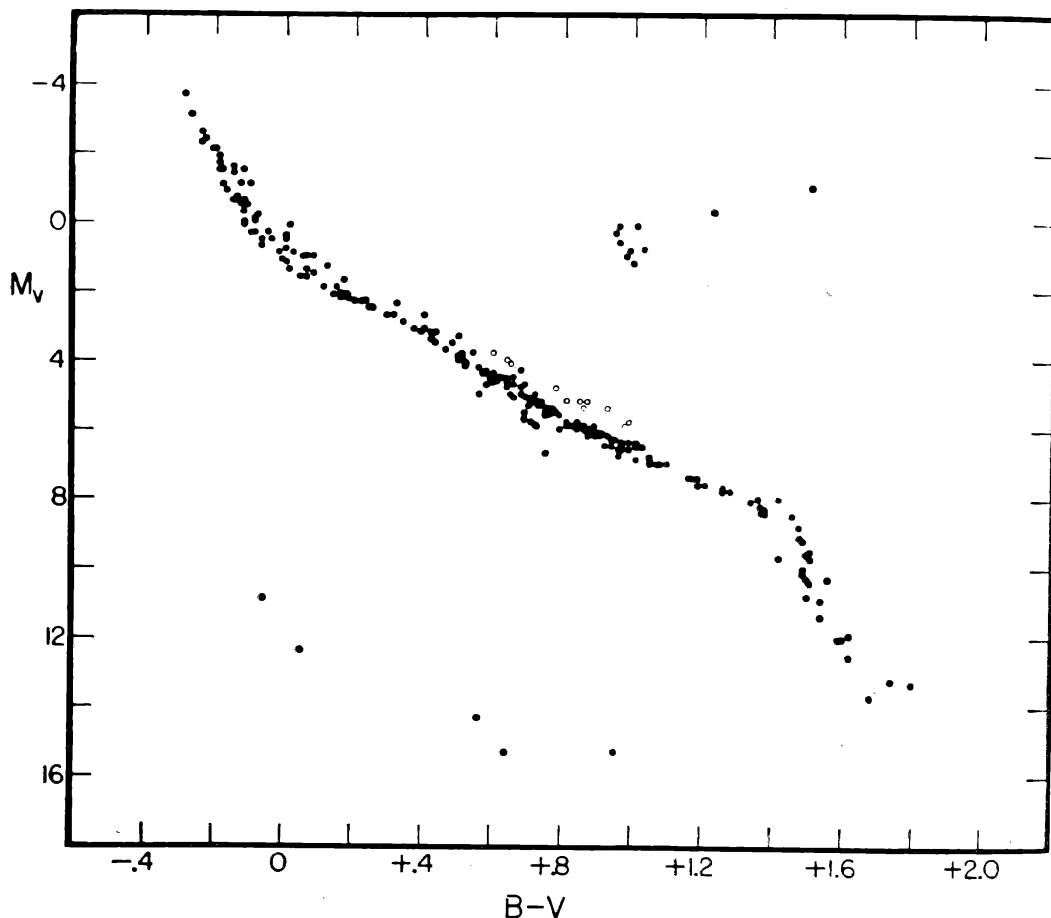


Fig. 58. — Diagramme représentant la relation entre les magnitudes absolues visuelles M_v et les indices de couleur $B-V$, obtenu avec les objets suivants :

- 1° Étoiles de la séquence principale dont les parallaxes trigonométriques sont inférieures à $0'',10$.
- 2° Les Pléiades, après correction du rougissement interstellaire moyen.
- 3° Preasepe.
- 4° NGC 2362 corrigé également du rougissement interstellaire moyen.
- 5° 5 naines blanches.
- 6° Quelques géantes jaunes.

Les petits cercles représentent quelques étoiles de Preasepe situées au-dessus de la Séquence Principale et qui sont très probablement des étoiles doubles.

Russell, mais dans lequel on a remplacé en abscisses, les types spectraux par les indices $B - V$. On voit sur ce graphique : les étoiles de la série principale de BI V à M6 V, la branche des géantes jaunes de KO III à K5 III et quelques naines blanches.

La relation entre la magnitude absolue M_v et les indices $U - B$ est

donnée figure 59. Dans ce cas, la discontinuité de Balmer se manifeste très

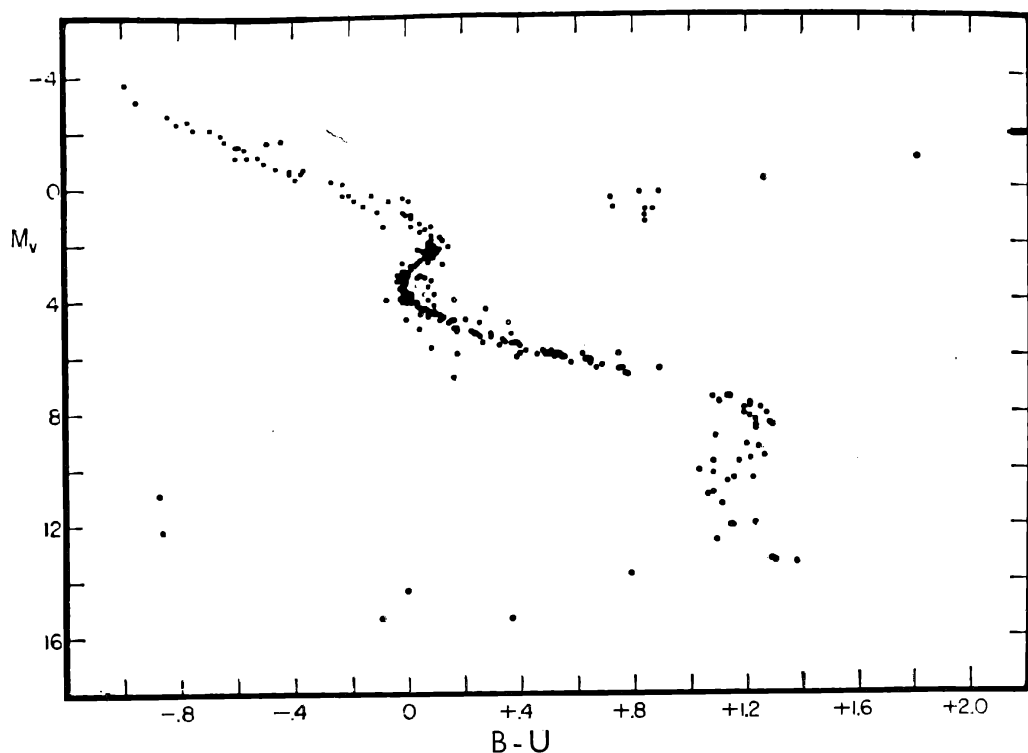


Fig. 59. — Diagramme représentant la relation entre les magnitudes absolues visuelles M_v et les indices de couleur U-B, obtenus avec les mêmes étoiles que dans la figure précédente.

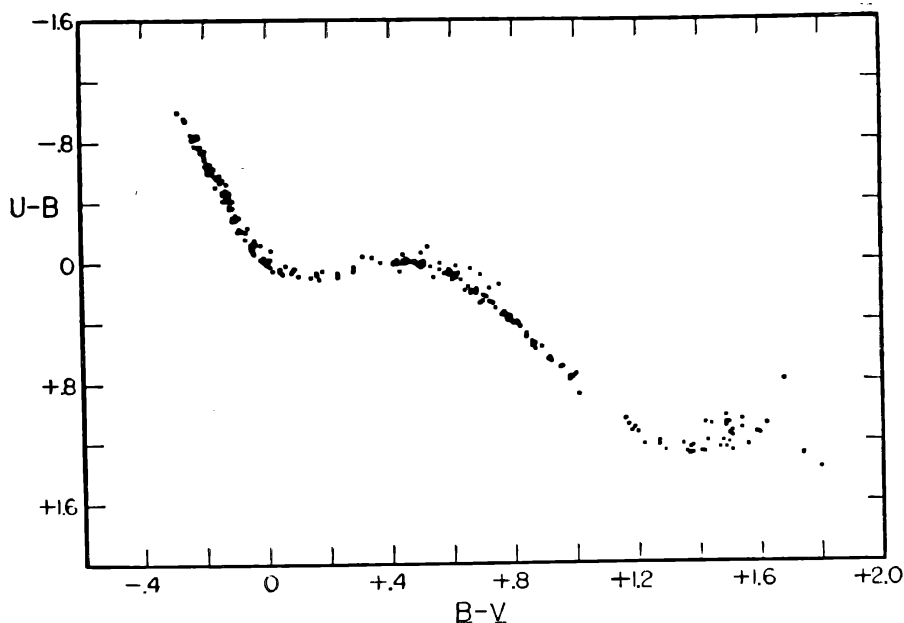


Fig. 60. — Relation entre les indices de couleur U-B et B-V pour les étoiles non rougies de la Séquence Principale.

nettement chez les étoiles A (au voisinage de $U - B = 0$ et de M_v comprise entre 2 et 5.

La figure 60 représente la relation entre les indices de couleur $U - B$ et $B - V$ pour les étoiles non rougies de la séquence principale (étoiles situées à moins de 10 parsecs et étoiles de Preasepe et de NGC 2362). La perturbation apportée par la discontinuité de Balmer chez les étoiles A y est également bien visible. Des relations analogues ont été établies pour les géantes et pour les supergéantes faiblement rougies. On constate que les supergéantes bleues sont systématiquement plus riches en ultraviolet que les naines de même indice $B - V$ et aussi que la discontinuité de Balmer y est beaucoup moins apparente.

La figure 60 montre qu'il n'existe pas de relation linéaire entre les 2 systèmes d'indice de couleur dont l'un d'eux : $U - B$, est affecté par l'absorption dans l'ultraviolet au-delà de la limite de la série de Balmer. Non seulement la relation entre les 2 indices n'est pas linéaire, mais elle prend des formes différentes suivant la classe de luminosité considérée. Cependant, ces différences ne sont généralement pas suffisantes pour qu'elles puissent être utilisées pour déterminer les classes de luminosité.

Le rougissement interstellaire et la grandeur Q . — Considérons (fig. 61), un diagramme $U - B$ en fonction de $B - V$ pour les étoiles de la série principale, de B1 à B9 (points noirs) et pour les supergéantes de O à A2, non rougies et rougies par absorption interstellaire (carrés). On remarque que les droites qui joignent les étoiles de même type spectral et de même classe de luminosité, mais affectées différemment par le rougissement interstellaire, ont la même pente. Ces droites s'appellent *droites de rougissement*. Cette propriété est très importante.

On sait que l'*excès de couleur* est la différence entre l'indice de couleur d'une étoile rougie et son indice de couleur intrinsèque ou normal (qu'elle aurait si elle n'était pas rougie). Appelons respectivement E_u et E_v les excès de couleur des indices $U - B$ et $B - V$, le rapport E_u/E_v mesure la pente des droites de rougissement. Ce rapport est donc constant pour les étoiles O et B ; c'est une conséquence de la loi d'absorption interstellaire. Ces étoiles peuvent d'ailleurs appartenir à des régions très différentes du ciel. On peut déterminer ce rapport au moyen des étoiles rougies et non rougies de la liste des étalons fondamentaux de Johnson et Morgan. On obtient la valeur :

$$E_u/E_v = 0,72 \pm 0,03 \text{ (}^1\text{)}$$

Il est alors possible de calculer une grandeur Q qui a pour expression :

$$Q = (U - B) - E_u/E_v (B - V),$$

soit

$$Q = (U - B) - 0,72 (B - V),$$

(¹) W. A. Hiltner et H. L. Johnson ont étudié de nouveau récemment, au moyen de 262 étoiles O-B, la pente de la droite $U-B$ en fonction de $B-V$; ils ont trouvé la valeur suivante, légèrement variable en fonction de E_v : $E_u/E_v = 0,72 + 0,05 E_v$.

Cette grandeur Q est indépendante du rougissement interstellaire, elle représente par conséquent des propriétés intrinsèques de l'étoile considérée.

On peut rapprocher de ce résultat celui obtenu par W. Becker par une méthode photographique très analogue appelée méthode de la « color difference ». Becker utilise des domaines spectraux centrés sur les longueurs d'onde suivantes : $0,369 \mu$, $0,468 \mu$ et $0,638 \mu$.

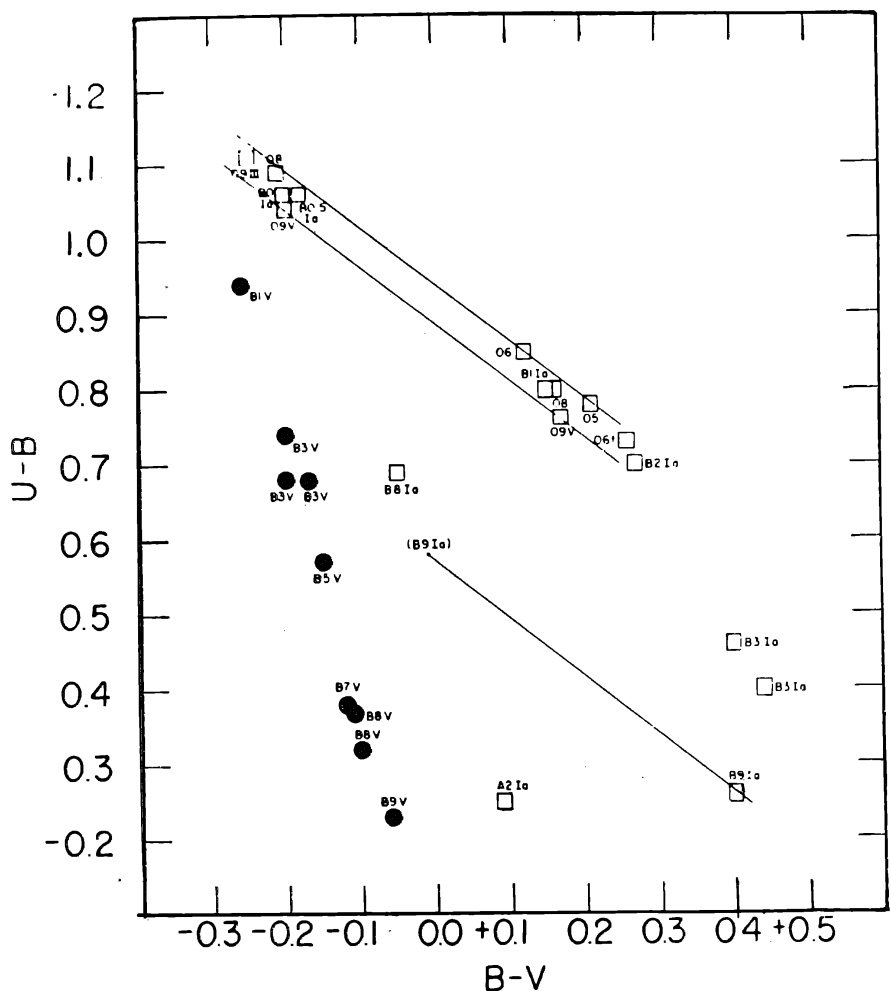


Fig. 61. — Relation entre les indices de couleur U-B et B-V. Le décalage des indices de couleur dû au rougissement interstellaire des supergéantes est représenté par les droites parallèles de pente 0,72.

Relation entre Q et B-V. — La figure 62, relative à 2 amas ouverts contenant des étoiles B légèrement rougies : NGC 2362 et M 36 et un certain nombre d'étoiles B brillantes et non rougies, des classes de luminosité III, IV et V, illustre la relation entre Q et B - V. La droite tracée à travers les points relatifs aux étoiles brillantes a pour équation :

$$(B - V)_0 = 0,337 Q - 0,009,$$

elle passe donc très sensiblement par l'origine. Les étoiles faisant partie d'un amas sont, en général, également rougies, car elles sont situées à la même

distance et vues sensiblement dans la même direction. Il en résulte que leurs indices de couleur $B - V$ sont accrus d'une quantité constante, c'est ce qui explique le décalage vers la droite des deux droites relatives aux amas NGC 2362 et M 36, mais leur pente ne varie pas, puisque Q est indépendante du rougissement.

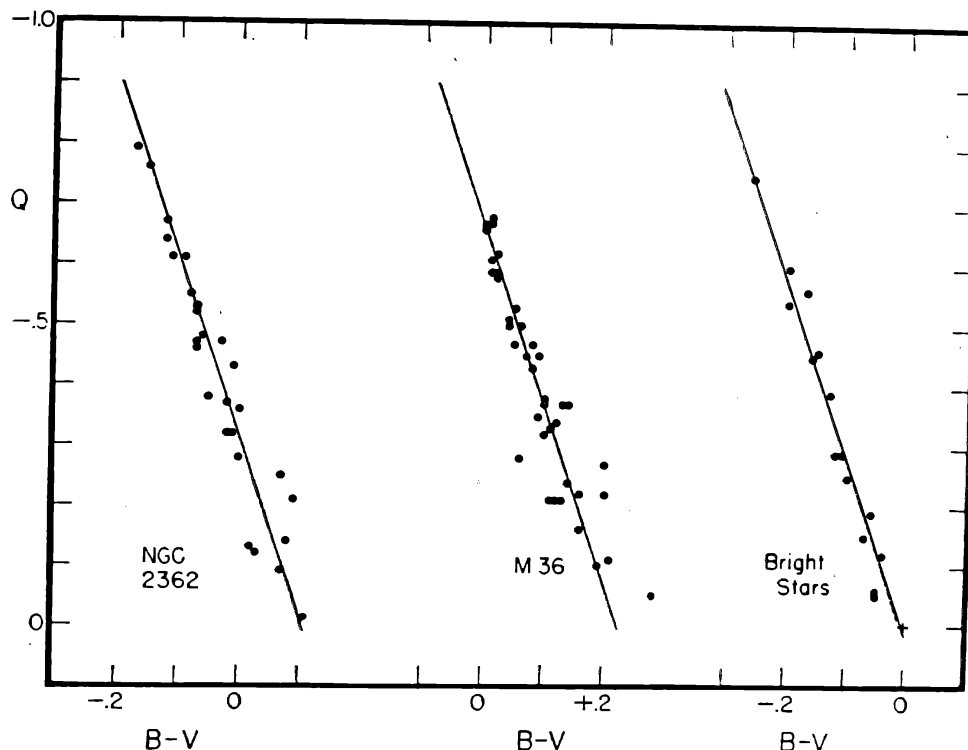


Fig. 62. — Relation entre Q et l'indice $B-V$ pour des étoiles brillantes non rougies et pour les amas galactiques M 36 et NGC 2362, un peu rougis.

Couleur normale et excès de couleur des étoiles B ; évaluation de l'absorption interstellaire. — L'excès de couleur E_v d'une étoile rougie étant par définition :

$$E_v = (B - V) - (B - V)_0,$$

on peut écrire :

$$E_v = (B - V) - (0,337 Q - 0,009)$$

où $B - V$ est l'indice de couleur observé pour chaque étoile individuelle et le second terme de la différence, l'indice de couleur normal établi au moyen des étoiles B non rougies.

La relation ci-dessus permet de calculer les excès de couleur des étoiles observées photo-électriquement dans le système U.B.V. ; elle est valable pour toutes les valeurs de Q comprises entre $-0,80$ et $-0,05$, c'est-à-dire pour les types spectraux B0 à B9 inclus et les classes de luminosité III, IV et V, donc pour les géantes et les naines.

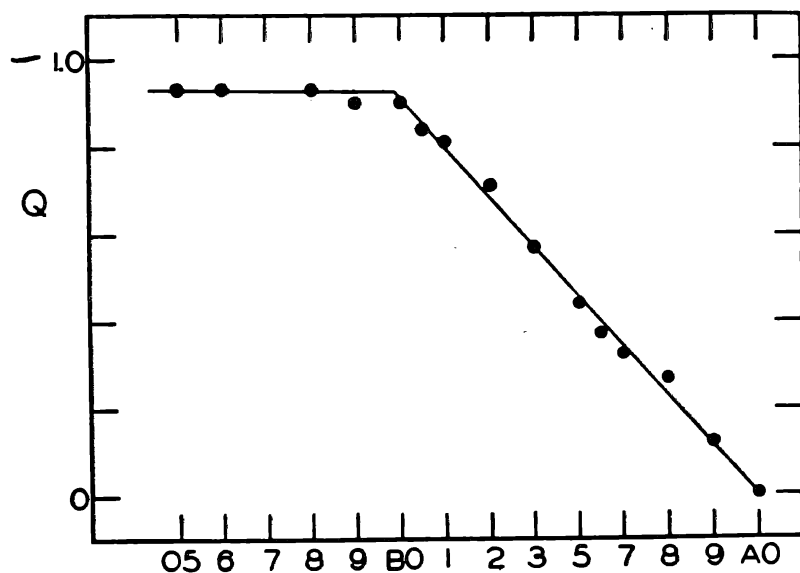


Fig. 63. — Relation entre les valeurs moyennes de Q et le type spectral (système M.K.) d'étoiles brillantes, pas ou peu rouges.

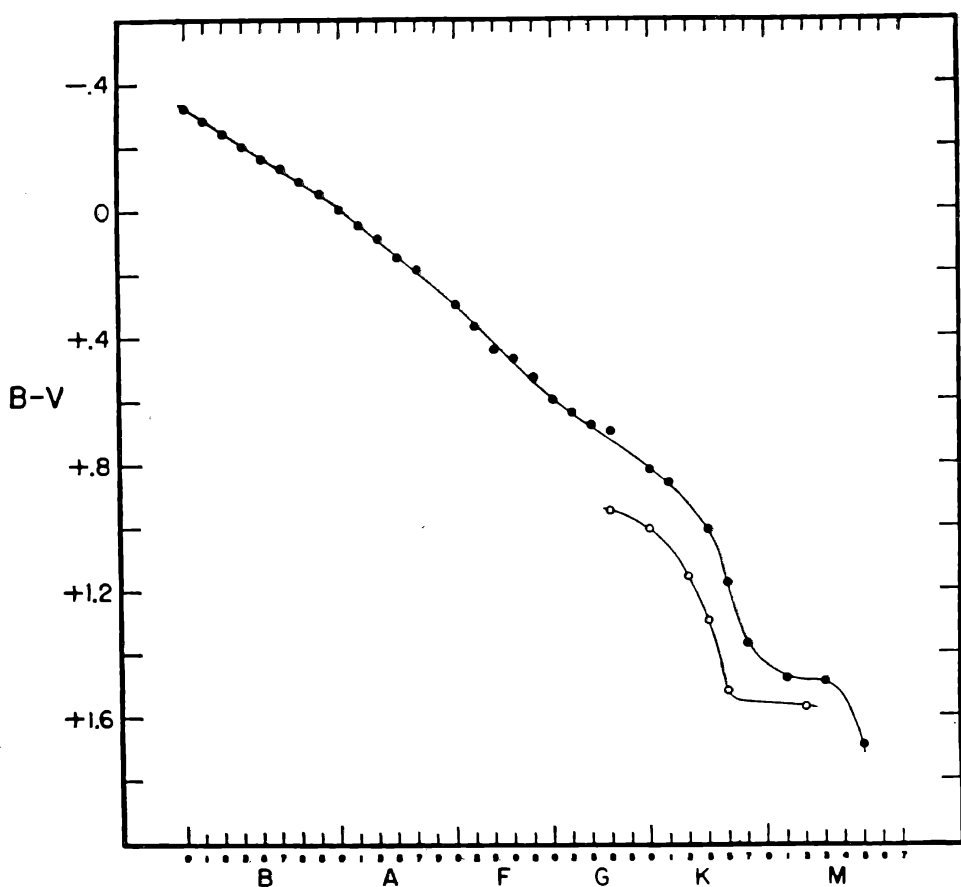


Fig. 64. — Relation entre l'indice de couleur intrinsèque $B-V$ et le type spectral (système M.K.) pour les étoiles de la Séquence Principale (points noirs) et pour les géantes jaunes (cercles).

Pour appliquer cette méthode à une étoile isolée, il est indispensable de s'assurer qu'elle appartient à la classe spectrale B et à la classe de luminosité III, IV ou V, il faut donc en obtenir un spectre, mais dans le cas des étoiles d'amas, ces renseignements sont fournis, sans grande erreur possible par la position de l'étoile sur le diagramme U - B en fonction de B - V. La grandeur Q permet ainsi de calculer l'excès de couleur d'un amas galactique contenant des étoiles B, sans étude spectroscopique préalable. Ainsi, cette méthode est applicable à des étoiles très faibles, donc à des amas très lointains. La valeur de l'excès de couleur des étoiles B de l'amas peut également servir à corriger les indices de couleur des autres étoiles plus avancées.

En outre, il est possible de corriger de l'absorption interstellaire les magnitudes V observées et d'en déduire les magnitudes V_0 obtenues en l'absence d'absorption. Des recherches récentes ont montré que l'absorption visuelle totale A_v est égale à $3 E_v \pm 0,20$. Il s'ensuit que :

$$V_0 = V - 3 E_v$$

Relation entre Q et le type spectral. — Il existe une relation très étroite entre Q et le type spectral pour les étoiles de O5 à AO ; elle a été établie au moyen des étoiles standard O et B des classes de luminosité III, IV et V pour lesquelles on connaît Q et une bonne classification spectrale dans le système M.K. Il n'y a pas de différence systématique en corrélation avec les classes de luminosité et celles-ci peuvent être utilisées indifféremment. La relation est bien linéaire de Bo à Ao inclusivement (voir fig. 63). On peut donc obtenir le type spectral d'une étoile B simplement à partir de Q donnée par les observations photométriques en 3 couleurs. Pour vérifier la précision de cette méthode, on a déterminé au moyen de la grandeur Q le type spectral d'étoiles déjà classées spectroscopiquement dans le système M.K. Pour une quarantaine d'étoiles ainsi contrôlées, les différences de classification n'excèdent pas une sous-classe et l'erreur probable du classement par photométrie est inférieure à 1/3 de sous-classe.

Relation entre les indices de couleur normaux B-V et U-B et le type spectral. — En utilisant les indices de couleur normaux des étoiles de la série principale, de Bo à M6 et ceux des géantes jaunes de G3 à M2, on a étudié la relation entre B - V et le type spectral dans le système M.K. (fig. 64). Pour la série principale, la relation est presque linéaire de Bo à K3. La forte discontinuité de Balmer des étoiles A n'apparaît pas sensiblement ici. Dans les classes avancées G, K et M, la différence bien connue entre les indices de couleur des géantes et des naines de même type spectral apparaît nettement : les géantes sont plus rouges.

La figure 65 traduit de même la relation entre U - B et le type spectral. La forte discontinuité de Balmer chez les étoiles A est ici très apparente,

comme dans tous les diagrammes où interviennent les mesures ultraviolettes. On note de même que les géantes des types avancées sont plus rouges que les naines.

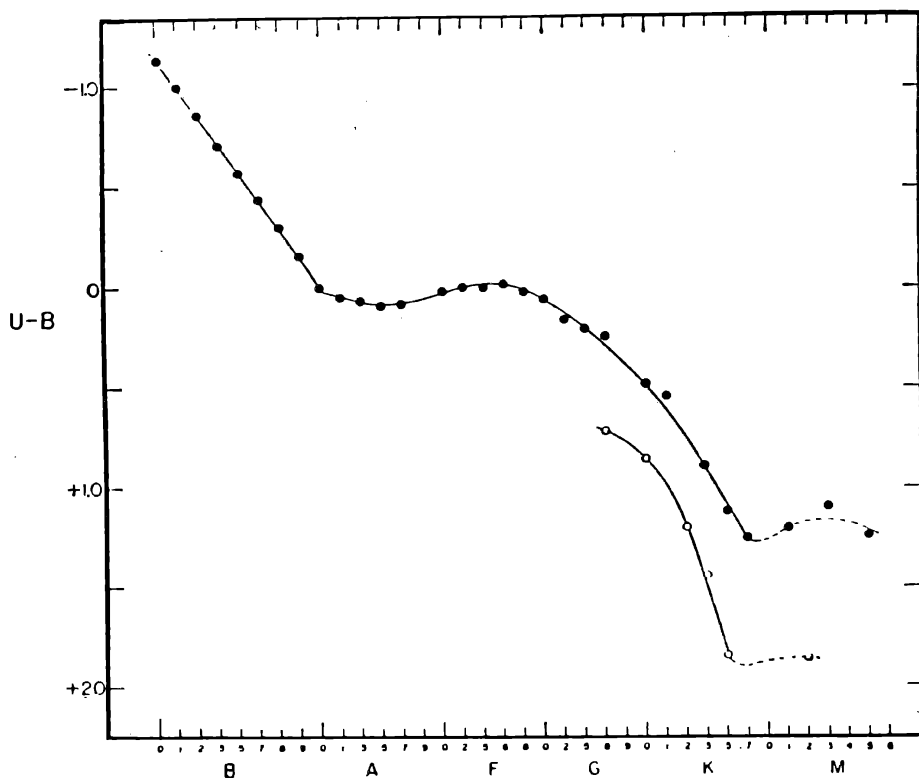


Fig. 65. — Relation entre l'indice de couleur intrinsèque U-B et le type spectral (système M.K.) pour les étoiles de la Séquence Principale (points noirs) et pour les géantes jaunes (cercles).

Conclusion. — Le système photométrique U.B.V. a pris un intérêt considérable depuis sa récente création. Les nouvelles méthodes photométriques qui se sont alors développées servent notamment pour la détermination du type spectral et la mesure du rougissement interstellaire dans les associations d'étoiles O-B et les amas galactiques de population I. Ces méthodes jouent un rôle important dans les recherches relatives à la structure de la Galaxie en permettant de localiser dans l'espace ces objets qui sont, avec les régions H II d'hydrogène ionisé, les meilleurs « indicateurs optiques » des bras de spirale de notre système. On a pu de la sorte mettre en évidence les 2 bras extérieurs : bras d'Orion (auquel appartient le Soleil) et bras de Persée, ainsi que le bras intérieur du Sagittaire. L'observation de la raie de 21 centimètres de l'hydrogène neutre H I a confirmé ces observations optiques.

J. H. BIGAY,

Astronome à l'Observatoire de Lyon.