

Spectre, couleur et polarisation de la lumière du ciel nocturne

J. Dufay

► To cite this version:

J. Dufay. Spectre, couleur et polarisation de la lumière du ciel nocturne. Journal de Physique et le Radium, 1929, 10 (6), pp.219-240. 10.1051/jphysrad:01929001006021900 . jpa-00205380

HAL Id: jpa-00205380 https://hal.science/jpa-00205380

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPECTRE, COULEUR ET POLARISATION DE LA LUMIÈRE DU CIEL NOCTURNE (*).

par M. J. DUFAY.

(Observatoire de Lyon).

Sommaire. — Etudié avec un spectrographe de quartz peu dispersif, le spectre du ciel nocturne paraît identique au spectre solaire, de 4 800 à 3 000 à. Dans le vert-jaune, la raie des aurores polaires est seule visible. On a cherché à évaluer l'intensité relative de la raie brillante et du fond continu à l'aide d'un spectrographe d'un modèle particulier, permettant de faire porter la comparaison sur une portion étendue du spectre continu. L'étude de la sensibilité spectrale des plaques utilisées a permis de passer du rapport des éclaireissements photographiques au rapport des énergies correspondantes.

Des comparaisons photographiques avec le ciel éclairé par la Lune, et avec diverses étoiles, faites à travers des filtres colorés, montrent qu'abstraction faite de la raie de l'aurore, la couleur du ciel nocturne est beaucoup plus voisine de celle du Soleil que de celle du ciel bleu.

La photographie permet de mettre en évidence une faible polarisation de la lumière du ciel nocturne. Le plan de polarisation passe constamment par le Soleil, mais la fraction de lumière polarisée n'est nulle part supérieure à 4 pour 400.

La lumière zodiacale montre une polarisation analogue, mais plus prononcée, atteignant 13 pour 400 à 60° du Soleil. Son spectre est également un spectre solaire.

I. — Généralités.

1. La brillance du ciel nocturne paraît décidément trop grande pour qu'on puisse l'attribuer aux étoiles faibles. Au-dessus des couches diffusantes de l'atmosphère celles-ci ne produiraient sans doute que les trois dixièmes de la brillance totale [2]. Sur l'origine de la lumière supplémentaire, les mesures de brillance ne nous apprennent rien. L'étude de la composition spectrale et de l'état de polarisation de la lumière du ciel pouvait au contraire conduire à des indications utiles.

A l'époque où j'ai entrepris ces recherches (1922), on savait déjà que la raie verte des aurores polaires ($\lambda = 5.577$ Å) pouvait être photographiée chaque nuit à des latitudes tempérées (Slipher [3], Lord Rayleigh [4]). Lord Rayleigh avait aussi impressionné des plaques, exposées à la lumière du ciel, à travers une série de filtres colorés, montrant ainsi l'existence de radiations depuis le rouge jusqu'à l'ultra-violet [5]. Ses observations paraissaient également montrer que la couleur du ciel nocturne différait beaucoup de celle du ciel bleu, et se rapprochait davantage de la couleur de la lumière solaire directe. Enfin, Lord Rayleigh avait constaté l'existence d'une faible polarisation, en observant à minuit à 90° du Soleil [6]. Mais, dans les mêmes conditions, H. D. Babcock, observant au Mont-Wilson, n'avait obtenu ensuite que des résultats négatifs ou douteux [7].

II. — Spectre du ciel nocturne.

2. Etude dans les régions bleue, violette et ultraviolette. — J'ai étudié le spectre du ciel nocturne avec le spectrographe à optique de quartz construit par MM. Fabry, Buisson et Bourget au cours de leurs recherches classiques sur la grande nébuleuse d'Orion [8]. Il comprend deux prismes de quartz droit et gauche de 60° et deux lentilles plan convexes identiques de 25 mm de diamètre et 90 mm de foyer; l'une sert d'objectif, l'autre de collimateur. L'ouverture relative sera donc de f/3,5. La dispersion est d'environ 120 à par mm vers 3.500 å, et la longueur des spectres de 4.800 à 3.000 å est de 12 mm.

L'appareil, généralement pointé vers le nord à 30° du zénith, est immobile; il embrasse un champ d'environ 200° carrés. Les étoiles brillantes qui passent n'envoient sur-

(*) Cet article résume une partie du mémoire publié dans le Bulletin de l'Observatoire de Lyon (4).

Nº 6.

le collimateur que d'étroits faisceaux de rayons parallèles limités par la fente : leur rôle est absolument négligeable. Naturellement la Lune est couchée pendant toute la durée de la pose, et le Soleil est à plus de 20° au-dessous de l'horizon ; ainsi tout effet crépusculaire est pratiquement éliminé. La plupart des observations ont été faites à Montpellier, par ciel pur ou très clair.

Avec une fente large de 1 à 2 dixièmes de mm, j'ai obtenu en 11 heures de pose consécutives, sur plaques Jougla étiquette violette, des négatifs encore très imparfaits montrant, sur un fond continu (de 4.800 à 3.300 Å), une série de bandes claires, semblables à des bandes d'absorption, (novembre 1922). Des poses de courte durée, faites sur le ciel au crépuscule, avec une fente de même largeur, donnèrent une apparence identique. Les deux spectres paraissaient superposables et les bandes claires observées la nuit semblaient coïncider avec des groupes de raies solaires. On reconnaissait déjà facilement la raie G et le groupe H-K (non séparées).

Avec une fente plus fine, donnant des clichés plus nets, les poses durent être poursuivies pendant plusieurs nuits. Il était indiqué de juxtaposer exactement sur la même plaque les spectres nocturne et crépusculaire, en masquant la moitié supérieure, puis la moitié inférieure de la fente avec un écran opaque. Deux poses nocturnes de 48 et 60 heures suivies de deux courtes expositions au crépuscule, montrèrent ainsi la coïncidence complète des raies (ou groupe de raies) d'absorption dans le spectre du ciel nocturne et le spectre du ciel bleu (janvier et mars 1923). Les observations poursuivies de 1923 à 1925 ont seulement confirmé les résultats précédents ; j'ai obtenu une quinzaine de spectrogrammes montrant uniquement des raies solaires sur un fond continu (de 4.800 à 3.000 Å). La durée des poses a varié de 25 à 115 heures : j'ai pu tirer parti de clichés très faibles en en prenant deux copies successives sur plaques à grands contrastes (Crumière Special Contrast).

LONGUEUR D'ONDE, en m ₂ .						
CIEL DIURNE	CIEL NOCTURNE	RAIES SOLAIRES				
430,8	430,8 422,5 409,8	430,8 (G) 422,7 (g) 440,2 (b)				
396.6	396.5	396.9 (H)				
393,4	393,4	393,4 (K)				
		386 forte raic.				
384,4	385	Groupe de raies faibles et				
	0.7.0	(382,1 (L)				
374,6	375	379 5 (M)				
364	366	$\int 3/2, 3 (M)$				
358,1	357,7	358,1 (N)				
354 ?	351,7	352 2 raies voisines.				
344,6	343, 8	344,1 (0)				
333,5	333,7	336,1 (P), bordé d'un groupe de raies vers les petits λ .				
325,2	325,2	(328,7 (Q) (323 à 324 raies faibles.				
]	317,5	318,1 (R)				
		315,8 raie plus faible				
1	310	310,0 (s)				
	304,7	304,7 (S)				

TABLEAU I.

Le tableau I donne les longueurs d'onde des raies les plus visibles, déterminées sur un cliché posé 25 heures seulement à Courbons (Basses-Alpes, altitude 900 m) avec une fente

Nº 6.

et sur l'autre

fine. Les mesures faites d'abord au comparateur, par la méthode ordinaire, ont été contrôlées au microphotomètre enregistreur de Chalonge et Lambert. Leur précision est limitée à 6 ou 8 Å par la faiblesse du pouvoir de résolution. On voit que les longueurs d'onde correspondent souvent à des groupes de raies voisines, non séparées par le spectrographe.

Les spectres nocturnes sont en général un peu moins denses dans la région bleue que les spectres obtenus au crépuscule, sur la même plaque, avec des poses incomparablement plus courtes, et cependant ils s'étendent plus loin dans l'ultra violet. De même, le spectre du ciel nocture s'affaiblit beaucoup moins vite dans l'ultra violet que celui du ciel éclairé par la Lune, enregistré sur la même plaque, avec la même durée de pose (60 heures) (¹). Cette différence d'aspect peut d'ailleurs s'expliquer de plusieurs manières, et il est difficile d'en tirer une conclusion relative à la courbe d'énergie spectrale de la lumière du ciel nocturne (²).

Lord Rayleigh a obtenu de son côté trois spectres du ciel nocturne de novembre 1922 à janvier 1923 [9]. Il se servait de petits spectrographes à un prisme de flint, munis d'objectifs de 30 mm de distance focale, ouverts à f/0.9, beaucoup plus lumineux, mais encore beaucoup moins dispersifs que mon appareil de quartz. Il a observé, sur plaques orthochromatiques, en plus de la raie verte de l'aurore, un spectre continu, s'étendant de 5.800 à 3.900 Å (longueur sur la plaque 2 mm), avec les raies H et K. Sur les deux spectres les plus intenses, on voyait en outre deux raies ou bandes brillantes, d'origine inconnue. La mesure des longueurs d'onde a donné sur un cliché

4.192	et	4.443 Å
4.225	et	4.4 96 Å.

Ces raies brillantes ne sont visibles sur aucun de mes clichés. L'étude de quelquesuns d'entre eux au microphotomètre enregistreur n'a pas réussi à les mettre en évidence.

3. Observation de la raie verte de l'aurore. — Chaque fois que j'ai employé des plaques orthochromatiques, j'ai observé avec l'appareil de quartz une raie brillante dans le vert-jaune, qui paraissait coïncider avec la raie verte de l'aurore. Mais la mise au point, faite pour la région ultra violette, n'était plus satisfaisante au milieu du spectre visible, et l'on sait qu'avec une mauvaise définition on risque de confondre avec la raie verte la bande de sensibilité des plaques à l'érythrosine [4]. Pour observer la raie de l'aurore, j'ai monté un petit spectrographe comprenant une lentille achromatique de 25 cm de foyer, un gros prisme à vision directe de Hoffmann (2 prismes de flint et 3 de crown), et un objectif de 23 mm d'ouverture et 30 mm de foyer. Malgré cette courte distance focale, la dispersion est encore, dans la région visible, supérieure aux deux tiers de celle de l'appareil de quartz. Une dizaine de spectrogrammes enregistrés en 1923 et en 1924 ont montré la raie verte avec une intensité variable, mais des poses de 20 à 40 heures n'ont pas suffi à faire apparaître le fond continu dans les régions jaune et verte.

(1) La brillance du ciel lunaire était réduite au moyen d'un échelon adsorbant peu sélectif, placé contre la fente. C'était une gélatine détachée d'une plaque photographique et reportée sur lame de quartz après impression, développement et renforcement au chlorure mercurique. Elle avait été étalonnée pour toutes les longueurs d'onde au cours d'un autre travail.

(²) La lumière diffusée par la Lune doit être un peu moins riche en radiations ultra violettes que la lumière solaire directe. D'autre part l'absorption des radiations de longueur d'onde inférieure à 3.300 Å par l'ozone atmosphérique ne se fait pas de la même manière lorsqu'on vise le ciel nocturne ou le ciel éclairé par le Soleil ou la Lune. Dans le cas du ciel nocturne, l'épaisseur de la couche absorbante dépend de la distance zénithale de la région visée; dans le cas du ciel diurne ou lunaire, c'est la distance zénithale de l'astre qui intervient, puisque le rayonnement est filtré à haute altitude par l'ozone, avant d'être diffusé par les molécules des couches inférieures.

L'altitude effective de la couche d'ozone étant de l'ordre de 45 km., l'épaisseur traversée au crépuscule est environ huit fois plus grande que lorsque l'astre est au zénith. III. --- IMPORTANCE RELATIVE DE LA RAIE DE L'AURORE ET DU SPECTRE CONTINU.

4. Dispositif utilisé. — La raie de l'aurore produit un effet comparable à celui d'une partie étendue du spectre continu; un spectrographe à fente fine ne permet pas d'évaluer leur intensité relative.

Remplaçons la fente du spectrographe par une large ouverture rectangulaire R, portant, vers son milieu, une tige opaque et fine T, parallèle aux arêtes du prismes (fig. 1, A). Une source émettant un spectre continu donne sur la plaque une bande spectrale très impure; une source émettant une seule radiation monochromatique donne au contraire une image nette de l'ouverture R et de la tige T. Si enfin la source émet à la fois une raie brillante et un spectre continu, les deux effets précédents se trouvent superposés :



Fig. 1 (A). — R ouverture rectangulaire dans le plan focal du collimateur, T tige opaque; (B) r image monochromatique de R, t image monochromatique de T.

on voit se détacher sur la bande spectrale du négatif un rectangle opaque à bords nets r, image monochromatique de l'ouverture R (fig. 1, B). Sur la bande plus claire t a seule agi la partie du spectre continu comprise entre des limites bien définies λ_1 et λ_2 . La mesure des densités correspondant à cette bande claire et à la région opaque située sur la même droite t t' fait connaître le rapport des éclairements produits d'une part par le spectre continu entre les limites λ_1 et λ_2 , d'autre part par cette même portion du spectre continu et par la raie brillante.

J'ai employé une ouverture carrée de 19,3 mm de côté, munie d'une tige cylindrique de 0,75 mm de diamètre, et placée dans le plan focal d'une lentille collimatrice de 34 cm de foyer. Le système dispersif comprend deux prismes de 60° en flint dense; l'objectif est un oculaire de microscope de 24 mm de foyer et et de 20 mm de diamètre utile. L'ensemble est fixé sur un bâti rigide en planches d'aluminium. La mise au point est faite à 0,01 mm près environ en éclairant avec une lampe à mercure.

Pour déterminer les limites λ_3 et λ_2 de la partie utile du spectre continu, on fait fonctionner l'appareil à l'envers, en substituant à la plaque photographique un écran opaque portant une fente fine, convenablement orientée (largeur approximative : 0,01 mm). Lorsqu'on éclaire cette fente avec un tube à krypton, un spectre réel se peint sur l'ouverture R. En déplaçant le châssis entre ses glissières on amène dans le prolongement de la tige **T** l'image de la raie verte du krypton, dont la longueur d'onde (5 570,5 Å) diffère très peu de celle de la raie de l'aurore (5 577,3 Å). On éclaire ensuite, sans toucher à la fente, avec plusieurs sources émettant des spectres de raies (arc au mercure, étincelles entre électrodes de cuivre, de zinc, d'aluminium et de cadmium) et on note, à 0,05 mm près, la position des raies sur un micromètre collé sur l'ouverture R. La courbe de dispersion qui résulte de ces mesures fournit, par une courte extrapolation, les limites cherchées, soit ici 4 962 et 4 460 Å. A partir de 6 000 Å la sensibilité des plaques utilisées est pratiquement nulle, les limites seront donc 4 962 et 6 000 Å : on utilise ainsi toute la bande de sensibilité dans le vert-jaune des plaques orthochromatiques.

La tige T masque au voisinage de la raie de l'aurore un intervalle de 55 Å.

5. Observations et résultats des mesures photométriques. — Les clichés destinés aux mesures photométriques ont été obtenus à l'Isle-sur-Serein (Yonne) en août et septembre 1926. Sur plaques Crumière « Aviator », des poses de une heure seulement, en l'absence de la Lune, donnent des impressions suffisantes; il vaut cependant mieux poser SPECTRE, COULEUR ET POLARISATION DE LA LUMIÈRE

223

une heure trente minutes de façon à utiliser uniquement dans les mesures la partie rectiligne de la courbe caractéristique, dont la pente (γ) est alors voisine de 2. La présence de la lune au-dessus de l'horizon ôte naturellement toute signification aux mesures, mais n'empêche pas d'observer la raie de l'aurore. J'ai pu photographier celle-ci au voisinage de la pleine Lune en posant cinq à dix minutes seulement. Le spectre continu de la lumière diffusée par l'atmosphère est naturellement prépondérant et le contraste entre l'image de la tige T et les régions voisines devient très faible, sans cesser encore d'être perceptible. A Paris mème j'ai photographié à plusieurs reprises la raie de l'aurore par ciel clair, malgré l'illumination intense de la ville vers 21 heures, en hiver.

Les clichés étaient étalonnés au moyen d'une pose auxiliaire, de mème durée, faite en exposant directement la plaque à la lumière du ciel nocturne derrière un échelon absorbant presque neutre. Un filtre jaune (Wratten 9) placé en avant de celui-ci permettait d'isoler la région spectrale voulue en absorbant les radiations de longueur d'onde inférieures à 4 950Å.



Fig. 2. — Mesure de l'intensité de la raie de l'aurore. r t r' image monochromatique de l'ouverture R et de la tige T fournie par la raie 5.577 Å. Pose 4 h. 30. Epreuve positive agrandie 4,8 fois.

L'échelon absorbant avait été lui-même étalonné par photographie, à travers le même filtre, exactement dans les mêmes conditions.

La figure 2 montre un agrandissement de l'un des clichés. La figure 3 reproduit l'enre-



Fig. 3. Diagramme d'enregistrement du cliché reproduit figure 2. Les ordonnées mesurent la transparence du cliché en chaque point (coordonnées légèrement obliques). Réduction du diagramme original dans le rapport de 1 à 0,8.

gistrement au microphotomètre de la moitié inférieure du spectre ; on voit nettement le rectangle opaque r r' correspondant à la raie brillante et la ligne t image de la tige T.

Nº 6.

Le tableau II donne les résultats de quelques mesures : r désigne le rapport des éclairements photographiques produits d'une part par la raie de l'aurore et le spectre continu entre 4 962 et 6 000 Å, d'autre part par le spectre continu seul entre les mêmes limites.

DATE	DURÉE DE LA POSE (miautes)	HEURE DU MILIEU DE LA POSE	CIEL	DISTANCE ZÉNITHALE	AZIMUT	r
31 août 8 septembre 9 9 9 14 16	90 — — 60 70	21 h 35 mn 22 24 0 1 21 30 23 8 2 8 1 3	clair (cirrus?) pur pur clair (orage au sud) pur très clair	50° 52° 40° 55° 75° 77°9 75°	Nord 	1,58 1,56 1,60 1,44 1,38 1,36 1,38

TABLEAU II.

Les valeurs de r sont comprises entre 1,4 et 1,6. Le rapport des éclairements photographiques produits par la raie seule et le spectre continu, entre les limites données, a donc varié de 0,4 à 0,6; la raie produisait une fraction de l'éclairement total comprise entre 0,28 et 0,38.

6. Passage à l'énergie. — Les nombres précédents dépendent évidemment des propriétés sélectives de la plaque utilisée. On aurait pu trouver des valeurs un peu différentes avec un autre type de plaques à l'érythrosine, ou très différentes avec des plaques sensibilisées au moyen d'un autre colorant. J'ai cherché à passer de la connaissance des éclairements photographiques à celle des énergies, en m'appuyant sur les considérations suivantes :

Construisons pour chaque longueur d'onde la courbe caractéristique de la plaque, en faisant varier l'éclairement sans modifier le temps de pose et supposons que, dans l'intervalle spectral étudié, toutes ces courbes puissent être superposées par une translation le long de l'axe des abscisses. Construisons de même les courbes caractéristiques correspondant à des expositions de durée variable et à une valeur constante de l'éclairement et supposons qu'elles satisfassent à la même condition. C'est seulement si ces hypothèses se trouvent vérifiées qu'on peut définir sans ambiguïté le rapport des éclairements photographiques produits par deux radiations de longueurs d'onde différentes.

Soit alors w_{λ} l'énergie transportée par une radiation monochromatique de longueur d'onde λ . La valeur photographique du flux correspondant F_{λ} peut être considérée comme le produit de w_{λ}^{2} par un tacteur $k_{\lambda} = \varphi(\lambda)$, caractérisant la sensibilité de la plaque pour cette radiation. On posera k = 1 pour la longueur d'onde qui correspond à la sensibilité maximum; k_{λ} n'est autre qu'un facteur de luminosité relative. Dans le cas d'une source émettant un spectre continu. l'énergie émise dans l'intervalle $\lambda = d\lambda/2$, $\lambda + d\lambda/2$ étant représentée par

$$\mathrm{d} W_{\lambda} = f(\lambda) \, \mathrm{d} \lambda \qquad . \bullet$$

la valeur photographique du flux total s'écrit :

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \varphi(\lambda) \, \mathrm{d} \lambda.$$

J'appellerai facteur de luminosité efficace, relitif à la source considérée, la quantité :

$$k_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda} = \frac{F}{W}.$$

Il s'agit actuellement de passer du rapport e_{λ}/E des éclairements photographiques produits respectivement par la raie de l'aurore et par le spectre continu entre λ_1 et λ_2 au rapport des énergies w_{λ}/W . On a :

$$\frac{e_{\lambda}}{E} = \frac{k_{\lambda}}{k_e} \frac{w_{\lambda}}{W}.$$

.

Il suffit donc de déterminer k_{λ}/k_{θ} ; pour cela il faudrait pouvoir construire séparément de 4 960 à 6 000 Å la courbe d'énergie du ciel nocturne et la courbe des facteurs de luminosité. La première n'est pas exactement connue, mais, comme la fonction $f(\lambda)$ varie certainement beaucoup moins vite que $\varphi(\lambda)$ dans l'intervalle considéré, l'incertitude qui en résulte est, comme nous le verrons, sans importance.

7. Etude de la sensibilité spectrale d'une plaque orthochromatique de 4 960 à 6 000 Λ . — Pour tracer la courbe des facteurs de luminosité j'ai étudié la répartition de l'éclairement photographique dans le spectre d'une source dont la courbe d'énergie est bien connue. C'était un corps noir d'Ives, monté par M. Volkringer au cours de son travail sur le spectre continu du mercure [10]. On sait qu'il s'agit d'un cylindre de platine porté à haute température par le passage d'un courant de quelques centaines d'ampères, et présentant une ouverture rectangulaire allongée parallèle aux génératrices. On projette l'image de cette ouverture sur la fente du spectrographe, en visant à 5° environ de l'axe du cylindre. La température, mesurée au moyen d'un pyromètre optique de la Cambridge Ld, est maintenue constante à 10° près; elle était de 1 375 + 273 = 1 648°K au cours de mes expériences. La dispersion moyenne du spectographe à deux prismes de flint utilisé était de 50 Å par mm de 5 000 à 5 800 Å.

L'étude d'une plaque comprenait deux séries de poses : 1° une série de poses de huit minutes chacune, faite en graduant l'éclairement à l'aide de deux prismes de Glan placés devant la fente; 2° une série de poses de durée variable, avec les Glans parallèles. Cette dernière série avait uniquement pour but de contrôler l'exactitude de l'hypothèse faite sur l'identité des courbes de noircissement. Les repères de longueurs d'onde étaient fournis par un arc au mercure.

L'étude des clichés au microphotomètre enregistreur a montré d'abord que les hypothèses fondamentales étaient approximativement vérifiées. Les courbes de noircissement relatives à un même cliché ont été construites de 50 en 50 Å, et l'on a constaté que de 4 900 à 5 850 Å on pouvait les faire coïncider par une translation convenable le long de l'axe des abscisses (log E ou log t). Quand les parties rectilignes étaient assez longues pour permettre de déterminer avec précision les facteurs de contraste γ et γ' , on a trouvé des valeurs à peu près indépendantes de la longueur d'onde (de 4 900 à 5 300 Å : $\gamma = 1.95 \pm 0.03$, $\gamma' = 4.76 \pm 0.04$, $\gamma'/\gamma = 0.90$; pour 5 800 Å : $\gamma = 1.95$, $\gamma' = 1.77$). De 5 850 à 6 000 Å les résultats sont moins nets ('), mais, dans cet étroit intervalle, la sensibilité de la plaque est assez faible pour que l'indétermination qui en résulte soit pratiquement sans importance.

Pour obtenir la répartition spectrale des *éclairements photographiques* (courbe I, fig. 4), il suffit maintenant de considérer les courbes de noircissement correspondant à la série des poses de même durée : les translations qu'on doit leur faire subir pour les superposer à l'une quelconque d'entre elles mesurent, en unités arbitraires, les valeurs photographiques des

(1) Il pourrait y avoir une augmentation de γ et de γ' .

éclairements. On évalue d'autre part les éclairements énergétiques en tenant compte de la dispersion (²) (courbe II, fig. 4), et, en divisant les ordonnées de la courbe I (éclairements photographiques) par celles de la courbe II (éclairements énergétiques), on obtient finaement la courbe des coefficients de luminosité k. Elle a été représentée figure 5, en posant k = 4 pour la radiation correpondant au maximum de sensibilité (au voisinage de 5 500 Å). On voit que le facteur de luminosité estiminimum vers 5 200 Å; pour la raie de l'aurore, il. vaut 0,88.



Pour évaluer le facteur de luminosité efficace k_e , relatif au spectre continu du ciel nocturne, il faudrait en toute rigueur connaître la courbe d'énergie de celui ci. J'envisagerai successivement deux hypothèses très différentes :

1^{re} hypothèse. — La courbe d'énergie du ciel nocturne est identique à celle du Soleil, assimilable à un corps noir à 6 000°K. En multipliant ses ordonnées par les coefficients de

(2) La formule de Wien donne la répartition de l'énergie dans le spectre du corps noir à 4.648° K. On mesure en chaque point de la plaque d'abscisse x, le coefficient angulaire dx/d de la courbe de dispersion du specthographe, et l'on multiplie les ordonnées de la courbe d'énergie par les valeurs correspondantes du $dx/d\lambda$.

luminosité de la plaque, on obtient la répartition spectrale des éclairements photographiques (ou des flux). L'énergie totale W et la valeur photographique du flux F, entre les limites considérées, sont évaluées par intégration graphique. On en tire :

$$k_e \equiv F/W \equiv 0,587.$$

2° hypothèse. — La courbe d'énergie du ciel nocturne est identique à celle de la lumière solaire diffusée par un gaz. — On l'obtient en multipliant par λ -4 les ordonnées de la courbe d'énergie du Soleil. En procédant comme dans le premier cas, on trouve: $k_c = 0.615$.

Les deux valeurs de k_e diffèrent à peine de 5 pour 100 : le facteur de luminosité, variant très rapidement avec la longueur d'onde, impose sa forme à la courbe des éclairements photographiques.



Fig. 3. - Facteurs de luminosité relative de la plaque Crumière Aviator.

On a maintenant toutes les données nécessaires au calcul du rapport des énergies transportées par la raie de l'aurore et par le spectre continu du ciel nocturne entre $4\,962$ et $6\,000$ Å. En prenant les valeurs minimum et maximum de r données dans le tableau II, on trouve :

r	-1 = 0,4	r - 1 = 0,6
1 ^{re} hypothèse : rayonnement solaire direct,	0,25	0,38
2^{e} — — — diffusé par un gaz	0,27	0,40

Ainsi la raie brillante transporte 0,3 à 0,4 de l'énergie transportée par le rayonnement continu de 4 962 à 6 000 Å.

9. Cas des observations visuelles. — La connaissance du rapport des énergies permet en principe de passer d'une manière inverse au rapport des éclairements visuels. Il convient d'employer ici les facteurs de luminosité de l'œil relatifs aux très faibles éclairements, J'emploierai les valeurs calculées par Nutting à l'aide des anciennes observations de König [12]. Le facteur de luminosité étant pris égal à 1 pour 5 050 Å (sensibité maximum) ne vaut plus que 0,207 pour la raie de l'aurore.

Le rayonnement susceptible d'exciter la sensation lumineuse est alors approximative-

ment compris entre 4 100 et 6 000 λ . Entre ces nouvelles limites, l'énergie émise est 1,85 fois plus grande qu'entre 4 960 et 6 000 λ , si l'on suppose le rayonnement continu du ciel nocturne identique à celui du Soleil. Pour ce dernier, le facteur de luminosité efficace est 0,44, et le rapport des éclairements produits par la raie et par le spectre continu prend au plus (r-1=0,6) la valeur :

$$\frac{0,207 \times 0,38}{0,44 \times 1,85} = 0,097.$$

La raie de l'aurore produit à elle seule une fraction de l'éclairement total égale à 0,089. En prenant la valeur minimum de r au lieu de la valeur maximum, on trouve la limite inférieure 0,060 (').

Ainsi, dans le cas des observations visuelles, la raie de l'aurore expliquerait environ 6 à 9 pour 400 de la brillance totale du ciel nocturne. Il est intéressant de rapprocher ce résultat de celui que Lord Rayleigh a obtenu par une méthode toute différente, en comparant les opacités d'un filtre destiné à isoler la raie de l'aurore, pour la raie verte du krypton (5 570,5 Å) et pour la lumière totale du ciel nocturne [12]. Elles étaient dans le rapport de 0,185 à 1. Si le filtre isolait rigoureusement la raie brillante, celle-ci produirait une fraction de l'éclairement total égale à 0,185. Mais, en raison de l'imperfection du filtre, qui présente une bande de transparence d'environ 200 Å, ce nombre doit être considéré comme une limite supérieure du rapport des éclairements visuels.

IV. -- COULEUR DU CIEL NOCTURNE

10. La connaissance de la courbe d'énergie du ciel nocturne présenterait un grand intérêt. Mais la brillance du ciel est si faible que les mesures spectrophométriques rencontreraient actuellement des difficultés à peu près insurmontables. Il faut donc se contenter des renseignements beaucoup plus grossiers que fournit l'analyse de la lumière du ciel à travers des filtres colorés.

La comparaison photométrique du ciel nocturne au ciel diurne ou à la lumière directe du Soleil, présenterait aussi de grandes difficultés, en raison de l'énormité des facteurs de réduction nécessaires. Je me suis borné à comparer, à travers des filtres colorés, le ciel nocturne au ciel éclairé par la Lune et à des étoiles de différents types spectraux.

II. Comparaison du ciel nocturne au ciel lunaire à travers les filtres colorés. — Les observations sont faites par photographie de la manière suivante :

Un échelon absorbant à peu près neutre, comprenant 5 ou 6 bandes de densités différentes (1), est placé contre la gélatine d'une plaque photographique. Sur la face antérieure de cet écran sont disposés transversalement plusieurs filtres de gélatine colorée. Un objectif très lumineux (condenseur de lanterne de projection, diamètre 11 cm, foyer 9 cm) projette sur la plaque l'image du ciel. On fait sur la même plaque deux poses de même durée : l'une sur le ciel nocturne, l'autre sur le ciel lunaire ; un diaphragme en forme de secteur permet au besoin de réduire l'ouverture de l'objectif. Pour réduire la durée d'exposition, il peut être avantageux de supprimer l'échelon absorbant au moment de la pose sur le ciel nocturne.

Les comparaisons sont faites sur plaques orthochromatiques à travers des filtres violet, bleu et jaune, et sur plaques panchromatiques à travers des filtres bleu, vert et rouge. Le tableau III indique les régions spectrales isolées (²).

(1) En supposant le rayonnement du ciel nocturne identique à celui d'un gaz diffusant la lumière solaire, on aurait trouvé dé même les limites 0,069 et 0,049.

 $({}_{l})$ Ces écrans sont faits avec des gélatines de plaques photographiques convenablement impressionnées. Comme ils ne sont pas rigoureusement neutres et peuvent diffuser d'une manière appréciable la lumière incidente, on les étalonne par photographie, à travers les filtres colorés, dans les conditions mêmes où ils seront utilisés sur le ciel. Leurs propriétés diffèrent suivant le type de plaques employé à leur confection et suivant le mode de développement.

(²) Les longueurs d'onde moyennes, grossièrement approchées, sont évaluées en tenant compte autant que possible de la sensibilité spectrale des plaques. Voir *Les facteurs de transmission des écrans* [4], p. 106.

FILTRE WRATTEN	NUMÉRO	PLAQUES ORTHOCHROMATIQUES (Å)	λ moyen	PLAQUES PANCEROMATIQUES	λ moyen
Violet. Bleu. Vert. Jaune. Rouge.	35 45 58 9 29	3 800-4 600 4 350-5 300 4 800-6 000	4 300 Å 4 700 5 500	4 350-5 300 4 900-5 800 6 150-7 000	4 700 Å 5 350 6 400

TABLEAU III.

L'étude d'un cliché au microphotomètre donne le rapport des brillances du ciel noc turne et du ciel lunaire à travers chacun des filtres. Supposons par exemple qu'il s'agisse d'une comparaison sur plaque orthochromatique, soit V, B et J, les valeurs de la brillance nocturne, mesurée en unités arbitraires, dans le violet, le bleu et le jaune et soit de même V', B' et J', les valeurs correspondantes de la brillance du ciel lunaire. Les mesures four nissent les rapports V/V', B/B' et J/J', dont les valeurs, variables avec l'âge de la Lune, ne nous intéressent pas en elles-mêmes. Pour caractériser la différence de teinte des deux lumières on les ramène à égalité dans le violet et on forme les rapports :

$$b = \frac{B/B'}{V/V'}$$
, $j = \frac{J/J'}{V/V'}$.

Les nombres obtenus sont rassemblés dans le tableau IV. Le tableau V donne de même, \dot{a} égalité dans le bleu, le rapport de la brillance du ciel nocturne à la brillance du ciel lunaire

UMÉRO	EMPLACEMENT	DATE (Pose	DURÉE DES POSES	ORIEN-	ь	j	CI	EL
Ň		nocturne.)	200 100000				Nocturne.	Lunaire.
		1924						
1	Montpellier.	6 janv.	5 h	N. 50°	1,05	1,82	pur	pur
2		12 -	5		1,10	2, 37		clair,cir r .,halo
3		28	3		1,02	1,74	un peu nuag.	très clair
4		29 —	5	-	0,84	1,28	très clair	clair
5	-	30 —	ð		1,18	2,00		cirrus, halo
6		8 mars	4	-	1,07	3,09	clair	très clair
7	-	9 juin	0 h 46 m n		1,17	2, 19	pur	pur
8	Saint-Geniez.	24 aoùt	0 53	E. 30°	0,71	1,03		
9		8 sept.	1 13	-	1,00	1,62	clair	très clair
		1926						
10	L'Isle-sur-Serein.	6 sept.	0 h 40 m n	zénith	cu	1,86	nuageux	pu r
11		8 —			q	1,74	pur	
12		10 —			ran	2,02	très clair	
13		10 —			ec	2,03	· ·	
14		11 —			e d	1,88		
15		14			pa:	1,84	pur	-
				l				

TABLEAU IV.

mesuré en lumière verte et en lumière rouge. Avec des notations analogues aux précédentes, on a :

$$v_e = rac{V/V'}{B/B'}, \quad r = rac{R/R'}{B/B'}.$$

TABLEAU V.

Éro	EMPLACEMENT	DATE	DURÉE	ORIEN-	2.0	r	C1	EL
MLW		nocturne.)	DES POSES	TATION	Ue		Nocturne.	Lunaire.
		1924						
16	Montpellier.	5-6 juil.	8 h	N. 50°	1,67	3,84	pur	pur
17	Mt-Salève (1).	31 —	4	SO. 30º	1,07	1,74	très clair (humidité)	clair
18	St-Geniez (BA.)	25 août	3 h 45 mn	E. 35°	1,82	2,63	p ur	pur
19		26 —	4 24		1, 59	[2, 57]		
20		30 —	5		1, 61	2,68	très clair	
21		1 ^{rr} sept.	$4 \ 30$	E. 50°	1,65	[3, 00]	pur	
22		2 _	4 18		1,41	2,69	·	
(1	(1) La pose sur le ciel lunaire a été faite à Saint-Geniez, en août.							

12. Interprétation des résultats. — Les nombres obtenus présentent, d'une nuit à l'autre, de larges différences. Elles peuvent résulter d'un changement de composition soit de la lumière du ciel nocturne, soit de la lumière du ciel lunaire. L'examen des clichés et des courbes de noircissement montre souvent sans ambiguïté d'où provient la variation. Par exemple le cliché n° 4 donne, pour les rapports b et j, des valeurs exceptionnellement faibles, et le cliché n° 6 une valeur très élevée du rapport j. Dans les deux cas c'est le ciel lunaire qui présentait une couleur anormale, caractérisée pour le cliché n° 4 par la faiblesse du violet et la grande intensité du jaune, et, inversement, pour le cliché n° 6 par l'excès de violet. D'une manière générale la couleur du ciel lunaire est plus variable que celle du ciel nocturne. Des changements de couleur de cette dernière sont cependant très visibles dans les deux cas suivants : la faiblesse des rapports b et j du cliché n° 8 parait bien résulter de la présence d'un excès de radiations violettes dans la lumière du ciel nocturne, la faiblesse des rapports v_e et r du cliché n° 17 d'un excès de radiations bleues.

Ces anomalies peuvent être rapprochées des changements de couleur observés visuellement par Lord Rayleigh [13]. Mais on peut aussi se demander si la sensibilité chromatique de la plaque ne peut pas être dans certains cas altérée par des changements d'état hygrométrique.

A égalité de brillance dans le violet, le ciel nocturne est plus riche que le ciel lunaire en radiations bleues et jaunes ; à égalité dans le bleu, il est plus riche en radiations vertes et surtout rouges. La lumière du ciel nocturne diffère ainsi profondément de la lumière diffusée par l'atmosphère éclairée par la Lune, et à plus forte raison par le Soleil; *le ciel étoilé n'est pas bleu*. En ramenant toutes les comparaisons à la lumière violette, on peut adopter les nombres suivants pour caractériser les rapports de la brillance du ciel nocturne à la brillance du ciel lunaire :

	4 300	4 700	$5 \ 350$	5 500	6 400
B/B'	1,00	1,05	1,70	2, 10	2,78

Mais les valeurs obtenues à travers les filtres vert et surtout jaune sont trop élevées pour caractériser le spectre continu du ciel nocturne, puisque la raie de l'aurore est transmise d'une manière très appréciable par ces deux écrans. On peut évaluer l'ordre de gran-

230

.

deur de la correction qu'il convient d'apporter au nombre relatif à l'écran jaune : la région transmise coïncide très sensiblement avec la partie du spectre continu utilisé dans l'étude de l'intensité de la raie de l'aurore. En septembre 1926, la raie produisait environ la moitié de l'éclairement photographique produit par cette région spectrale, et le rapport j était alors très voisin de la valeur moyenne adoptée (¹). Il faudrait donc diminuer d'environ un tiers le rapport trouvé dans le jaune, pour tenir compte de la raie brillante. Celle-ci joue un rôle moins important dans le cas de l'écran vert (associé à une plaque panchromatique) dont la transparence est idéjà réduite pour 5 577 Å. La correction peut être ici de l'ordre de 1/5. On aboutit ainsi aux nouvelles valeurs contenues dans la 2º colonne du Tableau VI.

Le ciel lunaire diffère d'ailleurs du ciel diurne de la même façon que la lumière diffusée par la Lune diffère de la lumière ravonnée par le Soleil. Edison Pettit a mesuré récemment par photographie les valeurs relatives du facteur de diffusion de la surface lunaire de 4 000 **-à 6 300 Å [14].** Ces données permettent de calculer des valeurs vraisemblables de ce que

serait le rapport <u>ciel nocturne</u> pour les longueurs d'onde précédentes. Les résultats se trouciel diurne

vent dans la 3^e colonne du même tableau.

Enfin, il est naturel de se demauder si la composition de la lumière du ciel nocturne, **qui** diffère si profondément de celle du ciel bleu, ne serait pas beaucoup plus voisine de «celle de la lumière solaire directe. Il faudrait pour s'en rendre compte pouvoir passer maintenant de la courbe d'énergie du ciel bleu à celle du Soleil lui-même, ce qui ne peut se faire **que** d'une manière très incertaine. Les nombres de la 4^e colonne dérivent de la loi en $1/\lambda^4$, -ceux de la 5° colonne proviennent de la courbe d'énergie donnée par Ives [15], enfin ceux de Ja 6° ont été calculés en admettant pour le ciel bleu, d'accord avec Priest [16], une température de couleur équivalente de 22 000°K (Priest donne 19 000 à 24 000° K). J'ai pris comme température de couleur équivalente du Soleil vu à travers l'atmosphère, 5 300°K.

Les trois résultats diffèrent beaucoup, mais il est visible, si indirecte et si incertaine **que soit la comparaison, que la couleur** du ciel nocturne se rapproche bien plus de celle du Soleil que de celle du ciel bleu. Toutefois, à égalité dans le vert et le jaune, il se pourrait «que la lumière du ciel nocturne l'emporte aux extrémités violette et rouge du spectre.

CIBL NOCTURNE						
Ciel Inneire Ciel diurne.			SOLEIL			
	Pettit.	Loi en J/λ^4 .	Ives.	Priest.		
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
1,00	1,15	0,81	0,99	0,85		
1,36	1,70	0, 71	0, 95	0, 82		
1,40	1,80	0,66	0, 92	0, 83		
2,78	4,10	0,83	1,48	1,40		
	Ciel lunaire. (2) 1,00 1,95 1,36 1,40 2,78	Ciel lunaire. Ciel diurne. Pettit. (2) (3) 1,00 1,00 1,95 1,45 1,36 1,70 1,40 1,80 2,78 4,10	CIEL NOCTURNE Ciel lunaire. Ciel diurne. Loi en J/λ^4 . (2) (3) (4) 1,00 1,00 1,00 1,35 1,15 0,81 1,36 1,70 0,71 1,40 1,80 0,66 2,78 4,10 0,83	CIEL NOCTURNE Ciel lunaire. Ciel diurne. Pettit. SOLEIL (2) (3) (4) (5) 1,00 1,00 1,00 1,00 1,05 1,15 0,81 0,99 1,36 1,70 0,71 0,95 1,40 1,80 0,66 0,92 2,78 4,10 0,83 1,48		

TABLEAU VI.

13. Comparaison aux étoiles. — J'ai comparé la lumière du ciel nocturne à celles de quelques étoiles des différents types spectraux, par la méthode photographique de M. Ch. Fabry [17,2]. J'avais disposé contre l'objectif à long foyer deux ou trois filtres colorés coupés transversalement par les bandes d'un échelon absorbant. Il suffisait alors de faire deux poses de même durée, l'une sur l'étoile, avec un diaphragme d'ouverture réduite dans le plan focal, l'autre sur le ciel, avec un diaphragme de grande ouverture et en retirant

(1) Voisin de 1,90 au zénith. Moyenne adoptée 2,10 pour $Z = 43^{\circ}$. Le rapport croit avec la distance zénithale (Voir paragraphe 14).

Nº 6.

JOURNAL DE PHYSIQUE

l'échelon absorbant. Le tableau VII donne les résultats des comparaisons effectuées surplaques orthochromatiques à travers les filtres violet, bleu et jaune précédémment décrits. Les poses, qui duraient une heure trente minutes, ont été faites à Montpellier de mai à julllet 1924. Les valeurs numériques obtenues ne comportent pas une grande précision, car la distance zénithale des étoiles variait parfois beaucoup durant la pose et l'absorption atmosphérique intervenait d'une manière complexe. Il est visible néanmoins que c'est à Capella, étoile du type solaire, que ressemble le plus la lumière globale du ciel nocturne, raie de l'aurore comprise.

TABLEAU VII.

NUMÉRO	ÉTOILE	TYPE SPECTRAL	a égalité dans le bleu Rappo rt <mark>ciel, p</mark>ôle .		
			En violet.	En jaune.	
1 2 3 4	γ Cassiopeiae α Virginis (Spica) α Aquilae (Altaïr) α I. Mi (Polaire)	$ \begin{array}{c} B_0 p \\ B_2 \\ A_5 \\ F_2 \end{array} $	0, 89 0, 98	2,52 1,26 1,32 1,11	
5 6	α Aurigae (Capella) α Bootis (Arcturus)	$egin{array}{c} & & & & & \\ & & G_0 & & & & \\ & & & K_0 & & & & \\ & & & & & & & \end{pmatrix}$	1,00 1,26	1,10 0,80	

J'ai fait d'autre part quelques mesures de la brillance du ciel nocturne au voisinage du pôle, par comparaison à l'étoile polaire, sur plaques orthochromatiques, à travers l'écran jaune Wratten n°9. Les résultats sont donnés dans le tableau VIII.

TABLEAU VIII.	
---------------	--

NUMÉRO	BMPLACEMENT	DATE	DURÉE DES POSES	µ Photovisuel	GIEL
1 2 3 4 5 6 7 8	Saint-Geniez. Montpellier. Courbons. L'Isle-sur-Serein. 	2 sept. 1924 20 mars 1925 22 avril 1925 24 — 12 sept. 1925 8 aoùt 1926 10 — 10 — Moyen	4 h 30 mn 1 30 2 2 1 30 1 20 1 20 1 20 1 20 ne	4, 01 3, 81 3 , 59 3, 79 3, 98 3, 65 3, 76 3, 76 3, 92 3, 84	pur un peu brumeux pur

Par ciel pur la magnitude photovisuelle de 1° carré du ciel est voisine de 3,85, alors que sa magnitude photographique est voisine de 4,35 [2]. Le color-index du ciel nocturne vaut donc à peu près + 0,5 comme celui de l'étoile polaire. D'ailleurs les mesures photovisuelles n° 3 et n° 5 ont été suivies immédiatement de mesures photographiques et ont donné respectivement, pour le color-index du ciel nocturne :

+0,55 et +0,46 (¹).

En comparant les intensités relatives des radiations violettes et jaunes, on trouve donc

(1) Le color-index de la Polaire est légèrement variable. Si l'on cherche à tenir compte de ses variations, les nombres précédents deviennent + 0,59 et + 0,50.

232

comme précédemment que la couleur du rayonnement complexe provenant du ciel nocturne (raie de l'aurore et spectre continu) est très voisine de celle d'une étoile du type F_s . (ou G_0).

Mais si, pour ne retenir que l'effet produit par le spectre continu, on ramène encore aux deux tiers de la valeur observée la brillance du ciel mesurée à travers l'écran jaune, on trouve cette fois comme magnitude photovisuelle de 1° carré 4,31 (0,133 Polaire). Comparons aux résultats des mesures visuelles et photographiques faites par comparaison à l'étoile polaire [2]; on a trouvé en moyenne pour 1° carré du ciel au voisinage du pôle:

Enfin une mesure de brillance faite sur plaque panchromatique à travers le filtre orangé Wratten nº 15 (transparent de 0,53 μ à l'extrême rouge), a donné 0,27 polaire par degré carré (pose 3^h 30^m). Les mesures photographiques sur plaques ordinaires qui avaient immédiatement précédé et suivi la longue pose sur le ciel avaient donné respectivement 0,220 et 0,245 polaire. Bien qu'elle soit transmise par l'écran orangé, la raie de l'aurore joue ici un rôle peu important en raison de la grande sensibilité de la plaque dans la région rouge. Il semble y avoir là une nouvelle indication de la prédominance des radiations rouges dans la lumière du ciel nocturne comparée à celle du Soleil.

En résumé, il résulte de l'ensemble des observations que, si l'on fait abstraction de la raie de l'aurore, le rayonnement du ciel nocturne diffère profondément de celui du ciel bleu. Il se rapprocherait davantage de celui du Soleil, dont il différerait pourtant, à égalité dans les régions verte et jaune, par une intensité notablement supérieure dans la région violette et peut-être dans la région rouge.

14. Couleur du ciel près de l'horizon. — L'étude précédente concerne la région du ciel voisine du pôle, vers 45° du zénith. La brillance mesurée visuellement augmente avec la distance zénithale; par photographie, l'augmentation est moins prononcée. Le ciel doit donc se montrer plus riche en radiations jaunes à mesure qu'on l'examine plus près de l'horizon. Voici par exemple les rapports de la brillance à 14° de l'horizon, vers le nord à la brillance au zénith, mesurés simultanément à travers les écrans bleu et jaune, sur plaque orthochromatique :

En bleu : 1,32.

En jaune : 2,04 (Montpellier, 16 mars 1925).

A égalité dans le bleu, le rapport était de 1,55 pour les radiations jaunes (raie de l'aurore comprise), soit une augmentation de color-index de + 0,475).

V. - POLARISATION.

15. Dispositif pour l'étude de la polarisation. — En présence des résultats peu concordants obtenus par Lord Rayleigh et par H.-D. Babcock, il paraissait nécessaire de substituer aux observations qualitatives une étude quantitative de la polarisation.

J'ai employé le dispositif représenté schématiquement figure 6. L'objectif très lumineux O projette sur la plaque P, à travers le prisme biréfringent B, deux images séparées, mais très voisines, de l'ouverture circulaire C. Si la lumière est partiellement polarisée dans le plan de section principale du biréfringent (ou dans un plan rectangulaire), les densités D_1 et D_2 des deux images seront différentes. Elles correspondent en effet aux éclaire-

233 :

⁽²⁾ La raie de l'aurore joue ici un rôle beaucoup moins important que dans le cas des observations photographiques en lumière jaune. La correction serait inférieure à 0,01 (Voir paragraphe 9).

ments inégaux E_1 et E_2 . Connaissant la courbe de noircissement de la plaque, on aura immédiatement la *dépolarisation* ρ de la lumière incidente

$$\rho = \frac{E_2}{E_1},$$

d'où, si l'on veut, la proportion de lumière polarisée

$$p = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}.$$

La graduation de la plaque s'obtient au moyen d'une seule pose auxiliaire, de mème durée que la pose nocturne, faite sur une source étendue de brillance peu supérieure à celle du ciel. A cet effet, on place contre l'ouverture C un écran absorbant approximativement neutre, comprenant 3 secteurs de densités différentes (¹).



Fig. 6. — Schéma de l'appareil employé pour l'étude de la polarisation. Couverture circulaire, B prisme biréfringent, O objectif, P plaque.

Ce dispositif, dont la qualité essentielle est d'absorber peu de lumière, permet de **déceler** de faibles polarisations. On a en effet, en désignant par γ le facteur de contraste :

$$D_1 - D_2 = \gamma \log \frac{E_1}{E_2} = \gamma \operatorname{colog} \rho.$$

Par des mesures soignées au microphotomètre, on peut mesurer les densités D_1 et D_2 à **0,005** près. La différence $D_1 - D_2$ peut donc être connue à 0,01 près. Quant au facteur γ , il est resté compris dans mes expériences entre 1,5 et 2,0. Dans le cas le plus défavorable ($\gamma = 1,5$), on pourra encore mettre en évidence une dépolarisation telle que

$$colog \, \rho = 0,91/1,5,$$

 $\rho = 0,984 \quad \text{et} \quad p = 1/120.$

J'ai employé comme biréfringent un gros prisme de spath achromatisé par deux prismes de verre (non trempé); il présente l'inconvénient de donner en lumière naturelle deux images inégalement éclairées. Le faisceau ordinaire, légèrement dévié et dispersé, donne une image plus faible. Il a donc fallu mesurer avec précision au laboratoire le rapport des éclairements des deux images en lumière naturelle (ou *dissymétrie* du biréfringent). Les mesures, faites par photographie sur l'appareil lui-mème, m'ont donné 0,91 (²). A titre de vérification, les mesures ont été faites sur le ciel dans deux positions rectangulaires, de façon à déterminer à nouveau, sur chaque cliché, la *dissymétrie* du biréfringent. Tous les nombres obtenus confirment le précédent.

16. Résultats des observations. — Il s'agissait d'établir par des mesures photométriques précises l'existence ou l'absence d'une polarisation partielle de la lumière du ciel nocturne, polarisation qui pouvait être liée à la position du Soleil.

La durée des poses étant d'au moins trente minutes, il aurait été impraticable de **recher**cher la position du plan de polarisation en donnant successivement au biréfringent

(²) Voir la méthode utilisée [1], page 120.

d'où :

⁽¹⁾ Voir note 1, paragraphe 2. La pose auxiliaire était faite au début sur une région brillante de la Jumière zodiacale ou sur le ciel éclairé par la Lune. J'ai vérifié plus tard que la présence de la lame absorbante ne modifiait pas la polarisation de la lumière incidente ; plusieurs clichés ont alors été faits en laissant la lame en permanence sur le diaphragme C ; chacune des poses fournit ainsi une courbe d'étalonnage, mais leur durée doit être portée de 30 à 45 minutes.

des orientations différentes. J'ai orienté l'appareil de façon permanente dans le méridien, vers le nord, la section principale du biréfringent étant verticale ou horizontale, de manière à mesurer constamment le rapport V/H des éclairements produits par la vibration verticale V et horizontale H. Si le plan de polarisation passe à chaque instant par le Soleil, ce rapport doit varier au cours de la nuit et passer par un minimum à minuit vrai; on s'en apercevra en faisant une série de poses successives. Dans cette hypothèse, il est facile de calculer la dépolarisation ρ à partir du rapport V/H mesuré pour une position quelconque du Soleil. En désignant par Φ l'angle formé avec le méridien par le plan contenant le Soleil et la ligne de visée, on a évidemment :

$$\rho = \frac{\frac{V}{H} - \mathrm{tg}^2 \Phi}{1 - \frac{V}{H} \mathrm{tg}^2 \Phi}.$$
(1)

Un calcul facile de trigonométrie sphérique donne l'angle Φ en même temps que la distance angulaire d du Soleil à la région visée, à partir de l'heure de l'observation et de la distance zénithale de la région visée qu'on lit sur le cercle du théodolite portant l'appareil.

DATE	не иве (Т. Ц.)	ζ _R	d	Φ	<i>V/H</i>	þ
Montpellier.						
30 mai —	0 h 40 mn 1 10	76° 43°	40°4′ 71°31′	$^{+\ 21^{\circ}19'}_{+\ 21^{\circ}37'}$	0,955 0,938	0,939 0,916
31 mai —	1 17 1 48	64°	52°15′ 52°47′	$+ \frac{28 \circ 13'}{- 37 \circ 32'}$	0,9 35 0,9 4 2	0,934 0,932
19-20 juin 	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	58°4	54° 47′	$-\frac{15^{\circ}45'}{0^{\circ}15'} + \frac{12^{\circ}45'}{+25^{\circ}}$	0,943 0,935 0,939 0,950	0,934 0,935 0,933 0,923
20-21 juin	11 30 0 18	58°4	54°46′	$-3^{\circ}45'$ + 8°00'	0,925 0,928	0,925 0,925
21 juin	11 50	58"	55°3′	— 0°15′	0,923	0,923
24 juin	10 6 10 50	?			0,985 0,966	
Courbons.						
18 septembre	$\begin{array}{ccc} 9 & 44 \\ 11 & 28 \\ 3 & 21 \end{array}$	50° 2	84°5′	$\begin{vmatrix} -26^{\circ}00 \\ + 4^{\circ}00 \\ + 58^{\circ}30' \end{vmatrix}$	0,905 0,935 1,033	0,943 0,935 0,934
24-25 septembre 	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	52•	83°	$ \begin{array}{c} - 9^{\circ}48' \\ + 2^{\circ}31' \\ + 13^{\circ}48' \\ + 26^{\circ}6' \\ + 38^{\circ}37' \\ + 51^{\circ}3' \end{array} $	0,965 0,960 0,968 0,970 0,984 1,009	0,963 0,960 0,964 0,956 0,964 0,958

TABLEAU IX.

Le tableau IX donne les résultats des observations faites à Montpellier et dans les Basses-Alpes, de mai à septembre 1925. Les valeurs de V/H et celles de ρ sont données avec trois décimales, bien que la précision des mesures ne permette de garantir que les deux premières.

L'examen de ces nombres conduit aux conclusions suivantes :

1° Le rapport V/H des éclairements produits par les vibrations verticale et horizontale varie au cours de la nuit et passe par un minimum inférieur à 1 aux environs de minuit vrai. La lumière est donc partiellement polarisée et le plan de polarisation est lié à la position du Soleil.

2º Les valeurs obtenues pour p au cours d'une même nuit, sur une même région du



Fig. 7. — Polarisation de la lumière du ciel nocturne dans le méridien. Mesure de V/H dans la nuit du 24 au 25 septembre 1925 et comparaison à la courbe théorique.

ciel, par application de la formule $({}^{1})$, diffèrent entre elles de quantités inférieures aux erreurs de mesure. Le plan de polarisation passe donc constamment par le Soleil. On arrive naturellement au même résultat en comparant aux valeurs de V/H mesurées les valeurs calculées par la formule :

$$\frac{V}{H} = \frac{\rho + \mathrm{tg}^2 \Phi}{1 + \rho \mathrm{tg}^2 \Phi},$$

en prenant pour ρ le nombre obtenu à minuit. Cette comparaison est faite pour les trois séries de mesures les plus complètes dans le tableau X ; les résultats d'une série sont représentés graphiquement figure 7. Les deux séries de Courbons sont particulièrement probantes : la durée plus longue des nuits a permis d'atteindre des valeurs de l'angle Φ supérieures à 45°. Le rapport V/H est alors devenu supérieur à 1, comme il était prévu.

		,	237

Montpellier, 19-20 juin 1925.		COURBONS, 18-19 septembre 1925.			COURBONS, 24-25 septembre 1925.						
Φ	V/I calculé	H observé	c — o	Φ	V/. calculé	H observé	c — o	Ф	V/I calculé	H observé	c — o
- 15°45′ + 0°15′ + 12°45′ + 25°	0,942 (0,935) 0,944 0,957	0,943 0,935 0,939 0,950	-0,001 +0,002 +0,007	- 26°00 + 1°00 + 58°30′	0,959 (0,935) 1,031	0,965 0,935 1,033	0,006 0,002	- 9°48' - 2°31' + 14°13' + 26°6' + 38° + 51°3'	0,962 (0,960) 0,964 0,975 0,991 1,008	0,965 0,960 0,968 0,970 0,984 1,009	-0,003 -0,004 +0,005 +0,007 -0,001

TABLEAU X.

3° Les valeurs obtenues ρ pour à diverses époques et pour différentes régions du ciel sont assez voisines les unes des autres (valeurs extrêmes 0,916 et 0,960 ou en proportions de lumière polarisée 0,043 et 0,021). Les mesures ne sont pas assez nombreuses pour permettre de rechercher les facteurs qui influent sur la grandeur de la dépolarisation. L'hypothèse la plus simple qu'on puisse envisager est que ρ soit uniquement fonction de la



Fig. 8. — Polarisation de la lumière du ciel nocturne dans le méridien. Valeurs de la dépolarisation ρ obtenues à différentes distances angulaires d du Soleil.

distance angulaire au Soleil. La figure 8 montre comment se placent les points représentant les mesures quand on porte d en abscisses et ρ en ordonnées.

VI. — Lumière du cibl nocturne et lumière zodiacale.

17. Spectre et couleur de la lumière zodiacale. — Il est intéressant de rapprocher des résultats précédents les résultats d'observations analogues faites sur la lumière zodiacale.

Le spectre de la lumière zodiacale a été photographié par Fath en 1907 et en 1909 [18]. Il a observé avec un appareil de verre peu dispersif un spectre continu montrant les raies G et H-K (ces dernières non séparées). J'ai répété ces observations de décembre à mars 1924 avec le spectrographe de quartz. La présence de Vénus dans la lumière zodiacale m'a obligé à projeter une image du ciel sur la fente du spectrographe et à orienter celui-ci de manière que l'image de la planète se fasse constamment en dehors de la fente. Ne disposant pas d'une lentille quartz-fluorine d'ouverture relative assez grande, je me suis servi d'une lentille achromatique en verre et n'ai pu, par suite, profiter complètement de la transparence du quartz. Les deux clichés obtenus montrent un faible spectre continu, s'étendant de 4 800 à 3 600 Å, sillonné des mêmes raies d'absorption que le spectre du ciel nocturne. Dans le jaune on ne voit que la raie de l'aurore. Sur une des plaques, un spectre du ciel nocturne, à la même distance du zénith, a été enregistré avec la même largeur de fente et le même temps de pose. Il ne se distingue du spectre de la lumière zodiacale que par son intensité un peu plus faible.

Les observations visuelles n'ont donné que des renseignements contradictoires sur la couleur de la lumière zodiacale [49], mais la question pourrait être étudiée facilement par photographie. D'après les quelques observations que j'ai pu faire, le rapport de la brillance de la lumière zodiacale à celle du ciel nocturne, à la même distance du zénith, paraît être approximativement le même à travers les filtres bleu et jaune. Ainsi j'ai trouvé le 16 mars 1925 les rapports 1,76 à travers l'écran bleu et 1,72 à travers l'écran jaune (distance zénithale 76°).

18. Polarisation de la lumière zodiacale. — J'ai étudié en 1924 et surtout en 1925 la polarisation de la lumière zodiacale avec le dispositif décrit pour la lumière du ciel nocturne. Je me bornerai à reproduire ici la courbe figurant la dépolarisation en fonction de la distance angulaire du Soleil (fig 9), pour des régions très voisines de l'écliptique. On voit



Fig. 9. — Polarisation de la lumière zodiacale au voisinage de l'éclictique. Valeurs de la dépolarisation obtenues à différentes distances angulaires d du Soleil. En haut courbe correspondante pour le ciel nocturne, à la même échelle. $\times 1924$, $\bigcirc 1925$.

que la proportion de lumière polarisée est beaucoup plus grande que dans le cas du ciel nocturne : elle atteint 0,43 à 60° du Soleil, résultat en bon accord avec les anciennes observations visuelles de Wright, qui, en 1874, estimait la proportion de lumière polarisée voisine de 0,15 [20].

Les courbes figurant la dépolarisation de la lumière zodiacale et de la lumière du ciel nocturne ont approximativement la même allure, mais, dans le cas de la lumière zodiacale, la polarisation est plus variable d'un jour à l'autre comme le montre la dispersion des points.

238

J

239

Les observations sont toujours faites assez près de l'horizon et les variations de transparence de l'atmosphère, souvent souillée de brume, sont probablement responsables de ces écarts.

VII. - CONCLUSIONS.

19. Les résultats des observations rassemblées dans cet article peuvent être résumés ainsi :

1º Le spectre continu du ciel nocturne montre une étroite ressemblance avec le spectre solaire (de 4 800 à 3 000 Å).

2º La raie verte de l'aurore produit sur une plaque orthochromatique les 6/10 de l'éclairement produit par le spectre continu de 4 960 à 6 000 Å. Le rapport des énergies correspondantes serait de l'ordre de 0,3 à 0.4, et, dans le cas des observations visuelles, la raie verte expliquerait un peu moins d'un dixième de la brillance totale (à 45° environ du zénith).

3º Abstraction faite de la raie brillante, la couleur du ciel nocturne est beaucoup plus voisine de celle du Soleil que de celle du ciel bleu. Mais, à égalité dans les régions vertes et jaunes, la lumière nocturne paraît plus riche que la lumière solaire en radiations violettes et rouges.

4º Enfin la lumière du ciel est faiblement polarisée et le plan de polarisation passe à chaque instant par le Soleil.

Tels sont les faits dont on devra tenir compte pour rechercher l'origine de la lumière du ciel. On sait aussi que la lumière qui parvient au sol provient en partie de la diffusion atmosphérique [1, 2] et celle-ci paraît susceptible d'expliquer l'intensité plus grande des radiations violettes dans la lumière du ciel comparée à la lumière solaire.

Au-dessus des couches diffusantes les étoiles faibles produiraient environ les 3/10 de la brillance totale. Elles sont en majorité des types F, G et K, et l'ensemble doit donner un spectre solaire (').

D'autre part les mesures photométriques, confirmant celles de Van Rhijn, conduisent à admettre que la lumière zodiacale s'étend sur le ciel entier [1, 2]. Ni les observations spectroscopiques, ni l'étude de la polarisation ne contredisent cette hypothèse. Mais si l'on compare les fractions de lumière polarisée dans le plan de l'écliptique et dans un plan rectangulaire, il semble que l'extension de la lumière zodiacale ne puisse expliquer qu'une assez. faible partie de la brillance du ciel. En supposant que la faible polarisation du ciel nocturne soit entièrement d'origine zodiacale, et que la lumière d'origine zodiacale contienne à peu près la mème fraction de lumière polarisée dans les deux plans, on trouve qu'au-dessus des couches diffusantes de l'atmosphère, 15 pour 100 de la lumière du ciel pourrait être attribués à la lumière zodiacale.

On peut donc affirmer que la luminosité du ciel nocturne est un phénomène complexe, dans lequel interviennent à la fois la lumière des étoiles faibles, la lumière zodiacale, la diffusion atmosphérique et la raie brillante des aurores polaires. Mais, tout compte fait, il semble que l'origine de la moitié environ de la lumière du ciel reste à trouver.

Les résultats relatifs à la couleur et à la polarisation de la lumière du ciel ne permettent plus d'envisager une diffusion de la lumière solaire par les molécules d'un gaz très raréfié répandu dans l'espace. Des électrons libres, qui diffusent beaucoup plus de lumière que les molécules, permettraient d'échapper à l'objection relative à la couleur du ciel. Mais pour expliquer la faiblesse de la polarisation, il faudrait admettre que le milieu diffusant s'étende extrêmement loin, de façon que la diffusion de la lumière stellaire puisse être prépondédérante. La diffusion de la lumière par les météorites de l'espace, telle que l'a envisagé M. Salet [23], permettrait aussi de rendre compte des faits d'observation ; mais, l'extension

(1) Le spectre de la Voie Lactée, photographié par Fath, est du type solaire [21]. Voir aussi les recherches de Seares sur le color-index moyen des étoiles de chaque grandeur [22].

Nº 6.

Nº 6.

du milieu diffusant, quel qu'il soit, implique nécessairement l'existence d'une absorption
de la lumière dans l'espace, absorption qui deviendrait assez importante pour les étoiles les plus lointaines.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DUFAY (J). - Recherches sur la lumière du ciel nocturne. Bull. Obs. Lyon, t. 10 (1928), p. 1-188.

[2] DUFAY (J.) — La brillance du ciel nocturne et ses variations. J. phys., série VI, t. 9 (1928), p. 390. [3] SLIPHER (V.-M.). — On the general Auroral Illumination of the Sky and the Wave Length of the hief aurora Line. Astroph J., t. 49 (1919), p. 266.

[4] LORD RAYLEIGH. — The auroral line in the spectrum of the night Sky. Proc. roy. Soc., A, t. 100 (1922), p. 367.

[5] LORD RAYLEIGH — The colour of the light from the night Sky. Proc. roy. Soc., A, t. 99 (1921), p. 10.

[6] STRUTT (R -J.) (LORD RAYLEIGH). — Polarization of the night Sky. Astroph. J., t. 50 (1919), p. 227.

[7] BABCOCK (H -D.). — Polarization of the night Sky. Astroph. J., t. 50 (1919), p. 228.

[8] FABRY (CH.), BUISSON (H.) et BOURGET (H.). — Application des interférences à l'étude de la nébuleuse d'Orion. J. Phys., série V, t. 4 (1914), p. 357.

[⁰] LORD RAYLEIGH. — Further Observations of the Spectrum of the night Sky. Proc. roy. Soc., A, t. 103 (1923), p. 43.

^[10] VOLKRINGER (H.). — Sur le spectre continu du mercure. C. R., t. 183 (1926), p. 780.

[11] NUTTING (P.-G.). — Chart of Standards Committee on visual Sensitometry. J. Opt. Soc. Amer., t. 4 (1928), p. 55.

^[12] LORD RAYLEGER. — The Light of the night Sky : Its Intensity Variations when Analysed by Colours Filters. *Proc. roy. Soc.*, A, t. **106** (1924), p. 117.

^[13] LORD RAYLEIGH, Ibid. III. Proc. roy. Soc., A, t. 119 (1928), p. 14.

[14] PETTIT (E.). — Energy Curve of the Lunar Spectrum, in the visual Region. Publ. Astron. Soc. Pac., t. 38 (1926), p. 242.

[15] Ives (H.-E.) — Color Measurements of Illuminants. Trans. Illum. Eng. Soc., t. 5 (1910), p 489.

[¹⁶] PRIEST (I.-G.). — The Colorimetry and Photometry of Daylight and Incandescent Illuminents by the Method of rotatory Dispersion J. Opt. Soc. Amer., t. 7 (1923), p. 1175, The spectral Distribution of Energy Required to Evoque the gray Sensation. Bur. Stand Sc. Pap. (1921), N° 447.

[17] FABRY (Ch.). - L'éclat intrinsèque du ciel étoilé. C. R., t. 150 (1910), p. 272.

^[18] FATH (E.-A.). — The Spectrum of the zodiacal Light. Lick Obs. Bull (1909). Nº 165.

^[19] FESSENKOFF (B). — La lumière zodiacale. Ann. Obs. Paris, Mémoires, t. 30 (1914).

[20] WRIGHT (A.-W). — On the Polarization of the zodiacal Light. Amer. J. Sc., série III, t. 7 (1874), p. 451.

[21] FATH (E.-A.). — The integrated Spectrum of the Milky Way. Astroph. J., t. 36 (1942), p. 362.

[²²] SEARES (F.-H.). — The mean Color Index of Stars of different apparent Magnitudes. Astroph. J., t. 61 (1925), p. 414.

[²³] SALET (P.). — Sur l'absorption et la diffusion de la lumière dans l'espace intersidéral. C. R., t. 152 (1911), p. 994.

240