

Spectrographie d'amateur

par M. LE FUR

Depuis les philosophes grecs jusqu'à Newton et Maxwell, l'esprit humain a été fasciné et intrigué par la lumière. Nos élèves, de tous âges, restent très intéressés par tous les phénomènes lumineux et colorés que nous étudions en classe. Les nombreux professeurs de Physique - photographes amateurs qui exercent dans nos Lycées et Collèges doivent en profiter : un appareil photographique réflex, équipé d'un objectif classique (50 mm ou 35 mm de distance focale), allié à un réseau (300 traits par mm ou 600 traits par mm), va nous permettre de réaliser quelques expériences fondamentales :

- identification d'éléments chimiques présents dans une source lumineuse par spectrographie,
- étude de la série de Balmer du spectre de l'hydrogène, détermination de la constante de Rydberg,
- application à l'étude spectrale de la lumière d'une étoile : Le Soleil.

1. «DIS-MOI QUEL EST TON SPECTRE, JE TE DIRAI QUI TU ES !»

L'objectif est ici de montrer qu'un spectre de raies est une «signature» de l'élément chimique. (programmes de 4^e et de Terminale C ou D). Le cours pourra débuter par la présentation de deux expériences classiques de projection de spectres : celui du mercure, en émission, grâce à une lampe à vapeur de mercure ; et enfin celui du sodium, en émission puis en absorption.

Mais pourrait-on trouver, ailleurs qu'au laboratoire, des sources lumineuses contenant du mercure ou du sodium ? La réponse est : oui, dans la rue. Avec un groupe d'élèves de 1^{ère} A, nous avons photographié des lampadaires urbains à travers un réseau de 300 traits par mm placé devant un objectif de 50 mm (figure 1).

Sur ce cliché on distingue, à gauche, 3 lampes d'éclairage urbain (qui correspondent à l'ordre 0). Par effet de perspective, elles semblent

proches les unes des autres car le photographe était dans l'axe de la rue. La plus «proche» émet une lumière blanchâtre (celle en haut à gauche) : c'est une lampe au Mercure. Les deux plus éloignées, donc moins lumineuses, luisent d'une teinte jaunâtre : nous observons deux sources lumineuses au sodium.

A leur droite, apparaissent leurs spectres d'ordres 1 et 2. Ceux d'ordre 1 permettent de visualiser l'intensité de la lumière émise en fonction de la longueur d'onde. Grâce à eux on comprend pourquoi la lumière de la lampe au Mercure apparaît blanche puisque la lumière émise est intense dans le bleu et le jaune-orange. Alors que pour les deux autres, les composantes jaune et rouge du spectre dominant et donnent un aspect global orangé.

L'étude qualitative de l'ordre 2 permet de reconnaître les quatre raies en émission du mercure pour la première lampe, et celle en absorption du sodium pour les deux autres. Les élèves font le lien avec les spectres observés en classe...

Une étude quantitative relative des longueurs d'onde permet de confirmer rapidement «l'impression» précédente (en Terminale seulement).

Soit d la distance entre la source et la raie de longueur d'onde théorique λ . Calculons λ/d en partant de la droite vers la gauche, pour la lampe au mercure (figure 2).

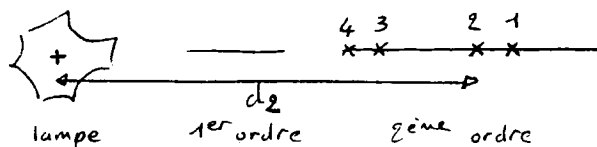


Figure 2

raie	1	2	3	4
$\lambda_{\text{théorique}} \text{ (nm)}$	579	546	436	405
$1 \lambda/d_i \text{ (nm/mm)}$	5,36	5,33	5,32	5,29

On a donc bien $\frac{\lambda}{d} \approx \text{constante} = 5,33$

Le spectre observé est donc bien celui du mercure.

Pour finir, étudions le spectre d'ordre 2 de la lampe au sodium. Choisissons le plus contrasté, c'est-à-dire la plus bas à droite de la figure 1. Calculons la longueur d'onde de la raie en absorption :

$$\lambda = \frac{\lambda}{d} \times \text{distance}(\text{source}, \text{raie}) \quad \lambda \approx 581 \text{ nm}$$

or le doublet du sodium se situe autour de 589 nm. L'écart est donc de moins de 2%. La raie observée est celle du sodium.

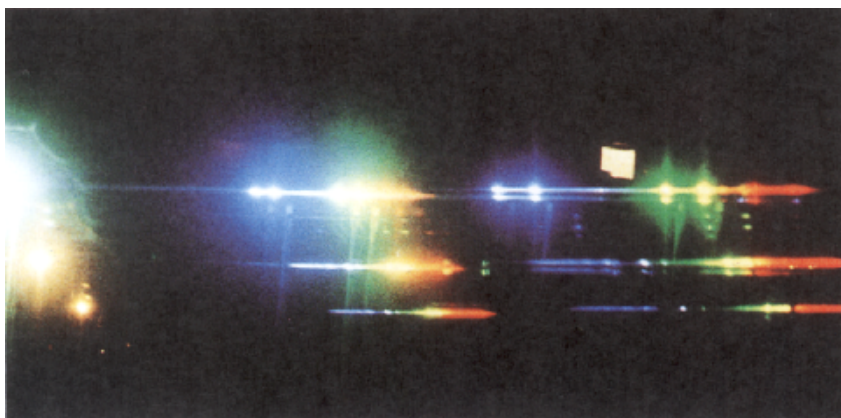


Figure 1 : Pose 10 secondes sur pellicule Ektachrome Kodak 400 Asa.

2. ÉTUDE DE L'ÉMISSION DE LUMIÈRE PAR L'ATOME D'HYDROGÈNE EXCITÉ

Ceci pourrait constituer un titre de paragraphe du cours. Proposons-nous de commencer ce chapitre par l'observation, à travers un réseau, de la lumière émise par un tube de Geissler.

(En Collège, où il est rarissime de disposer de ce matériel, on peut l'emprunter à un lycée voisin le temps de réaliser un cliché ou de le montrer à une classe de 4^e. Une observation de document imprimé peut aussi suffire à la poursuite du travail (III)).

a - observation visuelle par les élèves :

Le tube spectral contenant l'hydrogène excité est sur la paillasse du professeur. Un ou plusieurs réseaux circulent dans la classe : regardant au travers (par transmission), l'élève apercevra directement

le spectre de raies superposé à un léger fond «continu», si le réseau est suffisamment dispersif (300 à 1200 traits/mm) et si la lampe spectrale est assez fine (cas général). Le maître pourra alors projeter une diapositive du spectre ou faire passer sur les tables des agrandissements d'une photographie de celui-ci.

b - obtention d'un cliché du spectre :

Les conditions de réalisation d'une photographie correcte sont liées :

- à la relation de dispersion du réseau :

$$\sin \theta = n k \lambda \quad (1)$$

où n est le nombre de traits par mètre

k l'ordre du spectre

λ la longueur d'onde en mètre

et θ l'angle de déviation

- à la distance focale de l'objectif de l'appareil, notée f ,
- à la sensibilité de la pellicule.

Le schéma du montage est le suivant :

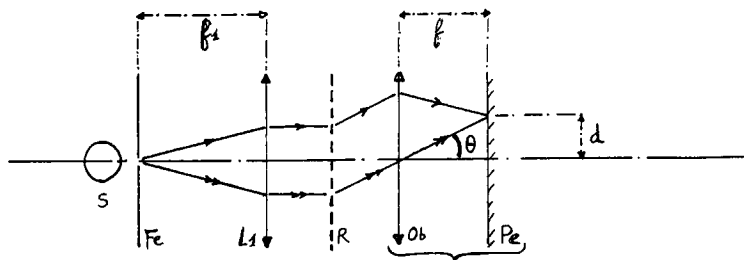


Figure 3

S : tube de Geissler

Fe : Fente

L_1 : lentille de distance focale $f_1 = 125$ mm, permettant d'envoyer un faisceau de lumière parallèle sur le réseau (L_1 est positionnée par rapport à Fe par autocollimation).

R : réseau 300 traits par mm.

Ob : objectif de l'appareil photographique de focale $f = 52$ mm, diaphragme ouvert au maximum : 2,8 réglé sur l'infini.

Pe : pellicule HP5 Ilford développée à 400 ASA.

Pour que la luminosité de l'image soit optimale, il faut diriger l'axe optique de l'appareil photographique parallèlement à la direction du spectre du 1^{er} ordre qui sera celui utilisé. On tourne donc l'appareil d'un angle α par rapport à l'axe du montage (figure 4).

Calcul de α : $\sin \alpha = n \lambda_{\text{moyen}}$

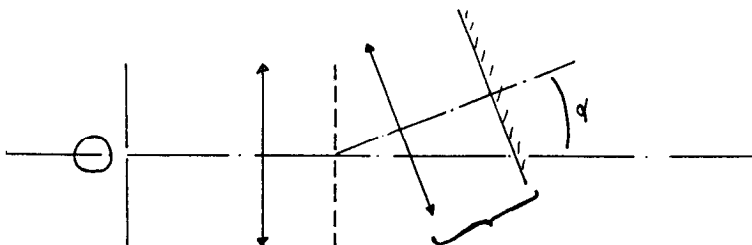


Figure 4

Ici

$$\sin \alpha \approx 300 \cdot 10^3 \times 0,610^{-6} = 0,18$$

$$\alpha \approx 10,4^\circ$$

c - Étude quantitative de la photographie : (en Terminale)

Pour le positif étudié, l'agrandissement utilisé a été de 9,39 fois. Montrons que la position des raies par rapport à l'image de la fente (ordre 0) dépend de la longueur d'onde : on raisonnera dans le cas de la Figure 3, l'autre étant identique.

Si d est la distance entre la raie et l'image de la fente sur la pellicule, on a : $d = f \cdot \tan \theta$.

Or $\sin \theta \approx \tan \theta$ à condition que θ soit petit (valable si le réseau est peu dispersif et si l'on choisit le premier ordre). Dans l'exemple étudié la condition est vérifiée à mieux que 3%.

d'où $d \approx f \sin \theta \approx f n \lambda$

Donc sur le tirage positif, agrandi K fois, on a :

$$d' \approx K f n \lambda$$

(2)

où d' est la distance réelle (raie, image de la fente).

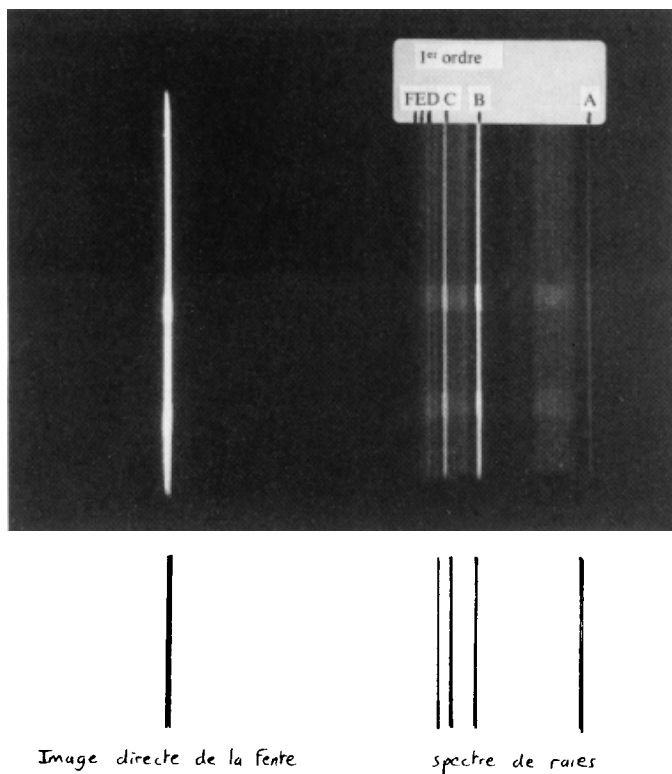


Figure 5 : Spectre de la lumière émise par le tube de Geissler contenant de l'hydrogène.

Pellicule HP5 Ilford pose 14 secondes.

Avec les élèves, on admettra soit la relation (1), soit directement (2) (sauf en Terminale).

Nous voilà donc prêts à mesurer les longueurs d'onde des quatre raies les plus intenses du spectre de l'hydrogène. Compte-tenu de la courbe sensibilité-longueur d'onde de la pellicule HP5 Ilford (figure 6), ce sont aussi les plus brillantes sur le papier photographique (figure 5). Elles sont notées A. B. C, D.

Mesurons donc λ_A , λ_B , λ_C et λ_D :

raie	d' (n)	$\lambda = d'/kfn$ (m)
A	$9,92 \cdot 10^{-2}$	$6,77 \cdot 10^{-7}$
B	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
C	$6,52 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-7}$
D	$6,15 \cdot 10^{-2}$	$4,20 \cdot 10^{-7}$

Ces mesures absolues de longueurs d'onde dépendent de l'exactitude des valeurs de k , f et n . (La valeur de f indiquée sur l'objectif n'est pas rigoureusement exacte : ici $f_{\text{indiquée}} = 50 \text{ mm}$; en réalité $f \approx 52 \text{ mm}$).

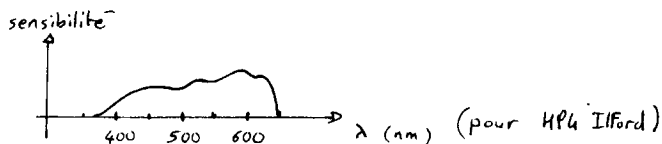


Figure 6 : Allure de la courbe sensibilité en fonction de la longueur d'onde pour une pellicule du type HP5 Ilford :

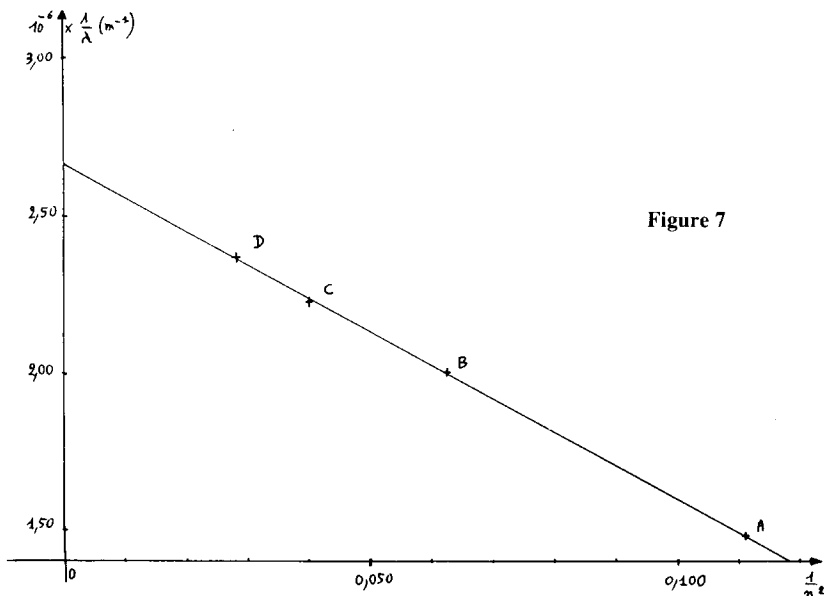


Figure 7

d - Exploitation des résultats :

Suite au cours théorique, les élèves de Terminale savent que les longueurs d'onde étudiées forment une suite telle que :

$$\frac{hc}{\lambda} = E_o \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

d'où
$$\frac{1}{\lambda} = R_h \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

R_H étant la constante de Rydberg.

Traçons donc la courbe expérimentale : $\frac{1}{\lambda_i} = f \left(\frac{1}{n_i^2} \right)$. (voir figure 7)

raie	n	$1/n^2$	$1/\lambda \text{ (m}^{-1}\text{)}$
A	3	0,111	$1,48.10^6$
B	4	0,0625	$2,00.10^6$
C	5	0,0400	$2,25.10^6$
D	6	0,0278	$2,38.10^6$

On obtient une droite de pente $-1,08 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ ($= -R_H$) et d'ordonnée à l'origine : $2,66.10^6 \text{ m}^{-1} \left(= \frac{R_H}{4} \right)$

On peut donc en déduire une valeur moyenne de R_H :

$$R_H \approx 1,07.10^7 \text{ m}^{-1}$$

Soit un écart d'environ 3% avec la valeur exacte :

$$R_H = 1,0968.10^7 \text{ m}^{-1}$$

c - Remarques :

On pourra faire vérifier aux élèves que les raies E et F appartiennent aussi à la série de Balmer. Celle située entre C et D comme d'autres visibles sur le cliché appartient à l'émission de l'hydrogène moléculaire ou d'un autre élément que H.

3. A LA RECHERCHE DE L'HYDROGÈNE PRÉSENT DANS NOTRE ÉTOILE, LE SOLEIL :

On peut utiliser les résultats du 1. et du 2. pour étudier le spectre solaire. Mais avant tout, il faut en obtenir quelques images.

a - Un spectrographe très simple :

Plantons dans le sol un tube métallique cylindrique de surface polie (genre tube inox pour aspirateurs...). Disposons à côté un écran noir d'assez grandes dimensions (1,50 m × 0,50m). Le soleil brille ? Alors photographiez son reflet donné par le tube, ainsi que l'écran, à travers un réseau dont les traits sont parallèles à l'image linéaire du soleil donnée par le tuyau métallique. Si l'écran a été correctement placé en face du spectre, visible dans la visée réflexe de l'appareil, alors le cliché révélera l'arc en ciel strié de traits sombres : les raies d'absorption du spectre solaire ! Voir clichés - 8 - et - 9 -.

Prenons soin de réaliser des clichés en couleur et en noir et blanc.

b - Étalonnons le spectre obtenu :

Observons les clichés couleurs. A la limite entre le rouge et le jaune apparaît une raie sombre très nette. On fera l'hypothèse qu'elle correspond au doublet du sodium à 589 nm. D'autre part un doublet de raies très intenses se signale à notre regard à la limite extrême du bleu : il domine toutes les autres raies sur des clichés noir et blanc légèrement surexposés (photographies - 10 - et - 11 -).

En réutilisant la méthode du 1., étalonnons le spectre du cliché n° 10 :

$$\frac{\lambda_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}} = \frac{589,3}{803,2} \approx 2,900 \text{ nm/mm}$$

D'où l'identification des raies 1 et 2 :

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}} \times d_2 \approx 397 \text{ nm}$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{\text{Na}}}{d_{\text{Na}}} \times d_1 \approx 394 \text{ nm}$$

C'est le doublet du calcium ionisé Ca^{2+} dont les valeurs de longueurs d'onde sont : 396,8 nm et 393,4 nm.

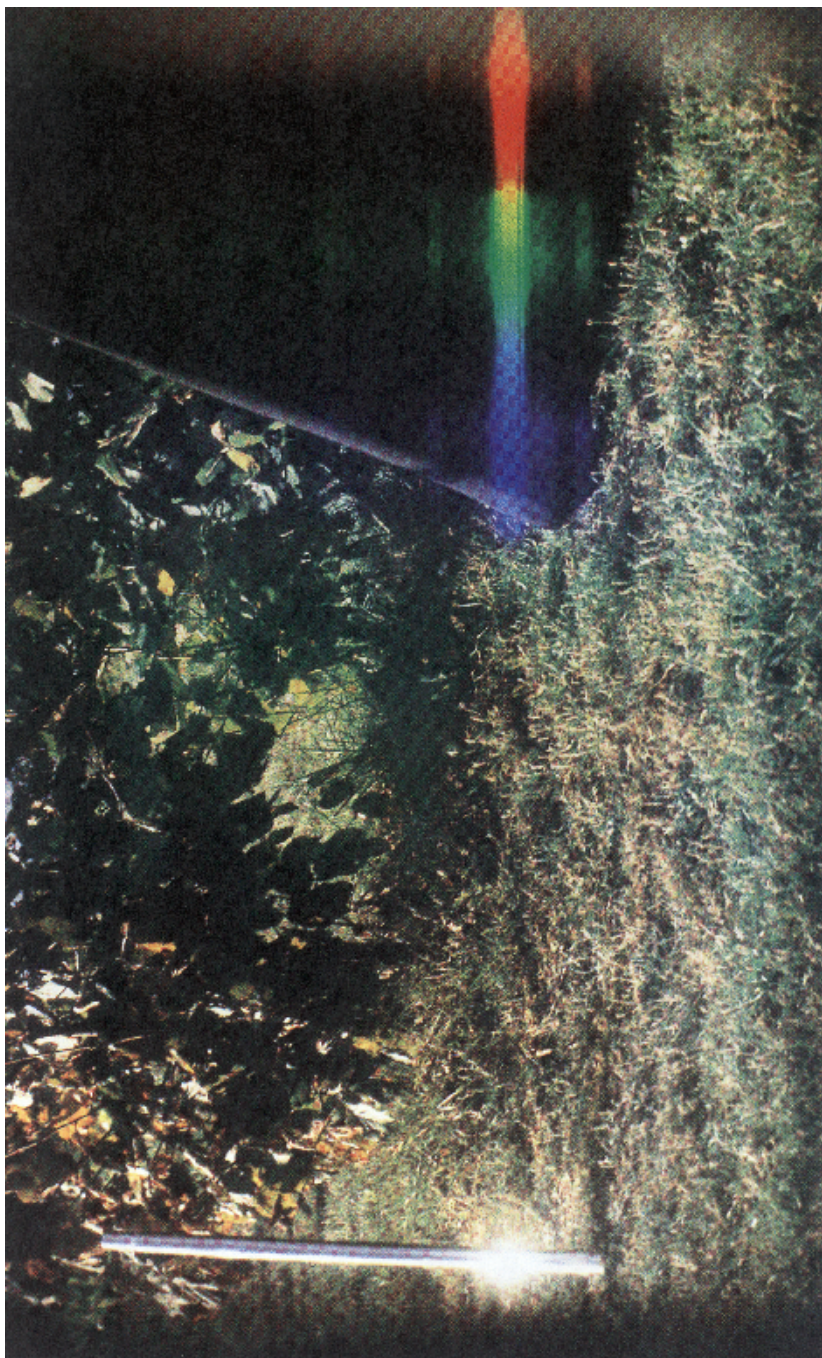


Figure 8

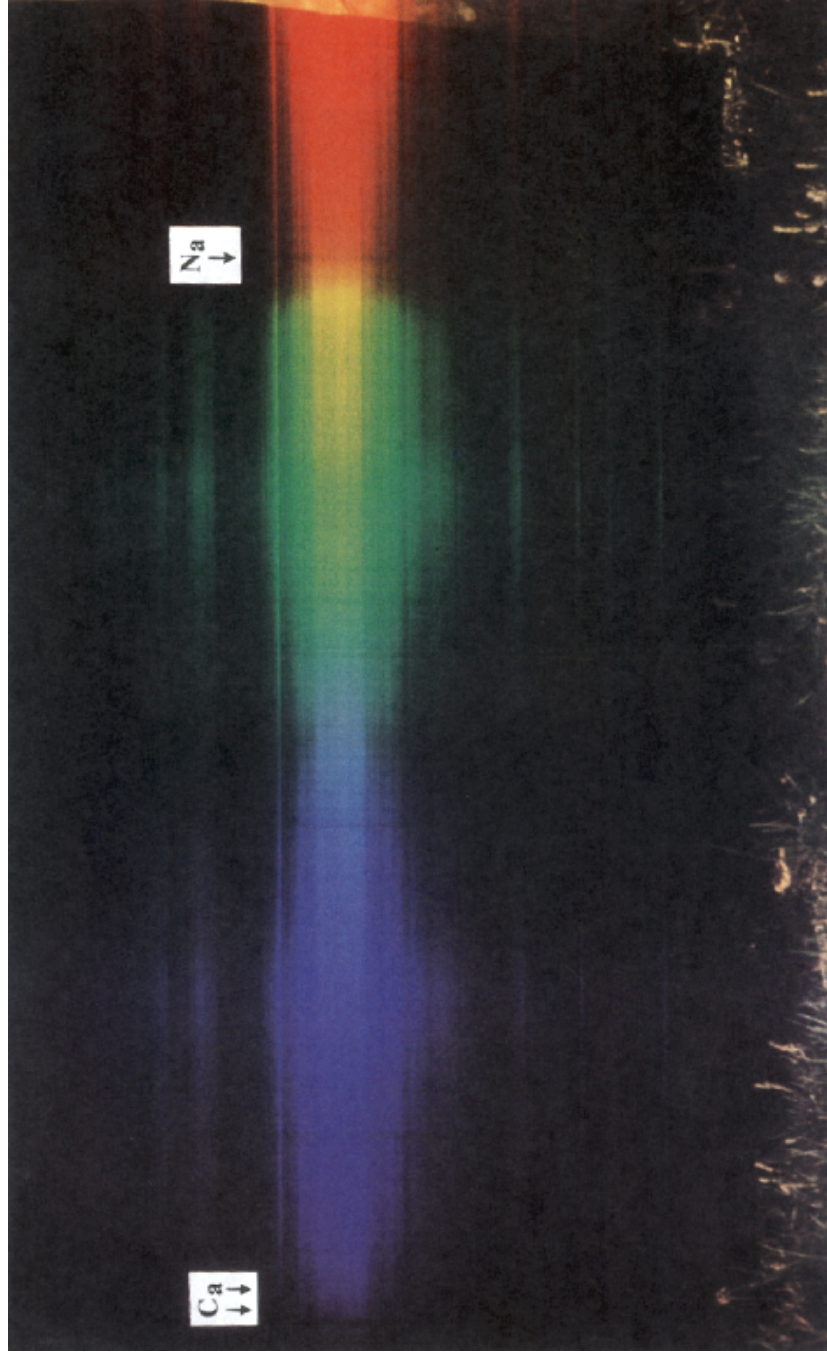


Figure 9



Figure 10

Tube inoxydable $\xrightarrow{\text{dNa}}$ Spectre

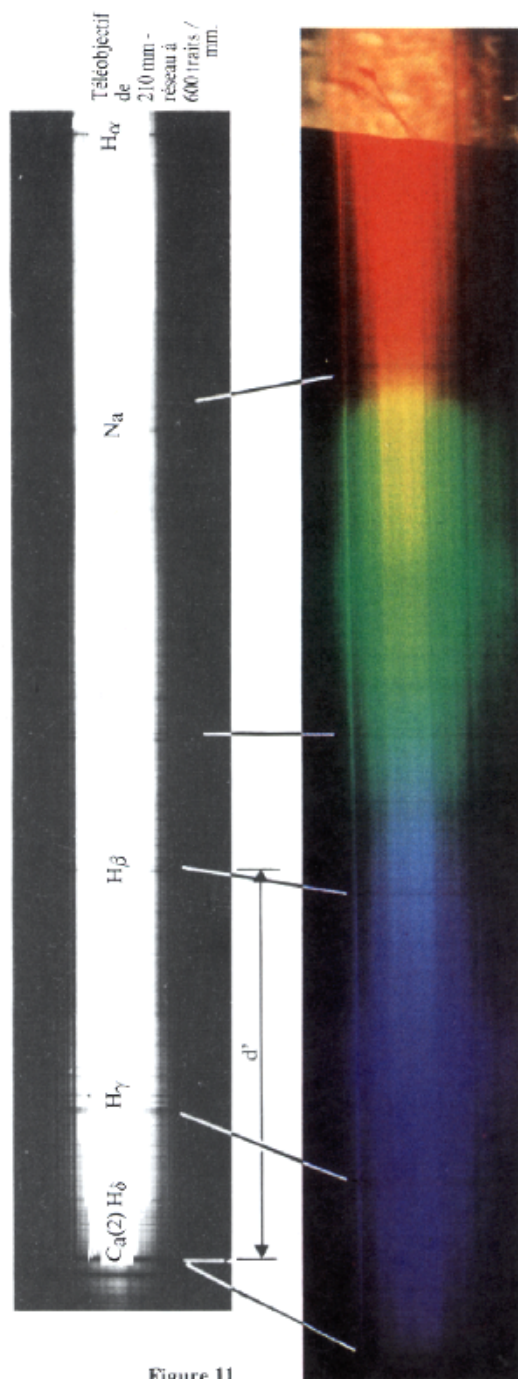


Figure 11

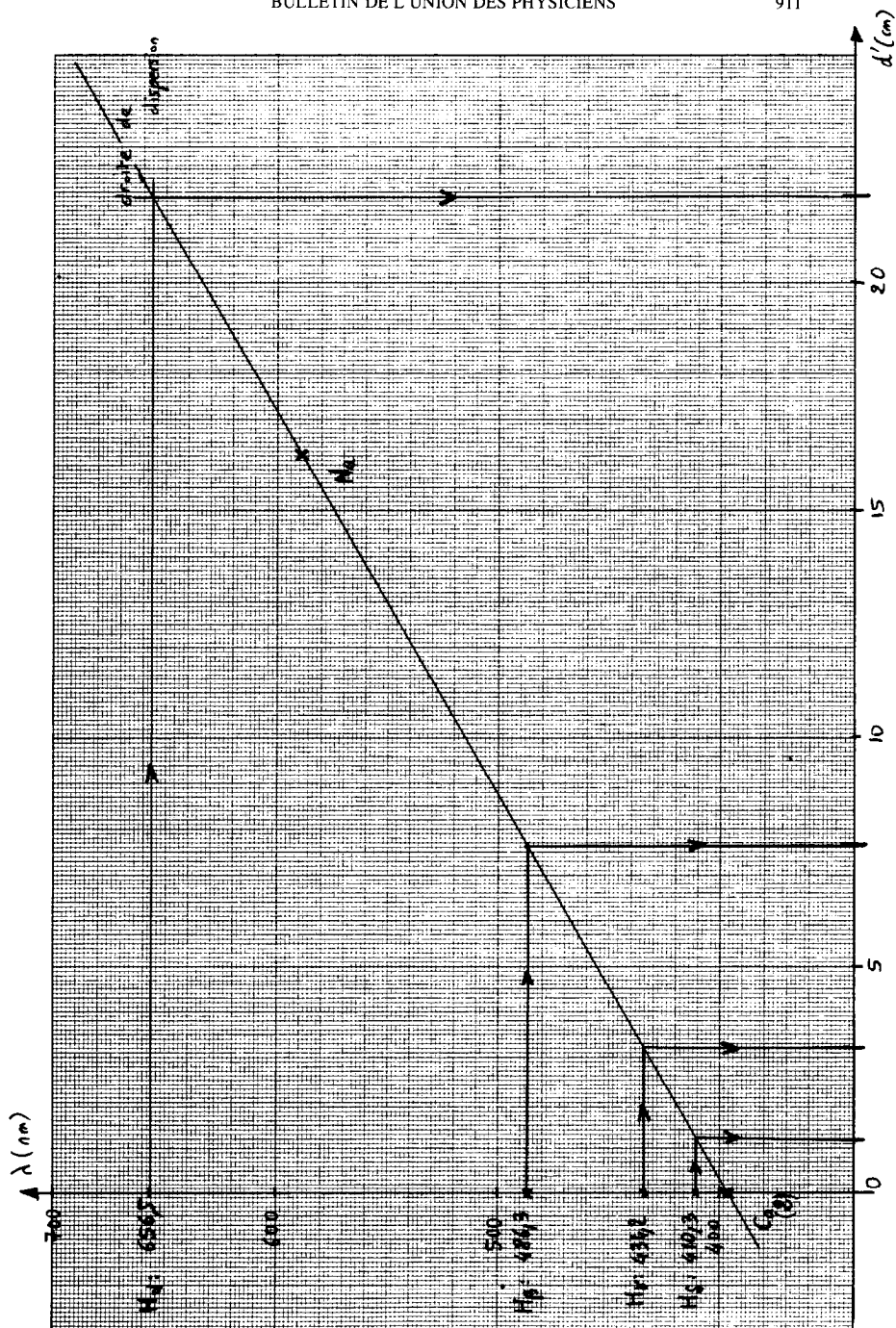
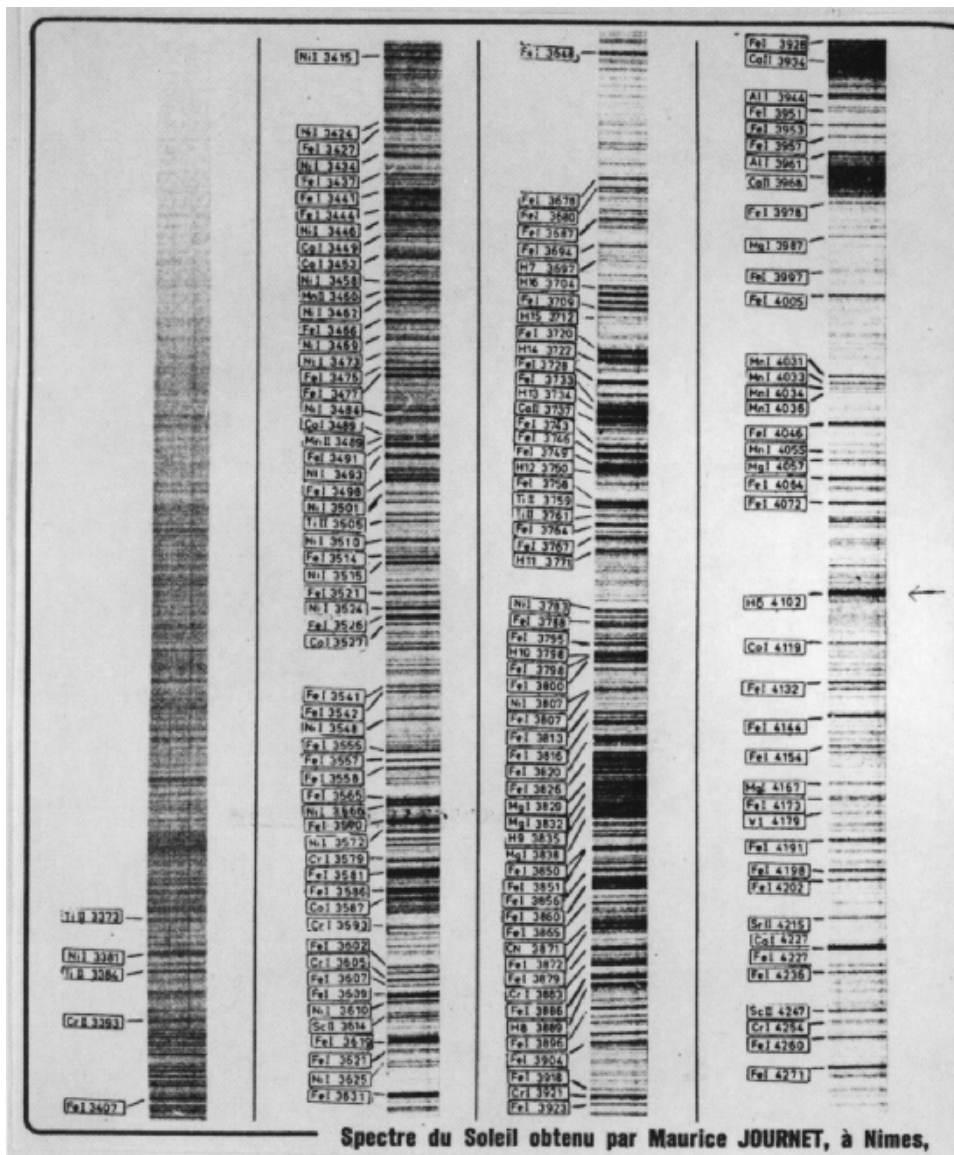


Figure 12



Spectre du Soleil obtenu par Maurice JOURNET, à Nîmes,

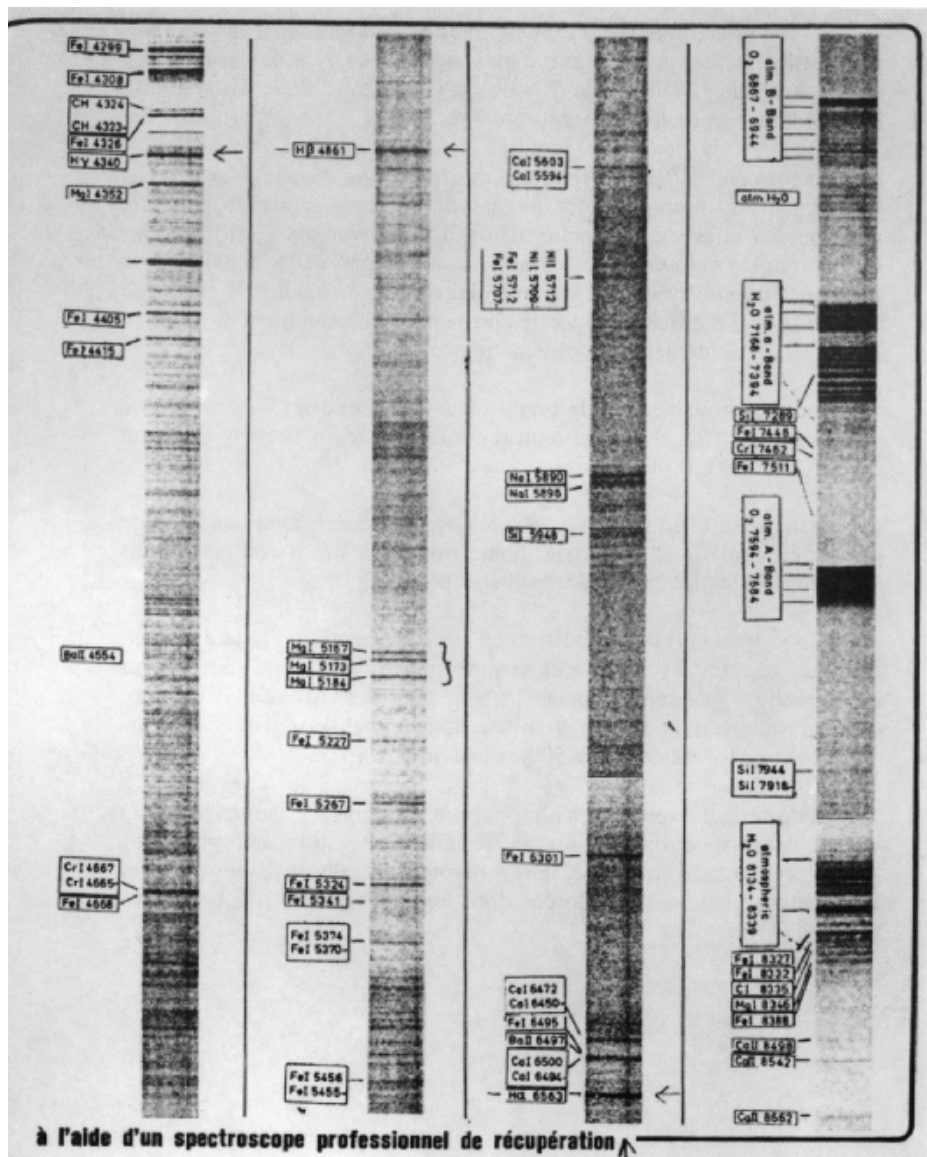


Figure 13

c - «Redécouverte» des raies de l'hydrogène :

A l'aide du cliché n°11 à plus grande résolution, repérons les raies par leur distance d' à la numéro 2 du Calcium. A l'aide des valeurs λ_{Na} et d'_{Na} (distance séparant la 2^e raie du Calcium et celle du sodium), traçons la droite de dispersion (voir figure 12).

Plaçons en ordonnée les valeurs des longueurs d'onde pour H_{α} , H_{β} , H_{γ} et H_{δ} . Par simple lecture du graphique on pourra en déduire la position des raies sur le spectre n°11 grâce aux valeurs de d' . Traçons sur un papier calque les raies ainsi déterminées et la deuxième du calcium. Superposons le diagramme obtenu avec le cliché : H_{α} apparaît comme la plus marquée du spectre après celles du calcium et du sodium. H_{β} , H_{γ} et H_{δ} se détachent moins nettement de l'ensemble.

Pour se convaincre de la bonne identification des raies, on pourra se reporter à la figure 13 qui représente le spectre solaire par λ variant de 866,2 nm à 320 nm environ.

Remarquons qu'il est préférable de travailler avec un spectre obtenu en couleur ou en noir et blanc surexposé car il contient moins de raies : seules les principales subsistent.

Cinq éléments sont identifiables sur des spectres d'amateur : fer, calcium, sodium, hydrogène et magnésium. Leurs intensités relatives ne dépendent pas seulement de l'abondance des différents éléments, mais aussi de la température du milieu dans lequel ils se trouvent : celle de la chromosphère monte à 5000 K environ.

Cette série d'expériences nous permet de montrer l'immense intérêt des méthodes spectroscopiques tant au laboratoire qu'en astrophysique. A un niveau plus modeste, elles permettront de réaliser quelques expériences visuelles et colorées dont les implications n'échapperont pas aux élèves :



Texte extrait de "l'étoile mystérieuse"
Aventures de Tintin - HERGÉ
Ed. Casterman