

Lucien CHRÉTIEN

INGÉNIEUR E. S. E.

*Directeur des Études à l'E. C. T. S. F.*

---

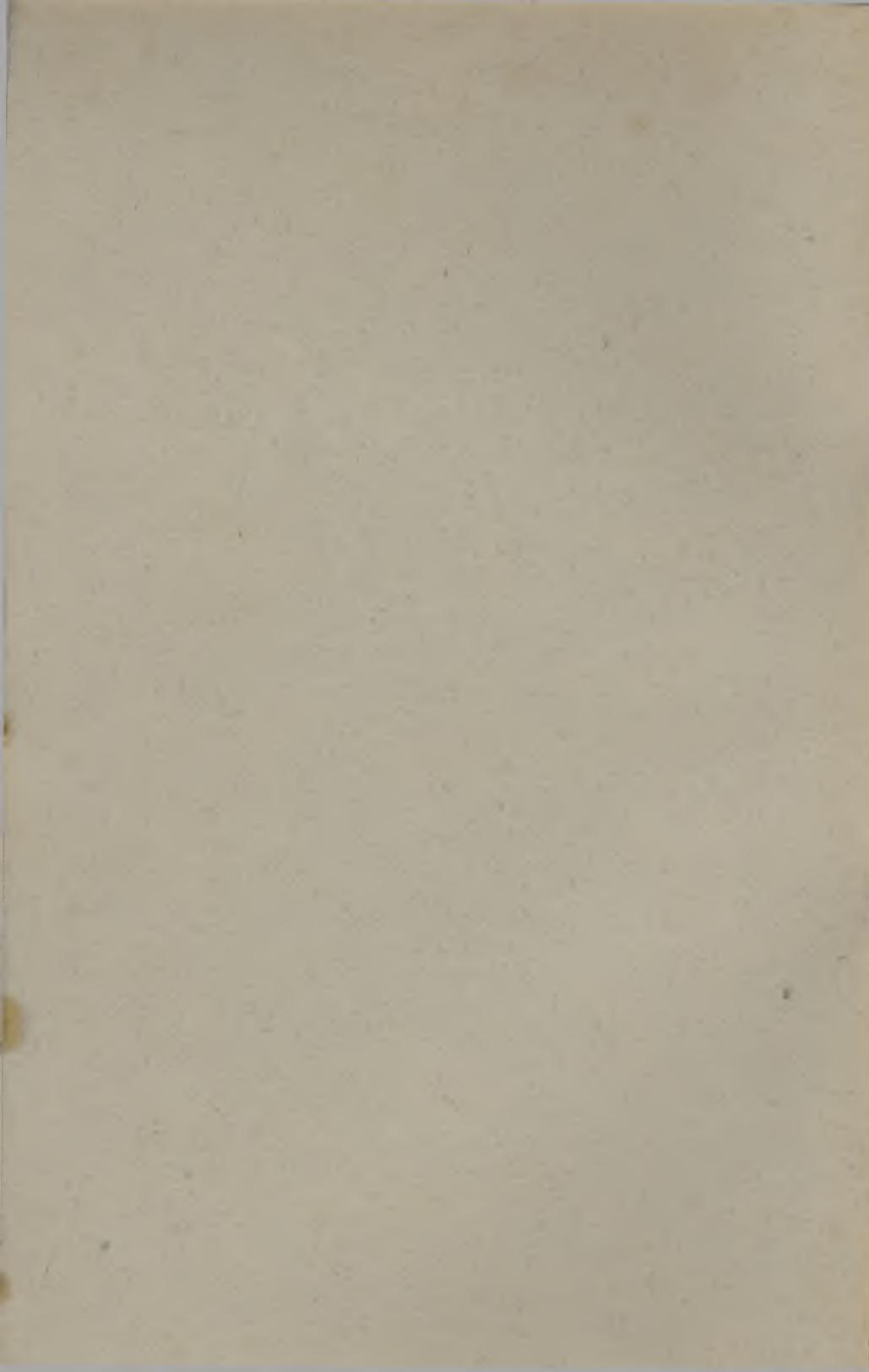
# L'ŒIL ELECTRIQUE

PHOTO-ELECTRICITE  
CELLULES PHOTOELECTRIQUES  
APPLICATIONS INDUSTRIELLES  
DIVERSES

**3<sup>e</sup> Édition**

EDITIONS CHIRON

40, rue de Seine  
PARIS



## OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

en vente aux Editions CHIRON, 40, rue de Seine, Paris (6<sup>e</sup>)

### *Théorie et Pratique de la Radio-électricité :*

Tome I. — « Les Bases de la Radio-électricité ».

Tome II. — « Théorie de la Radio-électricité ».

Tome III. — « Pratique de la Radio-électricité ».

Tome IV. — « Compléments modernes » (en préparation).

*Moteurs et Dynamos électriques*, un volume.

*Cellule Photo-Electrique et Cinéma sonore*.

*Physique Electronique du cours supérieur de Radto de l'E.C.T.S.F.*,  
un vol. paru.

*La T. S. F. sans mathématiques* (épuisé, nouvelle édition en préparation).  
remaniée).

*L'art du dépannage et la mise au point des postes de T.S.F.* (édition  
1945, entièrement remise à jour).

*L'art de la vérification des récepteurs de T.S.F.*, (nouvelle édition).

*Comment installer la T.S.F. dans les automobiles* (épuisé).

*Ondes courtes et ondes très courtes* (épuisé, nouvelle édition en prépara-  
tion).

*Ce que tout auditeur doit savoir des lampes de T.S.F.* (épuisé).

*Etude et réalisation d'un poste à haute fidélité musicale* (épuisé).

*Le tube à rayons cathodiques* (épuisé, nouvelle édition en préparation).

*Les tubes de la nouvelle technique transcontinentale « Série Rouge »*  
(épuisé).

*Ce qu'on doit savoir de la contre-réaction* (nouvelle édition entièrement  
remaniée, pour paraître début 1946).

*Eléments d'Acoustiques. La projection sonore*.

EN COLLABORATION AVEC P.-L. COURIER :

*Antennes et descentes d'antenne antiparasites*.

EN COLLABORATION AVEC G. GINIAUX :

*Les haut-parleurs et leur technique*.

*Le réglage automatique des récepteurs*.

*A.B.C. du Radio-Service*.

---

Tous droits de traduction et de reproduction réservés pour tous pays  
y compris la Suède, la Norvège et l'U.R.S.S.

Copyright by E. Chiron et L. Chrétien 1945.

## AVANT-PROPOS

---

On peut imaginer un certain nombre de problèmes pratiques qui semblent, à priori, difficiles à résoudre. Par exemple :

Commander automatiquement l'ouverture d'une porte quand un véhicule, un piéton se présentent devant le seuil. Commander la fermeture quand le passage est franchi. Maintenir la porte ouverte si le mobile reste arrêté sur le seuil.

Doser automatiquement un produit destiné à tuer les microbes d'une eau d'alimentation, suivant le degré de pollution de l'eau.

Protéger contre une imprudence ou une seconde d'inattention un ouvrier qui travaille devant une presse d'emboutissage. S'il approche sa main de la zone dangereuse, *sans contact matériel*, la presse se bloque.

Trier des objets suivant leur longueur, leur hauteur, leur *couleur*. Grouper les objets d'une même teinte (les cigares, par exemple).

Tisser devant une bijouterie, devant un coffre-fort, une chambre forte, un rideau invisible, immatériel, et cependant rigoureusement infranchissable. Tout accroc fait dans le voile impalpable alerte le gardien, sans même que le visiteur indésirable puisse se douter que sa présence est signalée.

Peser automatiquement un produit quelconque en demandant au mécanisme de faire la tare de charge du récipient.

Analyser les teintes composantes d'une nuance quelconque, (ce que notre œil est incapable de faire ; nous ne pouvons par exemple, distinguer le vert monochromatique d'un mélange de bleu et de jaune).

Avertir instantanément de la présence d'une fumée suspecte ou d'une flamme dans un local d'entrepôt ou dans une cale.

Détecter la présence de radiations invisibles : ultra-violet ou infra-rouge.

Apprécier avec rigueur le rapport d'intensité entre deux éclairagements (notre œil peut, tout au plus, apprécier leur égalité) etc..., etc...

Nous pourrions presque indéfiniment allonger cette liste.

Ces problèmes semblent exiger l'intervention d'une *intelligence* ou d'un *jugement*; pourtant ils peuvent être résolus avec une magique simplicité par l'emploi combiné d'un rayon lumineux, d'une cellule photo-électrique, d'une lampe triode et d'un relais.

La cellule photo-électrique, la lampe triode, sont bien maintenant des éléments industriels, au même titre qu'un électroaimant, ou qu'une dynamo. Les possibilités d'emploi sont innombrables. Il ne s'agit que de faire connaître le principe de réalisation.

Avant d'en arriver là, il nous a semblé indispensable d'initier nos lecteurs à un exposé très simplifié des phénomènes photo-électriques. Nous l'avons fait, sans avoir recours à la théorie proprement dite. Celle-ci nous aurait en effet entraîné fort loin. Nous aurions été dans l'obligation de citer des noms un peu effarants pour un lecteur moyen : *Einstein*, *Planck*, *de Broglie*, etc..., etc... Une étude complète de la question aurait nécessairement emprunté le langage de la théorie des *quanta* et de la *mécanique ondulatoire*. . . et nous avons préféré y renoncer dans ce petit ouvrage. Les élèves trouveront des compléments d'information dans le cours de Physique électronique que nous professons à l'Ecole Centrale de T. S. F. (1).

Quelques exemples de réalisation ont été empruntés aux notices aimablement fournies par « Alsthom », « Prolabo », « L. M. T. » et « Philips Industrie ». Un certain nombre de documents graphiques ainsi que des renseignements divers sont empruntés à une conférence de M. M. Wilfart, ingénieur à la Société Alsthom, intitulée « les *Commandes Photo-électriques industrielles* ».

(1) Un volume de 368 pages aux Editions Chiron.

# L'ŒIL ELECTRIQUE

---

## PHOTO-ELECTRICITE

La *Photo-électricité* étudie l'action de la lumière sur les phénomènes électriques. Cette action peut se traduire de différentes manières :

1°) La lumière peut arracher des électrons à la matière ; c'est le phénomène de *l'émission photo-électronique* ou *photo-émisif*.

2°) La lumière peut provoquer des variations dans la résistance électrique des circuits : c'est un effet de *photo-conductibilité*.

3°) La lumière peut provoquer des variations dans la force électromotrice d'une pile ; c'est *l'effet photo-voltaïque*.

4°) Elle peut aussi donner naissance à une force électromotrice. Le phénomène est utilisé dans les cellules photo-électriques à oxydes, encore appelées cellules photo-électriques à *couche de barrage* ou à *couche d'arrêt*.

Cet effet pourrait être logiquement classé dans la même catégorie que le précédent.

## EMISSION PHOTO-ELECTRONIQUE

### Historique

Au cours de ses expériences sur les ondes électro-magnétiques, *Hertz* constata que l'étincelle franchissait l'intervalle de l'éclateur pour une tension moins élevée quand l'électrode négative était éclairée par la lumière d'un arc électrique.

*Hallwachs*, en 1888, observa qu'une sphère de zinc, fraîchement polie, se déchargeait rapidement lorsqu'elle était éclairée par un arc électrique, à condition qu'elle fût négativement chargée.

On sait aujourd'hui que ces deux observations s'expliquent facilement, si l'on admet que la lumière arrache aux électrodes des charges négatives élémentaires qui sont des électrons. Cha-

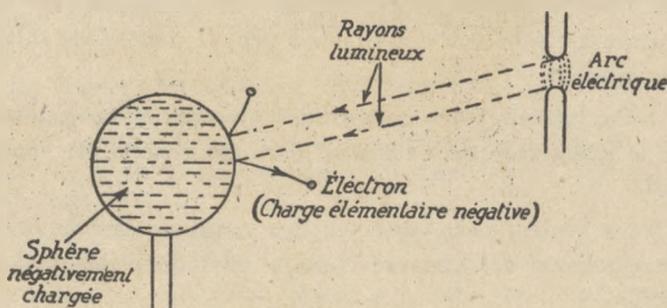


FIG. 1

que électron libéré enlève à la sphère de Hallwachs (fig. 1) une quantité d'électricité négative égale à  $4,77 \times 10^{-10}$  Franklins (unité électro-statique c. g. s.), c'est-à-dire :  $1,59 \times 10^{-11}$  Coulombs (unité électro-magnétique pratique). On conçoit donc que la charge électrique totale puisse disparaître entièrement au bout d'un certain temps.

Il n'en est pas de même quand la sphère est chargée positivement. Les électrons arrachés par l'énergie rayonnée, ne peuvent quitter la sphère : ils sont retenus par la charge positive.

### Cellule photo-émettrice

On dit aussi généralement : *cellule photo-électrique*. Elle se compose essentiellement d'une *cathode photo-sensible* et d'une *anode*, placées dans une ampoule vide d'air (cellule à vide) ou

emplie d'un gaz inerte sous faible pression (cellule à gaz) (fig. 2).

La cathode est généralement disposée en une couche plus ou moins épaisse sur le verre de l'ampoule. A l'opposé, une fenêtre, plus ou moins large, laisse pénétrer la lumière.

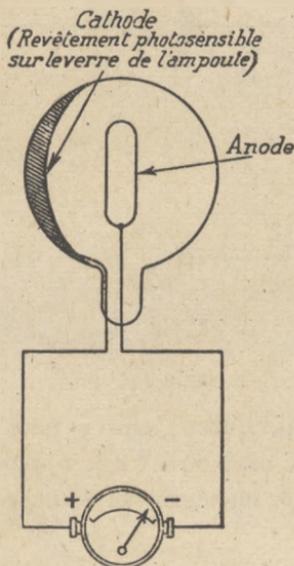


FIG. 2

L'anode est une grille à larges mailles, un simple anneau, ou même une tige cylindrique placée au milieu de l'ampoule.

Parfois le verre de l'ampoule est recouvert d'un vernis spécial pour éviter la pénétration de certaines lumières colorées qui pourraient détériorer la cathode.

Dans ces conditions, un galvanomètre, très sensible, permettant d'apprécier des intensités de l'ordre de 1 micro-ampère ( $10^{-6}$  ampère) accusera le passage d'un courant, quand la cathode sera éclairée.

L'effet est beaucoup plus facile à mettre en évidence si l'on

a soin de porter l'anode à une tension positive suffisante pour attirer et capter tous les électrons produits par la cathode (fig. 3).

Le rôle de la source de tension est le même que dans un

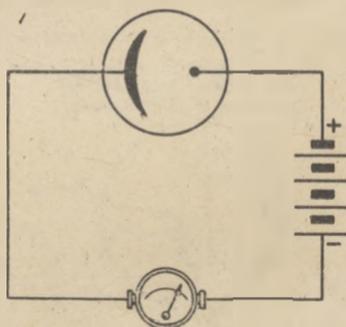


FIG. 3

tube à plusieurs électrodes; elle a pour effet d'annuler la charge d'espace, c'est-à-dire l'action répulsive produite par tous les électrons qui séjournent au voisinage de la cathode.

### Caractéristique de la cellule à vide

La caractéristique relative à une certaine intensité d'éclairage a la même forme générale que celle d'une lampe triode (fig. 4).

a) On constate l'existence d'un faible courant même pour une tension anodique nulle (région a).

Ce courant s'explique par les considérations suivantes: les électrons photo-électriques (on dit aussi les photo-électrons) sont arrachés de la cathode avec une certaine vitesse. Ils peuvent donc s'éloigner jusqu'à une certaine distance et atteindre la plaque, bien que celle-ci soit à la même tension que la cathode.

Pour annuler complètement le courant, il faut appliquer une tension en sens inverse. On peut remarquer que la grandeur de cette tension dépend essentiellement de la fréquence de la lumière (c'est-à-dire de sa couleur). Cette tension est souvent désignée sous le nom de *potentiel d'arrêt*.

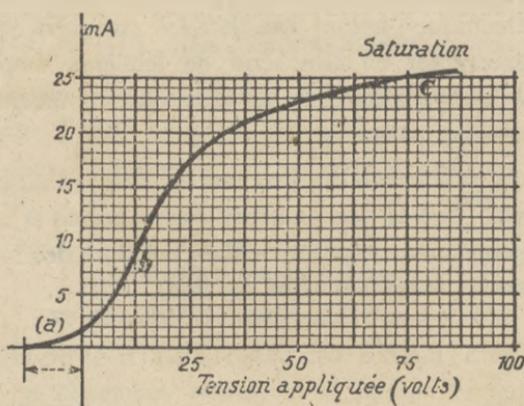


FIG. 4

b) Dans la seconde partie de la courbe (région b), l'intensité croît très rapidement avec la tension.

c) Dans la région c, la croissance devient de moins en moins grande. Elle cesse bientôt d'une manière complète. On dit qu'on a atteint la *région de saturation* (voir aussi -fig. 8 a).

### Influence de l'intensité lumineuse sur l'intensité de saturation

La théorie moderne de l'effet photo-électrique (Einstein) prévoit que l'intensité de courant de saturation doit être rigoureusement proportionnelle à l'intensité lumineuse de la source éclairante.

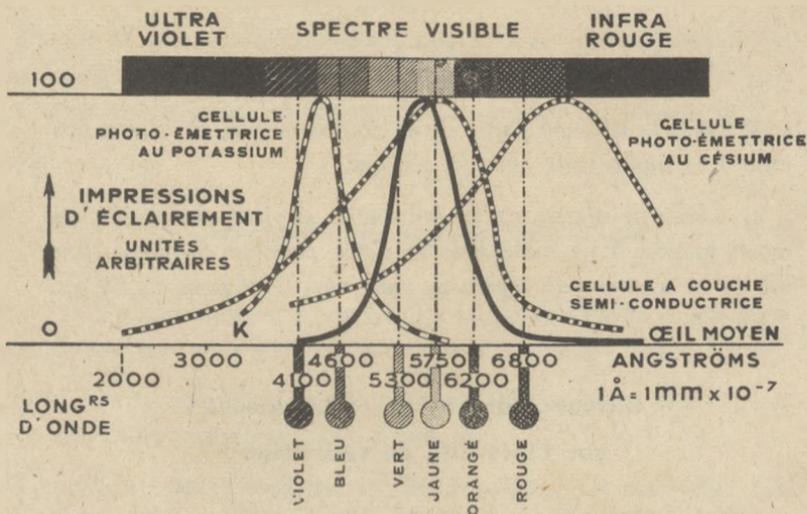
C'est ce que les expériences les plus précises ont exactement confirmé. (Millikan).

### Composition spectrale des sources lumineuses

Une source lumineuse quelconque (soleil, lampe à incandescence, arc électrique) fournit une lumière complexe qu'il est facile de décomposer en une série de lumières simples qui constituent le *spectre solaire* et qui sont : *violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge*.

On sait ainsi qu'il existe des lumières invisibles : l'*ultra-violet*, et l'*infra-rouge*. Toutes ces lumières correspondent à des fréquences différentes, ou, ce qui revient au même, à des longueurs d'onde différentes (mesurées dans le vide).

### CARACTERISTIQUES DE SENSIBILITE SPECTRALE



C'est ainsi que la lumière visible correspond à des longueurs d'onde comprises entre  $0,4\mu$  et  $0,75\mu$ .

On sait que le *micron* ou *mu*, désigné par la lettre grec-

que  $\mu$  (prononcer mu) vaut  $10^{-3}$  millimètre. On utilise aussi parfois l'unité *Angström* qui vaut  $10^{-8}$  cm. Par conséquent :

$$0,4\mu = 4.000 \text{ angströms}$$

$$0,75\mu = 7.500 \text{ angströms}$$

Des longueurs d'onde plus courtes que 4.000 angströms (entre 4.000 et 120), appartiennent à l'ultra-violet.

Au contraire, des longueurs d'onde supérieures à 7.500 angströms (entre 7.500 angströms et quelques centimètres) seront classées dans l'*infra-rouge*. (Voir croquis ci-dessus.)

### Nature de la cathode et sensibilité spectrale des cellules

Il est extrêmement intéressant d'étudier l'influence de la couleur (c'est-à-dire de la longueur d'onde de la lumière) sur l'effet photo-électrique.

Le phénomène photo-électrique est absolument général. On peut l'observer avec tous les corps : *conducteurs* ou *isolants*. Il est généralement très faible avec les isolants et il est limité par le fait que le départ d'un électron laisse une charge positive correspondante sur la surface de la cathode. Il en résulte que l'arrachement d'autres électrons devient de plus en plus difficile.

Les métaux du groupe alcalin (*lithium, sodium, potassium, rubidium, caesium*), permettent d'obtenir des courants photo-électriques relativement intenses. Ils seront donc, de préférence, utilisés comme cathodes.

Il est facile d'observer que certains métaux, le zinc par exemple, ne donnent un effet photo-électrique qu'avec une radiation ultra-violette. Une lumière jaune par exemple, ne permet pas d'obtenir un courant, *quelle que soit l'intensité de*

cette lumière. On peut mettre en évidence un *seuil photo-électrique* pour chaque métal, c'est-à-dire une longueur d'onde limite, au delà de laquelle l'effet photo-électrique ne se manifeste plus. Cette observation est encore en parfait accord avec la théorie.

Si l'on étudie la variation de courant photo-électrique, d'une cathode donnée, en fonction de la longueur d'onde lumineuse, pour une énergie lumineuse donnée, on obtient généralement une courbe qui présente un maximum fort net du côté du bleu ou de l'ultra-violet (effet photo-électrique sélectif). La forme générale de la courbe rappelle celle d'une courbe de résonance. Après passage par ce maximum, la sensibilité tombe régulièrement du côté du rouge, pour devenir nulle à la fréquence limite (fig. 5 a).

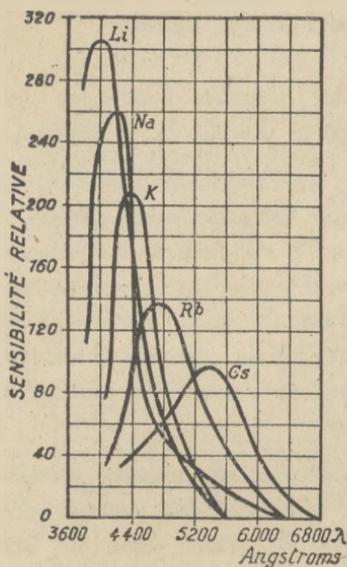


FIG. 5 a

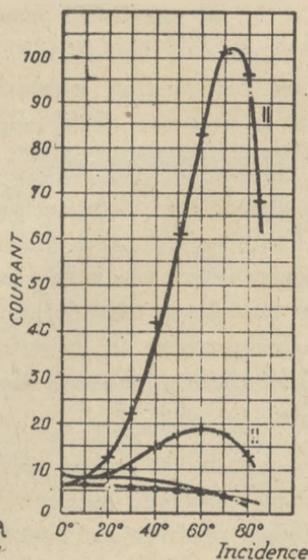


FIG. 5 b

### Effet des couches minces

Les indications précédentes sont valables pour des cathodes d'une certaine épaisseur. On a remarqué que les cathodes en

couches extrêmement minces, déposées sur une autre substance conductrice (couche de caesium sur argent oxydé) se compor-

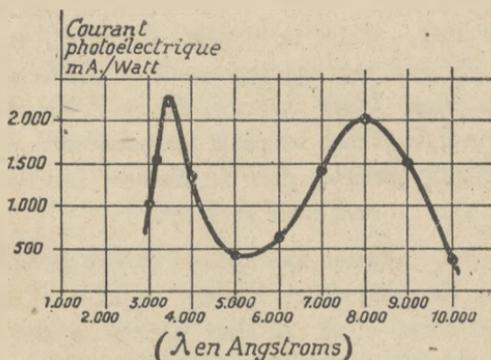


FIG. 6

taient d'une manière très différente. La sensibilité pour les grandes longueurs d'onde se trouve considérablement augmentée. En d'autres termes, le seuil se trouve reporté plus loin, du

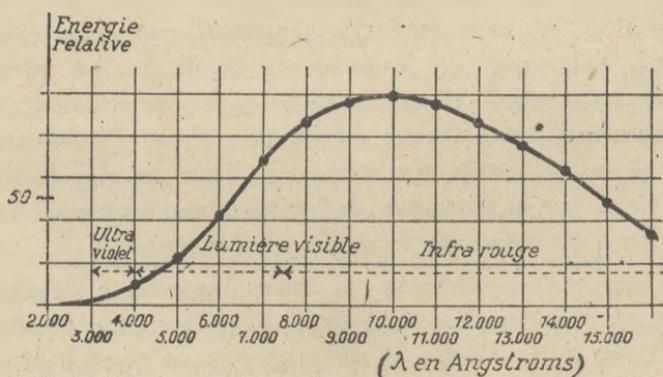


FIG. 7

côté des grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire du côté du rouge et de l'infra-rouge (fig. 6). La présence de certains com-

posés (oxydes, hydrures, etc...) ou l'emploi de cathodes complexes peut conduire au même résultat.

Il faut noter qu'il est fort intéressant d'obtenir des cellules sensibles au rouge et à l'infra-rouge. En effet, la plupart des sources de lumière usuelles rayonnent le maximum d'énergie dans l'infra-rouge. Nous donnons, figure 7, la répartition de l'énergie spectrale d'une lampe à incandescence ordinaire, du type atmosphère gazeuse, dont le filament fonctionnait à une température absolue de l'ordre de  $2.800^{\circ}$ .

D'autre part, certaines applications (contre le vol par exemple) exigent l'emploi d'une lumière invisible. On utilise les rayons infra-rouges et il est alors nécessaire de prévoir des cellules sensibles à ces radiations.

### Fréquence de la lumière et vitesse des électrons

La vitesse des électrons arrachés à la cathode peut être mesurée. Il est alors facile de remarquer que cette vitesse dépend *uniquement de la fréquence* de la lumière et non pas de son intensité. Ainsi, un rayon violet, extrêmement faible arrachera des électrons animés de vitesses s'échelonnant entre 0 et un certain maximum. Ce maximum sera toujours plus élevé que le maximum de vitesse observé avec un faisceau jaune ou rouge, *quelle qu'en soit l'intensité*.

Ce résultat remarquable a une énorme importance théorique. Il est, en effet, en désaccord absolu avec la théorie purement ondulatoire de la lumière, d'après laquelle un rayon lumineux serait un phénomène vibratoire se propageant dans un milieu problématique (*l'Ether lumineux*). Il ne peut s'expliquer simplement qu'en supposant la lumière formée d'atomes ou de corpuscules élémentaires nommés *photons* (Théorie de la Mécanique Ondulatoire et Théorie des Quanta).

### Utilisation des différentes cathodes

On choisira la nature de la cathode d'après la longueur d'onde des radiations que l'on voudra utiliser ou détecter. Il faudra tenir compte aussi du fait que le verre ordinaire est opaque aux rayons ultra-violet. S'il s'agit de mesures dans cette région du spectre, il faudra donc utiliser des ampoules de quartz fondu ou de verres spéciaux.

Les métaux ordinaires donneront des cellules utilisables seulement pour l'ultra-violet à courte longueur d'onde. Les métaux alcalins, déjà cités plus haut, en couches épaisses, permettront l'emploi en lumière ultra-violette de grande longueur d'onde et auront encore une sensibilité appréciable dans la partie du spectre visible s'étendant du violet au vert. Cela sera surtout vrai pour le *potassium*, le *rubidium* et le *caesium*. Pour le rouge et l'infra-rouge, on utilisera les mêmes métaux, mais en couches minces sur des supports métalliques ou d'oxydes.

### Cellules à atmosphère gazeuse

L'intensité de courant photo-électrique d'une cellule à vide est toujours très faible. On accroît considérablement la sensibilité de la cellule en introduisant dans l'ampoule un gaz inerte sous faible pression (hélium, néon, argon, etc.).

Le mécanisme du fonctionnement est alors le suivant : comme dans la cellule à vide, les photo-électrons sont arrachés à la cathode par la radiation lumineuse. Ces électrons sont attirés par l'anode et acquièrent ainsi une certaine vitesse. Dans leur trajet vers l'anode, ils heurtent d'autres molécules gazeuses et, si leur vitesse est suffisante, peuvent leur arracher d'autres électrons, c'est-à-dire provoquer l'*ionisation* de ces molécules. Les électrons ainsi produits peuvent aussi ioniser les molécules voisines. Il en résulte qu'un seul photo-électron primaire peut

produire de nombreux électrons d'ionisation et que l'intensité de courant est beaucoup plus grande.

Si l'on augmente la tension anodique, on communique une vitesse plus grande aux électrons; l'ionisation devient plus intense et la sensibilité s'accroît. *Il n'y a donc plus de courant de saturation.*

Mais il serait faux de croire qu'on puisse augmenter indéfiniment la tension. Les molécules auxquelles les électrons ont été arrachés, c'est-à-dire les ions, se dirigent vers la cathode. Elles sont, en effet, positivement électrisées. Le choc des

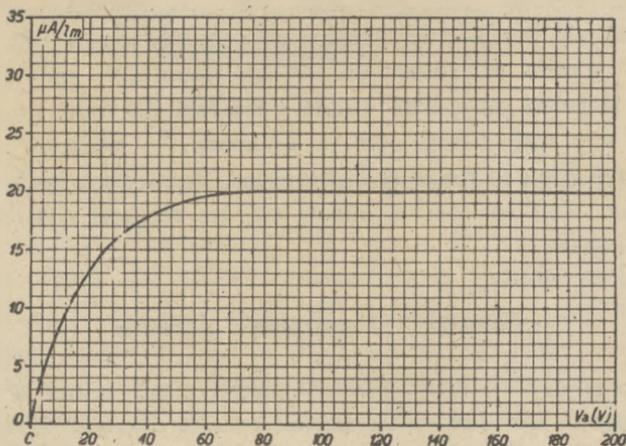
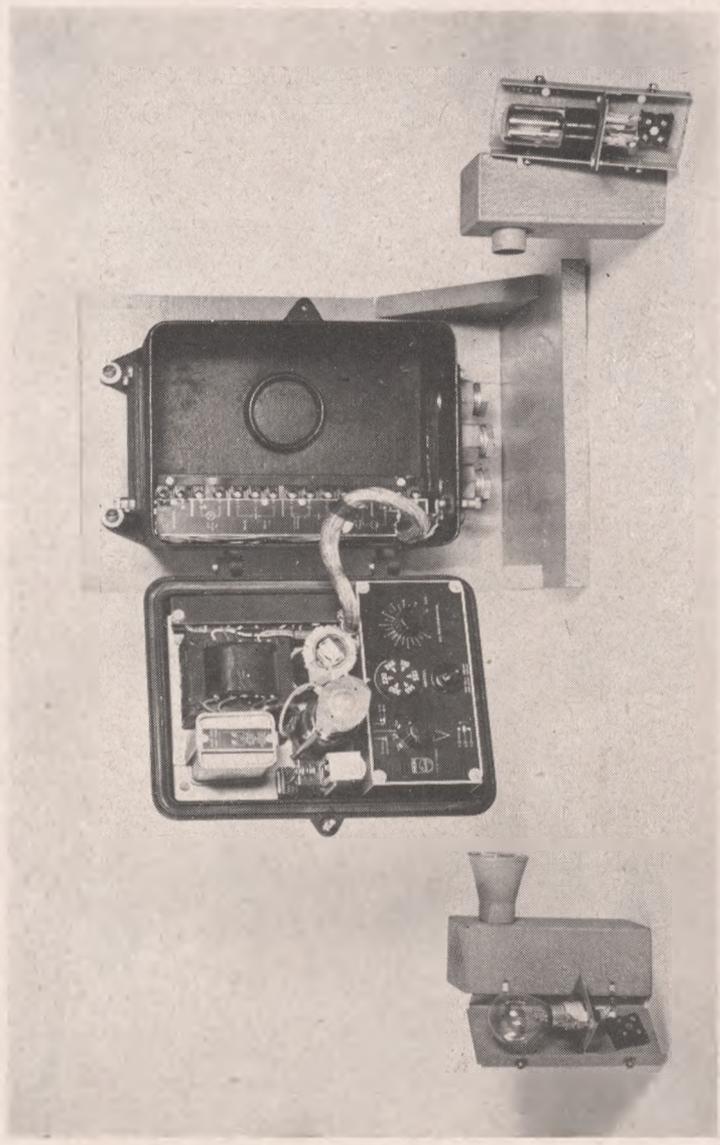
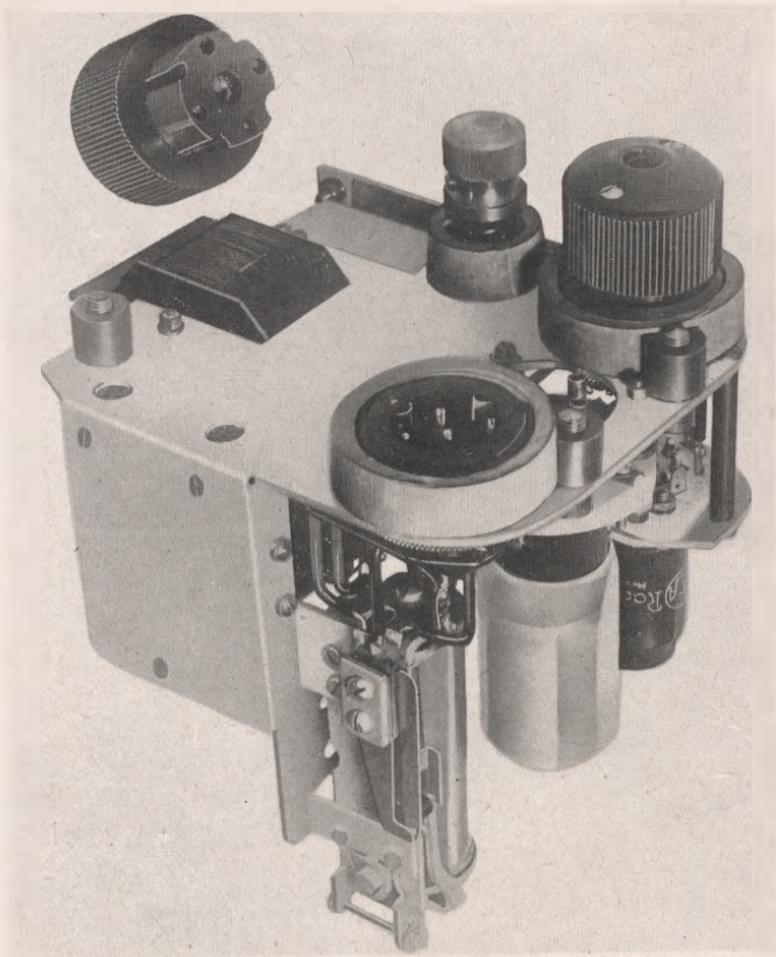


FIG. 8 a. — Variation du courant en  $\mu\text{A}/\text{Lm}$ , traversant une cellule à vide poussé à cathode au cæsium, en fonction de la tension aux bornes, pour une luminosité constante.

ions arrache des électrons à la cathode sans qu'il soit nécessaire d'éclairer celle-ci. Un courant permanent circule alors dans la cellule et on voit naître dans l'ampoule une *décharge lumineuse*. On dit alors que la cellule est *illuminée*. Ce phénomène peut mettre la cellule hors d'usage et il faut en éviter la production. Il y a donc, pour chaque cellule à gaz, une tension limite qu'il



Projecteur. Cellule photo-électrique et, au centre, Relais électronique alimenté par la cellule.  
(Cluché Philips-Industrie, 50, avenue Montaigne, Paris.)



Châssis d'automate photo-électrique.  
(Cliché Alsthom, 38, avenue Kléber, Paris-16°.)

ne faut pas dépasser et qui dépend, non seulement de sa construction, mais aussi de l'intensité lumineuse à laquelle on la soumet.

Pour éviter l'influence d'une « illumination » de la cellule, il est prudent de prévoir en circuit une résistance de l'ordre de 100.000 ohms qui limite l'intensité.

### Comparaison entre les cellules à vide et à atmosphère gazeuse

Le paragraphe précédent nous indique que les caractéristiques différeront essentiellement. Une cellule à atmosphère gazeuse ne présente pas de région de saturation.

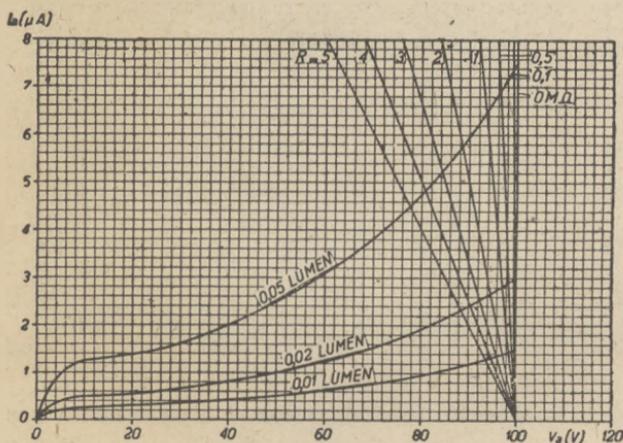


FIG. 8 b. — Variation du courant photo-électronique des cellules à atmosphère gazeuse, à cathode au césium, en fonction de la tension aux bornes par lumen et pour un éclairement constant.

C'est précisément ce que montrent les figures 8 a et 8 b.

Sur la figure 8 b on a tracé des droites de charges correspondant à diverses valeurs de la résistance en série avec la cellule.

Ces courbes permettent de calculer que la sensibilité exprimée en *micro-ampères par lumen* est de 20 pour la cellule à vide alors qu'elle atteint facilement 150 pour une cellule à gaz. L'écart est donc considérable.

Par contre, pour des mesures de précision, il est toujours préférable d'utiliser une cellule à vide. Il est en effet difficile de construire deux cellules à gaz qui soient rigoureusement identiques. Les caractéristiques ne sont pas absolument stables et peuvent varier sous des influences diverses.

La cellule à gaz présente une certaine *inertie*. Il faut entendre par là qu'une variation d'éclairage n'est pas instanta-

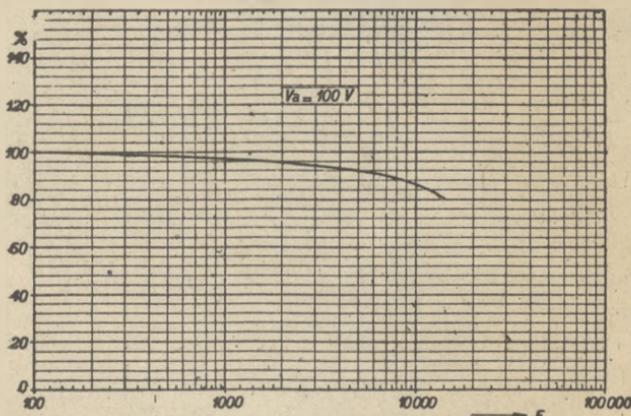


FIG. 9. — Caractéristique de fréquence d'une cellule à gaz

nément suivie par une variation de courant photo-électrique. Cela s'explique facilement : le phénomène d'ionisation dont dépend le fonctionnement de la cellule n'est pas instantané. Il se produit de proche en proche.

Il en résulte que la sensibilité tend à baisser à mesure que la fréquence de l'éclairage augmente. Cet effet est très net sur

le graphique fig. 9. La perte de sensibilité est de l'ordre de 10 % pour une fréquence de 10.000 périodes par seconde.

L'emploi des cellules à gaz est donc possible pour les fréquences acoustiques, au besoin en compensant la diminution de gain vers les fréquences élevées. Par contre elles ne pourraient convenir en télévision, les fréquences pouvant atteindre plusieurs millions de cycles par seconde.

### **Application des cellules**

L'étude des applications sera entreprise dans la seconde partie de cet exposé

## EFFET PHOTO-CONDUCTEUR

La *photo-conductibilité* n'a fait l'objet que d'applications peu nombreuses dans le domaine industriel, nous nous bornons donc à une étude très sommaire. Elle concerne les variations de résistance électrique d'un corps sous l'influence de l'éclairement.

### Propriétés du sélénium

Le sélénium, métalloïde découvert en 1817 par le chimiste suédois *Berzelius*, appartient à la même famille que le soufre dont les propriétés sont très souvent comparables. Comme le soufre, il peut se présenter sous différents aspects ou variétés allotropiques :

a) *Variétés non cristallines.*

b) *Variété cristalline rouge.*

c) *Variété cristalline grise ou métallique* (qui, seule, possède les propriétés qui nous intéressent). On obtient cette dernière variété à partir de la forme non cristalline. On porte le sélénium légèrement au-dessus de  $180^{\circ}$  et il se transforme lentement.

La variation de résistance du sélénium sous l'influence de la lumière a été découverte accidentellement en 1873 par *May* en utilisant des bâtonnets de sélénium comme résistances au cours d'essais sur les câbles transatlantiques.

### Constitution d'une cellule photo-conductrice

La résistivité du sélénium est extrêmement grande. Elle varie d'ailleurs, avec la pression. De plus, le sélénium est opaque sous une faible épaisseur. Ces deux remarques nous permet-

tent de comprendre comment est construite une cellule au sélénium. On s'efforce d'exposer une surface aussi grande que possible au flux lumineux et de réduire l'intervalle entre les deux électrodes.

On pourra par exemple, utiliser deux fils parallèles enroulés en spirales sur une plaquette isolante. L'intervalle entre les deux conducteurs sera rempli par une couche mince de sélénium.

On peut aussi recouvrir une plaque isolante d'une couche conductrice (or, platine, graphite, etc...), on sépare cette couche en deux parties par une rainure en zig-zag et on coule une mince pellicule de sélénium.

### Cellule Thallofide ou au Thallium

On a découvert d'autres corps, présentant le même effet photo-conducteur que le sélénium, par exemple l'*oxy-sulfure de Thallium*. On peut constituer des cellules de même construction que des cellules au sélénium.

Les cellules au sélénium ou au thallium, sont souvent placées dans le vide pour éviter l'action des agents de l'atmosphère.

### Théorie de l'effet photo-conducteur

On désigne parfois l'effet photo-conducteur sous le terme d'*effet photo-électrique interne*. On veut indiquer par là qu'il s'agit du même phénomène que dans les cellules photo-émettrices mais que les électrons libérés *restent à l'intérieur de la substance* et concourent tout simplement à modifier sa résistivité. Cette explication simple ne rend pas compte de toutes les observations, c'est pourquoi certains physiciens ont eu recours à d'autres théories sur lesquelles nous n'insisterons pas. Nous nous bornerons à indiquer que s'il s'agit bien d'un effet photo-électrique interne, il faut admettre que la simplicité des faits théoriques est masquée par des effets secondaires.

### Qualités et défauts des cellules photo-conductrices

La qualité principale est la grande sensibilité. Le physicien anglais *Fournier d'Albe* citait le cas d'une cellule de sélénium assez sensible pour produire une variation de courant mesurable sous l'influence d'un éclairage comparable à celui que donnerait une bougie placée à une distance égale à celle qui sépare la Terre de la Lune.

Le défaut principal, c'est l'inertie. L'intensité de courant n'atteint pas instantanément sa valeur définitive. Certaines cellules au Thallium ont pu, toutefois, être utilisées à des fréquences téléphoniques. C'est aux prix d'une diminution très importante de sensibilité.

Les cellules photo-conductrices présentent aussi très souvent un effet de fatigue. Il faut entendre par là que leur sensibilité décroît après un temps d'exposition prolongé ou après exposition à la lumière trop intense.

## EFFET PHOTO-VOLTAÏQUE CELLULES A COUCHES DE BARRAGE

---

### Effet photo-voltaïque

Les piles électriques présentent des variations de force électromotrice quand on éclaire les électrodes ou l'électrolyte : c'est l'*effet photo-voltaïque*, découvert par le Français *Becquerel* en 1849. C'est un effet absolument général, mais qui peut avoir, suivant les circonstances, une importance plus ou moins grande.

Cet effet n'a donné lieu qu'à des applications pratiques peu importantes. Nous ne le citons que pour mémoire, parce qu'il est sans doute de même nature que le phénomène étudié dans les paragraphes suivants.

### Cellule photo-électrique à l'oxyde de cuivre Effet avant, effet arrière

Si l'on soumet une plaque de cuivre rouge à une température de l'ordre de  $1.000^{\circ}$ , on produit une oxydation de la surface. En allant de l'extérieur vers l'intérieur, on trouve d'abord une couche d'oxyde noir, puis une couche rouge et semi-transparente d'oxyde cuivreux ou oxydure ( $\text{Cu}^2\text{O}$ ). Au delà, existe une couche de passage, qu'on peut considérer comme une solution de cuivre dans l'oxyde, et enfin, le cuivre métallique.

On enlève l'oxyde noir par un procédé mécanique ou chimique et l'élément ainsi obtenu, jouit de propriétés électriques particulières. Sa résistance électrique dépend du sens de circulation du courant : *c'est un redresseur*.

C'est aussi un *élément photo-électrique*. Si l'on expose la surface à la lumière, une différence de potentiel naît entre l'oxyde et le métal, de telle sorte que l'oxyde soit un pôle

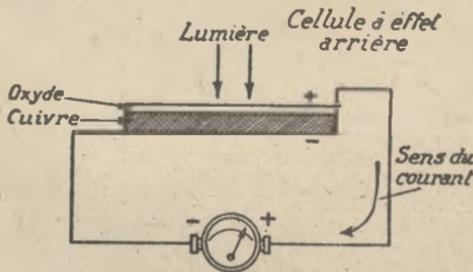


FIG. 10

positif, et le cuivre un pôle négatif. Un conducteur extérieur est le siège d'un courant assez intense pour qu'un appareil de mesure à cadre puisse le mesurer. Une telle cellule est dite à *effet arrière* (fig. 10). On peut aussi obtenir un autre mode de fonctionnement. La couche oxydée est recouverte d'une contre-électrode transparente, une très mince couche d'or par exemple. Dans ces conditions précises, on constate encore

l'existence d'un courant, mais dans un sens opposé au précédent : on est alors en présence d'une cellule dite à *effet avant* (fig. 11) dont la sensibilité est notoirement plus élevée.

### Cellule photo-électrique au sélénium

On peut aussi fabriquer des cellules photo-voltaïques de ce type (à couche de barrage) en utilisant le sélénium. La couche support est une plaque de fer pur. On coule une couche de sélénium fondu d'une épaisseur d'environ 0,1 mm. Après quoi, il faut sensibiliser la cellule en modifiant la texture du sélénium. On le soumet pendant plusieurs heures à une température de l'ordre de 180° pour le transformer en variété grise.

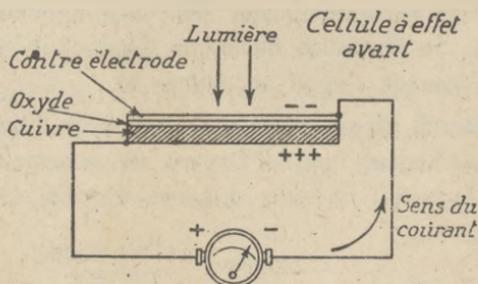


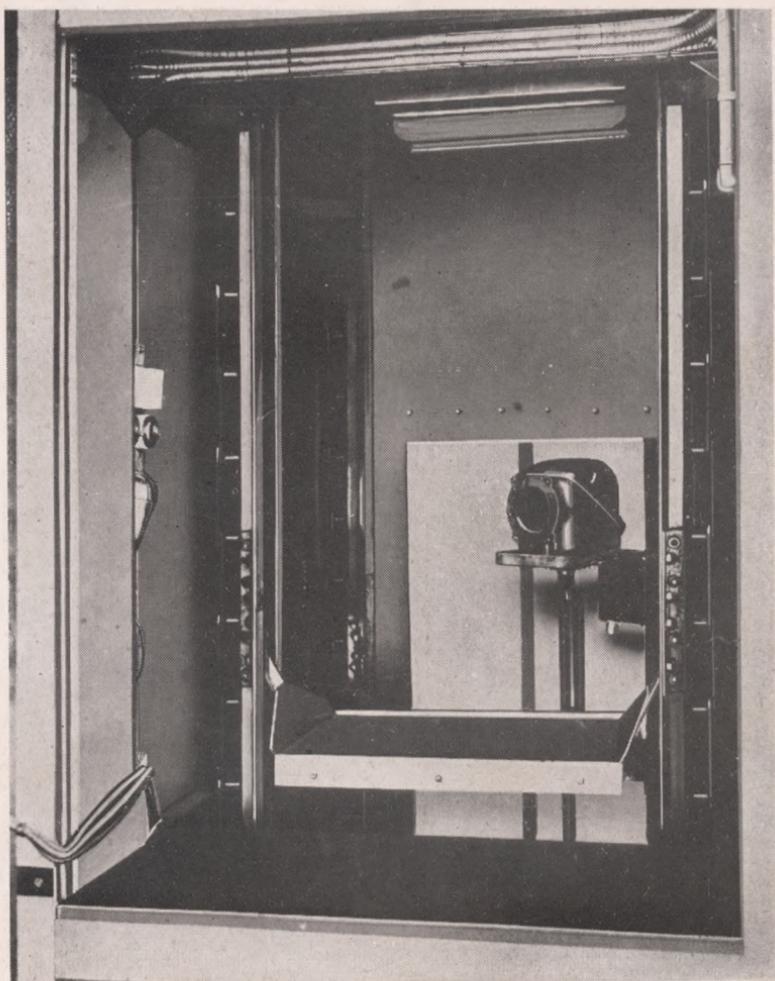
FIG. 11

La contre-électrode est une couche métallique assez mince pour être pratiquement transparente (plomb, or, platine, etc...), obtenue par bombardement cathodique.

*La cellule ainsi constituée est une cellule à effet avant.*

### Théorie du fonctionnement

On explique le fonctionnement de ces cellules en admettant l'existence d'une *couche d'arrêt* ou *couche de barrage* entre la contre-électrode et la surface active. Il y aurait libération de photo-électrons dans l'épaisseur de la cellule, mais ceux-ci éprouveraient une difficulté beaucoup plus grande à circuler dans un certain sens. Il y aurait ainsi naissance d'une force électro-motrice produisant une intensité de courant dans le circuit extérieur.



Automaticité photo-électrique.  
Arrêt d'un transporteur vertical, avec comptage.  
(Cliché Alsthom, 38, avenue Kléber, Paris-16<sup>e</sup>.)

CARACTERISTIQUES ET EMPLOI DES CELLULES PHOTOELECTRIQUES

TYPES ET CORRESP.	MARQUE	A GAZ OU A VAIDE	USAGES	CONNEXIONS DU CULOT (VOIR SCHEMAS)	CATHODE			CAPACITE - RELECT. (1/4F)	MAX. DE TEMPERATURE AMBIANTE	MAX. TENSION D'UTILISATION	MAX. COURANT ANODE (μA)	RESISTANCE DE CHARGE (EN MEGOHMS) Pr					
					ZONE DE SENSIBILITE (A°)	SENSIBILITE μA/LU	SURFACE FENETRE EN MM					75 v		90 v		250 v	500 v
												Pr - de 3,5 mA	Pr + de 3,5 mA	Pr - de 2 mA	Pr + de 2 mA		
A 10 TCG3A 868 et 918 2535	FOTOS FOTOS RCA CDC	G	SOM RELAIS	C1	7000/8000	150/200	20 × 30	2,5	100	90	10	0	0,1	0,1	2,5		
A11 TCG3E	FOTOS FOTOS	G	SOM RELAIS	C2	7000	150/200	20 × 30	2,5	100	90	10	0	0,1	0,1	2,5		
A12 TCG3 RA	FOTOS FOTOS	G	SOM RELAIS	C3	8000	150/200	20 × 20	2	100	90	8	0	0,1	1	4		
A14 3535 917	FOTOS PHILIPS RCA	V	RELAIS MESURES	C1 ou ss culot	8000	150/200	20 × 30	2	100	500	20					1	10
A15 A16 927 TCG5	FOTOS RCA FOTOS FOTOS	G	RELAIS SOM	C1	7000	150/200	20 × 80	2,5	100	90	25	0	0,07	0,05	1		
A17 3530 2225	FOTOS PHILIPS C d c	G	RELAIS	C5 Sp. 8	7000 ou 8000	150/200	13 × 25	2	100	90	2	0	0,1	0,1	1		
A18 TCG5 bis	FOTOS FOTOS	G	EOM	Culot sans broches	7000 ou 8000	150/200	13 × 25	2	100	90	2	0		0,1			
A19	FOTOS	G	SOM RELAIS	C3	7000/8000	150/200	20 × 25	2,25	100	90	10	0	0,1	0,5	3		
A20	FOTOS	G	SOM RELAIS	C3	8000	150/200	20 × 30	2,5	100	90	10	0	0,1	0,1	2,5		
A21 2520 E	FOTOS C d c	G	SOM RELAIS	C7	8000	150/200	20 × 20	2,5	100	90	8	0	0,1	0,1	2,5		
A22 2520 A	FOTOS C d c	G	SOM RELAIS	C1	8000	150/200	20 × 20	2,5	100	90	8	0	0,1	0,1	2,5		
A23 TCV3A	FOTOS FOTOS	V	RELAIS MESURES	sans Culot	7000/8000	150/200	20 × 30 DEUX DE	2,3	100	250	15					1	
A24 920	FOTOS RCA	G	SOM RELAIS	C8	7000.8000	150/200	25 × 6,5	1,5	100	90	6	0	0,1	1	4		
A13 TCG3RE	FOTOS FOTOS	G	SOM RELAIS	C4	8000	150/200	20 × 20	2	100	90	8	0	0,1	1	4		
A25 925	FOTOS RCA	G	RELAIS MESURES	C9 (OCTAL)	8000	150/200	20 × 20	2,5	100	90	8	0	0,1	1	4		
A26 923	FOTOS RCA	G	SOM RELAIS	C1	8000	150/200	20 × 20	2	100	90	8	0	0,1	1	4		
3533	PHILIPS	G	SOM RELAIS	A12	7000/8000	150		-	-	80 100	5 2			0,1 1			
3534	PHILIPS	G	SOM RELAIS	C3	7000/8000	150				70 90	5 2			0,1 1			
3543	PHILIPS	G	SOM RELAIS	Sp.16	7000/8000	150				70 90	5 2			0,1 1			
3546	PHILIPS	G	SOM RELAIS	Sp.8	7000/8000	150				75 90	5 2			0,1 1			
G40	FOTOS	G	COLORI- METRIE	C1	4000	200	20 × 30	2,5	100	90	10						
G41	FOTOS	V	COLORI- METRIE	C1 ou sans cu- lot	4000	200	20 × 30 DEUX FOTS	2,25	100	250	10					1	
G42	FOTOS		COLORI- METRIE	C8	4000	200	25 × 6,5	1,5	100	90	8	0	0,1	1	4		
A67	MULTIPLICA- TEUR D'ELEC- TRONS FOTOS		SPECIAUX							1500 à 1800	0,25	500.000 ohms entre électrodes (pont de 8 résistances série)					
G67	MULTIPLICA- TEUR D'ELEC- TRONS FOTOS		SPECIAUX														

Pour toutes les cellules, maximum de flux : 0,1 Lumen. Pour les multiplicateurs, maximum de flux : 0,01 Lumen.

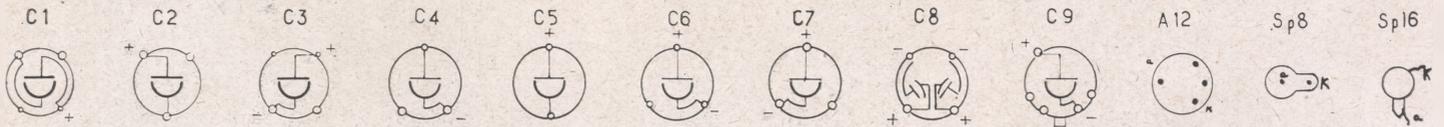
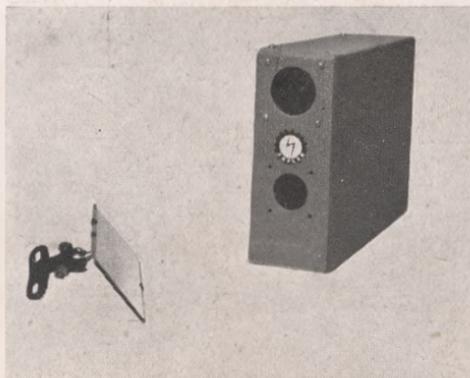


Tableau des culots de quelques cellules photo-électriques.



Protection contre le vol, avertissement du passage d'une personne par le combiné *Sentinel*, comportant le projecteur et la cellule, le renvoi du faisceau du premier vers la seconde étant fait par un simple miroir, orientable à la pose. (Cliché *Industrial Electric Equipment*.)



Cellule photo-électrique, amplificateur et relais contenus dans un tube de 7,7 cm de diamètre et 22,5 cm de hauteur. Usage: protection sur machines dangereuses: massicot, presse, laminoir. Distance d'utilisation: 20 mètres. Peut servir au comptage. (Cliché *Industrial Electric Equipment*.)



Protection de grandes surfaces avec réflexion du rayon sur 2 glaces parallèles; le coffret contient cellule, double amplificateur et relais. Cet équipement est aussi livré en coffrets étanches. Le projecteur est séparé, présenté dans un cylindre. (Cliché *Industrial Electric Equipment*, 33, rue Boussingault, Paris.)

## Propriétés électriques

La couche de barrage peut être considérée comme une résistance élevée, mais qui n'est cependant pas infiniment grande. Une fraction des électrons libérés peut donc traverser la couche de barrage. Cette fraction est d'autant plus grande que la

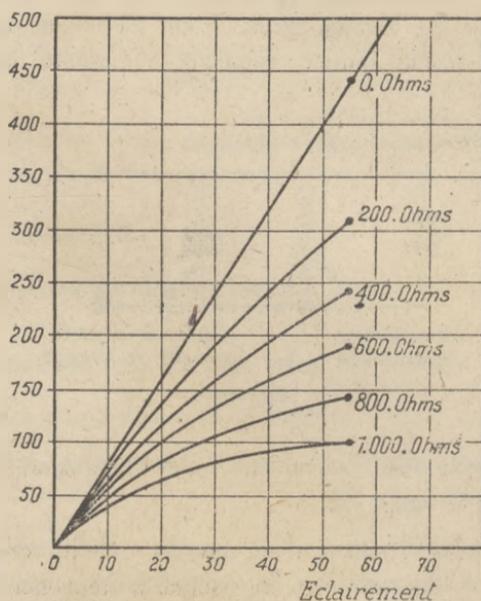


FIG. 12

résistance du circuit extérieur est elle-même plus grande et que la résistance interne est plus faible. Or, cette dernière, assez élevée dans l'obscurité, diminue rapidement quand on augmente l'éclairement. On doit donc s'attendre à observer une modification de la forme des caractéristiques avec la valeur de la résistance extérieure.

C'est bien ce que l'expérience confirme. Si la résistance extérieure est faible, l'intensité de courant fournie est très sensiblement proportionnelle à l'éclairement. Nous donnons,

figure 12, les courbes caractéristiques d'une cellule à oxyde de cuivre.

On fait la même observation pour les cellules au sélénium. D'après Mme Roy-Pochon (1), on observe que la caractéristique s'écarte d'autant plus d'une droite :

- a) que la résistance de la cellule est plus grande ;
- b) que la résistance extérieure est elle-même plus grande.

La couche de barrage étant d'une épaisseur extrêmement faible, il en résulte qu'une capacité importante existe entre

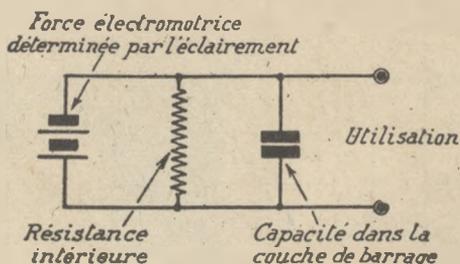


FIG. 13

les deux électrodes. Le schéma équivalent serait donc celui qui est indiqué figure 13.

D'après cela, il est évident que la cellule sera incapable de répondre à des variations de courant à fréquence élevée. La composante alternative se trouve pratiquement mise en court-circuit par le condensateur. Il en résulte que les cellules à couches d'arrêt ne peuvent être utilisées en lumière modulée (cinéma sonore) à fréquence relativement élevée.

### Sensibilité spectrale

Les cellules à oxyde de cuivre à *effet arrière*, ont un maximum de sensibilité en lumière rouge. Cela s'explique parce

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, Déc. 1934.

que la lumière doit traverser la couche d'oxyde avant d'arriver à la couche photo-sensible. Or, l'oxyde ne laisse guère passer que les radiations rouges.

Les cellules à effet avant présentent un maximum de sensibilité dans le jaune. La forme de leur courbe de sensibilité rappelle tout à fait celle de l'œil humain, ce qui a des avantages précieux pour certaines applications (photométrie).

Les cellules au sélénium ont un maximum de sensibilité dans le rouge orangé. La sensibilité à l'infra-rouge est appréciable.

Par l'emploi de filtres appropriés on peut obtenir une courbe de sensibilité tout à fait comparable à celle de notre œil.

### Comparaison des différents types de cellules

Nous rappelons que les trois types de cellules sont :

- a) *cellules photo-émisives* (à vide ou à gaz) ;
- b) *cellules photo-conductrices* (sélénium, oxysulfure de thallium) ;
- c) *cellules photo-voltaïques ou à couche de barrage* (oxyde cuivreux, sélénium sur fer).

Les deux premières catégories exigent l'emploi d'une source de courant continu extérieure. On peut les considérer comme des relais. La dernière catégorie fonctionne sans force électromotrice extérieure. Elle fournit une intensité de courant suffisante pour actionner directement un relais ou un appareil de mesure à cadre mobile. C'est un avantage important. On pourrait être tenté d'apprécier la qualité des cellules d'après la puissance électrique qu'elles peuvent libérer. On verrait ainsi, d'après le tableau ci-après, que la puissance fournie par une cellule à couche d'arrêt est très faible. Il faut remarquer, tou-

tefois, qu'elle est beaucoup plus facile à utiliser que la puissance fournie par les cellules d'autre type. Elle correspond, en effet, à une intensité relativement grande, sous une faible tension, avec une faible résistance interne. La charge optimum, donnant le maximum de puissance utile correspond à une résistance de 1.000 à 2.000 ohms, ce qui est facilement réalisable.

Par contre, si l'on voulait utiliser directement la puissance fournie par une cellule photo-émettrice, on serait amené à prévoir un relais dont les enroulements présenteraient une résistance de *plusieurs centaines de milliers d'ohms*, ce qui serait pratiquement impossible à réaliser.

Malgré tout, la puissance fournie par les cellules photo-électriques à couche de barrage demeure faible. On ne peut guère l'utiliser pour commander directement, avec sécurité, un relais de puissance. Il faut passer par l'intermédiaire d'un relais primaire, commandant à son tour, un relais secondaire ou de puissance. Dès lors, son principal avantage, pour les commandes automatiques, semble s'amoindrir. Une lampe triode, un thyatron sont aujourd'hui des organes industriels, moins coûteux et d'un fonctionnement tout aussi sûr qu'un relais électro-magnétique.

Nous pouvons donc conclure que le débat reste ouvert et que, pour résoudre les problèmes d'automatisme, on peut s'adresser tout aussi bien aux cellules photo-émettrices qu'aux cellules à couche de barrage.

TYPE DE CELLULE	PHOTO-VOLTAÏQUE (oxyde cuivreux)	PHOTO- CONDUCTRICE (Thallium)	PHOTO- ÉMETTRICE (caesium argon)
Tension appliquée ou fournie (volts).....	0,01	100	100
Intensité (microampères)...	10	65	12
Puissance correspondante (microwatts) .....	0,01	6.500	1.200

### Amplification des courants photo-électriques

Quel que soit le principe des cellules, la puissance libérée demeure faible pour actionner directement un relais avec sécurité. On peut, certes, construire des relais déclenchant pour  $1/1000^{\circ}$  de watt, mais il s'agit d'organes très fragiles qui doivent être mis à l'abri des vibrations de toutes sortes qui peuvent se produire dans une usine ou dans un magasin.

De plus, nous venons de montrer que la puissance fournie

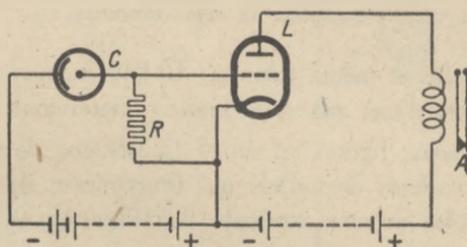


FIG. 14. — Dispositif à cellule. Le relais enclenche à l'interruption du rayon lumineux.

par les cellules photo-émettrices se prête mal à l'utilisation directe ; par contre, il est facile de l'utiliser pour agir sur la grille d'une lampe triode agissant comme relais.

Il est donc toujours nécessaire d'*amplifier* le courant fourni par la cellule photo-émettrice pour commander le premier relais. La lampe triode, est l'organe idéal, pour obtenir ce résultat. Elle est d'un emploi très général aujourd'hui, ses propriétés sont bien connues et les modèles usuels sont partout disponibles. L'alimentation de la lampe peut, sans difficulté, être empruntée au réseau.

Il suffit d'une énergie bien inférieure à 1 microwatt pour amener une variation appréciable de courant anodique, correspondant, par exemple, à une puissance libérée dépassant 1 watt. Le relais correspondant ne sera plus un fragile instrument de laboratoire, mais un appareil industriel robuste et sûr.

La durée de vie du tube triode pourra être considérable si l'on prend soin de l'utiliser très loin des limites permises. Elle

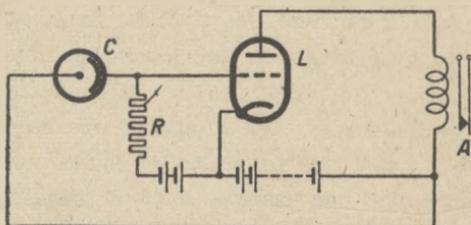


FIG. 15. — Dispositif à cellule. Le relais enclenche à l'apparition du rayon lumineux.

pourra atteindre et même dépasser 10.000 heures, ce qui correspond à plus d'une année de service ininterrompu.

Nous donnons, figures 14 et 15, le schéma de principe de deux amplificateurs de cellule qui fonctionnent dans deux cas différents. Une premier exemple de réalisation est donné fi-

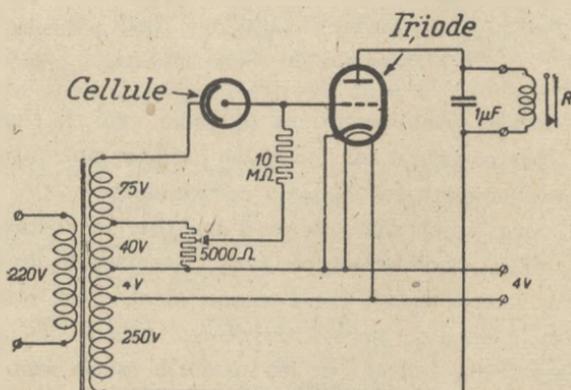


FIG. 16. — Schéma d'un amplificateur de cellule, basé sur le principe de la figure 14 et entièrement alimenté en courant alternatif.

gure 16. Le tube triode est utilisé en auto-redresseur. En effet, il n'y a pas de valve, et seules les alternances positives peuvent provoquer la naissance d'un courant dans le circuit de pla-

que. Un second exemple est donné figure 17. La lampe triode commande un thyatron (ou tube relais) qui n'est pas autre chose qu'un tube triode à atmosphère gazeuse. L'énergie libérée dans le circuit-plaque de ce dernier est beaucoup plus considérable que celle d'un tube triode de même grandeur. On construit des thyatrons pouvant commander jusqu'à 50 kilowatts.

Lorsque l'on veut utiliser de très fortes amplifications, on

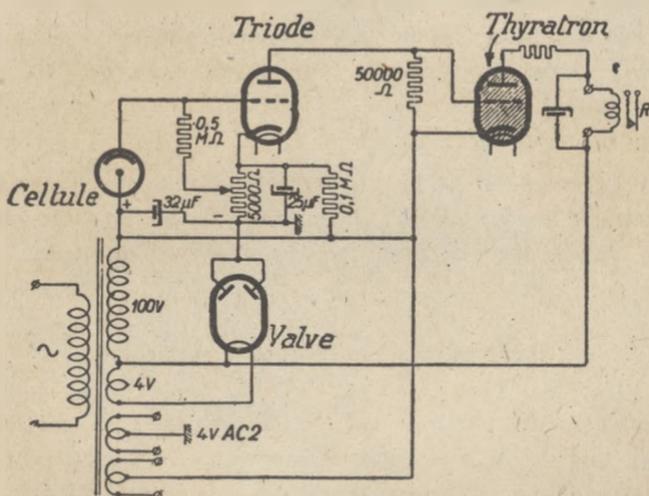


FIG. 17. — Schéma d'un amplificateur de cellule à grande sensibilité.

éclaire généralement la cellule en *lumière modulée*, c'est-à-dire en lumière interrompue un certain nombre de fois par seconde. Le courant de cellule est alors un courant alternatif qu'il est facile d'amplifier par les moyens utilisés habituellement en basse fréquence.

## LES MESURES UTILISANT LES CELLULES

Pour utiliser la cellule comme appareil de mesure, il convient de tenir compte de certaines remarques importantes :

1) *La cellule est un instrument de comparaison plutôt qu'un instrument de mesure proprement dit.* Les indications lues dépendent des propriétés de la cellule, qui peuvent se modifier avec le temps, ainsi que des propriétés de l'amplificateur qui, lui est le plus souvent associé. L'appareil de mesure devra donc être étalonné de temps en temps.

2) *La cellule n'est pas également sensible aux différentes régions du spectre visible.* On ne pourra donc comparer utilement que des lumières ayant même composition spectrale.

### Photométrie des lampes d'éclairage

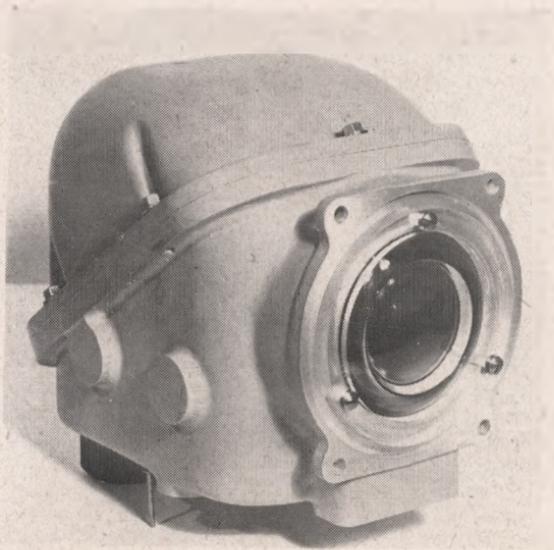
Notre œil ne peut pas mesurer les différences d'éclairement, même s'il s'agit de deux sources de même composition spectrale. Nous pouvons dire que tel éclairement est plus intense que tel autre. Mais nous sommes incapables d'apprécier le rapport et de dire, par exemple, que le premier éclairement est de deux fois plus intense que le second.

Pour tourner la difficulté on a recours aux *photomètres*. Les deux sources à comparer éclairent deux surfaces différentes et on modifie la distance d'une des sources à la surface éclairée, de manière à obtenir l'égalité d'éclairement. Sachant que l'éclairement varie en raison inverse du carré de la distance, on peut facilement déduire le rapport d'intensité des deux sources lumineuses.

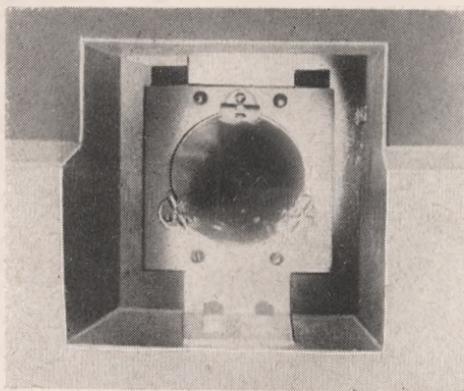
On conçoit facilement que cette méthode soit lente et peu précise. Il faut opérer dans une chambre noire. L'opérateur se



Automaticité photo-électrique.  
Signalisation au passage d'une porte. (Cliché Alsthom.)



Automate photo-électrique. (Cliché Alsthom.)



Automaticité photo-électrique. Fixation d'un miroir.  
(Cliché Alsthom, 38, avenue Kléber, Paris-16.)

fatigue très vite. Pour comparer des sources d'éclat très différent il faut disposer de grandes distances. La cellule photo-électrique donne une solution parfaite à ce problème. *Le courant fourni est proportionnel au flux lumineux reçu.* Il n'est donc plus besoin de déplacer la source. Il suffit de lire l'intensité de courant. Les lampes à comparer sont placées les unes après les autres, au même endroit. La seule manœuvre consiste à placer la lampe et à lire l'indication de l'appareil de mesure. C'est rapide, instantané et peu fatigant.

On peut utiliser des cellules à couche de barrage alimentant directement un galvanomètre à cadre; on peut aussi utiliser la combinaison: cellule photo-émettrice et tube triode.

Le montage de principe sera celui de la figure 15. On remplacera le relais par l'appareil de mesure. Mais la lampe, réglée dans la partie droite de la caractéristique, fournit un courant anodique permanent. On peut compenser celui-ci à l'aide d'un simple dispositif potentiométrique, de telle sorte que l'appareil de mesure soit rigoureusement au zéro quand la lampe d'éclairage est éteinte.

Cette solution offre le double avantage suivant :

a) La lecture de l'appareil de mesure sera immédiate. Il sera inutile de tenir compte de l'intensité de courant permanent.

b) On pourra utiliser un appareil de mesure beaucoup plus sensible. On prendra, par exemple, un galvanomètre 0-500  $\mu\text{A}$  alors que le courant permanent de la lampe sera de 5.000  $\mu\text{A}$ .

L'appareil de mesure pourra être directement gradué en unités lumineuses.

### **Luxmètre portatif. Posemètre**

Un appareil encore plus simple que le précédent, bien que moins précis, pourra être réalisé par l'association d'une cellule

à couche d'arrêt (oxyde cuivreux, ou sélénium) associée à un galvanomètre à cadre. On pourra ainsi mesurer l'éclairement en un endroit quelconque. L'appareil pourra se mettre dans la poche.

Il pourra aussi être gradué de telle sorte que l'indication de l'aiguille donne directement la valeur du temps de pose pour photographier ou cinématographier un sujet quelconque. On expose alors la cellule à la lumière réfléchie par le sujet. Il est facile d'imaginer des systèmes simples permettant de tenir compte de la sensibilité de l'émulsion photographique et de l'ouverture du diaphragme.

### Mesures d'opacité

Les cellules photo-électriques permettent facilement de mesurer, par comparaison avec un échantillon quelconque l'opacité ou la transparence d'un milieu. Il est facile de déterminer au cours même de la fabrication, l'opacité d'un papier par exemple.

Les variations d'opacité sont immédiatement visibles par la seule indication d'un appareil de mesure. Le principe est très simple : on utilise une lampe à incandescence préalablement étalonnée et alimentée sous une tension continue.

L'échantillon à examiner est intercalé entre la cellule et la source de lumière.

Le même dispositif peut être utilisé pour apprécier la transparence d'un milieu : verre, matière plastique ou de l'eau (mesure de turbidité).

On peut aussi, de la même manière, mesurer le noircissement des pellicules photographiques et cinématographiques. Dans une certaine mesure il devient possible de corriger les écarts de temps de pose ou de déterminer les meilleures conditions de tirage des positifs. Ce dispositif a, en particulier, un intérêt considérable dans la détermination des conditions de reproduction optima de pistes sonores (enregistrement des sons sur films).

### Colorimétrie

La cellule photo-électrique permet d'analyser et de comparer des couleurs. On peut aussi bien agir par transparence que par lumière diffusée.

La lumière transmise passe à travers différents filtres monochromatiques et on compare la déviation de l'appareil de mesure avec celle qu'on obtient en utilisant l'échantillon.

On apprécie ainsi l'intensité de chaque radiation et l'ensemble des mesures peut être groupé en une *courbe de couleur* qui est, en quelque sorte, le résumé de l'ensemble des mesures.

### Dosages

On peut doser les échantillons dissous d'après la coloration des solutions. On a ainsi, pour de nombreux produits, un procédé très simple, très rapide, et d'une précision pratiquement suffisante. Nous nous bornerons à citer les cas suivants, sans insister davantage (dosage de l'hémoglobine, toxiques, sérums, urines, liquides de ponction, etc..., etc... ).

## COMMANDE AUTOMATIQUE DE L'ECLAIRAGE

Il est logique d'utiliser une cellule, véritable œil photo-électrique, pour commander automatiquement l'éclairage des rues, des gares, etc... et même l'éclairage intérieur des locaux industriels. L'expérience montre que ce procédé a de nombreux avantages sur celui qui consiste à confier le soin de commander les interrupteurs d'éclairage, soit au personnel, soit à un employé quelconque. Des vérifications précises ont montré régulièrement que l'éclairage était allumé ou trop tôt ou trop tard ; trop tôt c'est une perte inutile d'énergie électrique, trop tard c'est une diminution de rendement du personnel.

L'emploi d'horloges automatiques ne résout pas la difficulté : elles commandent imperturbablement l'allumage et l'extinction à la même heure, sans tenir aucunement compte des conditions de l'éclairage extérieur : temps clair ou temps couvert.

La solution parfaite sera donnée par l'emploi d'une cellule, agissant sur un relais, et réglée de telle sorte que l'allumage soit commandé dès que l'éclairement extérieur tombe au-dessous d'une certaine valeur. On peut expérimentalement déterminer cette valeur.

Lorsqu'au contraire, l'éclairage passe au-dessus d'une certaine valeur, qui n'est pas nécessairement la même que celle qui correspond à l'allumage, la même cellule commande l'extinction des lumières.

En adoptant deux valeurs différentes pour l'allumage et l'extinction, on évite les « tâtonnements » du dispositif automatique au moment où la lumière extérieure atteint précisément la valeur critique. On peut aussi prévoir un dispositif à action différée, de telle sorte que le passage d'une fumée ou d'une ombre quelconque ne puisse pas actionner le relais. Le délai d'action pourra être de l'ordre de 30 à 45 secondes, par exemple. Le même dispositif peut être utilisé pour provoquer l'allumage des feux de position d'une voiture automobile en stationnement. Dans ce cas, la difficulté est évidemment l'alimentation de l'amplificateur. On peut alors supprimer celui-ci en utilisant une cellule photo-voltaïque et deux relais successifs.

### Commande graduelle de la lumière

Le dispositif décrit ci-dessus fonctionne *par tout ou rien*. Les lampes sont allumées ou elles sont éteintes. On peut aussi prévoir un dispositif plus flexible, plus souple, indispensable dans certains cas.

Examinons le problème qui se pose pour l'éclairage des tunnels routiers prévus à différentes portes de Paris. Le jour,

les automobilistes pénètrent d'une zone normalement éclairée par la lumière solaire dans une zone artificiellement éclairée. Les deux éclairages doivent fournir la même impression. En effet, si le tunnel est insuffisamment éclairé, le conducteur n'y verra rien et risquera un accident grave. Si l'éclairage est trop vif, il sera ébloui et le résultat sera le même. Il faut donc que l'éclat du jour et celui de l'éclairage du tunnel fasse exactement la même impression. Ce résultat peut être atteint avec une cellule qui commande un certain nombre de relais. Ceux-ci sont successivement mis en action suivant l'intensité du courant de cellule, c'est-à-dire suivant l'intensité du jour. Un nuage vient-il à passer devant le soleil, des lampes s'éteignent dans le tunnel... Le soleil, brille-t-il de nouveau, les lampes se rallument.

---

### COMMANDES AUTOMATIQUES DE MACHINES OU DE DISPOSITIFS DIVERS

Les applications que nous allons examiner maintenant utilisent toutes un même principe. Une cellule photo-électrique est excitée par un faisceau lumineux. La coupure du faisceau provoque une variation de courant photo-électrique et, en conséquence, l'action d'un relais commandant un mécanisme quelconque : moteur électrique, signal lumineux ou sonore, etc.

Ce mode de fonctionnement a un avantage : il est à sécurité dite « *positive* ». Il faut entendre par là qu'un accident quelconque aux appareils se traduit par l'apparition du signal. Si la lampe qui fournit le faisceau lumineux, si un tube de l'amplificateur cesse de fonctionner, si un condensateur claque, le dispositif se met en marche et l'usager est immédiatement prévenu.

Nous indiquerons plus loin quelques exemples, mais il va sans dire qu'on peut en imaginer beaucoup d'autres. Ces exemples ont en commun :

- a) l'emploi d'une cellule ;
- b) l'emploi d'un faisceau lumineux ;
- c) l'emploi d'un ou plusieurs relais, ou, éventuellement, d'amplificateurs.

a) *La cellule.* — Ce sera généralement une cellule photométrique à gaz. On disposera ainsi d'une sensibilité beaucoup plus grande, ce qui permettra d'utiliser un faisceau lumineux moins intense. Si l'on veut opérer en lumière invisible (infrarouge) on choisira une cellule au caesium. La cellule et son amplificateur seront protégés des actions extérieures. Il faut éviter qu'une lumière parasite puisse agir sur la cellule.

b) *La source de lumière.* — Un éclaircissement de 100 lux conviendra dans la plupart des cas. On utilisera une simple lampe à incandescence et, pour prolonger considérablement sa durée de vie, on pourra la sous-volter légèrement. On diminuera ainsi son rendement lumineux d'une manière très importante, ce qui n'aura aucune conséquence dans le cas qui nous intéresse. Une lampe basse-tension, donc à filament court et de gros diamètre, est préférable. On l'alimentera par un enroulement du transformateur prévu pour les circuits de l'amplificateur. Une lampe de phare d'automobile de 50 ou 100 bougies conviendra parfaitement.

Si la longueur du faisceau est importante on aura recours à des dispositifs convergents appropriés : miroirs concaves, paraboliques, ou sphériques, lentilles, etc... La déviation du faisceau sera assurée par des miroirs. Il est indispensable de pouvoir régler l'angle de ceux-ci, il faut, en effet, prévoir un déplacement éventuel d'un élément, une déformation toujours possible.

La tension d'alimentation du projecteur ne doit pas varier de  $\pm 10\%$ . En cas de variation plus grande du réseau, il faudrait prévoir un régulateur de tension. Un projecteur d'automobile du type normal, avec une lampe de 50 bougies, permet de sensibiliser un relais du modèle courant à une distance de 70 mètres en lumière visible et de 35 mètres en lumière infra-rouge (invisible).

Si le faisceau lumineux doit être réfléchi sur un miroir, il faut compter une perte de 10 % environ. La distance utilisable sera donc 63 m. après une réflexion, 57 m. après deux, etc... En infra-rouge, la perte est notoirement plus importante.

c) *L'amplificateur et le relais.* — Un seul étage d'amplification est généralement suffisant. On utilisera pour cela une lampe triode alimentée sur le secteur. On peut prévoir une lampe à grande durée de vie (tungstène thorié) dont le filament est sous-volté. Le relais est directement placé dans le circuit de plaque de la lampe. Il est généralement groupé avec la cellule et les organes d'alimentation. Il correspond à la figure 16. Le potentiomètre de réglage est accessible de l'extérieur. Le contact du relais peut commander une intensité de 1 ampère sous 110 ou 220 volts. Le fonctionnement est assuré pour une variation d'éclairement de 30 Lux. S'il s'agit de commander une forte intensité, on peut utiliser deux relais successifs. Ces relais ont une certaine inertie. S'il faut réaliser une commande rigoureusement instantanée, on remplacera le relais par un thyatron. Mais on notera que ce dernier doit être « désamorcé » à la fin de l'opération. Il sera généralement possible de prévoir un dispositif simple de « fin de course ».

---

## LES DISPOSITIFS DE SECURITE

### Arrêt automatique d'une presse

Dans l'opération de descente de la presse, il faut éviter que l'ouvrier, par imprudence, puisse placer ses mains entre les mâchoires. Les dispositifs mécaniques qui ont été imaginés résol-

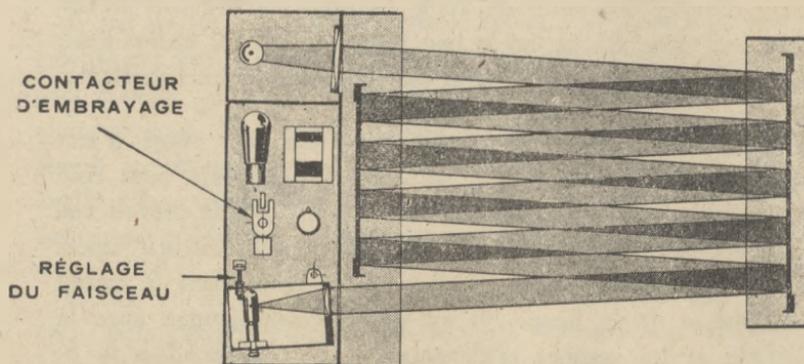


FIG. 18. — Rideau photo-électrique pour protection des ouvriers aux presses.

vent le problème, mais au prix d'une diminution de vitesse du travail. La solution que donne la cellule est pratiquement parfaite.

On établit devant la presse un barrage lumineux constitué par un faisceau réfléchi un certain nombre de fois entre deux miroirs plans, avant de tomber sur une cellule. L'interruption du faisceau en un point quelconque déclenche le relais qui commande, à son tour, l'arrêt de la machine. Le dispositif est automatiquement hors circuit pendant l'opération de montée de la presse.

### Protection contre le vol

Il s'agit de protéger un coffre-fort, la porte d'une chambre forte, d'une vitrine d'exposition, etc., etc. On établit devant l'endroit à protéger la même barrière lumineuse. Elle peut

être invisible si elle est réalisée en rayons infra-rouges. On peut disposer des miroirs pour que l'objet à surveiller soit entouré de tous côtés. Une interruption du faisceau déclenche un signal d'alarme. Les circuits peuvent être combinés de telle sorte que la coupure d'un fil de l'installation se traduisent par le même résultat.

La substitution d'un autre faisceau lumineux au barrage de protection pourrait paralyser le dispositif. Il suffirait, pour cela, que le cambrioleur plaçât une lampe de poche allumée devant la cellule. Mais on peut facilement tourner la difficulté. On opère en lumière modulée, c'est-à-dire que le faisceau lumineux est interrompu à une fréquence quelconque. Le courant photo-électrique est alternatif. On branche un transformateur de couplage entre la cellule et l'amplificateur. Le remplacement de la lumière modulée par la lumière fixe déclencherait l'alarme.

### Protection contre l'incendie

Un commencement d'incendie se traduit par de la fumée. Un ventilateur aspire de l'air dans les locaux à surveiller. Une

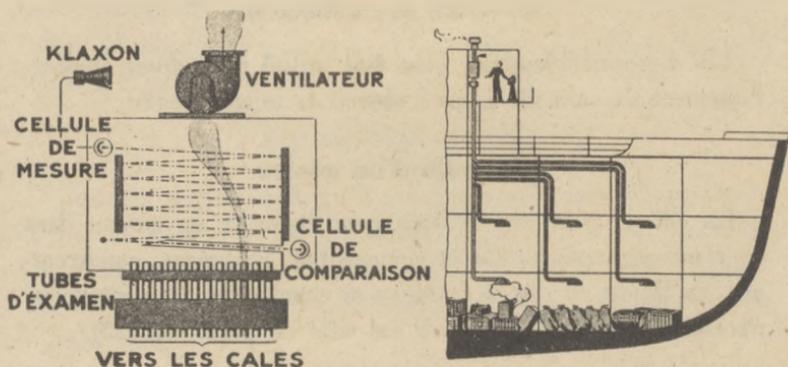


FIG. 19. — Détection des fumées.

cellule photo-électrique « examine » la transparence de cet air. Dès que la moindre opacité suspecte se manifeste, l'action

du relais déclanche un signal d'alarme. Le tuyau d'aspiration d'air peut aussi être utilisé pour refouler de l'anhydride carbonique et étouffer le feu dès première manifestation.

Pour obtenir un fonctionnement plus sûr, on utilise deux cellules dans un montage différentiel. L'une « examine » l'air ambiant, l'autre, l'air des locaux surveillés.

Une telle installation a été réalisée dans les cales du paquebot « Normandie » (fig. 19).

### **Contrôle de turbidité**

Un dispositif identique peut être utilisé pour la surveillance des eaux de source destinées à l'alimentation.

En cas de pluies importantes, l'eau se trouble et les dangers de pollution sont plus grands. Non seulement la cellule peut immédiatement avertir le personnel, de jour comme de nuit, mais elle peut mettre sans délai la source suspecte en décharge. On pourrait aussi imaginer un dispositif prévoyant le dosage automatique du chlore (eau de Javel) en tenant compte de la turbidité de l'eau.

### **Contrôle des colorants**

Un dispositif identique peut être utilisé pour doser automatiquement un colorant jusqu'à obtenir la teinte désirée.

### **Contrôle d'un niveau**

La cellule peut être utilisée pour contrôler un niveau dans un réservoir impénétrable et inaccessible, contenant, par exemple, un fluide sous haute pression et commander les manœuvres nécessaires quand le réservoir est vide ou plein (fig. 20).

### **Contrôle d'un brûleur**

Lorsqu'un brûleur à mazout s'éteint, accidentellement, le combustible continue d'être injecté dans le foyer. Il se trans-

forme en gaz, et au contact des parois chaudes, s'allume après quelques secondes, en provoquant une violente et dangereuse explosion.

La lumière de la flamme, ou celle d'un corps incandescent placé dans cette flamme, excitent une cellule. L'extinction commande instantanément un relais et celui-ci ferme l'admission

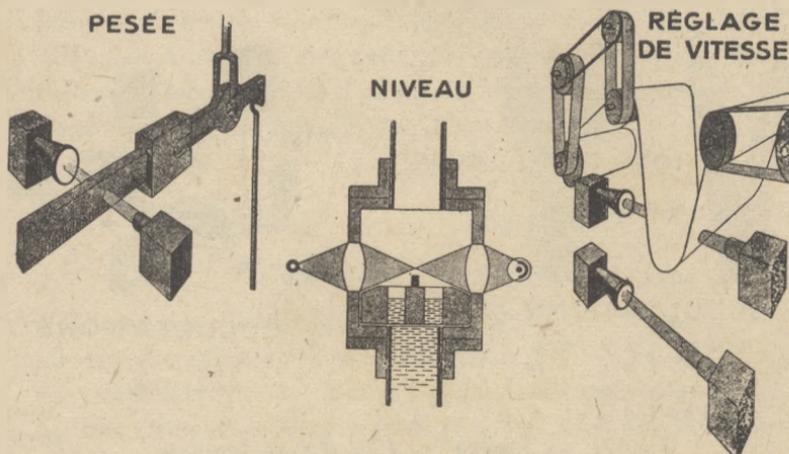


FIG. 20. — Manutention automatique .

de combustible, en même temps qu'un signal quelconque prévient le personnel intéressé. Tout danger est donc complètement écarté.

### Signalisation routière

Certains tunnels routiers, certaines routes de montagne sont à « voie unique » par faute de largeur. Un rayon lumineux occulté par la première voiture qui vient dans un sens peut provoquer automatiquement l'allumage d'un signal de blocage de l'autre voie.

### Passages à hauteur limitée

Dans le même ordre d'idées, si un véhicule trop haut s'engage dans un passage à hauteur limitée, il coupe un faisceau

lumineux qui actionne immédiatement un signal d'avertissement.

### Comptage

L'œil photo-électrique peut compter des objets qui sont disposés sur un tapis transporteur. Chaque occultation du faisceau fait avancer d'un numéro un compteur automatique.

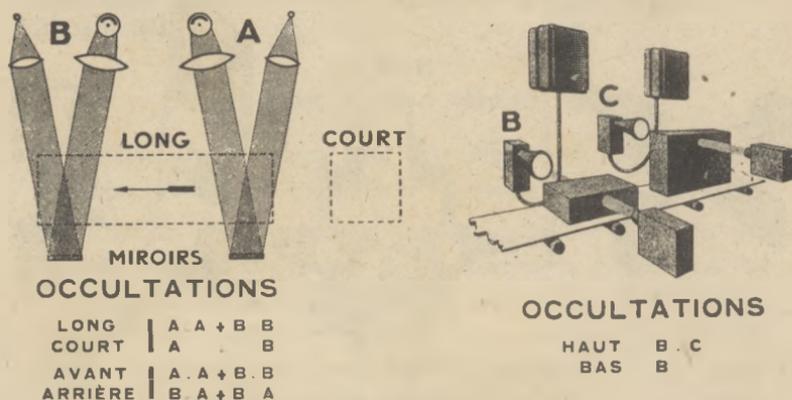


FIG. 21. — Lumière occultée. Tri ou comptage.

### Triage des objets

La cellule peut aussi (fig. 21 et 22) trier des objets. On utilisera deux cellules décalées d'une certaine longueur dans le

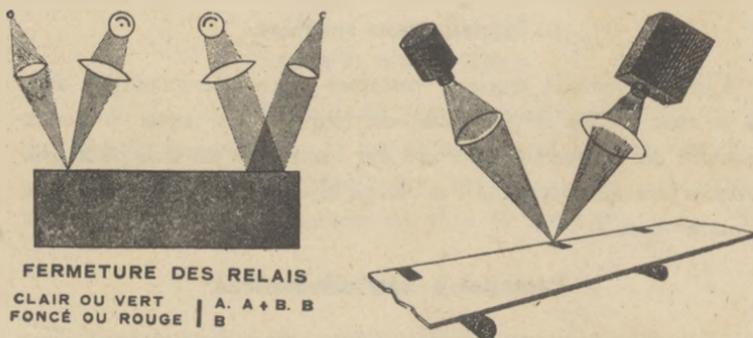


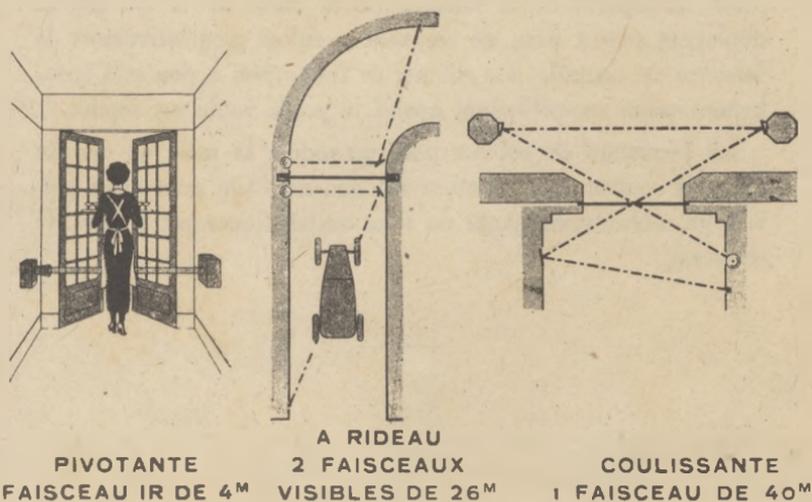
FIG. 22. — Lumière réfléchie. Tri ou comptage. Coupage à la marque.

sens horizontal ou dans le sens vertical. L'occultation simultanée des deux faisceaux correspond à un objet long ou à un objet haut. On peut alors diriger les objets vers une case ou vers l'autre. Un dispositif analogue peut être utilisé pour classer des objets suivant leur couleur. Pour obtenir ce résultat, il suffira d'employer des cellules de sensibilité spectrale différente et au besoin, d'intercaler des écrans colorés. Un dispositif facile à imaginer peut permettre de couper le papier d'emballage en tenant compte d'un repère quelconque ou même tout simplement de la dimension des objets à emballer.

## COMMANDES AUTOMATIQUES

### Commande des portes

Une voiture s'approchant d'une porte coupe un faisceau lumineux. Le relais commande l'ouverture des portes (fig. 23). Le mécanisme peut être facilement prévu de telle sorte que la porte se ferme après le passage de la voiture et qu'elle demeure ouverte si la voiture demeure dans le passage.



PIVOTANTE  
FAISCEAU IR DE 4<sup>M</sup>

A RIDEAU  
2 FAISCEAUX  
VISIBLES DE 26<sup>M</sup>

COULISSANTE  
1 FAISCEAU DE 40<sup>M</sup>

FIG. 23

Le même système s'applique aussi bien aux portes intérieures. On pourrait aussi imaginer sans difficulté un mécanisme qui ouvrirait la porte des piétons ou la porte des voitures.

### Passage à niveau

L'ouverture du passage à niveau peut être commandée par l'occultation d'un faisceau lumineux. Si un train est engagé sur la section dangereuse, la porte ne s'ouvrira point, la manœuvre est différée, jusqu'au passage du train. Un signal de contrôle peut compléter le dispositif.

### Pesée automatique

Des récipients conduits par un tapis roulant viennent se placer sous un robinet, sur le plateau d'une balance ou d'une bascule. L'arrêt à l'endroit choisi peut être commandé par une première cellule. Le même dispositif provoque l'ouverture du robinet. La matière à peser (poudre, liquide), emplit le récipient. L'aiguille de la balance ou la barre de la bascule se déplacent peu à peu, et viennent occulter progressivement le faisceau de contrôle. Le robinet se ferme peu à peu et l'écoulement cesse complètement quand le poids voulu est atteint.

La fermeture du robinet peut provoquer la mise en marche du tapis roulant et l'opération recommence. On peut aussi prévoir un mécanisme chargé de faire automatiquement la tare du récipient.

---

**CONCLUSION**

Nous pourrions citer beaucoup d'autres applications possibles. Les exemples que nous avons choisis dans des domaines très différents permettent aux lecteurs de se faire une idée précise de la diversité des applications.

Actuellement, ces applications sont encore peu nombreuses, mais nous sommes convaincus qu'elles se multiplieront dans l'avenir.

Lucien CHRÉTIEN.

---

## TABLE DES MATIERES

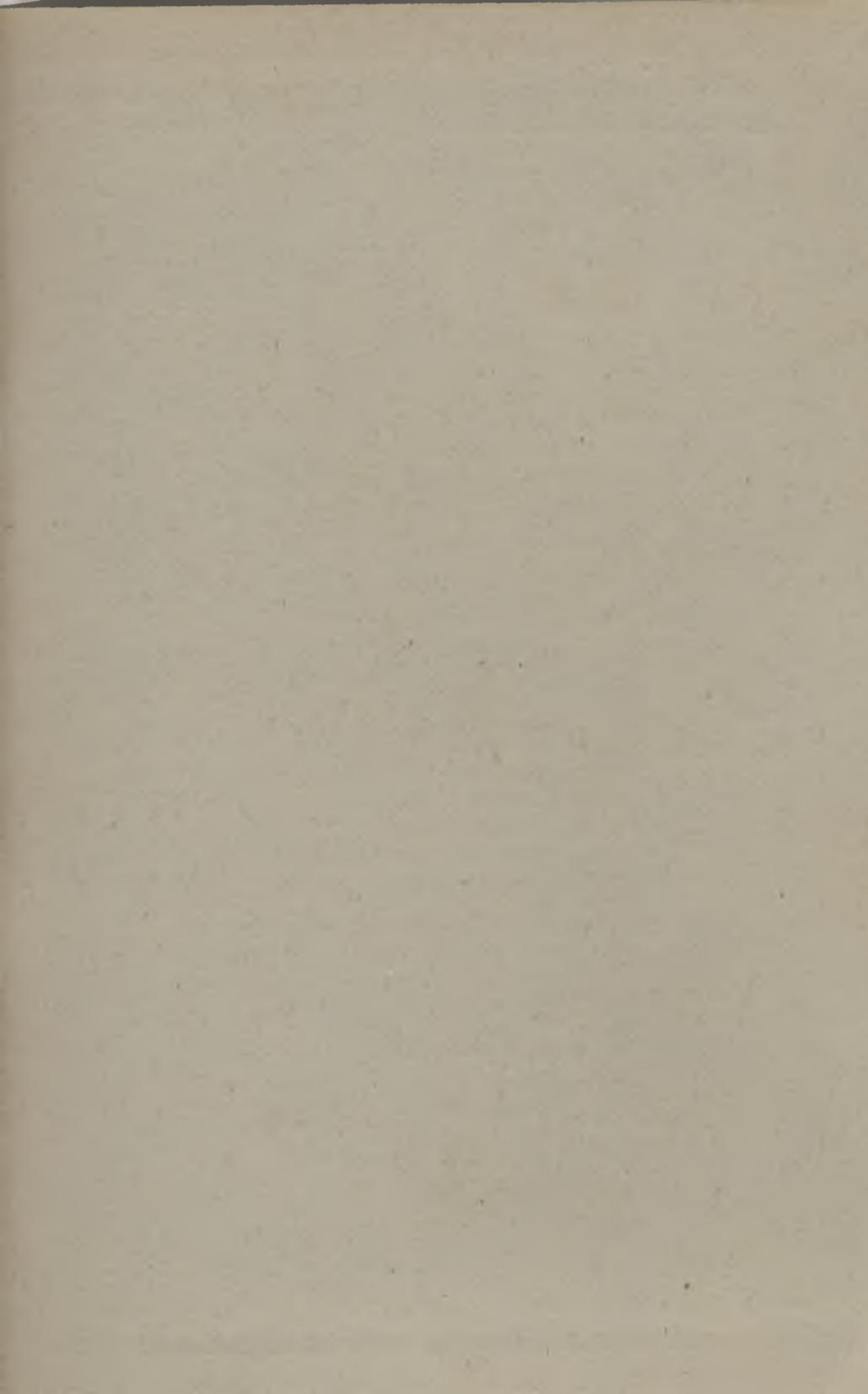
	Pages
AVANT-PROPOS .....	3
Photo-électricité .....	5
Effet photo-conducteur.....	20
Effet photo-voltaïque. Cellules à couches de barrage.....	22
Les mesures utilisant les cellules.....	32
Commande automatique de l'éclairage.....	35
Commande automatique de machines ou de dispositifs divers....	37
Les dispositifs de sécurité.....	40
Commandes automatiques.....	45
Conclusion .....	47

---

R. LECOT Imprimeur-Photogreveur  
38 rue St-Sabin PARIS 11'

DÉPOT LÉGAL N° 10

2<sup>ème</sup> trimestre 1950



QUELQUES OUVRAGES  
EN VENTE  
A LA MÊME LIBRAIRIE :

---

*LA SOUDURE A L'ARC ET SES APPLICATIONS INDUSTRIELLES*, par R. SALELLES, ingénieur. — 64 pages.. . . . . **210 frs.**

*TECHNOLOGIE DES BOBINAGES ÉLECTRIQUES*, par M. DELFOSSE, ingénieur. — *Un ouvrage en préparation.*

*COURS POUR LA FORMATION COMPLÈTE DE L'ÉLECTRICIEN D'AUTOMOBILE*, par G. COMPAIN. — Un volume de 350 pages. **420 frs.**

*NOTIONS D'ÉLECTRICITÉ EXPÉRIMENTALE*, pour la préparation au C.A.P. — Tome I : *Courant continu*. — Tome II : *Courant alternatif*, par G. COMPAIN ; deux volumes de 192 et 144 pages. *Tome I : 450 frs. Tome II : 390 frs.*

*MOTEURS, DYNAMOS ÉLECTRIQUES ET SERVOMOTEURS*, par LUCIEN CHRÉTIEN, ingénieur E. S. E. — Un volume de 90 pages.. . **180 frs.**

**Chez votre Libraire**

ou aux Éditions Chiron, 40, rue de Seine  
Paris 6<sup>e</sup>

*Port et emballage : 15 % en sus.*