

Construction d'un radiomètre simplifié (*)

par Jean VOGT,

Lycée Fustel-de-Coulanges, Strasbourg.

I. INTRODUCTION.

La nécessité de disposer d'un radiomètre apparaît chaque fois que l'on a besoin d'évaluer l'énergie rayonnante émise, réfléchie ou reçue par un milieu. Il en est ainsi, par exemple, en télédétection aérospatiale, dans l'enseignement de la Physique (étude de l'absorption, de la réflexion, de l'émission thermique, des corps colorés, de la trichromie, des filtres...) et en Sciences naturelles (étude de l'absorption chlorophyllienne en fonction de la longueur d'onde, comparaison des éclaircissements des plantes...).

Le radiomètre décrit dans cet article a été construit dans le cadre d'une recherche de l'I.N.R.P. sur l'« Introduction expérimentale de la télédétection dans l'enseignement secondaire ». Il donne des résultats quantitatifs et a pour mission de permettre aux élèves de mieux concrétiser le principe de l'acquisition des données en télédétection. Au cours de son utilisation il est apparu que cet appareil pouvait rendre service dans l'enseignement de la Physique et des Sciences naturelles.

Principales caractéristiques de ce radiomètre :

- fonctionne dans le visible et le proche infrarouge pour des longueurs d'onde allant de 400 à 1 100 nm,
- permet des mesures dans 6 bandes spectrales différentes,
- suffisamment simple afin de pouvoir être étudié et compris par un élève de Seconde,
- donne des mesures quantitatives,
- bon marché (environ 180 F pour la version la moins chère).

Sur le plan de la précision, cet appareil ne peut évidemment pas concurrencer les radiomètres professionnels dont le prix est au moins cent fois plus élevé, mais son intérêt pédagogique (voir § VI.) et la simplicité de la construction justifient sa réalisation.

(*) N.D.L.R. : Cet article, ainsi que le précédent, reprend la matière d'exposés et de T.P. proposés au Stage du C.N.E.S. au Bourget-du-Lac en septembre 1987.

Un document plus complet que cet article et développant l'étude des filtres et les applications est disponible à l'I.N.R.P., 91, rue Gabriel-Péri, 92120 Montrouge.

II. GRANDEURS MESUREES PAR LE RADIOMETRE.

Le capteur du radiomètre capte l'énergie électromagnétique qu'il reçoit de la scène visée et délivre un signal électrique proportionnel à l'intensité rayonnante reçue.

1. La luminance.

La luminance d'une surface S , dans une direction donnée, est l'intensité rayonnée dans cette direction par unité de surface apparente. Elle s'exprime en watt par stéradian et par mètre carré.

Si la surface visée par le radiomètre est HOMOGENE et s'il n'y a pas d'absorption du rayonnement le long du trajet, le signal enregistré :

- ne dépend pas de l'altitude et donc pas de la forme ni de la dimension de la tache d'analyse,
- ne dépend que de la luminance de la surface visée ainsi que des caractéristiques du radiomètre.

Pour les surfaces non homogènes, la réponse du radiomètre dépend de l'altitude. Si la luminance est indépendante de la direction, la surface est dite « lambertienne ».

La luminance est une grandeur fondamentale en télédétection car le signal du radiomètre est proportionnel à la luminance de la scène homogène visée.

La luminance d'une surface varie avec la longueur d'onde ; on est donc amené à définir la LUMINANCE SPECTRALE $L(\lambda)$ pour une longueur d'onde donnée.

Le radiomètre décrit dans cet article ne permet pas la mesure absolue d'une luminance, mais il est possible de montrer ses variations en déplaçant l'appareil au-dessus d'objets divers.

2. La réflectance.

La réflectance d'une surface est le quotient de la puissance rayonnante réfléchie P' par la puissance rayonnante P reçue.

La réflectance est donc comprise entre 0 (pas d'énergie réfléchie) et 1 (toute l'énergie reçue est réfléchie). Elle est souvent exprimée en pourcentage.

Contrairement à la luminance, la réflectance est une grandeur caractéristique du milieu. Elle est à la base de la reconnais-

sance des substances de la surface terrestre à partir des satellites et le radiomètre construit en permet une détermination quantitative.

La RÉFLECTANCE SPECTRALE d'une surface est la réflectance définie pour chaque longueur d'onde.

3. Remarque.

En plus de ces grandeurs fondamentales en télédétection, le radiomètre permet de mesurer d'autres grandeurs telles que la transmittance, l'absorbance d'une substance...

III. L'ELECTRONIQUE DU RADIOMETRE.

1. Le capteur.

1.1. L'élément photosensible est une photodiode utilisée en mode photoconducteur qui, contrairement au mode photovoltaïque, donne une réponse linéaire en fonction de la puissance lumineuse incidente.

La photodiode est donc montée en inverse et débite dans une résistance R de $3,3 \text{ M}\Omega$, l'ensemble étant soumis à une tension de l'ordre de 5 V pour une tension d'alimentation de 9 V (fig. 1).

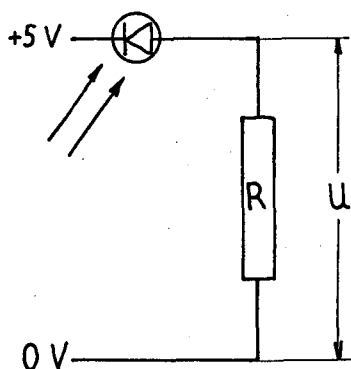


Fig. 1

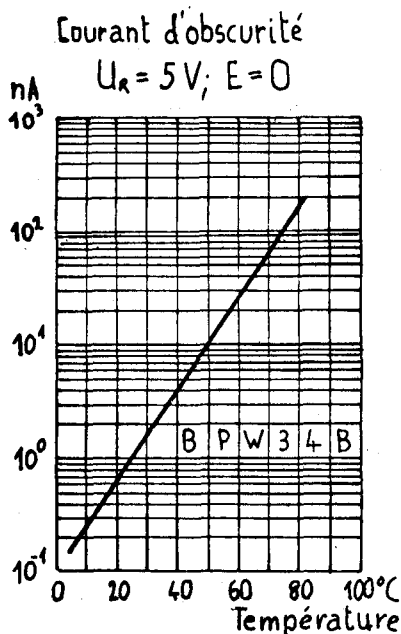


Fig. 2

1.2. Le flux lumineux reçu par la diode crée un courant photoélectrique I_p auquel s'ajoute le courant d'obscurité I_o pour donner le courant total I :

$$I = I_o + I_p$$

I_o augmente assez rapidement avec la température (fig. 2), I_p est proportionnel à la puissance rayonnante reçue par la diode, mais ne dépend pas de la température.

La tension U aux bornes de R est donc :

$$U = RI_o + RI_p.$$

Pour éviter que des courants induits variables modifient U , on place un condensateur en dérivation sur la résistance R .

2. Compensation du courant d'obscurité.

Le produit RI_o peut aller d'une fraction de millivolts à quelques centaines de mV selon la température et la photo-diode. Pour le type de diode utilisé, le constructeur indique la valeur moyenne de I_o (2 nA à 25 °C et sous une tension de 10 V) et garantit la valeur maximale de I_o dans les mêmes conditions (30 nA).

Le produit RI_p est imposé par l'éclairement et les filtres utilisés. Pour des éclairagements faibles, il peut être du même ordre de grandeur que RI_o . Il est donc nécessaire de compenser les effets du courant d'obscurité.

Cette compensation est obtenue grâce à deux ponts diviseurs (R_1, R_2, R_3) et (R_4, R_5) donnant :

- la tension d'alimentation (5 V) pour l'ensemble (diode + R),
- les tensions nécessaires pour la compensation de RI_o .

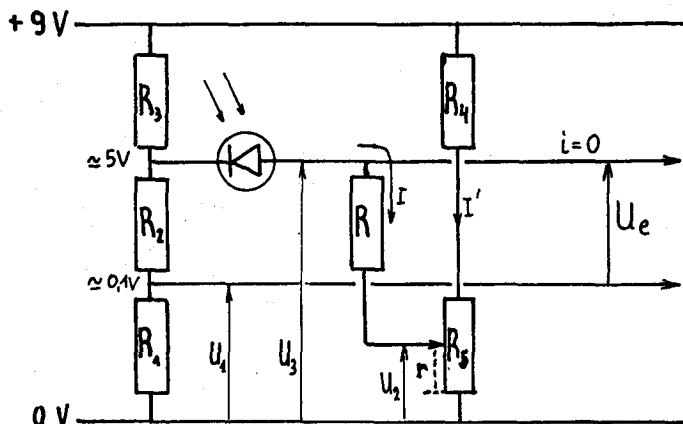


Fig. 3

Les valeurs des résistances sont choisies pour que la tension U_1 (100 mV), imposée par R_1 , soit supérieure à la valeur maximale de RI_o dans les conditions de températures habituelles.

Soit U_e la tension d'entrée de l'amplificateur, dont les impédances d'entrées sont pratiquement infinies ($i = 0$). D'après la fig. 3 :

$$U_e = U_3 - U_1 = [RI + U_2] - U_1 = [R(I_p + I_o) + U_2] - U_1$$

donc :

$$U_e = RI_p + RI_o + U_2 - U_1.$$

Avant chaque utilisation du radiomètre ou lorsque la température change (sous l'action du soleil ou d'une lampe proche), on règle R_5 pour que la tension U_e soit nulle en l'ABSENCE DE LUMIÈRE.

Dans ces conditions, $U_3 = U_1$ et comme $I_p = 0$, on en déduit que :

$$RI_o + U_2 = U_1.$$

Il en résulte que, si la diode est ÉCLAIRÉE et tant que la température ne change pas :

$$U_e = RI_p.$$

La tension à amplifier U_e est alors proportionnelle au courant photoélectrique donc à la puissance moyenne rayonnante frappant la photodiode.

Remarques.

La résistance variable R_5 sert en plus à compenser l'influence de la petite variation de U_1 due à l'effet de la température sur l'amplificateur opérationnel ainsi que l'influence de la lumière parasite (les infrarouges traversent un peu le tube métallique contenant la diode).

La tension $U_2 = r(I + I')$ ne change pas avec I car I est environ 1 000 fois plus faible que I' . De plus les faibles variations de U_2 sont négligeables devant celles de RI_p car le rapport des résistances R/r est grand (supérieur à 7 000).

3. L'amplification de tension .

3.1. La tension U_e pourrait être augmentée en prenant une valeur plus forte que R , mais alors la réponse de la diode serait trop lente. U_e est amplifiée par un amplificateur opérationnel linéaire et de gain réglable. L'ampli. op. devait avoir les caractéristiques suivantes :

- alimentation simple par une seule pile de 9 volts,
- faible consommation,

- fonctionner en mode commun à partir d'une tension, sur l'entrée E^+ , nulle par rapport à la borne d'alimentation négative,
- très forte impédance d'entrée.

Nous avons retenu l'ampli. TLC 271 de Texas-Instrument (prix : 6,2 à 15,5 F selon les magasins).

3.2. Le gain variable est déterminé par une boucle de contre-réaction entre la sortie et l'entrée E^- (fig. 4).

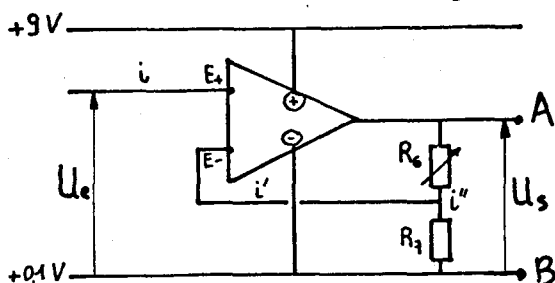


Fig. 4

Pour l'ampli. op. les impédances des deux entrées sont tellement grandes que les courants i et i' peuvent être considérés comme nuls. L'intensité i'' est donc la même dans les deux résistances R_6 et R_7 .

De plus, la tension entre les deux entrées est aussi pratiquement nulle car le gain différentiel (pour une tension d'entrée appliquée entre E^+ et E^-) est très important (de l'ordre de 100 000 pour le TLC 271).

Si on désigne par U_e et U_s les tensions d'entrée et de sortie, on a :

$$U_e = R_7 \times i'' \quad \text{et} \quad U_s = (R_6 + R_7) \times i''$$

d'où le gain :

$$G = \frac{U_s}{U_e} = \frac{R_6 + R_7}{R_7}.$$

Dans le cas du radiomètre, réalisé avec $R_6 = 1 \text{ M}\Omega$ au maximum et $R_7 = 4,7 \text{ k}\Omega$, le gain maximal est de 214.

Si $R_6 = 0$ alors le gain vaut 1 et la tension de sortie est égale à la tension d'entrée (montage suiveur).

4. Mesure de la tension de sortie.

Deux solutions sont possibles :

- Brancher, entre les points A et B (fig. 4 et 5) un voltmètre de calibre 1 V et de forte résistance interne (20 000 Ω/V).

On pourra utiliser les voltmètres des travaux pratiques. Il vaut cependant mieux brancher ce voltmètre entre les points A et C (fig. 5) car, entre A et B, il produirait une légère variation de la tension de référence U_1 . La résistance ajustable R_{10} est réglée pour que la tension à ses bornes soit égale à U_1 , ce qui donne une déviation nulle quand la tension d'entrée U_e due au courant photoélectrique est nulle.

b) Incorporer un voltmètre dans le montage pour avoir un appareil indépendant mais plus cher. Ce voltmètre peut être fait avec un microampèremètre gradué de 0 à 100 μA avec 50 intervalles.

On pourra se contenter d'un appareil type « grand public » de classe 2 ou 2,5 (prix : de 60 à 100 F). Le microampèremètre sera associé en série avec une résistance ajustable R_8 réglée de telle façon que la tension aux bornes de l'ensemble (microampèremètre + R_8) soit de 1 V environ quand l'intensité est de 100 μA .

Cet ensemble (microampèremètre + R_8) sera branché entre les points A et C.

On peut remplacer le microampèremètre par un milliampèremètre de 0 à 1 mA, mais il faut lui associer un ajustable de 1 k Ω et remplacer la résistance R_9 (6,8 k Ω) par une résistance de 560 k Ω .

5. Schéma de principe du circuit électrique (fig. 5).

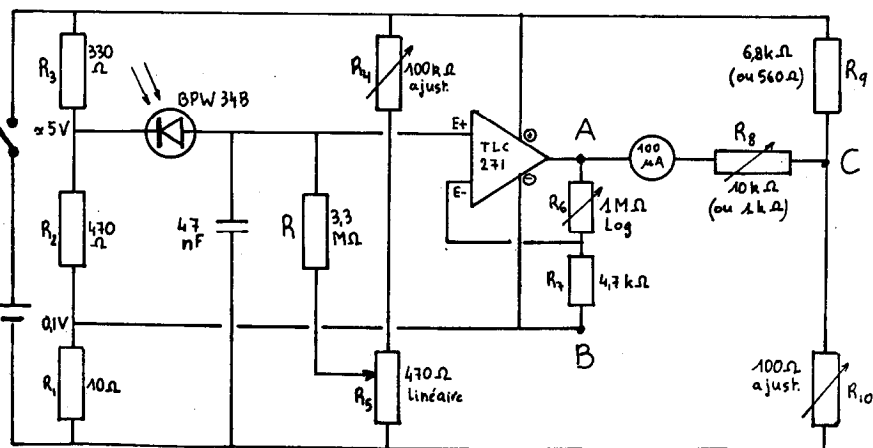


Fig. 5

IV. CHOIX DES FILTRES ET DE LA PHOTODIODE.

1. Les bandes spectrales du radiomètre.

Le radiomètre ayant été construit dans le cadre d'une étude de l'introduction de la télédétection aérospatiale dans l'enseignement, nous avons adopté les domaines spectraux retenus sur les satellites LANDSAT et SPOT. Il s'agit des domaines :

— de 450 à 500 nm (bleu)	Landsat 4 et 5 (Thematic Mapper)
— de 500 à 600 nm (vert)	Landsat 1, 2, 3, 4, 5 et Spot
— de 600 à 700 nm (rouge)	Landsat 1, 2, 3, 4, 5 et Spot
— de 700 à 800 nm (rouge foncé)	Landsat 1, 2, 3
— des I.R. proches à partir de 800 nm	Landsat 1, 2, 3, 4, 5 et Spot

Ces domaines couvrent le spectre visible et le proche infra-rouge et sont particulièrement adaptés pour l'étude de la végétation car la chlorophylle absorbe dans le bleu et le rouge vers 650 nm et réfléchit le vert et surtout le proche infrarouge.

Eventuellement, on peut ajouter un filtre couvrant tout le rouge de 600 à 800 nm afin de montrer qu'en élargissant la bande spectrale, le capteur reçoit plus d'énergie mais au prix d'une perte d'informations par rapport à celles données par les deux bandes 600 - 700 et 700 - 800 nm.

2. Les filtres.

Pour délimiter les domaines de longueurs d'onde, on pourrait utiliser des filtres interférentiels à bande large, mais ils laissent souvent passer trop peu de lumière et ils sont très chers (de l'ordre de 500 à plus de 1 000 F pièce !)

Le radiomètre utilise donc des filtres Wratten en pellicule de gélatine de Kodak (60 F en 102 × 102 mm), associées à des filtres en verre de Schott (environ 135 F en 50 × 50 mm) dans lesquels on découpe des filtres de 16 × 16 mm.

Les filtres en gélatine, en général, n'absorbent pas entre 700 et 2 500 nm et laissent donc passer des infrarouges proches. Le radiomètre enregistre alors simultanément la réponse dans deux domaines spectraux.

Pour arrêter les infrarouges, on utilise les filtres en verre de Schott BG 39 de 1 mm d'épaisseur et KG 5 de 2 mm.

Les différentes bandes spectrales sont obtenues par les filtres :

— Bleu	400-500 nm	Kodak n° 47 + Schott BG 39-1
— Vert	500-600 nm	Kodak n° 57 + Schott BG 39-1

— Rouge	600-700 nm	Kodak n° 29 + Schott BG 39-1
— Rouge foncé	700-800 nm	Kodak n° 79 + Schott KG 5-2
— Rouge complet (facultatif)	600-800 nm	Kodak n° 29 + Schott KG-5-2
— Infrarouge	800-1 100 nm	Kodak n° 87 C seul.

3. Choix de la photodiode BPW 34 B.

L'expérience a montré qu'on ne pouvait pas régler le problème des infrarouges avec une photodiode peu sensible aux infrarouges (genre BPW 21). On utilise donc une diode au spectre plus large : la BPW 34 B de Siemens. Cette diode au silicium couvre le plus proche infrarouge, le visible et un peu l'ultra-violet.

Cette diode a été retenue, parmi d'autres diodes au silicium, pour son faible courant d'obscurité (2 nA en moyenne et garanti inférieur à 30 nA à 25 °C et sous 10 V) associé à une grande sensibilité (75 nA/lx) et particulièrement dans le bleu. La fig. 2 (§ III.1.) donne la variation du courant d'obscurité en fonction de la température.

4. Sensibilité relative du radiomètre.

4.1. SENSIBILITÉ RELATIVE DE LA PHOTODIODE.

Nous avons vu (§ III.1.2.) que le courant I donné par la diode est la somme du courant photoélectrique I_p et du courant d'obscurité I_o .

Si I_o est constant (température constante), la variation de I est égale à la variation ΔI_p de I_p .

La SENSIBILITÉ SPECTRALE $S(\lambda)$ de la diode, soumise à une variation de flux lumineux $\Delta\Phi(\lambda)$, est définie par :

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta\Phi(\lambda)}$$

en A/W.

Notre capteur, monté en mode photoconducteur, étant linéaire (§ III.1.), on peut écrire :

$$S(\lambda) = \frac{I_p}{\Phi(\lambda)}$$

avec $I_p = U_e/R$ (voir § III.2.).

Le constructeur de la photodiode donne habituellement la courbe de SENSIBILITÉ RELATIVE $S_r(\lambda)$ et la valeur $S(\lambda_m)$ en A/W

où $\mu\text{A}/\mu\text{W}$, (λ_m) étant la longueur d'onde correspondant à la sensibilité spectrale maximale :

$$S_r(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_m)}$$

inférieur ou égal à 1.

Pour la photodiode BPW 34 B, $S_r(\lambda)$ est donné par la fig. 6 et $S(\lambda_m)$ vaut 0,62 A/W pour $\lambda_m = 850$ nm.

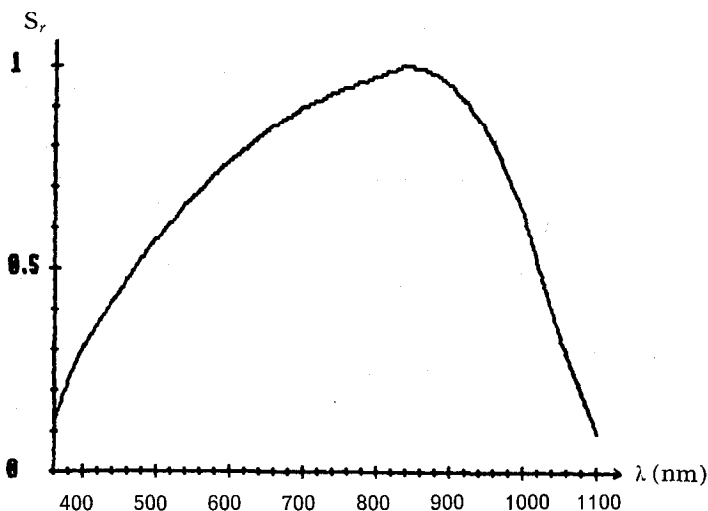


Fig. 6. — Courbe de sensibilité relative de la BPW 34 B en fonction de la longueur d'onde (voir § IV.4.).

4.2. SENSIBILITÉ RELATIVE DE L'ENSEMBLE (DIODE + FILTRES).

En tenant compte des formules du paragraphe précédent et pour une lumière de longueur d'onde λ donnée, on peut écrire :

$$I_p = S(\lambda) \times \Phi(\lambda) = S_r(\lambda) \times S(\lambda_m) \times \Phi(\lambda).$$

Si, entre la source et la photodiode, on interpose un filtre de coefficient de transmission spectrale $T(\lambda)$, le flux $\Phi(\lambda)$ reçu par la diode s'exprime, en fonction du flux incident $\Phi_i(\lambda)$ par :

$$\Phi(\lambda) = T(\lambda) \times \Phi_i(\lambda)$$

d'où :

$$I_p = S_r(\lambda) \times S(\lambda_m) \times T(\lambda) \times \Phi_i(\lambda).$$

Si on utilise simultanément plusieurs filtres de coefficients de transmission $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, ..., $T_n(\lambda)$, on a :

$$I_p = S_r(\lambda) \times S(\lambda_m) \times T_1(\lambda) \times \dots \times T_n(\lambda) \times \Phi_i(\lambda).$$

La sensibilité relative $S_e(\lambda)$ de l'ensemble (diode + filtres) vaut :

$$S_e = \frac{I_p / \Phi(\lambda)}{(I_p / \Phi(\lambda))_m} = \frac{S_r(\lambda) \times S(\lambda_m) \times T(\lambda)}{(S_r(\lambda) \times S(\lambda_m) \times T(\lambda))_m} = \dots$$

$$\dots \frac{S_r(\lambda) \times T_1(\lambda) \times \dots \times T_n(\lambda)}{(S_r(\lambda) \times T_1(\lambda) \times \dots \times T_n(\lambda))_m}.$$

4.3. CALCULS ET COURBES.

Le calcul de I_p ou de S_e pour différentes valeurs de la longueur d'onde est fastidieux surtout s'il faut étudier diverses combinaisons de filtres et plusieurs diodes. Nous avons donc utilisé l'ordinateur (Amstrad CPC 464) et créé un logiciel dont la partie informatique a été réalisée à cet effet par Philippe Vogt, élève de Première S au lycée Fustel-de-Coulanges de Strasbourg.

Après avoir saisi les données nécessaires, il visualise et imprime les courbes de sensibilité et les simulations de réponse en tenant compte :

- de la sensibilité relative de la diode,
- du coefficient de transmission des filtres utilisés,
- de la répartition spectrale de la source de lumière (voir § 5),
- de la substance étudiée et en particulier des substances chlorophylliennes (voir § 5).

Les courbes suivantes donnent la sensibilité relative de l'ensemble (diode + filtres) donc également celle du radiomètre car l'amplification est linéaire.

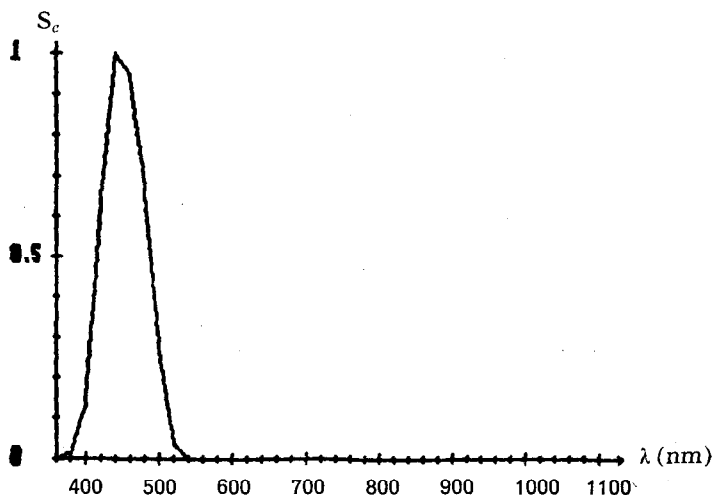


Fig. 7. — Bleu n° 47 + BG39-1.

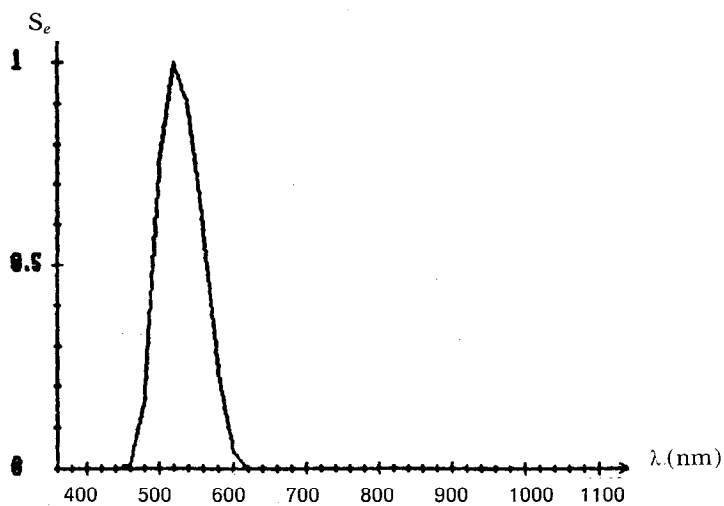


Fig. 8. — Vert n° 57 + BG39-1.

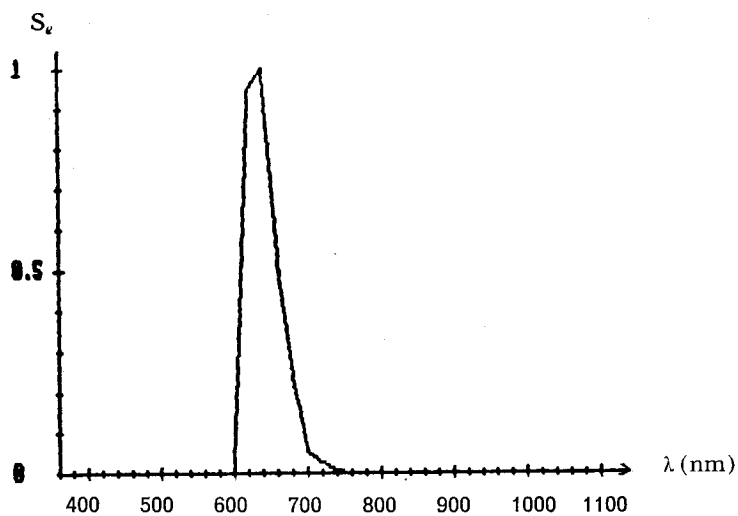


Fig. 9. — Rouge n° 29 + BG39-1.

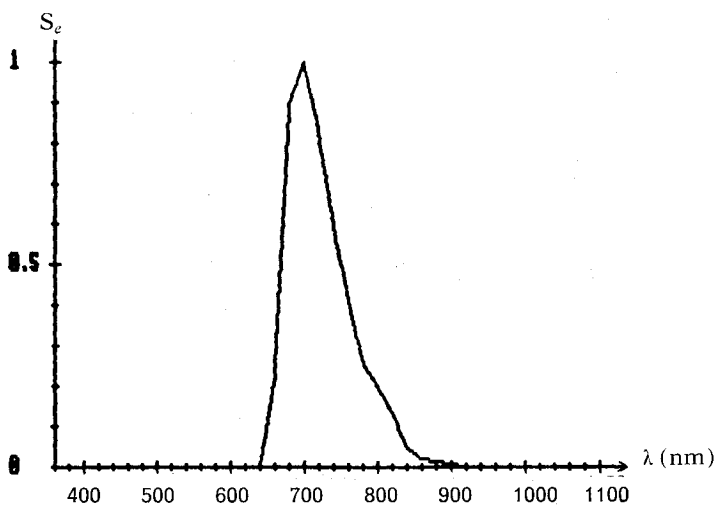


Fig. 10. — Rouge foncé n° 70 + KG5-2.

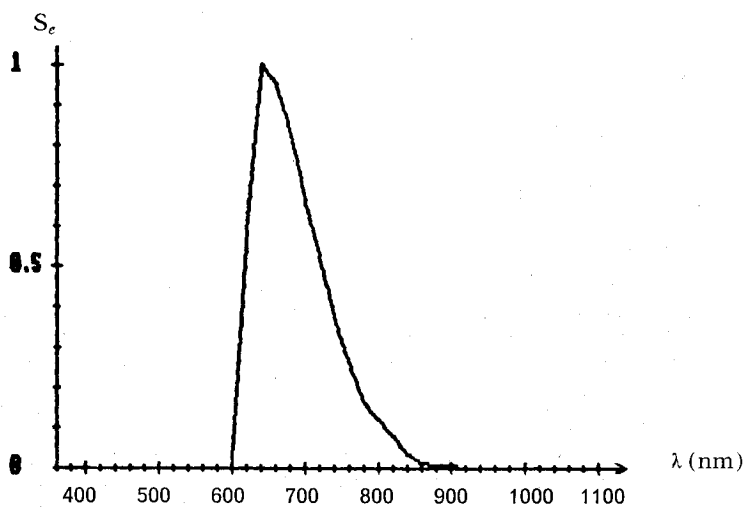


Fig. 11. — Rouge complet n° 29 + KG5-2.

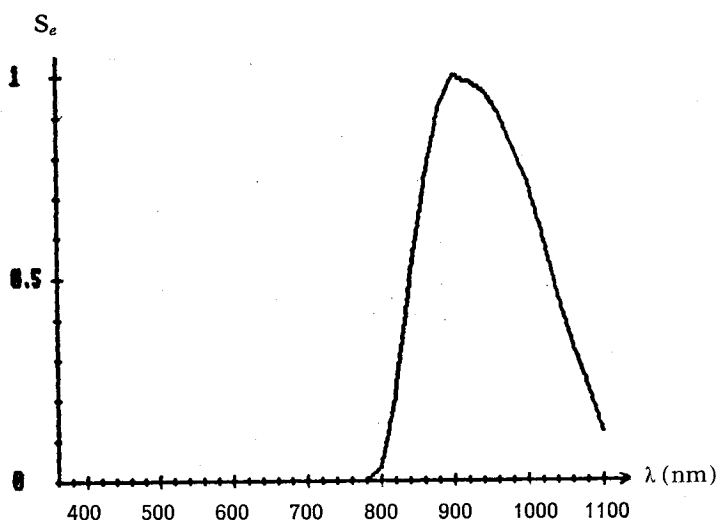


Fig. 12. — Infrarouge proche n° 87C seul.

5. Simulation des réponses du radiomètre.

Cette simulation a permis de mieux déterminer les filtres et d'étudier l'influence de la répartition spectrale de la source de lumière.

a) QUELS FILTRES ACHETER ?

Les courbes de réponse du genre de celles données par les figures 7 à 12 permettent de dégrossir le problème. Mais il faut contrôler que les bandes spectrales sont respectées dans tous les cas.

Citons l'exemple de l'étude des plantes chlorophylliennes dont la réflectance subit une forte augmentation entre 675 et 750 nm (elle passe par ex. de 0,1 à 0,4). On peut hésiter entre les filtres très voisins BG 39-1 et BG 40-1 (fig. 13) pour l'association avec le filtre Kodak n° 29 pour la bande 600-700 nm.

La simulation de la réponse relative obtenue dans le cas le plus défavorable (éclairage avec une lampe à incandescence de 40 W, riche en infrarouge) permet de trancher et évite l'achat de filtres s'avérant ensuite inutilisables ! La fig. 14 montre qu'avec le filtre BG 40-1 la moitié de la réponse du radiomètre est due aux longueurs d'ondes supérieures à 700 nm. Ce filtre ne convient donc pas.

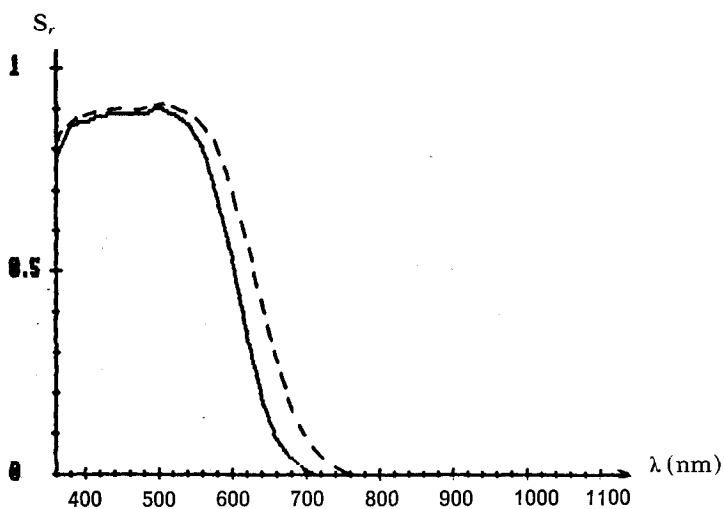


Fig. 13. — Transmission des filtres :

— BG39-1 (en trait plein)

— BG40-1 (en tirets).

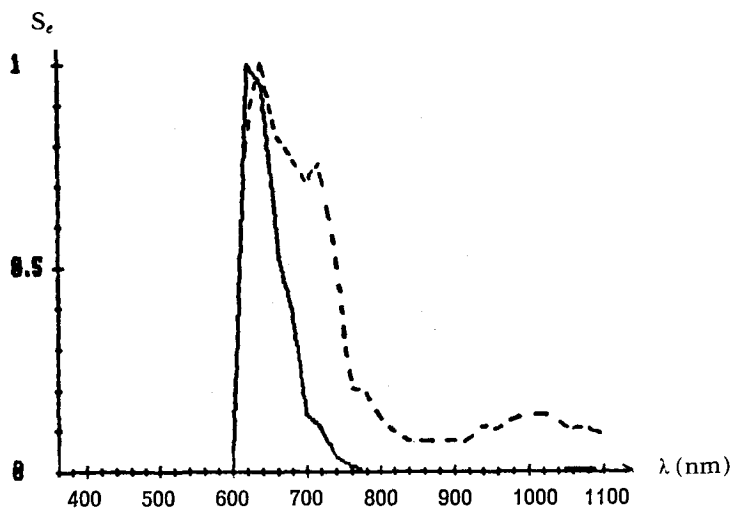


Fig. 14. — Réponse relative du radiomètre avec les filtres :

— n° 29 + BG39 (trait plein),

— n° 29 + BG40 (en tirets).

b) INFLUENCE DE LA RÉPARTITION SPECTRALE DE LA SOURCE DE LUMIÈRE.

Le capteur du radiomètre n'est pas soumis à une lumière monochromatique mais à une bande spectrale. Il faut alors définir la SENSIBILITÉ TOTALE S pour une lumière non monochromatique et pour un capteur linéaire :

$$S = \frac{I_p}{\Phi}$$

où I_p est la somme des courants dus aux diverses radiations reçues et Φ est le flux total frappant la photodiode.

Cette sensibilité totale, toujours inférieure à la sensibilité spectrale maximale dépend :

- de la sensibilité spectrale du capteur,
- de la répartition spectrale de la lumière incidente, donc de la source utilisée.

Pour tenir compte de la répartition spectrale de la source, nous avons utilisé la « température de couleur » qui est la température absolue T du corps noir, porté à incandescence et qui a même aspect VISUEL que la source. La formule de Planck permet alors de calculer la luminance spectrale en fonction de la longueur d'onde et de la température T . Cette technique est valable pour la lumière du jour et pour les lampes à incandescences mais elle ne convient pas pour les lampes fluorescentes.

La simulation des réponses du radiomètre montre une influence certaine de la source sur le résultat de la mesure mais, en général, cette influence est faible sauf dans le bleu, vers 1 000 nm pour les bandes spectrales larges et dans le cas où la luminance de la surface étudiée présente une brusque variation dans un domaine étroit de longueurs d'onde.

V. RÉALISATION PRATIQUE.

1. L'électronique.

a) LISTE DU MATÉRIEL (voir § III.4.).

* Radiomètre avec un voltmètre extérieur (20 000 Ω/V ; calibre 1 V) :

- Résistances 1/4 W : R_1 (10 Ω), R_2 (470 Ω), R_3 (330 Ω), R_9 (6,8 k Ω),
- Résistances 1/8 W : R (3,3 M Ω), R_7 (4,7 k Ω),
- Résistances ajustables pour CI 1/8 W horizontales : R_4 (100 k Ω), R_{10} (100 Ω),

- Potentiomètre de face avant : R_5 (470 Ω lin), R_6 (1 M Ω log),
- Boutons pour ces potentiomètres,
- Condensateur 47 nF, 16 V,
- Photodiode BPW 34 B de Siemens (voir § IV.3.),
- Ampli. op. TLC 271 de Texas-Instrument,
- Support 8 broches pour l'ampli. op.,
- Interrupteur à bouton-poussoir (ou levier) de bonne qualité,
- Adaptateur de pile + pile 9 V standard type 6 F 22,
- Boîtier Teko P 2,
- Plaque Veroboard à bandes cuivrées perforées (dimensions : 65 $\times$ 39 mm),
- Fil de connexion souple,
- 2 bornes femelles pour fiche banane (connexion du voltmètre). La borne rouge (+) est reliée à A et la noire à C (R_8 supprimée).

* *Radiomètre avec voltmètre incorporé :*

- Matériel précédent sauf les bornes femelles,
- Eventuellement un boîtier plus grand si la dimension de l'appareil de mesure l'impose,
- Instrument de mesure avec cadran ayant au moins 50 intervalles et pouvant être :
 - un ampèremètre 0-100 μ A
(adjoindre l'ajustable $R_8 = 10$ k Ω),
 - un ampèremètre 0-1 mA
(adjoindre l'ajustable $R_8 = 1$ k Ω),
 - un voltmètre 0-1 V
à au moins 1 000 Ω /V (supprimer R_8).

Si on ne recherche pas une grande précision, on pourra se contenter d'appareils type « grand public » de classe 2 à 2,5 qui coûtent environ 70 F (dimensions de l'écran : 6 $\times$ 4,5 cm) donc au moins 3 fois moins chers que des appareils de classe 1,5.

Avec l'ampèremètre 0-1 mA et le voltmètre 0-1 V, prendre $R_9 = 560 \Omega$.

b) LE MONTAGE.

Le montage est simple et si on manque de confiance en soi, on peut relire l'article de P. NÉEL : « Construction de circuits imprimés » paru dans le B.U.P. n° 675.

La construction sur plaquette Veroboard est avantageuse ici car il n'y a que deux ponts à placer et seulement 4 interruptions de bandes cuivrées à réaliser par perforation.

On se reportera au schéma d'ensemble (fig. 5 § III.) et au schéma d'implantation (fig. 15). Pour éviter des erreurs, il est bon de tracer, sur le côté bakélite de la plaquette, un trait toutes les 5 lignes et toutes les 5 colonnes.

L'amplificateur opérationnel sera monté sur un support soudé sur la plaquette mais ne sera mis en place qu'après les premiers réglages (voir § V.3.).

Veiller à la bonne qualité des soudures, éviter les surchauffes des composants et vérifier que la soudure ne touche pas la bande cuivrée voisine. Il est prudent de gratter, avec un tourne-vis fin, l'isolant entre les bandes à la fin des soudures.

Ne pas oublier les 2 ponts ainsi que les coupures de bandes cuivrées avec un foret de diamètre 3 mm.

Lors du montage dans le tube guide de lumière, il faudra bien isoler (avec du polystyrène par exemple) les pattes de la photodiode car celle-ci débite sur une résistance de 3,3 M Ω ! Ne pas relier les pattes avec du ruban adhésif (genre scotch) dont la colle est trop conductrice.

Le circuit peut être immobilisé dans le boîtier avec du polystyrène expansé ou avec les rainures disposées à l'intérieur du boîtier Teko. Pour la disposition d'ensemble, voir la fig. 16. La pile est immobilisée avec du polystyrène sous les potentiomètres de commande.

2. La partie optique.

a) LE GUIDE DE LUMIÈRE.

Il est réalisé avec un tube de diamètre intérieur 13 mm environ en aluminium ou en inox (genre tringle de rideau vendu chez BHV) d'épaisseur environ 1 mm. A l'intérieur, il sera tapissé de papier Canson noir mat. Ce tube est collé dans une ouverture pratiquée dans la potence en bois vissée sur le côté du boîtier contenant l'électronique.

Lorsque la photodiode aura été mise en place, il faudra la mettre à l'abri des infrarouges arrivant sur le dessus du tube par plusieurs épaisseurs de papier alu et une rondelle métallique collée sur le tube.

b) LE PORTE-FILTRES.

Il est découpé dans du contre-plaqué de 5 mm d'épaisseur avec 7 fenêtres (ou 6 si la bande spectrale du rouge complet de

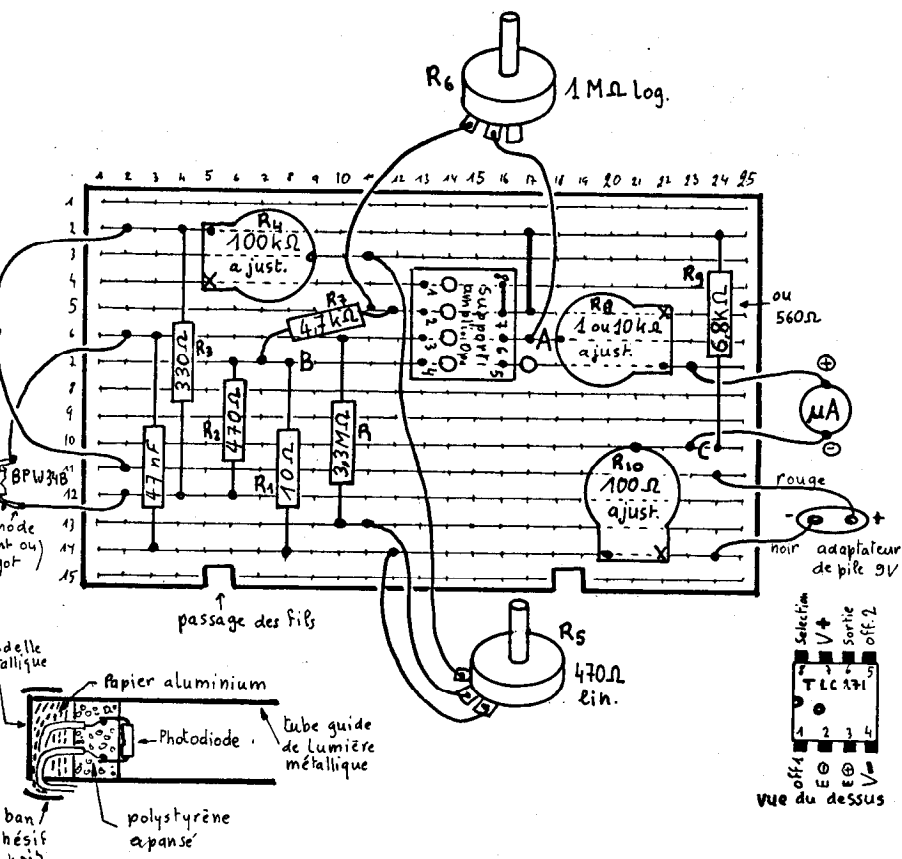


Fig. 15. — Implantation des composants (vue côté bakélite) :

- représente une bande cuivrée perforée,
- » une soudure,
- » une interruption de la bande cuivrée,
- · — » un pont conducteur (pont soudé entre les points 7 et 8 de l'ampli. op.),
- X » une patte pliée ou coupée et non soudée.

600 à 800 nm est inutile). Une fenêtre ne porte pas de filtre et peut servir à tester d'autres filtres, à obtenir la réponse globale dans le domaine allant de 350 à 1 100 nm ou à détecter les infrarouges ou les ultraviolets très proches (fig. 18).

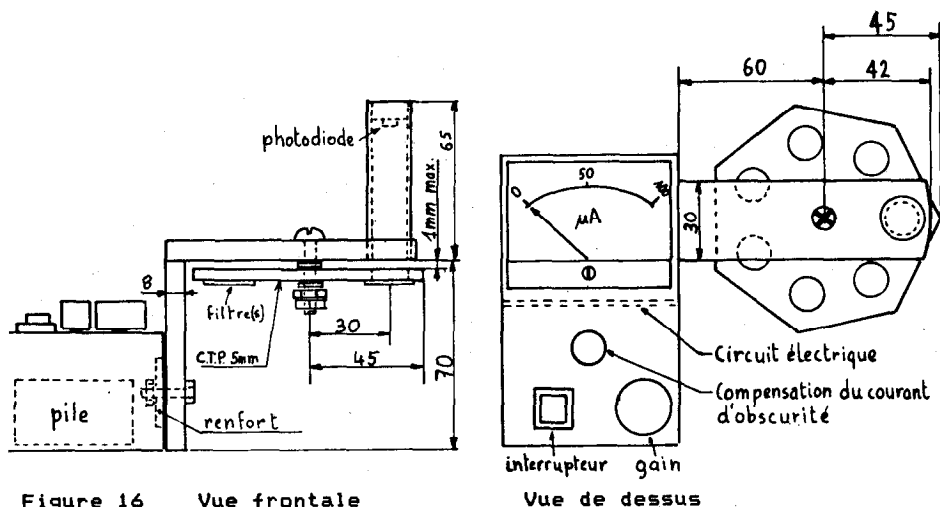


Fig. 16

Les fenêtres devront bien être centrées par rapport au guide de lumière et leur diamètre est égal à 13 mm.

Les filtres en gélatine de Kodak, livrés en carrés de 100×100 mm, sont découpés en filtres de 16×16 mm qui doivent être protégés de l'humidité. Pour cela, ils seront pris en sandwich entre 2 feuilles de plastique transparent (feuille de rétroprojecteur) ou entre une feuille plastique et un filtre Schott en verre de même dimension. Le tout est collé sur le porte-filtres avec une colle non fluide genre Syntofer sinon il y a diffusion entre les feuilles à cause de la capillarité.

Les filtres en verre de Schott, livrés en carrés de 50×50 mm, sont découpés au diamant en évitant d'appuyer trop fortement sur le filtre de 1 mm d'épaisseur. Il est prudent de s'exercer d'abord sur un autre morceau de verre fin ou de demander conseil à son vitrier. Avec un filtre Schott, on fera 9 petits filtres de $16,7 \times 16,7$ mm.

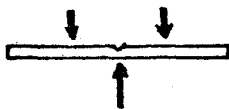


Fig. 17. — Forces à exercer sur le verre à l'EXTRÉMITÉ du trait du diamant.

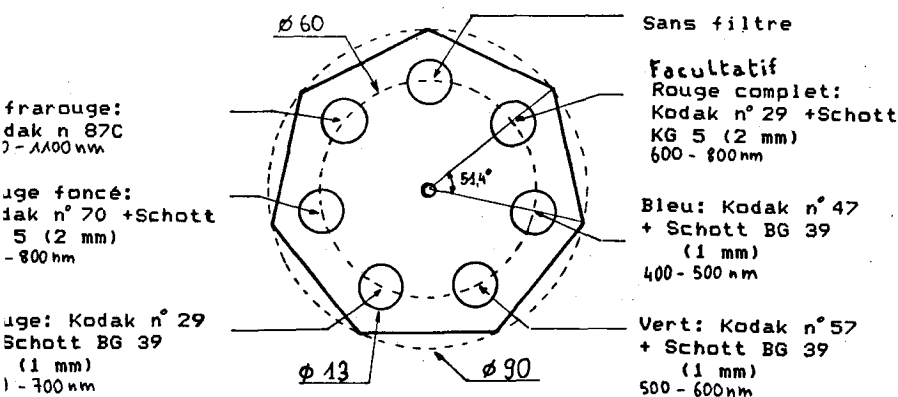


Fig. 18. — Le porte-filtres et les filtres (voir § IV).

3. Les réglages.

Il est prudent de les faire avant de tout fixer dans le boîtier.

a) Vérifier le montage ; l'ampli. op. est enlevé ; brancher la pile.

b) Brancher un voltmètre auxiliaire sur la résistance R_1 ; en actionnant l'interrupteur, le voltmètre indique environ 0,1 V.

c) Brancher le voltmètre auxiliaire entre les points C et B et régler R_{10} pour que la tension soit nulle. Débrancher le voltmètre auxiliaire.

d) Mettre en place l'ampli. op. (attention au sens !). Régler R_4 à sa valeur maximale, R_5 à sa valeur minimale (gain faible) et R_3 environ au premier tiers de sa course (sens des aiguilles d'une montre) si les réglages se font à une température de 20 à 25 degrés. A une température inférieure à 20 degrés, tourner R_3 au premier quart.

Afin d'obscurcir la photodiode, intercaler un obturateur (morceau de Canson 160 g/m² noir mat) entre le porte-filtres et le tube.

Actionner l'interrupteur et tourner R_4 jusqu'à ce que l'aiguille du radiomètre (ou du voltmètre extérieur branché sur les bornes de sortie) commence à peine à dévier en restant pratiquement au zéro.

Recommencer en mettant le bouton de commande du gain (R_6) à mi-course pour affiner le réglage.

e) Seulement pour les radiomètres utilisant un milli ou un microampèremètre incorporé :

- Mettre R_8 à sa valeur maximale et enlever l'obturateur ;
- Viser une feuille blanche placée sous le radiomètre ;
- Brancher un voltmètre entre A et C ;
- Régler le gain (R_6) pour obtenir une tension de sortie de 1 V (diaphragmer s'il y a trop de lumière) ;
- Régler R_8 afin que l'ampèremètre du radiomètre dévie au maximum. La tension de sortie maximale mesurable est donc de 1 V.
- Débrancher le voltmètre auxiliaire.

f) Monter l'ensemble dans le boîtier.

4. Compléments.

a) Lorsqu'on fait des mesures en plein soleil, la photodiode peut recevoir trop de lumière et il faut diaphragmer l'ouverture d'entrée soit :

- * en tournant partiellement le porte-filtres,
- * en utilisant un diaphragme réalisé avec une bande de 25×55 mm découpée dans de la tôle de boîte de conserve (fig. 19). Ce diaphragme se glisse entre le porte-filtres et l'ouverture du tube guide de lumière en se fixant sur la partie horizontale de la potence. Lorsque l'on tourne le porte-filtres, le diaphragme reste en place.

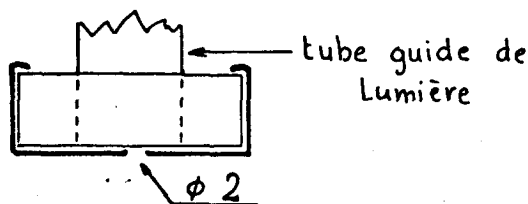


Fig. 19. — Le diaphragme.

Pour réduire la sensibilité du radiomètre dans l'infrarouge, il est bon de placer dans le trou du porte-filtre, au-dessus du filtre infrarouge, un petit diaphragme en Canson noir muni d'une ouverture de diamètre 4 à 5 mm. Ce diaphragme réduira la lumière admise en diminuant le diamètre du champ d'observation.

b) On pourra ajouter une petite diode LED s'allumant lorsque le radiomètre est en marche mais il faudra choisir une LED ne consommant pas plus de 10 mA pour éviter une usure prématurée de la pile.

Par exemple : associer une LED Telefunken TLUR 3100 avec une résistance de $1\,200\ \Omega$ en série et brancher le tout entre 0 et + 9 V.

c) Le radiomètre est prévu pour fonctionner avec une pile de 9 V, ce qui le rend autonome, mais il marche aussi avec une tension de 8 V disponible dans les salles de travaux pratiques à condition que cette tension soit suffisamment stable.

d) Pour les mesures de réflectance, il est bon de disposer d'un cadre carré en bois et de dimensions intérieures : 100×100 mm. Il sera fait avec des baguettes à section carrée de environ 10 mm de côté. Ce cadre sera placé autour de la surface étudiée afin de pouvoir poser dessus la feuille blanche de référence.

e) Pour un radiomètre à voltmètre non incorporé, il peut arriver qu'on soit obligé de lester le boîtier afin que l'appareil garde son équilibre.

f) Pour les radiomètres à voltmètre incorporé, on pourra monter deux bornes femelles pour fiche banane afin de pouvoir connecter un voltmètre extérieur visible par toute la classe. Ces bornes seront reliées aux points A et C (fig. 15).

VI. MODE D'EMPLOI. MESURES.

1. Compensation du courant d'obscurité.

Cette opération TRÈS IMPORTANTE est à effectuer :

- au début de chaque séance d'utilisation du radiomètre ;
- au cours d'une série de mesures, si les conditions d'éclairage changent, si la température de l'appareil varie, même faiblement (passage d'une salle froide à une autre plus chaude, proximité d'une lampe ou d'un radiateur, échauffement direct par le soleil) ;
- chaque fois que l'on a un doute sur le résultat d'une mesure dans le cas où la lumière reçue par la photodiode est faible.

Mode opératoire :

a) Brancher le voltmètre extérieur si le radiomètre n'a pas de voltmètre incorporé. Utiliser le calibre 1 V ou 1,5 V (dans ce cas, lire de 0 à 1 V).

b) Placer l'obturateur (voir § V.3.) entre l'ouverture du tube et le porte-filtres.

c) Tourner le bouton de compensation et celui du gain (fig. 16 § V.2.) à fond dans le sens des aiguilles d'une montre. Actionner l'interrupteur puis tourner le bouton de compensation

dans le sens inverse jusqu'à ce que l'aiguille commence à bouger en restant pratiquement au zéro. Faire un réglage minutieux, sinon le radiomètre serait incapable de mesurer les luminances très faibles (cas où le gain est fort).

d) Remettre le gain à sa valeur minimale.

2. Champ d'observation du radiomètre.

Ce champ représente l'ensemble des points de la cible envoyant des rayons lumineux sur la photodiode. A cause de la réfraction et de la réflexion diffuse à l'intérieur du tube guide de lumière, le champ s'étend théoriquement jusqu'à l'infini mais, en pratique et si le gain n'est pas trop grand, il est limité à un disque de 3 cm de diamètre sur le plan supportant le boîtier du radiomètre.

On peut montrer que, pour un même gain, le diamètre du champ est en gros proportionnel à la distance de la photodiode à la cible (pour cela, viser une feuille blanche et chercher les limites du champ en déplaçant une feuille noire).

3. Etude de la luminance d'une scène (voir § II.1.).

Rappelons que la réponse du radiomètre est proportionnelle à la luminance de la surface visée. On peut montrer que la luminance :

a) varie avec la substance étudiée et dépend entre autre du fait que l'objet est clair ou sombre ;

b) varie avec la pente de la surface surtout si celle-ci est brillante car la réflexion spéculaire domine la réflexion diffuse ;

c) varie avec la distance de la cible à la photodiode sauf si la surface est homogène.

4. Mesure de la réflectance d'une substance (voir § II.2.).

a) PRINCIPE DE LA MESURE.

Pour une bande spectrale donnée et pour une même direction de visée, on compare :

- la luminance de la substance étudiée ;
- la luminance d'une surface blanche mate qui diffuse pratiquement toute la lumière reçue.

Le rapport des deux mesures est sensiblement égal à la réflectance de la substance. En toute rigueur, la diffusion de la lumière ne se fait pas de la même façon dans toutes les directions et il faudrait parler de « réflectivité bidirectionnelle » (voir l'article de F. BECKER dans le B.U.P. n° 630).

En comparant le papier Canson blanc mat 180 g/m^2 à un dépôt d'oxyde de magnésium de réflectance connue, on trouve une réflectance de environ 0,93 pour le Canson blanc et ceci avec une faible variation de 400 à 1 100 nm.

b) LA MESURE.

* Placer la substance à étudier sur du Canson noir mat 160 g/m^2 (dimensions : $100 \times 100 \text{ mm}$) et sous le tube du radiomètre, en essayant d'obtenir les surfaces les plus horizontales possibles.

* Mettre en place le cadre, précisé au § V.4., en le centrant sous le tube et disposer au-dessus une feuille de Canson blanc mat (dimensions : $100 \times 100 \text{ mm}$).

* Choisir le filtre souhaité et régler le gain pour que l'aiguille indique 93 car cette feuille réfléchit 93 % de la lumière reçue.

* Enlever la feuille blanche et lire l'indication X de l'aiguille. X représente la valeur, en pourcentage, de la réflectance de la substance étudiée.

* Recommencer l'opération avec d'autres filtres.

c) COMMENTAIRES.

Le fait que la surface blanche ne se trouve pas à la même distance de la photodiode que la substance étudiée n'entraîne aucune erreur car la surface blanche est homogène (voir § VI.3.).

Les résultats étant obtenus en lumière non monochromatique, ils dépendent un peu de la répartition spectrale de la source (voir § IV.5.b); même les rideaux colorés d'une salle ont une influence !)

Si la lumière du jour est insuffisante ou si elle varie de trop, il faut utiliser une lampe de bureau éclairant à 45° environ.

5. Analyse trichromique des couleurs.

Pour cela, il suffit de faire des mesures de réflectance (sur du Canson coloré mat par exemple) dans les bandes spectrales du bleu, du vert et du rouge 600-700 nm. On obtient ainsi les pourcentages de bleu, de vert, de rouge de lumière réfléchi.

6. Détection des infrarouges.

A l'aide du radiomètre muni du filtre infrarouge, on vise une plaque de fer chauffée ou le filament d'une lampe alimentée par une tension variable. On constate que l'aiguille dévie d'autant plus que le corps est plus chaud.

7. Transmission des filtres.

Pour déterminer le coefficient de transmission moyen d'un filtre dans une bande spectrale donnée :

- viser une feuille de papier blanc Canson mat,
- régler le gain pour que l'aiguille indique 100,
- placer le filtre à étudier contre et sous le porte-filtres en évitant de faire de l'ombre sur la feuille blanche,
- l'indication de l'aiguille donne alors le coefficient de transmission moyen du filtre.

8. Comparaison des éclairagements de deux surfaces.

Pour cette comparaison, il suffit de placer en ces endroits une feuille de papier Canson blanc mat et de les viser successivement avec le radiomètre en conservant le même gain d'une mesure à l'autre. Le rapport des indications de l'aiguille est sensiblement égal au rapport des éclairagements des deux surfaces. Il faut évidemment veiller à ne pas faire d'ombre, dans le champ d'observation, avec le radiomètre au cours de ces deux mesures.

9. Quelques conseils.

Avant toute mesure, mettre le gain au minimum (tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre).

Ne pas faire la mesure trop rapidement lorsque la lumière reçue par la photodiode est faible. Il en est ainsi pour des mesures dans le bleu avec l'éclairage d'une lampe à incandescence de faible puissance. Le courant n'atteint que lentement son régime permanent à cause de la charge ou de la décharge d'un condensateur.

Il est bon d'éviter les gains extrêmes en utilisant un éclairage complémentaire ou, au contraire, en diaphragmant par une petite rotation du porte-filtres (voir § V.4.).

Ne pas oublier de faire souvent la compensation du courant d'obscurité.

Les changements de position des mains ou de l'expérimentateur peuvent modifier l'éclairage de la cible surtout si les habits sont clairs.
