

LES LAMPES A INCANDESCENCE

AVANT-PROPOS

Malgré l'apparition des lampes à décharge et notamment des tubes fluorescents, les lampes à incandescence n'ont cessé de se développer. Simplicité d'emploi, allumage immédiat, bon marché, leur assurent un débouché important. Il faut ajouter que leur adaptation à toutes les tensions, leurs faibles dimensions sous forme de lampes aux halogènes, la qualité de leur lumière, leur donnent toutes les qualités d'une lampe "de projection".

Si la presse technique relate de temps en temps les travaux que leur consacrent encore les laboratoires de recherche et annonce l'apparition de lampes nouvelles, il n'y a pas d'ouvrages d'ensemble modernes sur l'incandescence (1)

Nous avons pensé qu'il y avait une lacune à combler car la formation des techniciens, toujours nécessaire, en tirerait profit. Dans les fabriques de lampes nombreux sont ceux qui, étroitement spécialisés, n'ont qu'une vue très fragmentaire de la lampe à incandescence et de ses applications. Nous espérons leur donner, dans les pages qui suivent rédigées dans un but pédagogique, des éléments sur toutes les activités que comportent la production et l'utilisation des différentes familles de lampes. Nous nous adressons également à ceux qui construisent des appareils dans lesquels la lampe à incandescence constitue une pièce essentielle. Ils ont en effet besoin de caractéristiques techniques détaillées et de remarques sur le comportement des lampes qui ne figurent pas dans les documentations à usage commercial.

Destiné malgré tout à un nombre limité de lecteurs cet ouvrage revêt la forme, peu prestigieuse mais économique, d'un cours pour étudiants. Nous demandons donc une certaine indulgence pour la présentation.

M. LA TOISON

Le 24 MARS 1977

(1) L'auteur avait publié en 1951 aux Editions Eyrolles une brochure déjà intitulée "Les lampes à incandescence". Elle est évidemment largement dépassée à l'heure actuelle.

CHAPITRE I

HISTORIQUE

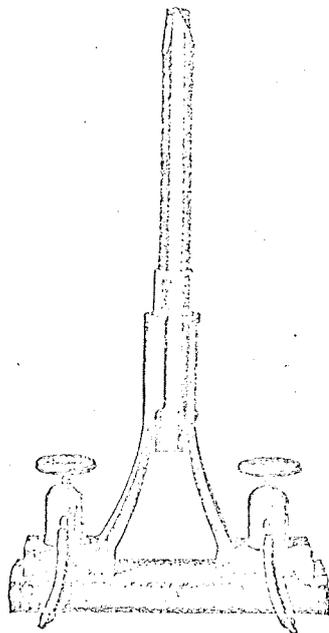
La lampe à incandescence ne joue pas seulement un rôle majeur dans l'histoire de l'éclairage, elle occupe une place très importante dans l'histoire de l'électricité.

Elle est en effet associée au développement des gros générateurs de courant et des réseaux de distribution. Avant la lampe à incandescence, les applications pratiques de l'électricité se réduisaient au télégraphe et, dans l'industrie, à la galvanoplastie. Les lampes à arc, dites à électrodes de charbon, étaient déjà utilisées, quelquefois de façon spectaculaire, mais le principe même en limitait les possibilités.

A un autre point de vue, celui de l'essor d'une nouvelle technologie, celle du vide, la lampe à incandescence doit aussi être considérée comme fondamentale. Elle est également à l'origine des lampes à trois électrodes, des tubes électroniques, et des lampes cathodiques. On peut citer des Compagnies mondialement connues, dont l'activité, maintenant très ramifiée, a commencé par la fabrication des lampes à incandescence.

LES DEBUTS DE L'ECLAIRAGE-ELECTRIQUE

La lampe à arc, faisant appel au phénomène de décharge électrique, a largement précédé la lampe à incandescence. En fait c'était la lumière émise par les électrodes portées à l'incandescence et non la décharge entre celles-ci, qui faisait l'intérêt de cette source.



LA BOUGIE JABLONKOFF - Fig. 1

La première démonstration en fut faite à LONDRES en 1810, par DAVY, maître assistant à la "ROYAL INSTITUTION".

Les électrodes étaient en charbon de bois et le courant venait d'une batterie de plusieurs centaines d'éléments VOLTA. DAVY mettait les électrodes en contact pour faire passer le courant, puis les écartait légèrement : un arc éblouissant s'établissait.

L'expérience était très spectaculaire mais on ne peut parler vraiment de "lampe à arc" avant 1844. A cette date, Léon FOUCAULT remplace les électrodes de charbon de bois par des électrodes en charbon des cornues et maintient constant leur écartement à l'aide d'un régulateur à main.

La chronique rapporte qu'en 1855 un chantier du Palais de l'Industrie à PARIS fut éclairé par des arcs pendant treize heures à l'aide d'éléments de piles BUNSEN.

Le problème de la régulation automatique des électrodes donna lieu à de nombreuses solutions à base de mécanismes d'horlogerie et de solénoïdes.

A partir des années 1870, il y eut, parallèlement à l'apparition de nouveaux générateurs de courant, les "dynamos" qui rendaient possible mieux que les "magnétos" la fourniture de courant électrique. Une activité croissante dans le domaine de l'éclairage électrique par arcs en résulta.

Ainsi, la "bougie JABLOCHKOFF" (fig.1) permit d'éclairer en 1878 l'avenue de l'Opéra à PARIS. Cette "bougie" évitait la complication de la régulation en séparant par une gaine de Kaolin les deux électrodes disposées parallèlement. Le support se volatilisait progressivement sous l'action de l'arc établi entre les extrémités libres alimentées en courant alternatif.

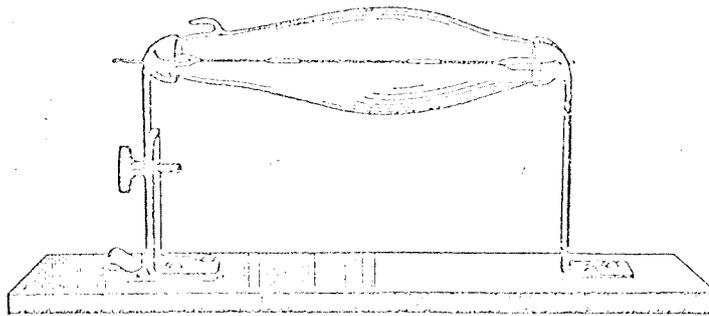
Les lampes à arc étaient relativement trop puissantes et demandaient trop d'entretien pour permettre un véritable développement de l'éclairage électrique. Elles ne cessèrent néanmoins, de se perfectionner et elles firent leurs preuves pour l'éclairage par projecteurs. On peut encore en trouver aujourd'hui des applications.

LES PRECURSEURS DANS LE DOMAINE DE L'INCANDESCENCE

La possibilité d'obtenir de la lumière à partir d'un filament chauffé électriquement était évidente pour de nombreux chercheurs. DAVY lui-même, avait montré qu'un fil de platine pouvait donner une lumière appréciable, mais il se volatilisait rapidement.

Dans tous les pays, on cite dans ce domaine, et à bon droit, des précurseurs. Platine, iridium, carbone sous des formes diverses : batonnets, rubans, fils, furent souvent essayés. Les expérimentateurs s'efforçaient de faire le vide dans un globe sur une cuve à mercure ou, mieux dans une ampoule. L'allemand GOEBEL, immigré aux U.S.A. a laissé le souvenir d'utiliser comme ampoules des flacons de parfum !! (1854).

L'apparition des dynamos et aussi l'invention de la pompe à mercure de SPRENGEL (1865 et perfectionnée en 1875) stimulèrent les recherches.



SWAN - Fig. 2

Avant de parler d'EDISON, joué universellement comme le père de l'éclairage électrique, il faut faire une place à l'anglais SWAN qui fut, de beaucoup, le concurrent d'EDISON le plus important.

Dès 1848, SWAN avait fait des essais avec des filaments en bristol carbonisé. En 1878, il fait une démonstration à NEWCASTLE, ayant renouvelé ses recherches avec la pompe SPRENGEL. Les résultats étaient bons mais SWAN fut plus lent qu'EDISON à prendre des brevets et il porta moins d'attention que lui aux conditions pratiques qu'il fallait satisfaire pour lier éclairage et distribution de courant.

C'est à SWAN qu'il faut attribuer une méthode capitale sur le plan technologique pour améliorer le vide dans les ampoules : le dégazage des filaments par passage du courant pendant le fonctionnement de la pompe à vide (Fig.2).

L'OEUVRE D'EDISON

En 1878, EDISON âgé de 31 ans, était déjà célèbre . Ce "self made man" avait déjà gagné assez d'argent avec des inventions, notamment dans le domaine de la télégraphie, pour fonder un laboratoire de recherches à MENLO-PARK dans le NEW-JERSEY. Il y travaillait avec une vingtaine de collaborateurs. Sa réputation était telle qu'il pouvait compter sur des concours financiers dès qu'un projet entrait dans une phase constructive. Il était donc bien placé dans la course à la lampe à incandescence.

On dit que c'est après avoir visité, en 1878, un constructeur de dynamos et de lampes à arc qu'il décida de se consacrer entièrement à ce problème. Ses paroles à un journaliste du NEW-YORK TRIBUNE montrent bien qu'il rêvait à ce sujet un véritable esprit de compétition .

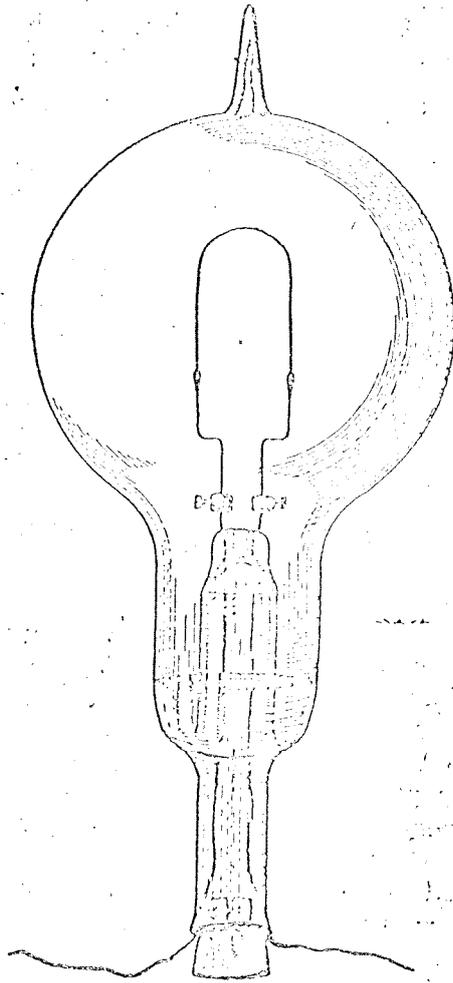
" I have let the other inventors get the start of me in this matter some what, because I have not given much attention to electric lights ; but I believe I can catch up to them now. I have an idea that I can make the electric light available for all common uses and supply it at trifling cost compared with that of gas. There is no difficulty about dividing up the electric currents and using small quantities at different points ..."

EDISON évoque ici une question fondamentale qui préoccupait beaucoup les techniciens, celle de la "division du courant". Alors que les lampes à arc étaient alimentées individuellement ou en série, diviser le courant, c'était, chose tout à fait nouvelle, faire des installations en parallèle, ce qui permettait d'allumer ou d'éteindre une lampe à volonté. Cela exigeait que soit résolu le problème de la régulation du courant fourni lorsque la puissance demandée variait.

EDISON comprit que les lampes devaient utiliser des filaments d'une résistance suffisante pour accepter une tension relativement élevée, adaptée à une distribution rationnelle à grande distance.

Après quelques travaux sur le platine et sur l'osmium, il revint au carbone qu'il avait déjà expérimenté sans grand succès, mais avec la conviction que c'était le seul corps pouvant supporter une température élevée et donnant des filaments d'une résistivité suffisante.

.../...



EDISON - Fig. 3

Il entreprit une étude systématique des conducteurs à base de carbone. Un fil de coton carbonisé donna deux jours de fonctionnement. Le papier [et mieux le bristol carbonisé] donna 170 heures de fonctionnement et permit une démonstration publique le 1er Janvier 1880 (Fig. 3). La fragilité de tels filaments étant grande, EDISON chercha autre chose. C'est une fibre de bambou, extraite, dit-on, d'un éventail de Madame EDISON qui apporta la solution. Le bambou resta la matière de base pour les lampes d'EDISON jusqu'en 1894. On relate qu'EDISON envoya des missions en Chine, au Japon, en Amazonie, en Inde, pour trouver la meilleure fibre de bambou et qu'il fixa son choix sur une certaine variété japonaise.

EDISON prit de nombreux brevets concernant les lampes, mais aussi des brevets sur les problèmes des dynamos, de la régulation du courant et de sa distribution.

C'est à l'exposition Internationale d'Electricité, organisée à PARIS en 1881, que l'éclairage électrique fit vraiment son entrée dans le monde. Dans une revue d'électricité créée en 1879 et qui portait, bien que traitant de tous les sujets, le nom significatif de "La Lumière Electrique" - Th. du Moncel -, relate l'événement. Il décrit l'installation des 160 lampes éclairant les deux salles réservées à EDISON (1).

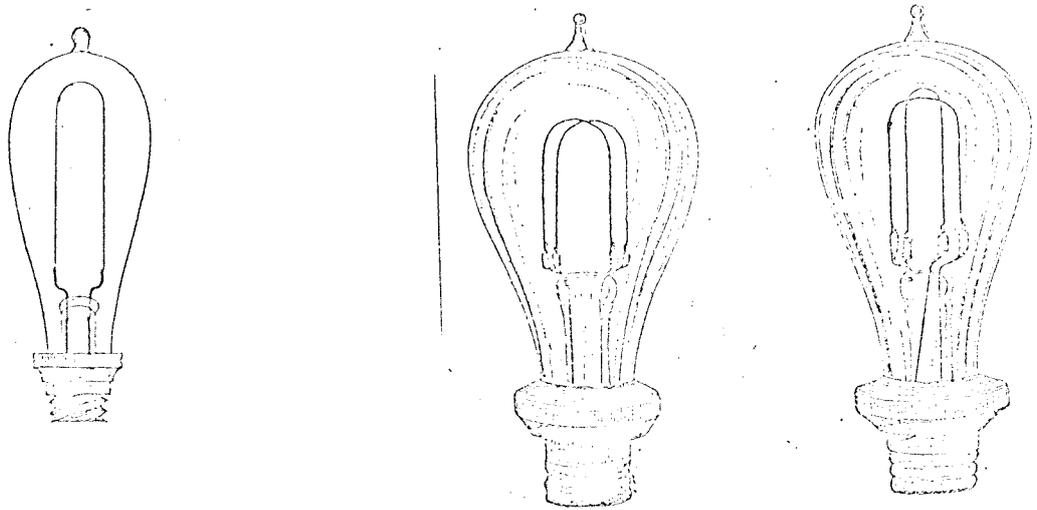
Au sujet des lampes il écrit :

LA LUMIERE ELECTRIQUE - 1er OCTOBRE 1881

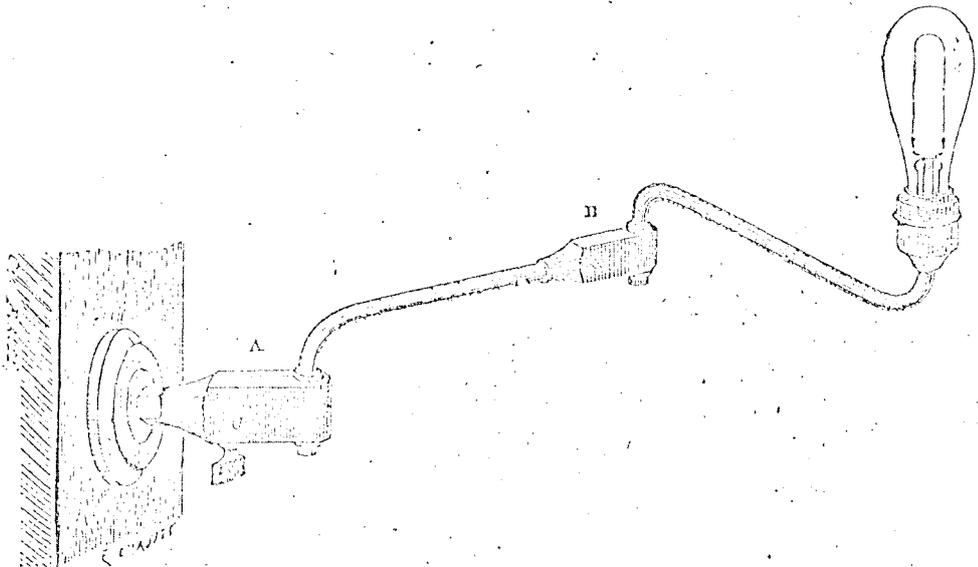
" Dans leurs conditions actuelles, ces lampes sont suffisamment solides et peuvent durer longtemps. Le charbon qui, dans l'origine, était fragile, est devenu maintenant extrêmement rigide et d'une ténuité telle qu'il peut être comparé, comme grosseur à un crin de cheval. Par un système d'attache habilement combiné, les fils de platine qui lui amènent le courant, ne sont plus exposés à être coupés, et leur scellement dans le verre du récipient est effectué de telle manière que leurs changements de volume, sous l'influence de la chaleur, ne compromettent plus la perfection du vide dans le récipient. Par la manière même dont les charbons sont actionnés au moment où le vide est effectué dans les récipients, les bulles d'air qu'ils peuvent renfermer dans leurs pores et qui, en sortant, désagrègent leur surface, sont évacuées avant la fermeture de la lampe avec les particules carbonées qui en proviennent, et en même temps le filament de charbon acquiert une densité et une dureté toutes particulières, comme cela avait du reste eu lieu pour les fils de platine. Il suffit pour obtenir ce résultat de porter le filament carbonisé à l'incandescence pendant qu'on fait le vide."

Concernant un aspect fondamental de la lampe à incandescence, sa durée de vie, l'auteur fait une comparaison amusante pour le lecteur actuel :

(1) - Notons que dans le même article Th. du Moncel analyse également ce qu'il appelle le "Système de Mr SWAN", le "Système de Mr LANE-FCSC" et le "Système MAXIM". Les procédés concurrents, démontrés dans la même Exposition, montrent combien était grande la compétition aux premières heures de l'éclairage électrique.



LAMPES CARBONE A L'EXPOSITION DE PARIS EN 1881 - Fig. 4



" Leur durée, d'après ce que l'on m'a assuré est assez grande ; cependant, elles doivent finir par s'user, et bien que la plupart d'entre elles aient pu servir pendant 1200 heures, on peut se demander si on peut considérer comme pratique une lampe capable de se détériorer; mais si on réfléchit que ces lampes pourront être livrées à 1fr.50, que leur ajustement sur leur support est on ne peut plus simple, comme on le verra à l'instant, on comprendra aisément qu'on se trouvera dans le cas des lampes ordinaires dont les verres se cassent fréquemment et qu'on renouvelle quand l'accident est produit. "

Intéressantes pour l'électricien sont ses remarques relatives à l'alimentation des lampes et aux moyens mis en oeuvre par EDISON :

" Mais ce qui constitue le système de M. EDISON, ce ne sont pas seulement ses lampes, c'est l'ensemble des dispositifs qui s'y rapportent et qui ont atteint un degré de simplicité tel, qu'il n'y a plus, dès aujourd'hui, rien à demander à la pratique. Machines génératrices, distribution des circuits, organisation des communications à travers les supports, appareils indicateurs et régulateurs, compteurs de la dépense électrique, tout est combiné pour l'application immédiate, et cette application, comme nous l'avons dit, va, du reste, être faite dans une partie de la ville de NEW-YORK, dont un très grand nombre de maisons doivent être éclairées par ce système, au moyen d'une canalisation correspondant à un poste central, qui transmettrait en même temps la force à domicile. Ce poste central sera, à cet effet, pourvu de douze machines à vapeur, de la force de 150 chevaux chacune, et qui mettront en action des machines dynamo-électriques disposées d'une manière particulière et susceptibles d'alimenter chacune, prétend-on, 2400 lampes de 8 candles chaque. La distribution du courant à ces lampes, s'effectuera par des dérivations prises, devant chaque maison, sur des conducteurs principaux de grosse section qui parcourront les rues correspondant aux diverses maisons éclairées. Ces dérivations constitueront alors, dans chaque maison, les pôles d'un générateur auxquels viendront aboutir les différents fils des lampes de la maison, lesquelles, de cette manière, fonctionneront toutes dans des conditions indépendantes. Il en sera de même pour la distribution de la force."

Il termine sur cette conclusion :

" Comme on le voit, le système de M. EDISON est aujourd'hui complet, parfaitement étudié dans toutes ses parties, il n'y a plus qu'à en faire des essais sur une grande échelle. "

EDISON avait choisi comme tension de distribution : 110V. Cette tension correspondait à l'emploi de deux dynamos de 55V en série, dynamos utilisées pour l'alimentation des lampes à arc.

La figure 4 montre quelques lampes d'EDISON. Ce sont des dessins extraits de la "Lumière Electrique". La figure 5 montre à titre d'exemple une applique d'éclairage électrique !

LES PREMIERES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Quelle était l'efficacité lumineuse des premières lampes d'EDISON? de 1,5 à 2 lm/w avec les meilleures fibres de bambou.

En Europe, on substituera rapidement au bambou des filaments obtenus par voie chimique. SWAN avait mis au point en 1883 une fabrication à partir d'une solution visqueuse de nitrocellulose passant à travers un filtre et coagulée dans un bain d'alcool.

Pour améliorer la régularité des filaments un procédé efficace fut de les allumer dans une atmosphère d'hydrocarbures provoquant un dépôt superficiel notamment aux endroits les plus faibles donc les plus chauds. Malgré cela la température de fonctionnement des filaments de carbone ne dépasse pas 1600°C et l'efficacité lumineuse 3,3 lm/W.

Les passages des entrées de courant dans le verre réalisés en platine, avaient une influence non négligeable sur le prix des lampes. Les ampoules (soufflées à la canne) étaient vidées par le sommet et les lampes présentaient une pointe caractéristique. Les culots, à vis pour EDISON, à baïonnette pour SWAN, annonçaient les culots actuels.

Il y eut des combats très vifs autour des brevets de base et de très nombreux procès entre fabricants. On peut citer notamment, la question du vide par le pied de la lampe. Les intérêts en jeu considérables, conduisirent finalement à des ententes industrielles sur l'exploitation des découvertes.

COMMENT FURENT MARQUEES LES PREMIERES LAMPES ?

La lampe carbone la plus vendue a été la lampe de 16 Bougies, mais il exista des lampes de 8 et 32 Bougies.

La Bougie, unité d'intensité lumineuse n'eut une définition internationale qu'en 1909 (1). On peut estimer que les lampes de 16 Bg avaient un flux lumineux voisin de 150 lumens pour une puissance voisine de 50 Watts.

Les performances étaient modestes, ce qui permit au gaz d'éclairage de rester longtemps un concurrent très actif de l'électricité, même pour l'éclairage des habitations. Le manchon AUER (1885) lui permit d'ailleurs de consolider sa position et de prolonger très longtemps son utilisation en éclairage public.

LES LAMPES A FILAMENT METALLIQUE

La température possible avec les filaments de carbone était trop faible. Toute tentative de l'augmenter conduisait à une désagrégation rapide malgré la limite théorique très élevée offerte par le carbone. Il devient gazeux à 3600°C.

Aux ETATS-UNIS, on renouvela néanmoins l'intérêt du carbone avec les filaments dits "métallisés" (1905). Grâce à des fours à très haute température, on portait les filaments dans une atmosphère saturée de carbone à une température telle qu'ils se recouvraient d'une couche de graphite. La température de fonctionnement de ces filaments pouvait être augmentée de 200° et l'efficacité lumineuse passait à 4 lm/w.

(1) Valeur un peu imprécise mais peu différente de notre Candela actuelle.

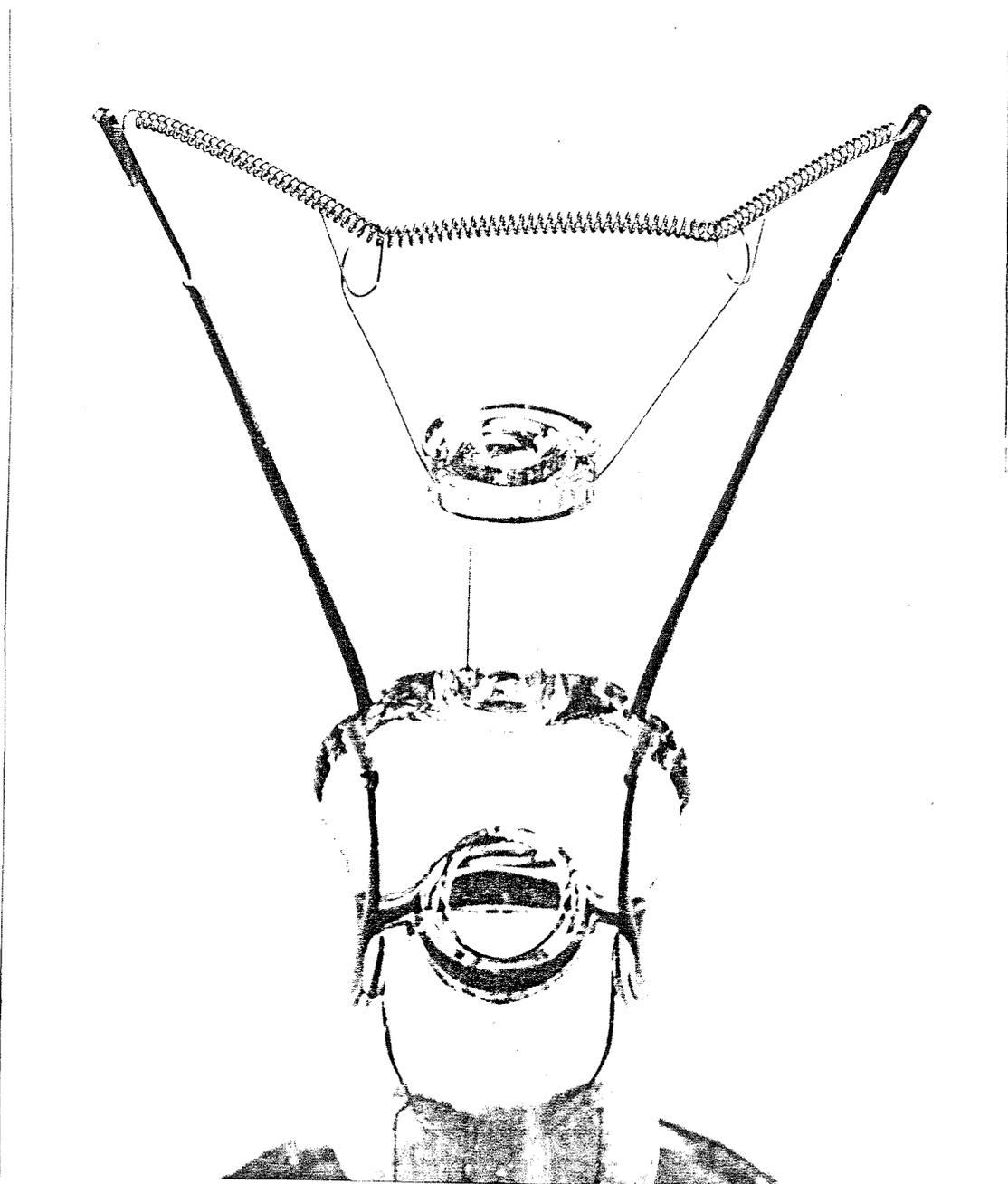
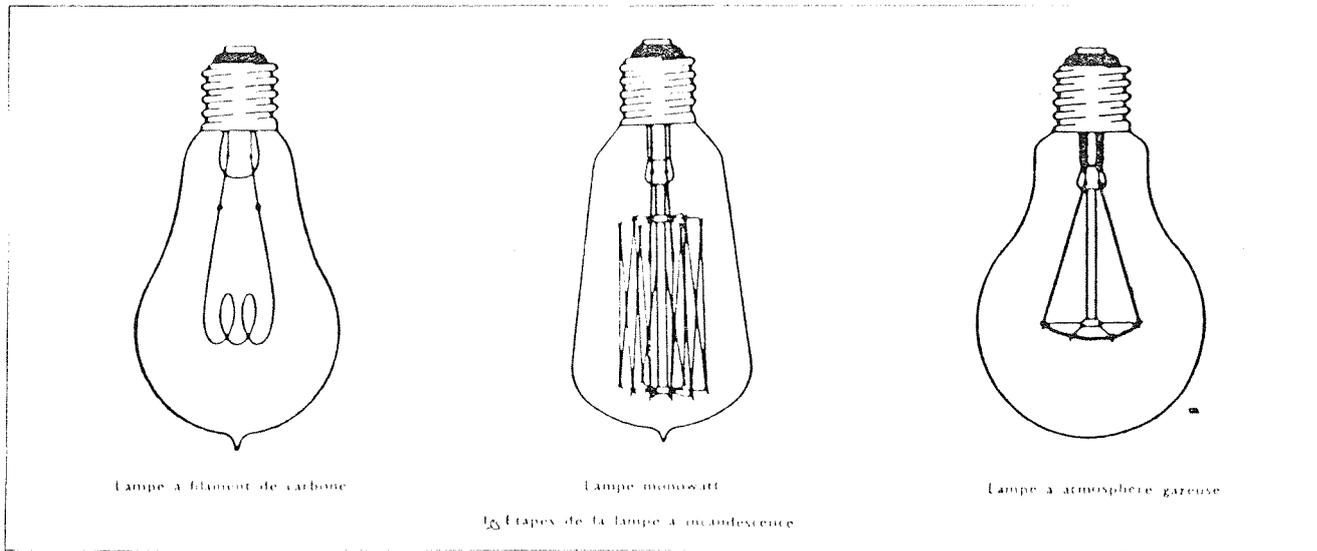


Fig. 7 - Le coeur de la lampe à incandescence : son filament spiralé.

8

En EUROPE et particulièrement en ALLEMAGNE et en AUTRICHE, les recherches furent orientées vers les métaux. AUER VON WELSBACH adopte l'osmium qui fond à 2700°C (1902). Les filaments sont obtenus à partir d'une poudre métallique agglomérée par un liant et chauffés à haute température. SIEMENS et HALSKE mettent sur le marché (1905) des lampes avec filament de tantale. Le tantale fond à 2850°C. Il peut être obtenu sous une forme suffisamment ductile pour être étiré.

L'efficacité lumineuse de ces lampes est voisine ou un peu supérieure à 5 lm/w. (1).

Le tungstène, disponible industriellement depuis 1890 semblait être le métal le plus désigné puisqu'il ne fond qu'à 3380°C, mais la difficulté d'en tirer des filaments était le grand obstacle.

Diverses méthodes furent utilisées : mélange de poudre de tungstène et d'un liant, dépôt de tungstène sur un fil de carbone, association avec l'osmium. Les premiers filaments étaient très fragiles mais permirent la commercialisation à partir de 1906. Le gain pour la température de fonctionnement était important : 500°, par rapport aux lampes carbone ordinaires. L'efficacité lumineuse passait à 10 lm/w.

La position du tungstène s'affermait lorsqu'à la suite des travaux de COOLIDGE on sut le rendre suffisamment ductile par martelages et chauffages successifs pour le tréfiler (1911). Les premières lampes à filament de tungstène dont le filament était monté en zig-zag entre deux couronnes de crochets, furent appelés "monowatt" parce que leur efficacité lumineuse était d'une bougie par watt.

Une étape importante qui conduisit directement à la technique actuelle fut celle de l'atmosphère gazeuse. Elle fut acquise à la suite des travaux de LANGMUIR (1913).

Au lieu de faire le vide dans les ampoules, on mit à profit l'avantage résultant de la présence d'un gaz neutre pour freiner la volatilisation des filaments. Ce gaz fut d'abord l'azote, puis l'argon. Un gain de température de 400° était rendu possible, mais l'efficacité lumineuse n'était pas celle que l'on aurait pu espérer à cause de la perte de chaleur du filament dans le gaz.

Pour réduire cette perte on créa la technique du spiralage sur laquelle nous ne nous étendrons pas ici.

.../...

(1) A côté des premières lampes à filament métallique, il faut faire une place à la lampe NERNST. Le filament NERNST était un bâtonnet d'oxydes métalliques (Thorium, Yttrium et Cerium) donnant l'avantage d'une émission "sélective" c'est-à-dire avec un rapport de l'énergie rayonnée dans le visible à l'énergie rayonnée dans l'infrarouge meilleur que celui des métaux. Le principal inconvénient étant la non conductivité à froid du bâtonnet, d'où la nécessité d'un dispositif auxiliaire de chauffage. Efficacité : 5lm/w.

L'aspect de la lampe devient différent : c'est celui que nous connaissons. Le filament n'occupe plus qu'une place réduite au centre de l'ampoule.

La lampe à atmosphère gazeuse dont l'efficacité varie de 10 à 20 lm/W suivie la puissance fut lancée sous le nom de lampe "demi-watt" par opposition à la lampe "monowatt" qu'elle venait remplacer. Elle ne devait plus subir de modification fondamentale.

Nous terminerons cet historique par une figure qui résume cette évolution en schématisant les "trois âges de la lampe à incandescence" Fig. 6 et une photographie du coeur de la lampe moderne : son filament spiralé.

B I B L I O G R A P H I E

PARTIE HISTORIQUE

- THE ELECTRIC LAMP INDUSTRY
Arthur A. Bright Jr - Mac Millan Cy - New-York 1949
- LAMPEN - LATERNEN - LEUCHTEN
Ernst Rebske - Franck'she Verlagshandlung - Stuttgart - 1962
- 75 ANS DE DEVELOPPEMENT DE LA LAMPE A INCANDESCENCE
Deenen et Geiss - Revue Internationale de l'Eclairage - 5-130-1954
- EN HOMMAGE AUX PIONNIERS
Deenen et Jansen - Revue Internationale de l'Eclairage - 5-143-1954
- SWAN ET LA LAMPE A FILAMENT DE CARBONE
Walsh - Revue Internationale de l'Eclairage - 5-158-1954
- HEINRICH GOEBEL
Arndt - Revue Internationale de l'Eclairage - 5-174-1954
- THE HISTORY OF THE TUNGSTEN FILAMENT LAMP
Moore - GEC Journal - 25-4-1958
- THE OUTSHINNING LIGHT
The Mazda Lighting Journal - 3-2-1954
- LA NAISSANCE D'UNE FABRIQUE DE LAMPES A INCANDESCENCE EN 1891
Halbertsma - Rev. Techn. Philips 23-218-1962
- LA LAMPE A ATMOSPHERE GAZEUSE A CINQUANTE ANS
Lokker - Rev. Techn. Philips - 24-281-1963
- COLLECTION DE "LA LUMIERE ELECTRIQUE"
Bibliothèque de la SFE - Paris

CHAPITRE II

LES LOIS DU RAYONNEMENT THERMIQUE - LE CORPS NOIR

L'émission de lumière par incandescence entre dans le cadre général du rayonnement thermique dont l'étude constitue un chapitre classique de la physique.

Au départ, un fait d'expérience : un corps chauffé progressivement fournit d'abord un rayonnement obscur mais calorifique, puis, s'il peut supporter une température suffisamment élevée, devient lumineux. Son éclat augmente avec la température. D'abord rouge très sombre, puis rouge clair, puis jaune, il devient d'un blanc éblouissant.

Les Physiciens ont établi les lois du rayonnement thermique dans le cadre théorique d'un corps idéal qu'ils appellent le corps noir.

Fondamental dans sa signification physique, le corps noir a été appelé à jouer un rôle pratique en éclairage, non seulement vis-à-vis des lampes à incandescence, mais de toutes les sources de lumière dont il sort à qualifier la couleur.

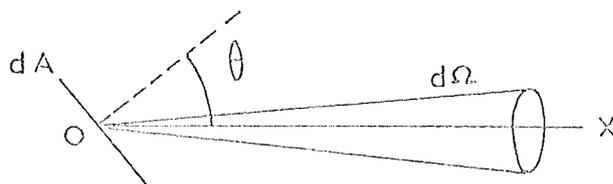
Pour comprendre les lois du corps noir, il faut être un peu familiarisé avec les grandeurs photométriques relatives au rayonnement, qu'il soit énergétique ou lumineux.

Nous rappellerons donc quelques définitions essentielles relatives à l'émission des sources de rayonnement. Ces définitions qui ont subi quelques variations dans le passé, ont maintenant une base internationale solide que



L'intensité : $I = \frac{d\check{\Phi}}{d\Omega}$

Fig. 8



La luminance : $L = \frac{d^2\check{\Phi}}{d\Omega \cdot dA \cos\theta} = \frac{dI}{dA \cos\theta}$

Fig. 9

leur a donnée la C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage - Vocabulaire 1970).

Les différentes grandeurs de base ont un double aspect : énergétique si le rayonnement est considéré uniquement sous sa forme physique, lumineux s'il est rapporté à la sensation qu'il produit sur notre oeil.

GRANDEURS ENERGETIQUES

La puissance émise sous forme de rayonnement constitue le flux énergétique d'une source ou d'un élément de surface. Unité : le Watt.

Si la source est ponctuelle (on la considère comme ponctuelle parce que la distance à laquelle on en étudie ses effets est relativement grande) on peut la caractériser par son intensité énergétique dans une direction considérée

INTENSITE ENERGETIQUE D'UNE SOURCE DANS UNE DIRECTION :

C'est le quotient du flux énergétique quittant la source et se propageant dans un élément d'angle solide contenant la direction, par cet élément d'angle solide :

$$I_e = \frac{d \Phi_e}{d \Omega}$$

L'indice e caractérise l'aspect énergétique par opposition à l'aspect lumineux. On peut l'omettre s'il n'y a pas d'ambiguïté (Fig. 8). L'unité d'intensité énergétique est le watt par stéradian.

Rappelons que le stéradian, unité d'angle solide, correspond à un cône découpant sur une sphère de rayon 1m une aire de 1 m². L'espace autour d'une source correspond par suite à un angle solide de 4π stéradians .

Si l'on s'attache à préciser l'émission d'un élément de surface, on définit la luminance qui est une grandeur directionnelle et l'exitance qui correspond à l'émission totale dans le demi-espace. (angle solide 2π).

Les définitions sont les suivantes :

LUMINANCE ENERGETIQUE DANS UNE DIRECTION (en un point d'une source) :

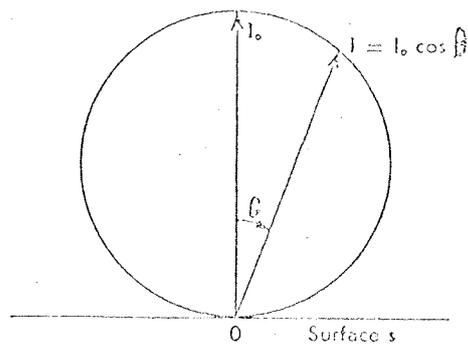
C'est le quotient du flux énergétique émis par un élément de surface contenant le point, par l'angle solide élémentaire entourant la direction considérée et par l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à cette direction :

$$L_e = \frac{d^2 \Phi_e}{d \Omega dA \cos \theta}$$

Elle s'exprime en watts par stéradian et par m². D'où :

$$L_e = \frac{d I_e}{dA \cos \theta}$$

dI étant l'intensité de dA dans la direction considérée. (Fig.9).



Indicatrice des intensités d'une surface
rayonnant à luminance uniforme (Loi de LAMBERT) - Fig. 10

EXITANCE ENERGETIQUE (en un point d'une surface) :

C'est le quotient du flux énergétique quittant un élément de surface contenant le point par l'aire de cet élément :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int L_e \cos \theta d\Omega$$

Elle est exprimée en watts par m2.

L'intégration est simple si l'on suppose que la surface rayonne à luminance constante (indépendante de la direction). Cette circonstance est souvent admissible.

On considère alors l'angle solide élémentaire $d\Omega$ contenu entre deux cônes d'axe normal à la surface et d'angle de demi-ouverture : θ et $\theta + d\theta$

On peut voir que :

$$d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$$

donc : $M_e = L_e \int_0^{\pi/2} 2\pi \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L_e$

On dit qu'une telle surface rayonne suivant la loi de LAMBERT. Puisque :

$$\frac{dI_e}{dA \cos \theta} = L_e = Cte$$

dI_e varie proportionnellement à $\cos \theta$. Cela signifie que l'indicatrice d'émission de la surface, donnant, par définition, l'enveloppe des rayons-vecteurs intensités dans toutes les directions pour une surface d'aire unité, est une sphère tangente à la surface au point considéré :

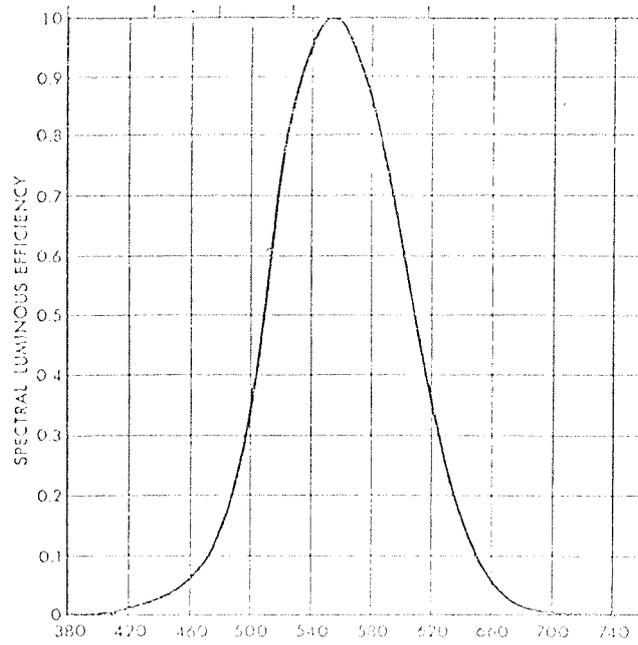
$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad \text{Fig. 10}$$

EMISSION SPECTRALE

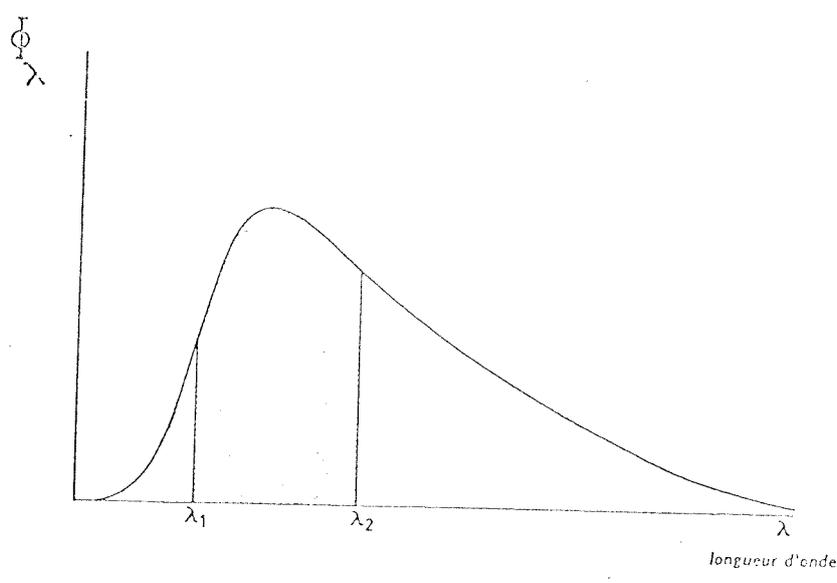
Le rayonnement d'un corps incandescent est constitué de radiations définies chacune par leur longueur d'onde. Ces radiations forment un ensemble continu c'est-à-dire que dans un large intervalle spectral toutes les longueurs d'onde sont présentes. On exprime celles-ci en microns ou micromètres /^{um} (10^{-6} m) ou, le plus souvent, dans le domaine des radiations lumineuses, en nanomètres nm (10^{-9} m).

Les longueurs d'onde des radiations visibles sont comprises entre 400 et 750 nm sans qu'il soit possible de fixer des limites absolument précises. Au-dessous de 400 nm, prennent place les radiations ultraviolettes. Au-dessus de 750 nm, les radiations infrarouges.

Rappelons qu'en fonction de la longueur d'onde croissante l'ordre des couleurs est : violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge avec, là aussi pour chaque couleur des limites imprécises.



Courbe spectrale d'efficacité lumineuse normalisée (C.I.E.) (vision photopique)
 Fig. 11



Courbe spectrale $\Phi_\lambda = f(\lambda)$

Fig. 12

La sensibilité de l'oeil aux différentes couleurs est très inégale, c'est-à-dire que l'efficacité lumineuse des radiations est fonction de la longueur d'onde.

La C.I.E. a normalisé une courbe d'efficacité dont le rôle est essentiel en photométrie. La fig. 11 montre cette courbe dont le maximum (égal par convention à 1) a lieu pour $\lambda = 555\text{nm}$ dans le "jaune-vert". C'est la fonction $V(\lambda)$.

La nature d'un rayonnement, en fonction des radiations qui le composent, est représentée par une courbe de répartition spectrale. En abscisse est portée la longueur d'onde λ et en ordonnée la grandeur considérée qui peut être relative au flux :

$$\frac{d\Phi}{d\lambda}; \text{ à l'exittance } \frac{dM}{d\lambda} \text{ ou}$$

à la luminance (en général dans la direction normale à la source) : $\frac{dL}{d\lambda}$.

Cette grandeur est en somme une ^{densité spectrale} du flux, d'exittance ou de luminance. Pour simplifier on parlera de flux spectrique (symbole $\bar{\Phi}_\lambda$). La figure 12 montre une courbe spectrale à titre d'exemple.

On remarquera que le flux, l'exittance ou la luminance tels qu'ils ont été définis plus haut résultent de l'intégration des valeurs spectrales en fonction de λ et sont donc représentés par l'aire de la surface déterminée par la courbe.

Entre deux limites λ_1 et λ_2 par exemple, l'énergie rayonnée est représentée par la partie hachurée de la figure 12.

Si λ_1 et λ_2 sont les limites du spectre visible on peut utiliser la courbe pour déterminer la proportion d'énergie lumineuse dans l'énergie totale rayonnée.

GRANDEURS LUMINEUSES

L'oeil intervient pour définir une série de grandeurs dérivées des grandeurs énergétiques. En fait, ces définitions sont physiques, car l'oeil est assimilé à un récepteur matériel dont la courbe de sensibilité est donnée par la fonction $V(\lambda)$ de la C.I.E. (vision photoptique) introduite plus haut:

Au flux $\bar{\Phi}_e$ tel que

$$\bar{\Phi}_e = \int \bar{\Phi}_\lambda d\lambda$$

correspond :

$$\bar{\Phi}_v = K_m \int \bar{\Phi}_\lambda V(\lambda) d\lambda$$

(indice V comme visible)
 K_m étant une constante.

.../...

K_m ne peut avoir une valeur arbitraire car l'unité de flux lumineux le lumen, a été introduit à partir d'un étalon imposé par d'autres considérations qui entraînent :

$$K_m = 680 \text{ lm/W}$$

Pour 1 watt de radiation 555 nm, correspondant à $V_\lambda = 1$ on a donc 680 lumens.

La définition du flux lumineux entraîne celle des autres grandeurs lumineuses. De même que pour l'intensité énergétique :

Intensité lumineuse :

$$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}$$

L'unité est alors le lumen par stéradian et prend le nom de candéla.

Luminance lumineuse dans une direction en un point donné :

$$L_V = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega dA \cos\theta} = \frac{dI_V}{dA \cos\theta}$$

L'unité est le lumen par stéradian et par m² c'est aussi la candela par m².

Exitance lumineuse en un point donné :

$$M_V = \frac{d\Phi_V}{dA} = \int L_V \cos\theta d\Omega$$

L'unité est le lumen par m².

Si la luminance peut être considérée comme indépendante de la direction (Loi de LAMBERT) :

$$M_V = \pi L_V$$

Il est évident, comme déjà signalé, que l'indice V peut être jugé superflu s'il n'y a pas risque de confusion avec les symboles énergétiques. C'est le cas dans la pratique de l'éclairagisme où l'on omet couramment cette précision.

.../...

EFFICACITE LUMINEUSE D'UNE SOURCE

L'efficacité lumineuse d'un rayonnement est le rapport entre la lumière (exprimée en lumens) et l'énergie (exprimée en watts) qu'il transporte.

L'efficacité lumineuse d'une source est le rapport entre la lumière qu'elle émet et l'énergie qu'on lui fournit. Elle est ainsi exprimée en lumens par watt (lm.W^{-1}) et son symbole est η . Elle est diminuée par les pertes dans la lampe, et l'efficacité lumineuse du rayonnement représente la limite supérieure de l'efficacité de la source.

LE CORPS NOIR

La notion du corps noir résulte de considérations thermodynamiques. On montre que dans une enceinte isotherme à la température T , les échanges de rayonnement entre les parois, résultant de leur émission propre et des réflexions conduisent à un régime d'équilibre bien déterminé. Il est tel que la luminance d'un petit contour (1) placée en un endroit quelconque de l'enceinte, est constante et indépendante de l'orientation. Elle ne dépend ni de la forme de l'enceinte, ni de la nature des parois. Elle n'est fonction que de la température T .

Si l'on place le contour sur la paroi on voit immédiatement que l'équilibre suppose un lien entre l'énergie qu'elle émet et celle qu'elle absorbe.

Considérons pour le rayonnement de longueur d'onde λ l'exitance spectrale m_λ de la paroi, l'exitance spectrale spécifique de l'enceinte M_λ et le facteur d'absorption a_λ de l'élément de paroi vis-à-vis de ce rayonnement. Il doit y avoir égalité entre l'énergie qu'il émet m_λ et l'énergie qu'il absorbe $a_\lambda M_\lambda$

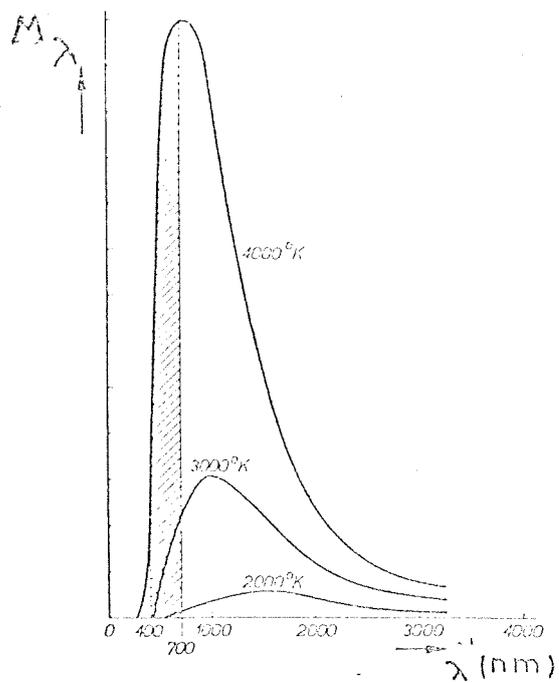
L'égalité : $m_\lambda = a_\lambda M_\lambda$

est en relation avec la "Loi de KIRCHHOFF" (voir chapitre suivant).

Nous remarquons que l'émission de la paroi est maximale pour $a = 1$ c'est-à-dire lorsqu'elle est complètement absorbante vis-à-vis des radiations de longueur d'onde λ . Cela conduit à la notion de corps noir défini ainsi par la C.I.E. :

CORPS NOIR : (appelé également radiateur intégral ou radiateur de PLANCK) : radiateur thermique qui absorbe complètement toutes les radiations incidentes quelles que soient leur longueur d'onde, leur direction et leur état de polarisation. C'est le radiateur thermique qui à une température donnée, présente pour toute longueur d'onde, l'exitance spectrique énergétique maximale.

(1) - On peut parler de la luminance d'un petit contour sur le trajet d'un faisceau. Sa définition est la même que celle d'une petite surface émissive. (Vocabulaire de la C.I.E.).



Courbes spectrales du corps noir pour
3 températures. - Fig. 13

Les courbes spectrales donnant en fonction de la longueur d'onde la valeur de M_λ du corps noir à chaque température ont pu être établies expérimentalement (1) et l'honneur revient à PLANCK d'en avoir donné l'expression mathématique.

La théorie de PLANCK (1906) prend pour base l'existence des "quanta" dont on connaît le rôle fondamental en physique.

EQUATION DE PLANCK

L'existance énergétique spectrique est donnée en fonction de la longueur d'onde et de la température par :

$$M_\lambda(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T} - 1} \right)^{-1} \quad W \cdot m^{-2}$$

λ en m, T en K, avec les deux valeurs des constantes C_1 et C_2 :

$$C_1 = 2 \pi^5 h c^2 = 3,74 \cdot 10^{-16}$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1,44 \cdot 10^{-2}$$

(h, constante de PLANCK - c, vitesse de la lumière dans le vide - k, constante de BOLEZMANN).

Quand λT est petit [c'est notamment le cas de la région visible pour les températures pratiquement réalisables] on peut réduire l'expression ci-dessus à :

$$M_\lambda(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

Elle prend alors le nom de loi du rayonnement de WIEN.

La figure 13 montre l'allure classique des courbes $M_\lambda(\lambda, T)$.

L'équation de PLANCK permet de retrouver certaines relations caractéristiques établies antérieurement (sans référence à la théorie des quanta) et relatives à l'existance totale énergétique M_e et à la position du maximum des courbes. Ainsi :

LOI DE STEFAN - BOLTZMANN

L'existance énergétique M_e du corps noir à la température T est donnée par l'aire comprise entre la e courbe correspondante et l'axe des abscisses.

.../...

(1) -- L'orifice percé dans une enceinte isotherme constitue expérimentalement une petite surface de corps noir. Voir plus loin.

Elle résulte d'une intégration montrant que :

$$M_e = \int_0^{\infty} M(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{W. m}^{-2}$$

La valeur de la constante σ est :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,7 \cdot 10^{-8}$$

CONCLUSION :

L'énergie rayonnée par le corps noir augmente avec la quatrième puissance de la température absolue. C'est une loi très importante, appliquée dans tous les calculs relatifs aux échanges de chaleur par rayonnement.

LOI DE DEPLACEMENT DE WIEN

En annulant la dérivée de l'équation de PLANCK, on voit que l'abscisse λ_m du maximum est telle que :

$$\lambda_m T = \text{Cte}$$

En exprimant λ_m en microns et T en °K, on peut écrire :

$$\lambda_m T = 2891$$

pour T croissant, le maximum se déplace donc vers les longueurs d'onde décroissantes.

L'exitance maximale, il est facile de le voir, est alors telle que :

$$M(\lambda_m, T) \propto T^5$$

L'exitance maximale du corps noir augmente avec la cinquième puissance de la température absolue.

La figure 13a montre les variations à température croissante : le maximum est d'abord situé loin dans l'infrarouge, et le corps reste sombre. Il faut atteindre environ 800°K pour obtenir pratiquement une lueur rouge. Les autres couleurs apparaissent successivement. Il est remarquable que le maximum soit au milieu du spectre visible pour T = 5200°K qui est la température correspondant à la lumière solaire directe.

Des tables et des graphiques facilitent le calcul des caractéristiques du corps noir. On peut notamment, mettre à profit le fait qu'en prenant comme variable $\frac{\lambda}{\lambda_m}$ au lieu de λ on obtient l'équation de PLANCK sous une

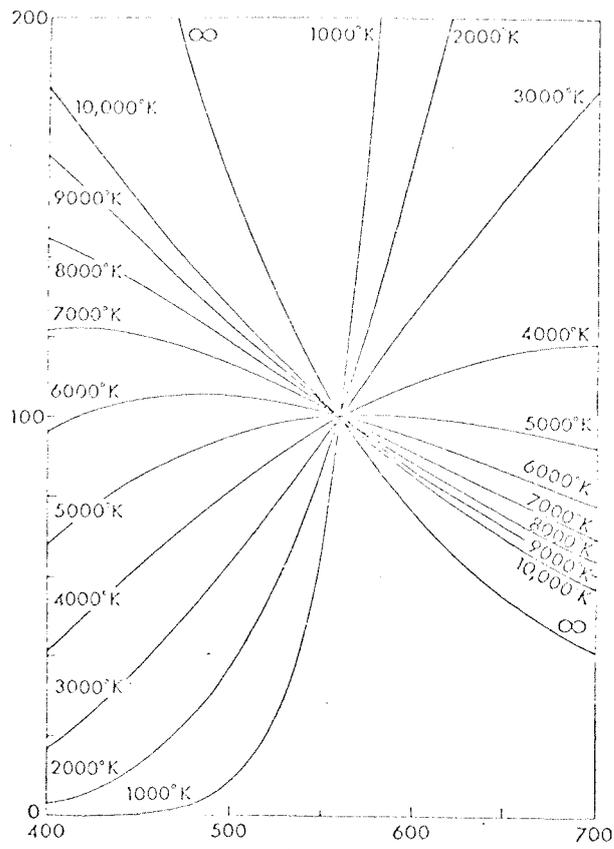


Fig. 14 λ (nm)

Répartition spectrale dans le visible du rayonnement du corps noir en fonction de la température.

forme réduite, indépendante de T. On en tire alors des conclusions générales : par exemple, qu'il y a moins de 1% de l'énergie rayonnée en radiations de longueur d'onde inférieure à $0,5 \lambda_m$ et moins de 5% en radiations de longueur d'onde supérieure à $4,3 \lambda_m$.

Des caractéristiques énergétiques du corps noir, on passe à ses caractéristiques lumineuses par l'intermédiaire de $V(\lambda)$.

L'exitance spectrale lumineuse est telle que :

$$M_V(\lambda, T) = M_e(\lambda, T) \cdot V(\lambda)$$

Le déplacement des courbes de PLANCK en fonction de la température vers les courtes longueurs d'onde, entraîne une croissance rapide de l'exitance lumineuse.

En écrivant que :

$$M_V \propto T^\alpha$$

On doit adopter un exposant :

$$\alpha = 12,4 \text{ vers } 2000^\circ\text{K}$$

$$\alpha = 8,5 \text{ vers } 3000^\circ\text{K}$$

$$\alpha = 6,4 \text{ vers } 4000^\circ\text{K}$$

$$\alpha = 4,4 \text{ vers } 6000^\circ\text{K}$$

L'efficacité lumineuse du rayonnement, rapport des deux exitances, lumineuse et énergétique (cette dernière variant comme T^4) augmente donc d'abord très vite avec la température. Elle passe par un maximum au-dessus de 6000°K et décroît ensuite. C'est ce que montre le tableau I donnant les caractéristiques radiométriques du corps noir.

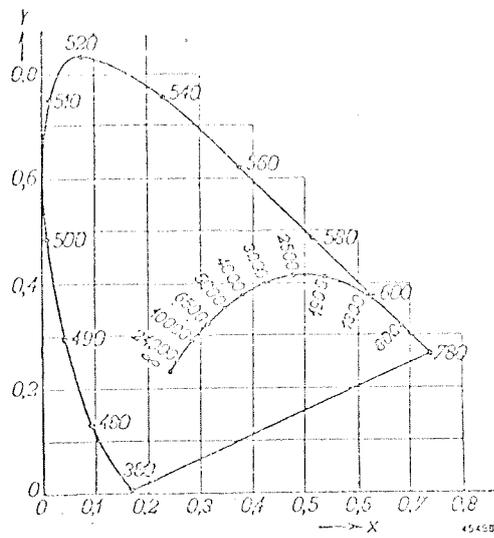
On voit que l'efficacité maximale, voisine de 90 lm/w , correspond à 44% de l'énergie rayonnée dans le visible (1) (entre $\lambda = 400 \text{ nm}$ et $\lambda = 750 \text{ nm}$).

COULEUR DU CORPS NOIR - TEMPERATURE DE COULEUR

A chaque température du corps noir correspond une répartition spectrale déterminée de la lumière émise et par suite une couleur également déterminée de celle-ci. A température croissante on va du rouge au bleu en passant par le rouge clair, le blanc-jaune, le blanc, le blanc-bleuté. Toutes ces couleurs ne sont pas réalisables pratiquement par incandescence, le blanc-bleuté par exemple, demandant une température trop élevée. La figure 14 montre l'évolution

.../...

(1) -- Si toute l'énergie d'une source était rayonnée dans le visible, donc sans ultraviolet ni infrarouge, le calcul donnerait une efficacité de 200 lm/w . C'est un plafond absolu pour une lumière ayant la composition spectrale de celle du corps noir.



Les points de couleur du corps noir dans le triangle des couleurs.

Fig. 15

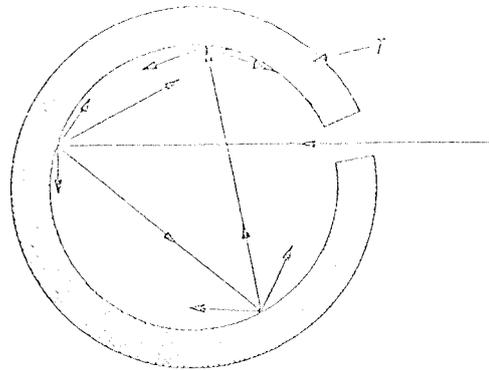
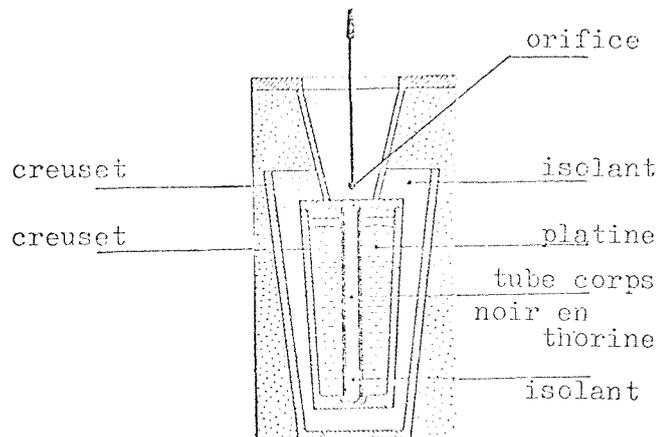


Fig. 16

Enceinte isotherme avec orifice dans la paroi



L'étalon d'intensité lumineuse - Fig. 17

de la répartition spectrale en valeurs relatives dans le visible.

Dans le triangle des couleurs tel qu'il est normalisé par le C.I.E, les couleurs du corps noir prennent place sur une courbe caractéristique indiquée par la figure 15.

Le lieu géométrique des points de couleur du corps noir a une importance particulière en colorimétrie. Il définit des couleurs qui peuvent être symbolisées par un chiffre unique : d'où la notion de température de couleur. La courbe traverse la zone des "blancs", partie centrale du triangle, et les blancs du corps noir, probablement parce qu'ils sont ceux auxquels l'œil humain est particulièrement habitué reçoivent toujours une appréciation favorable en éclairage. C'est une donnée de l'éclairagisme.

REALISATION PRATIQUE DU CORPS NOIR

A une température voisine de la température ordinaire une surface recouverte d'une couche épaisse de noir de fumée peut représenter valablement le corps noir.

A température élevée, il faut faire appel à un dispositif dont la conception résulte de la définition du corps noir, telle que nous l'avons donnée à partir d'une enceinte isotherme.

Supposons en effet, que nous percions un petit orifice dans une enceinte isotherme à la température T. On peut admettre que la perturbation créée par cet orifice dans le régime d'émission et réflexion est négligeable. Le rayonnement qui sort par l'orifice est donc le rayonnement du corps noir à T. La figure 16 schématise ce principe.

Un exemple d'application est donné par l'étalon d'intensité lumineuse, la candela dont la définition adoptée par la Conférence Internationale des Poids et Mesures est la suivante :

CANDELA : Intensité lumineuse dans la direction perpendiculaire d'une surface de $1/6000000$ m² d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101325 newtons par m².

Définition d'où résulte celle du lumen :

LUMEN : flux lumineux émis dans un stéradian par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candela.

Cela fixe la valeur de la constante K_m donnée plus haut.

Pour réaliser l'étalon, on fait appel à un tube étroit en matière réfractaire placé dans un creuset contenant le platine. Le tube réalise ainsi une enceinte isotherme. La figure montre le schéma du dispositif utilisé. (Fig. 17)

.../...

T A B L E A U I

CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES DU CORPS NOIR

Température	Ex itance énergétique	Ex itance lumineuse	Efficacité lumineuse	Longueur d'onde m	% d'énergie dans le visible
1000°K	5,7 W/cm2	0,0008 lm/cm2	0,0001 lm/W	2,8 / μ m	--
1500°K	32,9 "	2,4 "	0,07 "	1,9 "	< 0,2
2000°K	91,3 "	144 "	1,6 "	1,4 "	2
2500°K	223 "	1,8 Klm/cm2	8 "	1,15 "	5
3000°K	462 "	9,5 "	20 "	0,96 "	12
3500°K	857 "	32 "	37 "	0,82 "	19
4000°K	1,46 KW/m2	79 "	54 "	0,72 "	26
5000°K	3,57 "	283 "	79 "	0,58 "	38
6000°K	7,4 "	667 "	90 "	0,48 "	44
7000°K	13,7 "	1230 "	89 "	0,41 "	44
8000°K	23,4 "	1950 "	83 "	0,36 "	43
10000°K	57 "	3750 "	66 "	0,29 "	35

D'après RUTGERS et DEVOS (Physica XX-715-720-1954), la luminance lumineuse du corps noir en fonction de T peut être calculée avec :

$$\text{Log } L_v = 7,2010 - \frac{1,1376 \times 10^4}{T} + \frac{0,00613 \times 10^8}{T^2}$$

On peut en déduire l' exitance par application de :

$$M_v = \pi L_v$$

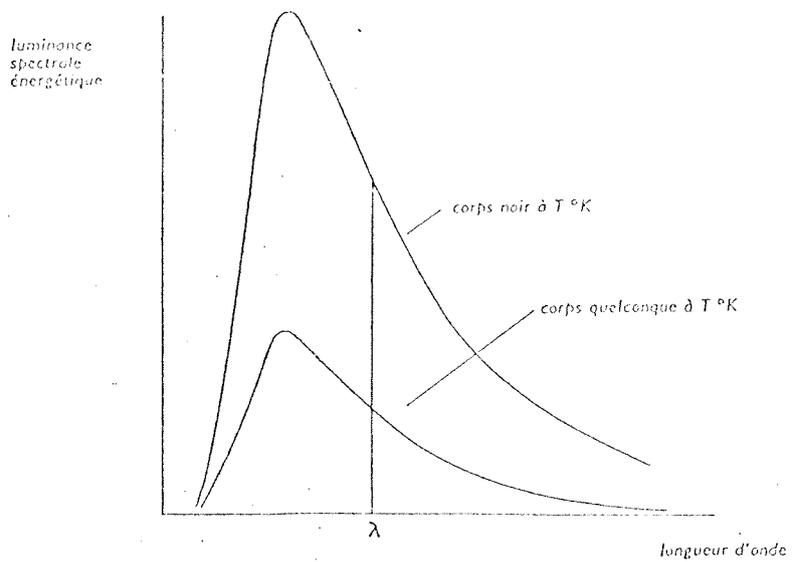


Fig. 18

L'émissivité spectrale d'un corps non noir est donnée par le rapport des ordonnées

C H A P I T R E III

LES CORPS NON NOIRS - LE TUNGSTÈNE

Le corps noir est à chaque température et pour chaque longueur d'onde, le corps qui rayonne le plus. Si par exemple, on trace sur le même graphique la courbe spectrale d'exitance énergétique d'un corps quelconque et celle du corps noir, la première courbe est entièrement comprise dans la seconde. (Fig. 18).

Le rapport entre les ordonnées des deux courbes pour la longueur d'onde λ est par définition, l'émissivité spectrale ϵ_{λ} du corps considéré :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{m_{\lambda}}{M_{\lambda}}$$

Le rapport entre les aires définies par les courbes et l'axe des abscisses égal au rapport des deux exitances est l'émissivité ϵ du corps :

$$\epsilon = \frac{m}{M}$$

On définit aussi l'émissivité directionnelle spectrale dont le symbole est $\epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi)$ les angles θ et φ indiquant la direction. C'est le rapport entre la luminance du corps considéré dans cette direction et celle du corps noir, qui, nous le savons, est indépendante de la direction :

$$\epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) = \frac{l_{\lambda}(\theta, \varphi)}{L_{\lambda}}$$

.../...

Une relation fondamentale, la loi de KIRCHHOFF s'énonce ainsi :

A toute température et pour toute longueur d'onde λ , l'émissivité directionnelle spectrale est égale au facteur spectral d'absorption pour un rayonnement de longueur d'onde λ incident, suivant la même direction :

$$\varepsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) = a_{\lambda}(\theta, \varphi)$$

Si le corps est opaque on peut remplacer a_{λ} par $1 - \rho_{\lambda}$ en désignant par ρ_{λ} le facteur de réflexion :

$$\varepsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) = 1 - \rho_{\lambda}(\theta, \varphi)$$

Si ε_{λ} est indépendant de la direction, on peut écrire :

$$\varepsilon_{\lambda} = a_{\lambda} \quad \text{ou} \quad \varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$$

L'émissivité spectrale, rapport des exitances est égale au facteur d'absorption.

On ne peut jamais admettre, sinon dans un domaine spectral étroit que a_{λ} soit constant. Tous les corps, même les métaux, présentent une certaine sélectivité et le facteur d'absorption varie avec la longueur d'onde.

En appliquant la loi de KIRCHHOFF, on voit que l'émissivité (totale) ε est égale au facteur d'absorption du corps non noir considéré vis-à-vis du rayonnement du corps noir à la même température.

La sélectivité a une conséquence importante; tout en rayonnant moins pour chaque longueur d'onde que le corps noir un corps quelconque peut avoir une efficacité lumineuse supérieure à celle de ce dernier. On doit s'attendre à cette circonstance avantageuse avec les métaux dont le facteur de réflexion ρ_{λ} augmente à longueur d'onde croissante et dont par suite l'émissivité ε_{λ} diminue dans l'infrarouge.

Nous reviendrons plus loin sur la question particulière des émetteurs sélectifs, recherchés en tant que tels.

TEMPERATURE DE LUMINANCE, DE COULEUR, DE DISTRIBUTION (OU DE REPARTITION)

La température de luminance pour une longueur d'onde λ est la température du corps noir pour laquelle celui-ci a la même luminance énergétique spectrique que le corps non noir considéré.

Cette notion est utile en pyrométrie visuelle. La longueur d'onde de référence est généralement $\lambda = 655\text{nm}$.

La température de répartition est la température du corps noir pour laquelle les ordonnées de sa courbe spectrale sont, dans le visible, proportionnelles (ou à peu près) à celles de la courbe du rayonnement considéré.

La connaissance de la température de répartition est importante lorsqu'on s'attache à qualifier l'action d'un rayonnement sur un matériau ayant une sensibilité spectrale déterminée : par exemple, une surface photographique.

La température de couleur est la température du corps noir émettant un rayonnement de même chromaticité que le rayonnement considéré.

Il faut comprendre, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, que la température de couleur fixe le point de couleur du corps considéré dans le triangle des couleurs.

Il est important de noter que la température de couleur ainsi définie fixe la couleur apparente du corps considéré mais non sa courbe d'émission spectrale.

C'est seulement dans le cas des radiateurs thermiques que la température de couleur peut être aussi la température de répartition. On la mesure d'ailleurs couramment par une méthode dite du rapport rouge-bleu qui suppose une similitude avec le corps noir dans la répartition spectrale des radiations visibles. On isole en effet, avec deux filtres une bande spectrale dans le bleu et une bande spectrale dans le rouge et la température de couleur est la température du corps noir donnant le même rapport des luminances que le rayonnement du corps considéré.

CARACTERISTIQUES DES CORPS NON NOIRS

Tungstène mis à part, il faut se contenter de quelques données, les publications étant rares.

CARBONE

Le carbone est considéré comme un corps gris en ce sens que dans le domaine visible son émissivité (ou son facteur d'absorption) est constante.

Le tableau II ci-après, donne un chiffre d'émissivité spectrale dans le visible plus élevé que celui de l'émissivité globale. Il y a donc une certaine sélectivité due à une absorption plus faible dans l'infrarouge.

.../...

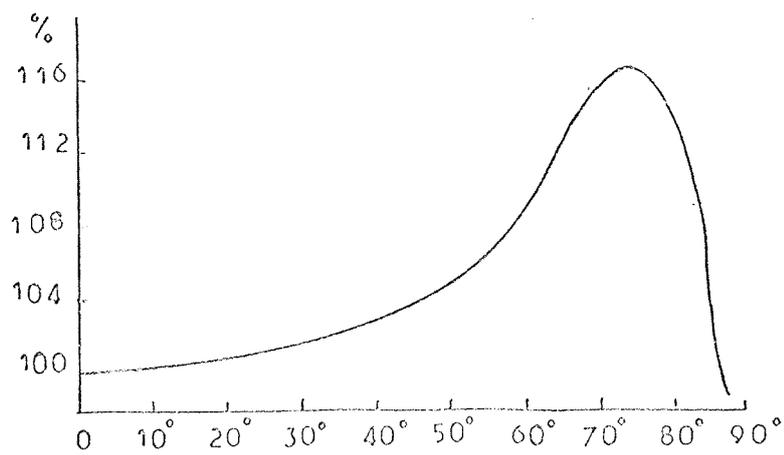


Fig. 19

Tungstène - Luminance spectrale pour $\lambda = 660\text{nm}$ en fonction de l'angle d'émission - (écarts avec la loi de LAMBERT)

T A B L E A U II

QUELQUES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES DU CARBONE

Température °K	Emissivité	Emissivité spectrale $\lambda = 660\text{nm}$	Exitance énergétique W/cm ²	Luminance visible cd/cm ²	Efficaci lm/W
1000	0,50		3,0	0,0002	-
1200	0,51		6,2	0,008	-
1400	0,52		11,6	0,18	0,04
1600	0,52	0,89	19,5	1,7	0,2
1800	0,52		33	8,0	0,8
2000	-		52	32	1,8
2200	-		82	100	3,7

PLATINE - Entre 1000°K et 1800°K, l'émissivité passe de 0,13 à 0,18

Pour $\lambda = 660\text{nm}$, l'émissivité spectrale est de 0,31 à 1600°K.

TANTALE - Entre 1600°K et 2400°K, l'émissivité passe de 0,19 à 0,27

pour $\lambda = 660\text{nm}$, l'émissivité spectrale est de 0,43 à 1600°K.

TUNGSTENE - Les caractéristiques du tungstène ont donné lieu à des études complètes. Voir tableau III .

L'émission du tungstène n'est pas à luminance uniforme car sa luminance augmente légèrement à incidence croissante, comme le montre la figure 19, d'après WORTHING.

.../...

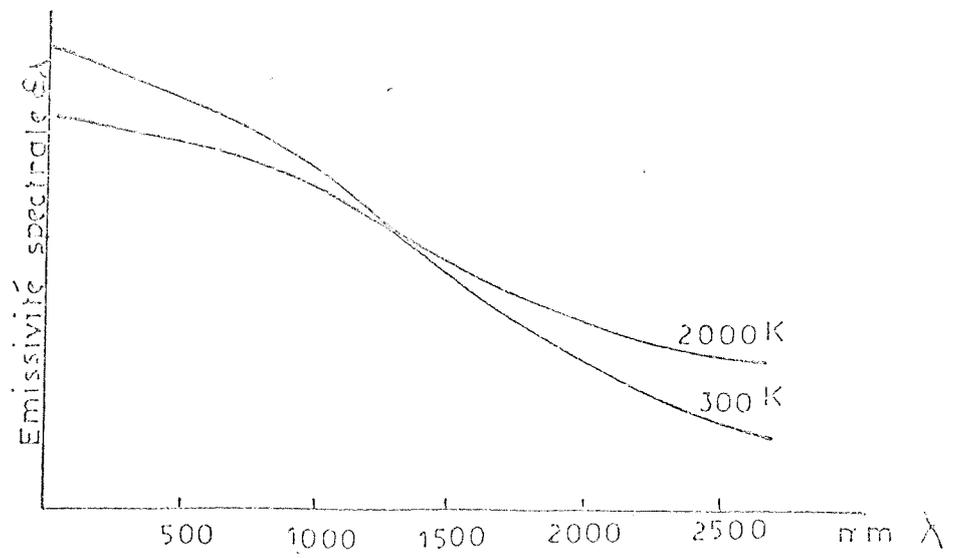
CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES
 ET PHOTOMETRIQUES DU TUNGSTENE

Température °K	Température de couleur (1) °K	Température de lumiance $\lambda = 650\text{nm}$ (1) °K	Excitation énergétique Jones et Langmuir W/cm ²	Excitation énergétique Zwicker W/cm ²	Lumiance (1) cd/cm ²	Emissivité	Emissivité spectrale $\lambda = 650\text{nm}$	Efficacité lumineuse (2) lm/W	$\frac{d^2E}{d\lambda^2} / \frac{d^2E}{d\lambda}$	$\frac{d^2E}{d\lambda^2} / \frac{d^2E}{d\lambda}$	$\frac{d^2E}{d\lambda^2} / \frac{d^2E}{d\lambda}$
2000	2023	1850	24,04	24,0	20,94	0,25	0,45	2,70	4,8	12,3	7,5
2100	2125	1935	30,5	30,5		0,26	0,45	3,88			
2200	2228	2019	38,2	38,2	64,31	0,27	0,45	5,24	4,7	11,2	6,5
2300	2382	2102	47,2	47,2		0,28	0,45	6,83			
2400	2436	2185	57,7	57,3	164,5	0,29	0,44	8,78	4,6	10,3	5,7
2500	2540	2267	69,8	69,4		0,30	0,44	11,1			
2600	2644	2348	83,8	83,5	365,3	0,30	0,44	15,8	4,5	9,6	5,1
2700	2748	2428	99,6	100,5		0,31	0,44	16,6			
2800	2853	2508	117,6	119,0	725	0,31	0,44	19,5	4,5	8,9	4,4
2900			137,8	139		0,32	0,44	22,5			
3000			160,5	162	1315	0,32	0,43	25,9	4,4	8,3	3,7
3100			185,8	189		0,33	0,43	29,4			
3200			214,0	221		0,33	0,43	33,0	4,3	7,8	3,5
3300			245,4	254		0,33	0,43	36,8			
3400			280,0	291		0,34	0,43	41,0	4,3	7,6	3,3

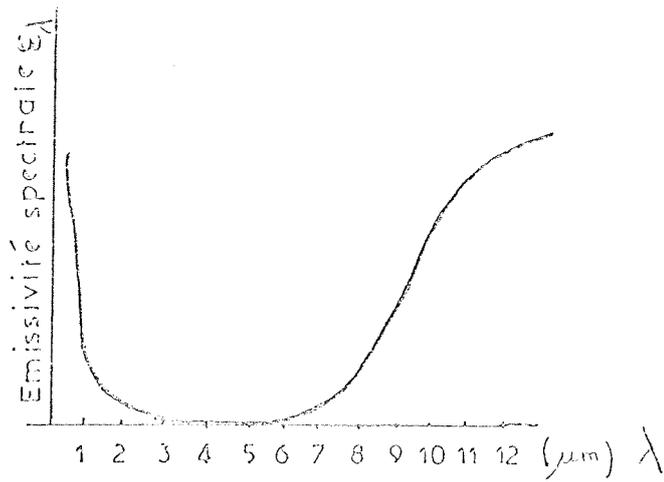
(1) D'après RUTGERS et DE VOS (Physica XX - 715-720-1954) - La lumiance est donnée par :

$$\text{Log } L = 6,8045 - \frac{1,1236 \times 10^4}{T} + \frac{0,00538 \times 10^6}{T^2}$$

(2) D'après Exalto (Doc. PHILIPS non publié) sur base pratique.



Emissivité spectrale du tungstène en fonction de la longueur d'onde - Fig. 20 -



Emissivité spectrale d'un corps très sélectif (manchon AUER)

Fig. 21

Le tableau III groupe les caractéristiques radiométriques du tungstène : température de couleur, température de luminance pour $\lambda = 650\text{nm}$, exitance énergétique (suivant deux auteurs), luminance, émissivité, émissivité spectrale pour $\lambda = 650\text{nm}$, efficacité lumineuse et enfin quelques coefficients exponentiels montrant l'allure de la variation de l'émission énergétique et lumineuse en fonction de la température. Ces coefficients seront utiles dans la suite de cet exposé.

L'examen du tableau montre que l'émissivité du tungstène augmente avec la température, mais diminue avec la longueur d'onde puisque ϵ_{650} est nettement plus élevée que ϵ pour l'ensemble du rayonnement. La confirmation est donnée par la courbe de la figure 20 donnant la variation de ϵ_{λ} en fonction de λ .

Une conséquence importante : l'efficacité lumineuse du tungstène est, à température égale, nettement supérieure à celle du corps noir. C'est ainsi qu'à 3000°K , elle dépasse celle-ci de 30%.

LE PROBLEME DES EMETTEURS SELECTIFS

L'idée de faire appel à des corps très sélectifs, permettant par leur efficacité un progrès en matière d'éclairage à incandescence est très ancienne.

Le manchon AUER en a été une application dans le domaine du gaz d'éclairage. Porté à 1600°K par la flamme du gaz il était plus lumineux et plus efficace que la flamme elle-même. Il était constitué d'oxydes de terres rares (thorium, cerium) caractérisé par une émissivité spectrale très faible dans l'infrarouge, entre 0,7 et $6 \mu\text{m}$ comme l'indique la figure 21.

La lampe à incandescence du type NERNST était basée également sur l'émission d'oxydes métalliques (thorium, yttrium, cerium) mais la sélectivité était moins marquée, car celle-ci, et il semble que ce soit une propriété générale, diminue à température élevée.

Cela limite l'espoir que l'on peut mettre dans une solution de ce genre pourtant séduisante. L'adoption d'une température plus faible que celle qui est possible avec le tungstène (dont l'efficacité augmente avec $T^{3,7}$ vers 3000°K) peut-elle être compensée par la sélectivité ? Jusqu'à présent la réponse a été négative.

Notons que les connaissances actuelles en matière de physique des solides donnent une base pour discuter de la constitution de l'émetteur idéal (1).

LE RAYONNEMENT D'UNE "SPIRALE" DE TUNGSTENE

Les caractéristiques radiométriques du tungstène données dans le tableau III sont celles d'une surface plane et polie. Elles s'appliquent sans restric-

.../...

(1) -- Radiateurs thermiques sélectifs. E. KAUER - Rev. Tech. PHILIPS
1963 - N°11-12--.

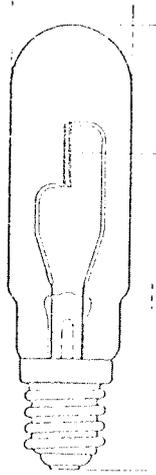


Fig. 22

Une lampe a ruban de tungstène



Fig. 23 Effet de corps noir dans la spirale

tion aux lampes dites à "ruban de tungstène" utilisées dans les laboratoires (fig.22) qui étudient les problèmes de photométrie et de pyrométrie.

Les conditions sont un peu différentes dans la pratique.

La lampe d'éclairage est, en effet, une lampe à filament "spiralo" [suivant une expression courante, mais un peu impropre puisqu'il s'agit d'un filament formé en hélice ou, si l'on préfère, "boudiné"]

Les considérations théoriques développées dans ce chapitre nous aident à comprendre que le rayonnement d'une spirale est différent de celui d'une surface plane. Par le jeu des interrélflexions à l'intérieur de la spirale, il y a une absorption plus grande de rayonnement et il en résulte ce qu'on appelle un "effet de corps noir". Les conséquences en sont les suivantes :

- la luminance des surfaces internes est plus grande que celle des surfaces externes (Fig.23).
- la température de couleur moyenne de la spirale est plus proche de celle du corps noir que celle du tungstène plan.
- l'efficacité lumineuse de la spirale se rapproche de celle du corps noir et est, par suite, inférieure à celle du tungstène plan.

Nous verrons plus loin l'influence de ces circonstances sur les caractéristiques des lampes.

CHAPITRE IV

LES EQUATIONS D'EQUILIBRE THERMIQUE D'UN FILAMENT DROIT.

LE RAYONNEMENT D'UN FILAMENT SPIRALE

RESISTANCE DES FILAMENTS

La lampe à incandescence est au point de vue électrique, le récepteur d'énergie le plus simple que l'on puisse souhaiter.

Elle se comporte comme une résistance et obéit aux lois classiques de l'effet Joule.

La résistance d'un filament de longueur l et de diamètre d est donnée par :

$$R = \rho \frac{4l}{\pi d^2} \quad \Omega \text{ (ohms)}$$

avec ρ , résistivité en ohm-mètre - l et d en mètres.

La résistivité est fonction de la température. Le tableau IV, ci-après, donne ρ pour le tungstène dans la zone des températures de fonctionnement 2000 K à 3400 K.

DONNÉES DE SPIRALAGE

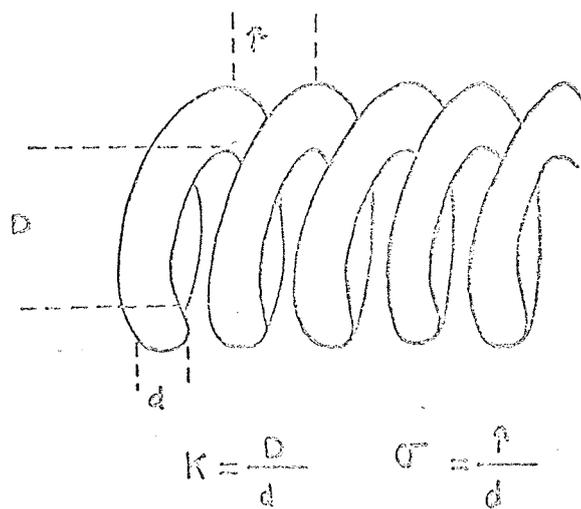


Figure 24

On peut admettre que :

$$\rho \propto T^{1,2}$$

En passant de 300 K à 3000 K la résistivité est donc multipliée par un facteur 13. Ce chiffre montre qu'il faut s'attendre au moment de l'allumage des lampes à incandescence à une intensité de courant à froid dépassant de beaucoup la valeur de régime, circonstance dont il faut éventuellement tenir compte.

TABLERAU IV

Résistivité du tungstène en fonction de la température

T (K)	$\rho \times 10^8$ ($\Omega \cdot m$)	T (K)	$\rho \times 10^8$ ($\Omega \cdot m$)
2000	56,7	2800	84,8
2100	60,1	2900	88,5
2200	63,5	3000	92,3
2300	66,9	3100	97,0
2400	70,5	3200	99,9
2500	74	3300	103,8
2600	77,6	3400	107,8
2700	81,2		

D'après ZWIKKER

La résistance d'un filament spiralé dépend un peu de la "géométrie" des spirales comme le montre le raisonnement ci-après.

Les paramètres de spiralage sont les rapports :

$$K = \frac{D}{d} \quad \sigma = \frac{p}{d} \quad (\text{Fig 24})$$

d étant le diamètre du fil, D le diamètre du mandrin sur lequel le fil est enroulé au cours de la fabrication, p le pas de spiralage, c'est-à-dire la distance, mesurée d'axe en axe, entre deux tours de fil successifs.

.../...

On peut considérer la longueur ℓ de l'hélice définie par l'axe du filament. Le diamètre \mathcal{S} de cette hélice est :

$$\mathcal{S} = D + d$$

Avec le pas p , la formule :

$$\ell_{2\pi} = \pi \mathcal{S} \sqrt{1 + \left(\frac{p}{\pi \mathcal{S}}\right)^2}$$

donne la longueur pour un tour de filament.

Si nous assimilons le filament, pour calculer sa résistance, à un faisceau de fils fins parallèles, la longueur de chaque fil (et sa résistance) est variable, il y a deux valeurs extrêmes :

$$\begin{aligned} \mathcal{S} &= D && \text{(à l'intérieur de la spirale)} \\ \text{et } \mathcal{S} &= D + 2d && \text{(à l'extérieur de la spirale)} \end{aligned}$$

la résistance résultante étant plus faible que celle calculée sur la base de la longueur axiale.

En fait, la correction est petite. D'après les calculs d'Exalto, elle est sensiblement de 1 % pour $K = 4$; elle atteint 4 % pour $K = 7,5$. L'influence de J est pratiquement négligeable.

Equation d'équilibre thermique :

Considérons le cas le plus simple d'un filament droit n'échangeant d'énergie avec son environnement que par rayonnement.

Il est à la température d'équilibre T , la résistivité est ρ_T , et la résistance est :

$$R_T = \rho_T \frac{4\ell}{\pi d^2}$$

Sous tension V , il admet un courant d'intensité I et absorbe une puissance électrique W :

$$W = R_T I^2 = \rho_T \frac{4\ell}{\pi d^2} I^2$$

ou :

$$W = \frac{V^2}{R_T} = \frac{\pi d^2}{4\ell \rho_T} V^2$$

Comme il rayonne toute la puissance qu'il absorbe (1), on peut aussi écrire :

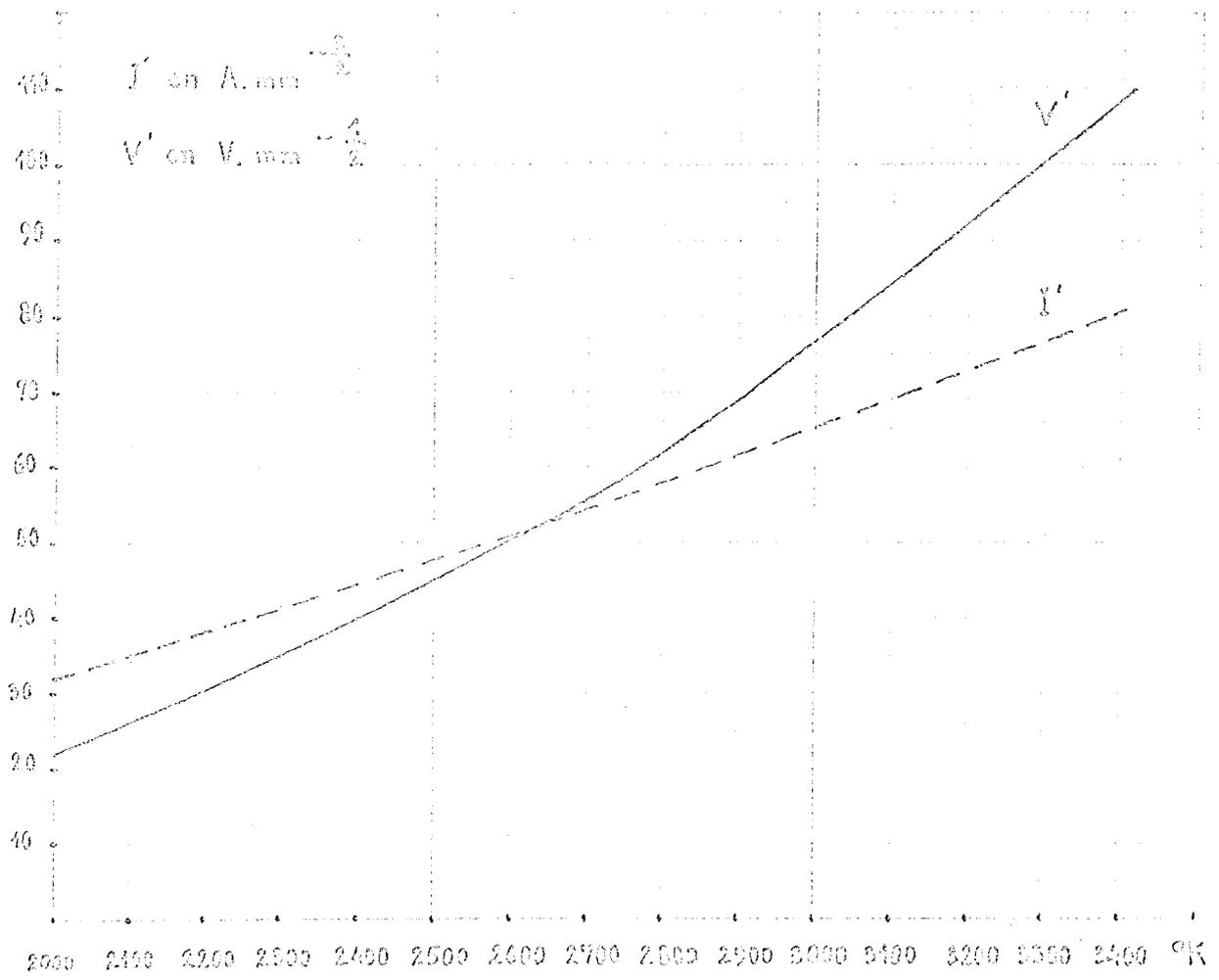
$$W = \pi d \ell m_T$$

m_T étant l'existence énergétique du tungstène à T .

On déduit de ces trois équations donnant W :

$$\begin{cases} V = (4 m_T \rho_T)^{\frac{1}{2}} \ell d^{-\frac{1}{2}} \\ I = \left(\frac{m_T}{\rho_T} \frac{\pi^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \end{cases}$$

(1) En toute rigueur le filament reçoit de l'énergie rayonnée par ce qui l'entoure c'est-à-dire par l'ampoule qui est chaude. On peut voir facilement que cet apport est négligeable.



PARAMETRES I' et V' D'UN FILAMENT LOCAL.

Fig 25

En désignant par \bar{V}' et \bar{I}' les expressions entre parenthèses, on peut écrire plus simplement :

$$\bar{V} = \bar{V}' \ell d^{-\frac{1}{2}}$$

$$I = \bar{I}' d^{\frac{3}{2}}$$

\bar{V}' et \bar{I}' , fonctions de base, sont données par la figure 25, d'après les chiffres de Jones et Langmuir. Elles sont exprimées en $\bar{V} \text{ mm}^{-\frac{1}{2}}$ et en $A \text{ mm}^{-\frac{3}{2}}$

Ces formules, relatives à un filament droit dans le vide, ne sont pas applicables aux lampes actuelles sans de nombreuses corrections. Notons simplement ici que les chiffres de Jones et Langmuir donnent une idée du diamètre et de la longueur des filaments pour une tension et une puissance déterminées.

A 2400 K par exemple, \bar{V}' et \bar{I}' ont les valeurs indiquées ci-après :
 [d'où I , \bar{V} et W pour une longueur de 1 mètre d'un fil de diamètre 0,1 mm et pour une longueur de 1 mètre d'un fil de diamètre 0,01 mm]

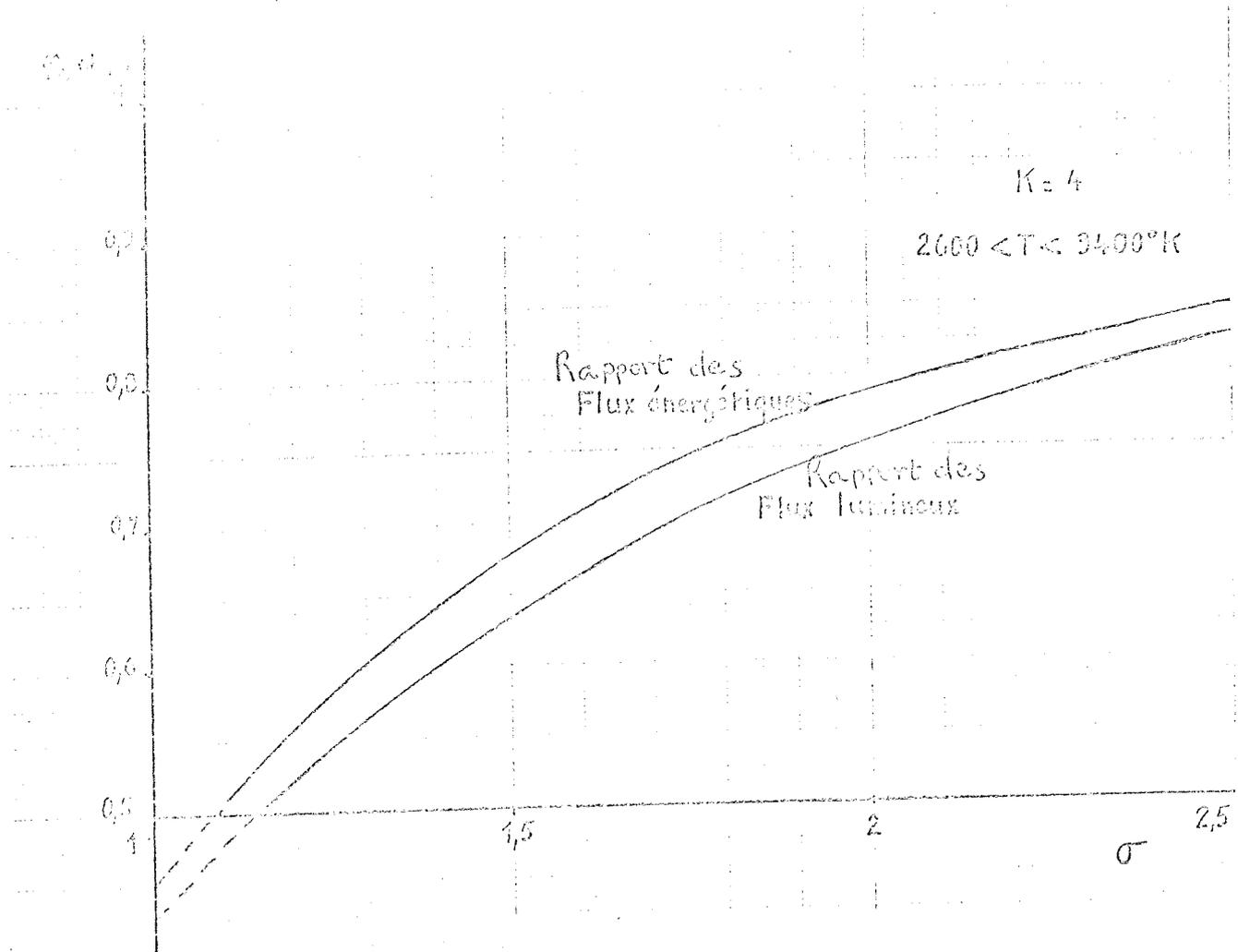
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V}' = 40 \\ \bar{I}' = 45 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{en } \bar{V} \text{ mm}^{-\frac{1}{2}} \\ \text{en } A \text{ mm}^{-\frac{3}{2}} \end{array}$$

	$d = 0,1 \text{ mm}$	$d = 0,01 \text{ mm}$
$I (A)$	1,4	0,045
$\bar{V} (V)$	126	400
$W (w)$	176	18

Rayonnement d'un filament spiralé :

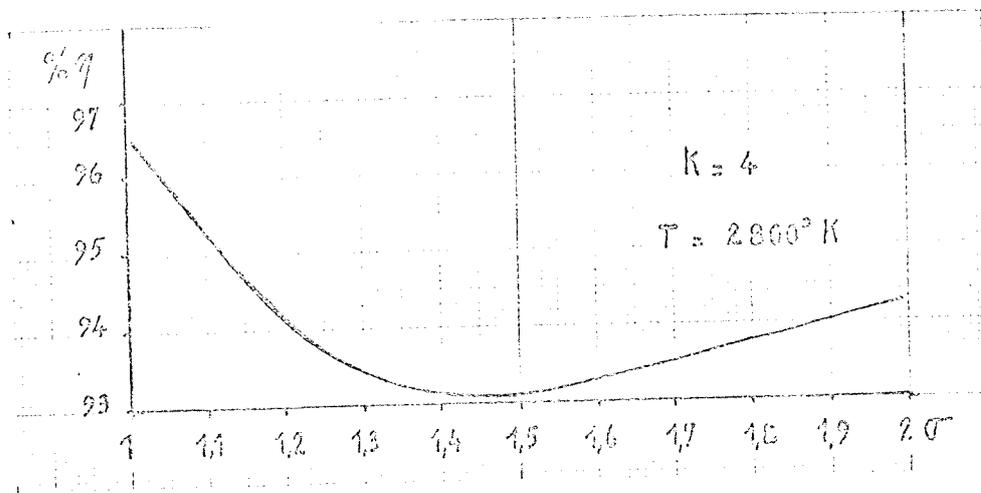
Lorsqu'un filament est spiralé, la situation au point de vue rayonnement est notablement modifiée. Il y a un effet d'occultation de la spirale pour son propre rayonnement.

.../...



Flux énergétique et flux lumineux d'une spirale comparés à ceux d'un filament droit.

Fig 26



Efficacité lumineuse d'une spirale comparée à celle d'un filament droit.

Fig 25 bis

Le problème a été abordé par le calcul et par l'expérience (Lux et Range). On peut déterminer d'abord la fraction du rayonnement primaire qui quitte librement la spirale. Le reste est partiellement absorbé et partiellement réfléchi, Lux et Range admettent que le rayonnement secondaire dû à la réflexion est partagé à nouveau dans la même proportion que le rayonnement primaire. Ainsi de suite, le calcul du rayonnement total, conduit à la sommation d'une progression géométrique.

Pour évaluer le facteur de réflexion, on ne commet pas une grosse erreur en admettant que le facteur d'absorption α du tungstène pour son propre rayonnement est égal à celui qu'il présenterait vis à vis du rayonnement du corps noir à la même température, d'où par application de la loi de Kirchhoff :

$$\alpha = \varepsilon$$

et le facteur d'absorption est donné par l'émissivité ε du tungstène à T . Le facteur de réflexion ρ est alors :

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon$$

Les calculs effectués avec ces approximations trouvent leur justification dans les contrôles expérimentaux des auteurs.

Reprise par Exalto, la méthode permet de chiffrer l'influence des paramètres de spirilage sur le flux énergétique, le flux lumineux, et l'efficacité lumineuse d'un filament spiralé par rapport à un filament droit.

Considérons le flux énergétique. Pour compenser l'effet d'occultation un filament spiralé doit développer une longueur plus grande qu'un filament droit donnant le même flux à la même température. Désignons par φ_e le rapport entre le flux énergétique venant de la spirale et le flux primaire de son filament (rayonnement du fil droit). La figure 25 montre pour $K = 4$, [valeur courante] et σ croissant, le rapport φ_e .

On remarque que pour $\sigma = 1$, cas des spires jointives, ce rapport est inférieur à 0,5. La moitié du flux est prisonnière à l'intérieur de la spirale. Il faut y ajouter la perte légère mais néanmoins notable due aux interréflexions dans les cannelures que forme le filament à l'extérieur.

L'influence de K est beaucoup plus faible. Il est clair que le diamètre joue moins de rôle que l'écartement entre spires. En passant de $K = 2$ à $K = 6$, le flux énergétique n'est diminué que de 5 à 6 %.

Si l'on compare les flux lumineux, on constate un rapport φ_v plus petit que φ_e , donc un effet plus marqué du spirilage (fig. 26). Rappelons que l'absorption, comme l'émissivité spectrale, est plus forte dans le visible que dans l'infrarouge. [Il suffit de comparer dans le tableau III du chapitre III l'émissivité pour $\lambda = 750\text{mm}$ et l'émissivité totale énergétique de la colonne précédente.]

De ce qui précède, il résulte que le rapport des flux lumineux et énergétique est plus faible pour une spirale que pour un filament droit et que le spirilage fait perdre un peu d'efficacité.

Une analyse complète montre l'influence du paramètre σ et la figure 26 bis indique la variation de η en fonction de σ pour $K = 4$ et $T = 2800$ K. On constate un minimum assez plat vers $\sigma = 1,5$. Si les spires s'écartent considérablement l'efficacité η se rapproche de celle d'un filament droit ($\eta = 100\%$).

La perte d'efficacité diminue lorsque la température augmente (1). Avec les données standard de spirallage : $K = 4$ et $\sigma = 1,5$, on a par rapport à un filament droit :

T (K)	η %
2400	0,891
2600	0,924
2800	0,932
3000	0,939
3200	0,945

(1) Parce que l'écart entre les émissivités, dans le visible et dans l'infrarouge diminue.

Existence moyenne d'une spirale.

Si l'efficacité lumineuse est diminuée par l'effet de corps noir, on peut espérer une augmentation de la luminance, ce qui présente de l'intérêt lorsque celle-ci devient la caractéristique fondamentale (lampes de projection).

A défaut de luminance on peut évaluer l'existence moyenne d'une spirale comparée à celle d'un filament droit, donc du tungstène à la même température.

Les propriétés des spirales exposées précédemment et notamment la courbe donnent φ_v sur la figure 26 pour $K = 4$, vont nous servir.

La surface enveloppe ou surface apparente, est pour un fil de diamètre d sur mandrin de diamètre $D = 4d$, pour une longueur de spirale unité :

$$S_s = \pi(D + d) = 5\pi d$$

La longueur de fil utilisée est :

$$l = \frac{\pi(D + d)}{\sigma} \sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\pi(D + d)} \right]^2} = \frac{5\pi}{\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{5\pi} \right)^2}$$

L'existence étant η_v et la surface d'émission $\pi d l$:

$$F_f = \frac{5\pi^2 d}{\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{5\pi} \right)^2} \cdot \eta_v$$

En désignant par F_f le flux du filament "déspiralé"

La spirale n'émet que $\varphi_v \cdot F_f$ mais par une surface égale à $6\pi d$ donc finalement :

$$\bar{\eta}_v = \frac{F_f \cdot \varphi_v}{6\pi d} = \frac{5\pi \varphi_v}{6\sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{5\pi} \right)^2} \cdot \eta_v$$

.../...

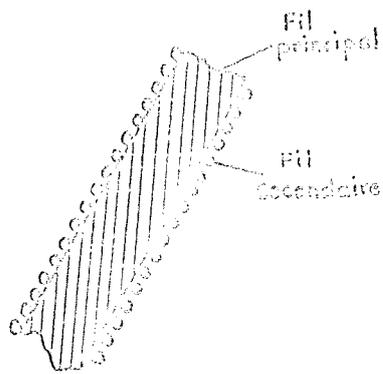


Fig 27 Filament "gulf"

En désignant par \overline{M}_V l'exitance moyenne de la spirale
 Appliquons cette formule au cas où $\sigma = 1,3$ (fig. 26) :

$$Q_V = 0,57$$

$$\text{donc : } \overline{M}_V = 1,30 \overline{M}_V$$

On pourra donc constater un gain de 30 % sur l'exitance et
 vraisemblablement sur la luminance. ⁽¹⁾

Pratiquement le gain doit augmenter avec K . On conçoit en
 effet que les intervalles entre spires sont d'autant mieux remplis que
 K sera plus élevé.

σ

Signalons la possibilité d'augmenter la luminance d'un filament
 relativement gros en enroulant autour de lui un filament fin. C'est la
 formule du filament "guiré". Cet effet de corps noir provoqué par les
 cannelures de la surface ainsi formée (fig. 27) a été mis à profit dans
 certaines lampes de projection.

1) Le gain serait le même si l'on pouvait admettre que le rayonnement avait lieu
 à "luminance constante".

CHAPITRE V

LES FACTEURS DE PERTE

PERTES PAR CONDUCTION

Les équations du chapitre précédent ont été établies sur la base d'un filament idéal dont la température était supposée constante d'une extrémité à l'autre.

En fait, les filaments sont reliés à deux entrées de courant et, sauf pour les très basses tensions soutenus par des crochets-supports, d'où des points à température plus faible et un certain écoulement de chaleur par conduction.

Rappelons qu'entre une section α d'un filament et la section $\alpha + d\alpha$ avec une différence de température dT on a, par conduction, un flux de chaleur :

$$\Phi_c = -\lambda S \frac{dT}{d\alpha}$$

λ conductivité thermique, S aire des sections, le signe - indique que l'écoulement a lieu dans le sens des températures décroissantes.

La conductivité varie avec la température. Pour le tungstène à 2500 K :

$$\lambda = 98 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Entre 1000 K et 3000 K, λ varie comme $T^{-0,23}$

Les équations d'équilibre dans la zone décollément, doivent tenir compte de l'énergie électrique acquise de l'énergie rayonnée et de l'énergie perdue par conduction.

L'analyse montre que la fonction $T = f(x)$ en désignant par x la distance au point de contact est telle que pour des filaments de diamètres différents ayant même température maximale T_m et même température T_0 au point de contact, ont la même température T à des distances du point de contact proportionnelles à \sqrt{d} .

C'est ce que l'on peut constater sur le tableau V, ci-dessous, donnant des distances calculées par Exalto en prenant :

$$T_c = 0,25 T_m \text{ et } T_1 = 0,999 T_m$$

TABIEAU V

T_m (K)	$d = 0,02 \text{ mm}$	0,04	0,05	0,10	0,20	0,30
2400	6 mm	8 mm	10 mm	13 mm	19 mm	23 mm
2800	5	7	8	11	15	18
3200	4	6	7	9	12	15

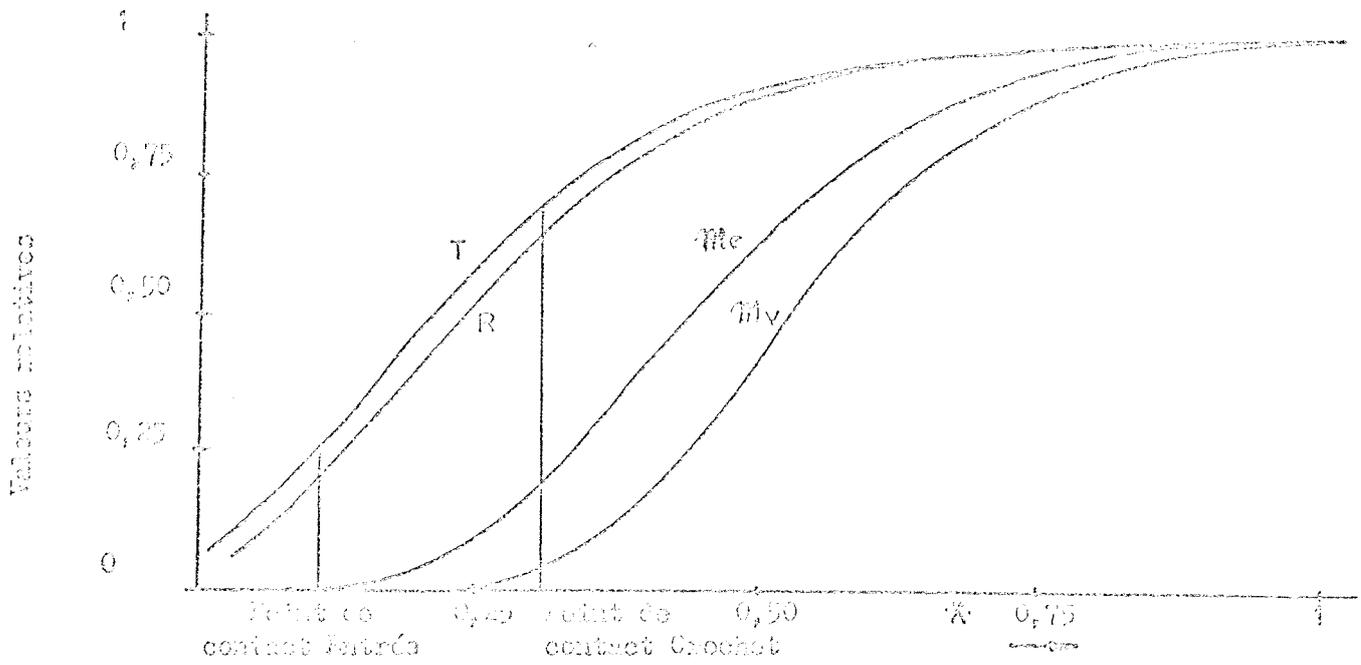
La perte par conduction est donnée par le flux qui s'écoule à travers la section $x=0$

$$P = -\lambda \pi d^2 \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x=0} \text{ ou } P = -\frac{\pi \lambda d^{\frac{3}{2}}}{4} \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x=0}$$

En remplaçant x par $x\sqrt{d}$ pour avoir une expression générale D'où la conclusion : la perte par conduction pour des filaments de différents diamètres, varie comme $d^{\frac{3}{2}}$ c'est-à-dire, comme l'intensité du courant. Lorsqu'il s'agit de lampes comparables et de même voltage, cette perte représente par suite une fraction sensiblement constante de la puissance.

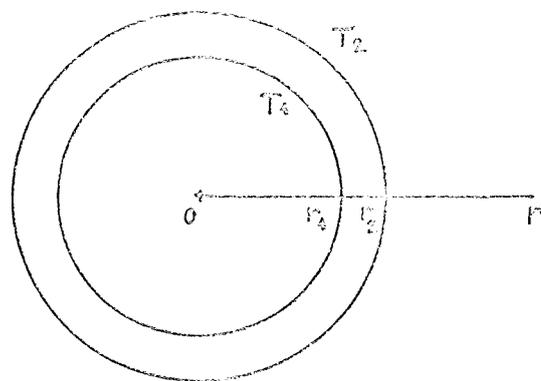
Compte tenu de la finesse des filaments, les pertes par conduction sont relativement très petites. C'est ainsi que pour un filament de 0,05 mm (à peu près celui d'une lampe de 100 W - 220 V) on ne perd que 0,2 W environ dans chaque entrée ou dans un crochet-support. La point au contact d'un support est à une température supérieure à celle que l'on constate au contact d'une entrée ~~max~~. L'action refroidissante s'exerce dans deux directions, mais les crochets sont très fins.

L'influence des points de contact sur l'efficacité lumineuse des lampes est évidemment fonction de l'importance relative des zones de refroidissement par rapport à la longueur totale du filament.



Influence des points de refroidissement

Fig. 28



Conduction entre surfaces
cylindriques

Fig. 29

La figure 28 montre, d'après Exalto, comment varient en % la température T , la résistance électrique R (donc la puissance électrique) l'excitation énergétique M_e et l'excitation lumineuse M_v en fonction de X .

On a fait les calculs, en prenant :

$$T_o = 0,25 T_m \text{ pour une entrée}$$

$$T_o = 0,70 T_m \text{ pour un crochet-support}$$

Dans le cas d'un filament relativement long comme celui d'une lampe courante 220^v- 100^w par exemple, avec deux crochets-supports (filament DB) la perte d'efficacité est très faible: 2 % seulement.

Elle ne devient importante que pour des filaments à très basse tension. Un exemple extrême étudié par Exalto suggère une limite pratique à la longueur des filaments. Un filament de longueur 3,5 mm fixé par deux entrées et admettant un courant de 0,22 A ne donne en effet qu'un flux de 0,48 lm alors qu'un élément de 3,5 mm d'un filament très long donnerait pour la même intensité de courant un flux de 6,8 lm.

Perte par conduction dans le gaz.

La présence d'une atmosphère gazeuse dans les ampoules, qui sera justifiée dans le chapitre suivant, entraîne une perte de chaleur, dite "perte dans le gaz".

Langmuir a établi une méthode de calcul exposée en 1912 dans la Physical Review. Cet article, souvent cité, marque le départ de la lampe à atmosphère gazeuse à filament spiralé.

Langmuir simplifia le problème en raisonnant sur un modèle : celui d'un cylindre gazeux immobile entourant le filament, au travers duquel la chaleur s'écoule par conduction. Cette représentation statique s'est révélée valable en première approximation.

Nous avons donné plus haut la formule du flux de conduction :

$$\Phi_c = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

La conductivité du gaz, compte tenu de sa variation importante avec la température sera désignée ici par $\lambda(T)$.

En désignant par r le rayon du cylindre gazeux (fig. 29) et en considérant un cylindre de hauteur unité, on écrit :

$$\Phi_c = -2\pi r \lambda(T) \frac{dT}{dr}$$

ce qui conduit, par intégration à variables séparées, à exprimer le flux qui s'écoule à travers une couche cylindrique de rayon interne r_1 et de température T_1 , de rayon externe r_2 et de température T_2 par :

$$\Phi_c = \frac{2\pi r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \int_{T_2}^{T_1} \lambda(T) dT$$

Langmuir part de cette formule classique de conduction pour faire apparaître deux fonctions S et φ , relatives respectivement à l'influence de la "géométrie" du problème et à celle de la température.

$$\Phi = S (\varphi_1 - \varphi_2)$$

La fonction S est telle que :
$$S = \frac{2 \pi}{\text{Log} \frac{r_1}{r_2}} = \frac{2 \pi}{\text{Log} \frac{D}{d}}$$

d étant le diamètre du filament, donc le diamètre interne, et D le diamètre de la couche gazeuse dite "couche de Langmuir", idonc le diamètre externe.

La fonction $\varphi = \int_0^T \lambda(T) dT$ a été calculée :

Covington a publié le tableau VII ci-après relatif aux gaz rares et mélanges gazeux des lampes à incandescence.

TABLEAU VII - φ en watts.cm⁻¹ -

$T, ^\circ K$	N_2	Ar	Kr	Xe	95 per cent Ar 5 per cent N_2	88 per cent 12 per cent
0	0	0	0	0	0	0
400	0,054	0,048	0,025	0,015	0,048	0,051
800	0,228	0,166	0,039	0,052	0,168	0,178
1 200	0,485	0,336	0,184	0,103	0,342	0,358
1 600	0,839	0,551	0,309	0,182	0,561	0,591
2 000	1,29	0,811	0,459	0,271	0,827	0,870
2 400	1,82	1,12	0,634	0,375	1,15	1,20
2 800	2,45	1,47	0,828	0,491	1,52	1,58
3 200	3,15	1,86	1,04	0,617	1,94	2,00

On calcule $\varphi_1 - \varphi_2$ à partir de φ en admettant que la température T_2 est celle de l'ampoule (on peut prendre $T_2 = 400$ K pour évaluer cette température dans le cas des lampes courantes), la température T_1 étant celle du filament.

La fonction S pose le problème du diamètre D .

Langmuir raisonnait de la façon suivante : pour un cylindre, au contact de la couche extérieure (température T_2 , rayon r_2), le gradient de température doit être le même que dans le cas d'un plan. Il désignait dans ce cas l'épaisseur de la couche par B alors qu'elle est $r_2 - r_1$ dans le premier cas.

La conservation du flux dans son parcours fait que, pour un cylindre :

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{r_2}{r} \lambda_2 \left| \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_2}$$

alors que pour un plan, on a simplement :

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda_2 \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x=B}$$

Il en déduit :

$$\frac{dr}{r} = \frac{dx}{r_2}$$

Et par intégration entre r_1 et r_2 c'est-à-dire entre d et D pour le cylindre, et 0 et B pour le plan, il écrit :

$$D \log \frac{D}{d} = 2B$$

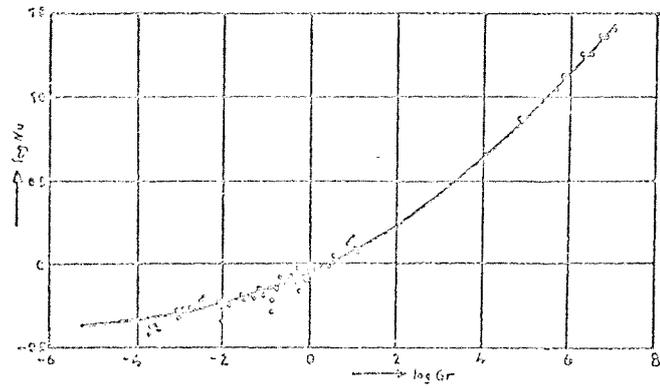
expression, qui, combinée avec celle de S donne :

$$\frac{d}{B} = \frac{S}{\pi} e^{\frac{-2\pi}{S}}$$

équation dans laquelle D a disparu et qui permet de relier S à $\frac{d}{B}$. Langmuir en déduit les chiffres du tableau VIII ci-après :

TABEAU DONNANT S EN FONCTION DE d/B

S	d/B	S	d/B	S	d/B	S	d/B
0,0	0,0	5,0	0,453	10	1,696	30	7,7
0,5	$0,735 \times 10^{-6}$	5,5	0,558	12	2,263	32	8,3
1,0	$0,594 \times 10^{-3}$	6,0	0,671	14	2,844	34	8,9
1,5	$0,725 \times 10^{-2}$	6,5	0,788	16	3,438	36	9,6
2,0	$2,752 \times 10^{-2}$	7,0	0,908	18	4,040	38	10,2
2,5	0,0044	7,5	1,032	20	4,645	40	10,8
3,0	0,1176	8,0	1,160	22	5,265	42	11,5
3,5	0,185	8,5	1,291	24	5,877	44	12,1
4,0	0,265	9,0	1,424	26	6,505	46	12,7
4,5	0,354	9,5	1,561	28	7,122	48	13,4
5,0	0,453	10,0	1,696	30	7,738	50	14,0



Log Nu en fonction de log Gr
 (cylindres horizontaux)

Fig 30

Il a donc S et $\varphi_1 - \varphi_2$ d'où \mathcal{E}_c .

La justification de cette méthode est fournie par Langmuir qui a expérimenté des filaments de différents diamètres, (de 0,04 à 0,5 mm) fonctionnant à l'air libre à une température variable (de 500 à 1900 K). Il a mesuré la perte de chaleur par différence entre l'énergie fournie et l'énergie rayonnée (évaluée à partir de la température et de l'émittance) pour mettre en évidence une valeur $\beta = 0,43$ en conduisant à un calcul satisfaisant de S et de \mathcal{E}_c par les formules ci-dessus.

Le tableau de S ainsi confirmé nous montre que pour $\frac{d}{B}$ petit :
 $\left(\frac{d}{B} < 0,2\right)$ on peut écrire sensiblement : $\frac{S}{B} \propto \left(\frac{d}{B}\right)^{0,3}$

Cet exposant 0,3 ~~xxx~~ indique la faible influence du diamètre des filaments sur la perte dans le gaz. Il est à la base de la technologie du spirilage. En effet :

En transformant un filament long et fin en un boudin de plus gros diamètre mais beaucoup plus court on réduit considérablement la perte dans le gaz.

Formule d'Elenbaas.

Elenbaas a prolongé la théorie de Langmuir en donnant à B que Langmuir avait trouvé pratiquement indépendant de T , un contenu permettant de tirer des conclusions intéressantes quant à la nature du gaz de remplissage et au rôle de la pression.

Elenbaas utilise les enseignements de la théorie moderne des échanges de chaleur par convection, tenant compte de la mécanique des fluides et des coefficients sans dimension qu'elle a introduits. Il a été conduit pour traduire les résultats de Langmuir et de Nusselt à proposer la formule générale (fig. 30) :

$$Nu \text{ e } Nu = K Gr^{\frac{1}{3}}$$

Nu est le "nombre de Nusselt". Relation générale pour les cylindres.

Gr est le "nombre de Grashof". K est une constante égale à $1/8$ pour les gaz diatomiques et $1/8,25$ pour les gaz monoatomiques.

Pour expliciter Nu on doit écrire :

$$Nu = \frac{hd}{\lambda}$$

h coefficient de transfert de chaleur - d diamètre du filament ou du cylindre, λ conductivité du gaz. Pour expliciter Gr :

$$Gr = \frac{d^3 g \rho^2 \beta (T_1 - T_2)}{\eta^2}$$

g accélération de la pesanteur, β coefficient de dilatation cubique (égal à $\frac{1}{T_0}$ c'est-à-dire $\frac{1}{T_2}$ dans notre problème), ρ densité du gaz, η viscosité du gaz.

(1) Dans une étude récente...

Dans cette relation fondamentale, λ, ρ et η sont considérés comme des constantes, or ils varient avec la température. Elenbaas a tourné la difficulté en adoptant des valeurs moyennes [pour $\frac{T_1 + T_2}{2}$], valeurs désignées par $\bar{\lambda}, \bar{\rho}$ et $\bar{\eta}$

Le coefficient h de transfert de chaleur est par définition rapporté à l'unité d'aire, donc, pour un fil de longueur unité :

$$\Phi_c = \pi d h (T_1 - T_2)$$

On a aussi, d'après Langmuir, comme indiqué plus haut :

$$\Phi_c = S (\varphi_1 - \varphi_2) = S \bar{\lambda} (T_1 - T_2)$$

Il est alors facile de voir que :

$$Nu = \frac{h d}{\bar{\lambda}} = \frac{S}{\pi}$$

et que la relation d'Elenbaas peut s'écrire, en explicitant Nu et Gr :

$$\frac{S}{\pi} e^{-\frac{2\pi}{S}} = K \cdot d \cdot g \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\bar{\rho}}{\eta} \right)^{\frac{2}{3}}$$

mais, comme : $\frac{S}{\pi} e^{-\frac{2\pi}{S}} = B$

On peut écrire, en groupant les constantes :

$$B = K' \left(\frac{T_2}{T_1 - T_2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\bar{\eta}}{\bar{\rho}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

avec $K' = 0,80$ (gaz diatomiques)

$K' = 0,83$ (gaz rares)

Influence de la nature du gaz :

Le tableau IX donne la valeur des différents paramètres λ, ρ, η tels qu'on les trouve dans les recueils de constantes physiques, c'est-à-dire dans des conditions normales de température et de pression, soit : $\lambda_0, \rho_0, \eta_0$ pour les quatre gaz utilisés dans les lampes à incandescence.

On peut admettre que les valeurs du tableau déterminent entre elles des rapports valables pour les lampes à incandescence, si ces valeurs varient proportionnellement en fonction de la température. La comparaison entre gaz rares monoatomiques offre à ce point de vue plus de sécurité que celle effectuée par rapport à l'azote. Dans le tableau IX ci-après, on a posé $B = 100$ pour l'argon et calculé les autres valeurs de B sur la base de

$$B \propto \left(\frac{\eta_0}{\rho_0} \right)^{\frac{2}{3}}$$

D'où la colonne des B_0 .

.../...

TABIEAU IX

Gaz	Poids moléculaire	Densité ρ_0 g cm ⁻³	Viscosité η_0 g Δ cm ⁻¹	Conductivité cal. cm ⁻¹ Δ ⁻¹ λ_0	B ₀
Azote (N ₂)	28	1,25 10 ⁻³	177 10 ⁻⁶	58,0 10 ⁻⁶	103
Argon	40	1,78 "	221 "	38,2 "	100
Krypton	84	3,74 "	248 "	21,2 "	65
Xenon	131	5,9 "	226 "	12,4 "	45

Comment, compte tenu de l'hypothèse ci-dessus, varie, en fonction de la nature du gaz, la perte dans le gaz ? On suppose d , T_1 et T_2 identiques.

Nous savons que pour $\frac{d}{B}$ petit :

$$S \propto B^{-0,3}$$

Nous admettons que : $\varphi_1 - \varphi_2 \propto \lambda_0$

ce qui conduit à : $\Phi_c \propto B^{-0,3} \lambda_0$

Sur cette base ont été calculées les valeurs théoriques du tableau X en prenant 100 pour la perte dans l'argon.

Ces chiffres sont pour le krypton et le xenon en excellent accord avec les chiffres expérimentaux d'Exalto figurant dans la colonne suivante. Le désaccord en ce qui concerne l'azote peut trouver son explication dans la dissociation moléculaire de ce gaz à la température élevée des filaments.

TABIEAU X

gaz	Φ_c théorique	Φ_c expérimental
azote	147	170
argon	100	100
krypton	63	62
xenon	42	42

La supériorité des gaz lourds est très marquée :

Influence de la température et de la pression.

La formule d'Elenbaas suggère que B doit augmenter lentement avec la température. On le constate en prenant des valeurs croissantes de T_2 et en calculant $\bar{\lambda}$ et $\bar{\nu}$, mais cette variation n'est pas très significative. Langmuir, nous l'avons vu, avait admis B constant. Par contre, $\Phi_2 - \Phi_1$ augmente assez rapidement avec T comme le montre le tableau VII. L'expérience conduit à écrire en effet :

$$\Phi_c \propto T^{1,7}$$

L'influence de la pression est facile à mettre en évidence et à chiffrer. La viscosité et la conductivité ne varient pas avec ρ c'est donc la variation de la densité qui est déterminante :

$$B \propto \rho^{-\frac{2}{3}} \propto \mu^{-\frac{2}{3}}$$

Avec $S \propto B^{-0,3}$ et φ constant, on peut écrire :

$$\Phi_c \propto \mu^{0,2}$$

Cet exposant 0,2 est confirmé par l'expérience en ce qui concerne les lampes courantes.

Remarque :

Pour certaines lampes et notamment les lampes aux halogènes, le rapport $\frac{d}{B}$ relativement élevé, ne permet plus d'admettre $S \propto B^{-0,3}$ et l'influence de la pression sur la perte dans le gaz est plus marquée, que ne l'indique un exposant 0,2.

Couche de gaz "laminaire":

Langmuir supposait qu'il y avait autour du filament une couche de gaz immobile. Dans la réalité, et par suite du régime de convection naturelle le gaz est en mouvement. Seule une couche extrêmement mince de gaz au contact peut être immobilisée par viscosité.

On doit en fait distinguer une zone de mouvement laminaire et une zone de mouvement turbulent, le mouvement laminaire correspond au déplacement lent et parallèle des filets gazeux, au voisinage du filament. A une certaine distance le mouvement devient turbulent parce qu'il y a brassage actif du gaz, sans direction privilégiée. Dans la zone laminaire, l'échange de chaleur a lieu surtout par conduction dans le sens transversal ce qui rejoint la conception de Langmuir, mais il y a également une certaine quantité de chaleur enlevée par le mouvement de convection. C'est ainsi que la position du filament n'est pas sans influence sur la perte dans le gaz. Un filament vertical perd moins de chaleur qu'un filament horizontal. Covington estime que pour un filament vertical le calcul doit être fait en donnant à la constante K' de B la valeur 0,85 pour les gaz diatomiques et 0,88 pour les gaz rares.

La zone laminaire ne détermine qu'imparfaitement un cylindre dont le filament n'occupe pas nécessairement l'axe. Elle a pu être visualisée par procédé optique. (1) Son diamètre est nettement supérieur au D de Langmuir.

La connaissance du diamètre de la couche laminaire n'est pas sans intérêt dans le cas de lampes cylindriques de petit diamètre, comme certaines lampes aux halogènes. Si la zone laminaire occupe tout le volume de l'ampoule il n'y a plus de place pour une zone turbulente dont la présence est néanmoins avantageuse pour assurer un bon brassage des constituants gazeux. L'emploi de gaz lourds et d'une pression élevée réduisant le diamètre de la zone laminaire, va dans le sens favorable à ce point de vue.

Quelques chiffres :

Le calcul de la perte dans le gaz, peut être fait avec une formule du type :

$$\Phi_c = C_p \cdot d^{0,3} \cdot T^{1,4} \cdot p^{0,2}$$

C étant une constante.

Les chiffres du tableau XI proviennent des données d'Exalto, appliquées à des filaments de différents diamètres ou à des spirales (qui se comportent au point de vue perte dans le gaz de la même façon qu'un cylindre plein) pour la température $T = 2700$ K. La pression de remplissage est de 67 cm de mercure et le mélange gazeux constitué de 87 % d'argon et 13 % d'azote.

La perte dans le gaz est chiffrée en watts par mm de longueur de filament. A titre de comparaison figure dans la colonne suivante l'énergie $\bar{\Phi}_n$ rayonnée par un filament du même diamètre à la même température. S'il s'agit d'une spirale, nous savons que ce rayonnement est plus faible. Environ 65 % pour $K = 4$ et $\kappa = 1,5$.

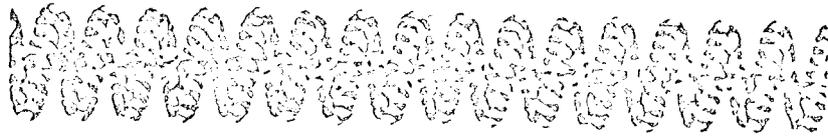
Le rapport $\frac{\bar{\Phi}_n}{\Phi_c}$ augmente avec d , de façon très significative.

TABEAU XI

Perte dans le gaz

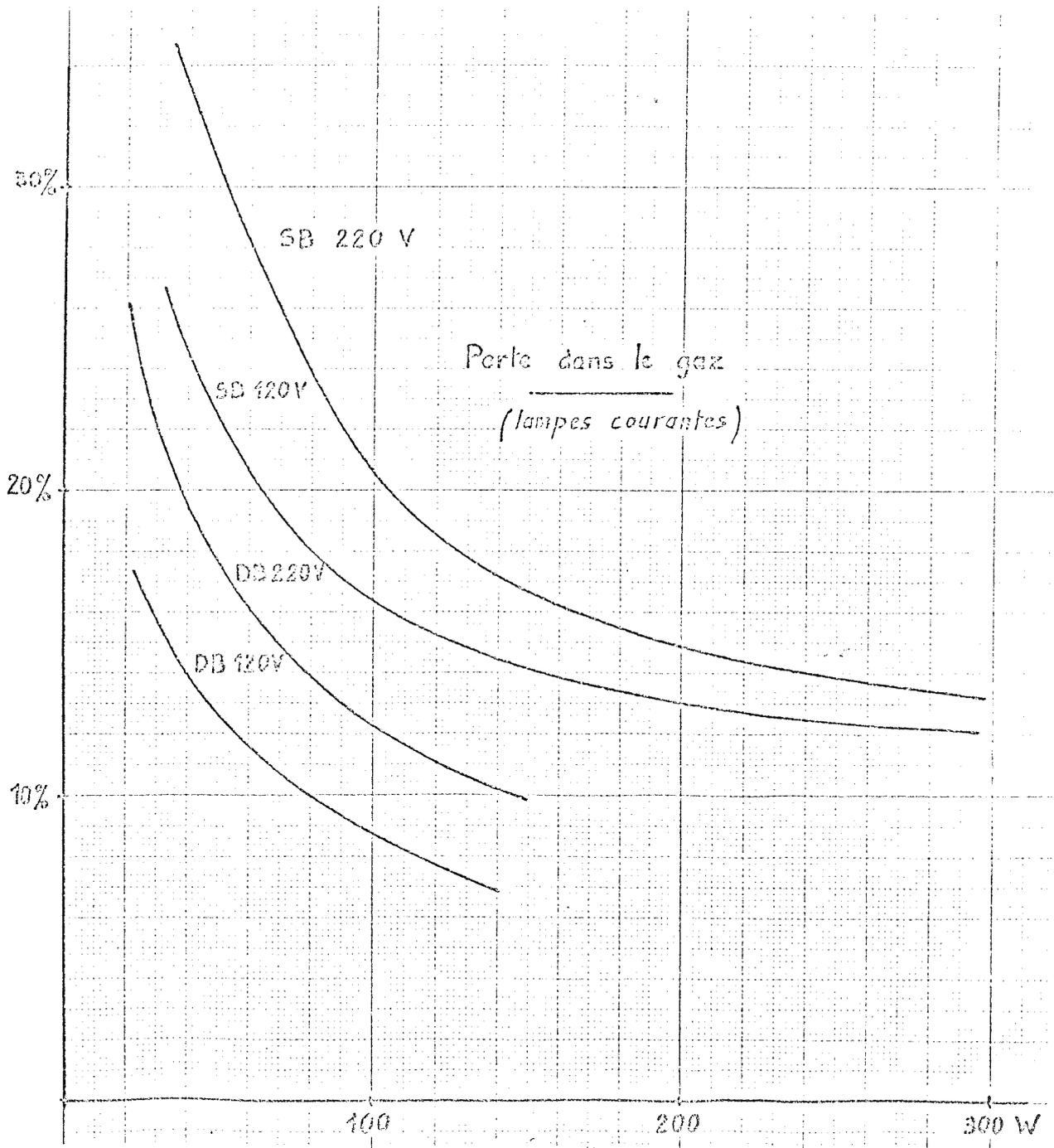
d (mm)	Φ_c (W mm ⁻¹)	$\bar{\Phi}_n$ (W. mm ⁻¹)
0,1	0,17	0,31
0,2	0,21	0,63
0,3	0,24	0,94
0,4	0,26	0,26
0,5	0,28	1,57
0,6	0,30	1,88
0,7	0,31	2,20
0,8	0,32	2,51
0,9	0,33	2,33
1	0,34	3,14

- (1) Fitzgerald et Hoyster ont visualisé la répartition des températures par une méthode d'holographie interférentielle. Cette méthode élégante montre que le modèle de Langmuir n'a de réalité qu'à des pressions très basses. A pression croissante, la déformation s'accroît et il ne peut être question d'une répartition cylindrique.



Filament doublement spiralo

Fig 31



Une réduction importante de la perte dans le gaz apparait indispensable pour améliorer l'efficacité par rapport à celle d'un filament droit fonctionnant dans le vide.

Malgré le spirilage, l'efficacité d'un filament très fin, dans le gaz, peut être inférieure à celle du même filament dans le vide, ce qui justifie le maintien des lampes "à vide".

Un procédé pour réduire la perte dans le gaz est de pratiquer, lorsqu'on le peut, "le double spirilage" (fig 31). Un premier boudin obtenu par spirilage sur un mandrin de diamètre relativement faible, est repris pour un second spirilage, ce qui permet d'obtenir un foyer lumineux dont la longueur est environ deux fois plus faible que celle donnée par un filament à spirilage unique.

Le double spirilage est utilisé pour les lampes courantes de tension 220 V et pour les lampes de très basse tension afin de concentrer le foyer lumineux (lampes de projection).

La substitution du krypton à l'argon permet de réduire la perte dans le gaz et encore mieux, le xénon, conformément aux données théoriques développées plus haut. Nous verrons plus loin que ces gaz présentent d'autres avantages mais leur prix élevé les fait réserver à des séries de lampes particulières.

La figure 32 montre la perte dans le gaz, (argon + azote) en valeur relative de la puissance, pour deux tensions (120 V et 220 V) avec simple spirilage et double-spirilage.

Autres facteurs de perte.

Le flux lumineux émis par le filament n'est pas le flux nominal de la lampe. Il subit en effet une certaine perte par défaut de transmission des ampoules.

Dans le cas d'une ampoule en verre clair, la perte est très faible. Le verre mince ne provoque que des réflexions : environ 4 % sur chaque face. La lumière réfléchie n'est pas perdue puisqu'elle peut traverser l'ampoule par la paroi opposée.

Plus sensible est l'occultation résultant de la présence du culot. Elle est évidemment fonction du diamètre de celui-ci et de la position relative du filament. Pour les lampes courantes - de forme "poire" - elle ne dépasse pas 2 % mais pour des lampes sphériques de très petit diamètre, la perte peut aller jusqu'à 15 %.

L'opalisation des ampoules qui provoque de multiples réflexions internes tend à augmenter la proportion de lumière dirigée vers le culot.

CHAPITRE VI

EVAPORATION DES FILAMENTS & DUREE DE VIE

L'EFFICACITE LUMINEUSE REELLE

LE POIDS MORTEL :

La mort normale d'une lampe à incandescence résulte de la rupture du filament. Pour une lampe de bonne qualité, soustraite à toute influence mécanique (chocs ou vibrations), c'est l'évaporation progressive du filament incandescent qui provoque cette rupture.

L'évaporation n'est pas uniforme. Un filament aussi régulier soit-il, présente des points où, le diamètre, plus faible, entraîne une température plus élevée et une évaporation plus rapide (1). Les différences initiales s'accroissent progressivement et l'on constate que le filament se rompt lorsqu'il a perdu une fraction très réduite de son poids.

.../...

(1) HORSFORD, KAUER et LECHNER ont montré qu'une différence de température initiale de 5° sur une petite longueur du filament suffisait à expliquer la rupture, dans le cas d'un fil droit dans le vide.

Le temps au bout duquel cette rupture intervient est évidemment, même pour des lampes identiques, quelque peu variable. La durée de vie d'un type de lampe à incandescence est donc caractérisée par une certaine dispersion, et des considérations statistiques sont nécessaires. Elles sont exposées à la fin de ce chapitre. Notons simplement ici que "la durée de vie" doit être comprise comme "la durée de vie moyenne" d'un lot de lampes d'un type déterminé.

Une constatation expérimentale importante est celle du poids mortel qui, exprimé en valeur relative (% du poids du filament), est sensiblement constant pour tous les lots de lampes d'une même technologie : lampes à filament droit, lampes à filament spiralé, lampes à filament doublement spiralé.

1) Lampes à filament droit dans le vide :

Les mesures effectuées sur ce type de lampe ont montré que le poids mortel était compris entre 10 et 15 %.

Le tableau ci-après (XII) indique en mg par mm² de surface, la masse m_w de tungstène évaporé pendant 1 000 heures, en fonction de la température :

TABLEAU XII

m_w en fonction de la température

T (K)	JONES et LANGMUIR mg - mm ⁻² - kh ⁻²	ZWIKKER mg - mm ⁻² - kh ⁻²	$\frac{dm}{m} / \frac{dT}{T}$
2 000	6,30 . 10 ⁻⁶	5,58 . 10 ⁻⁷	- 45
2 200	4,50 . 10 ⁻⁴	8,21 . 10 ⁻⁵	- 44
2 400	1,54 . 10 ⁻²	4,97 . 10 ⁻³	- 40
2 600	3,05 . 10 ⁻¹	1,50 . 10 ⁻¹	- 37
2 800	3,93	3,00	- 34
3 000	3,55 . 10	3,69 . 10	- 31
3 200	2,40 . 10 ²	3,60 . 10 ²	- 28
3 400	1,28 . 10 ³	2,54 . 10 ³	

Le coefficient donné dans la dernière colonne montre la rapidité avec laquelle augmente le taux d'évaporation.

On peut voir, par exemple, que vers 3 000°K le taux est multiplié par 10, pour une augmentation de température de 7 % seulement.

La surface d'évaporation étant proportionnelle au diamètre du filament, et le poids mortel au carré du diamètre, la durée de vie d'un gros filament sera, à température égale, beaucoup plus longue que celle d'un filament fin.

Pratiquement, la température des filaments est donc fonction de leur diamètre. Pour une même durée de vie, On constate une température et une efficacité lumineuse croissant avec la puissance des lampes d'une tension déterminée, et, à puissance constante, température et efficacité augmentent en raison inverse de la tension. Nous y reviendrons.

2) Lampes à filament spiralé dans le vide :

Une partie du tungstène évaporé étant recueillie par la spirale elle-même, on pourrait s'attendre, pour cette catégorie de lampes, à un poids mortel plus faible. L'expérience montre pourtant un poids mortel identique à celui des lampes à filament droit.

Il faut donc admettre que le spiralage a un effet favorable sur la durée et que le filament est en quelque sorte "nourri" par sa propre évaporation.

Cette circonstance permet d'augmenter très légèrement la température de fonctionnement par rapport à une lampe à filament droit. On compense ainsi la perte d'efficacité due au spiralage du filament et à l'effet de corps noir.

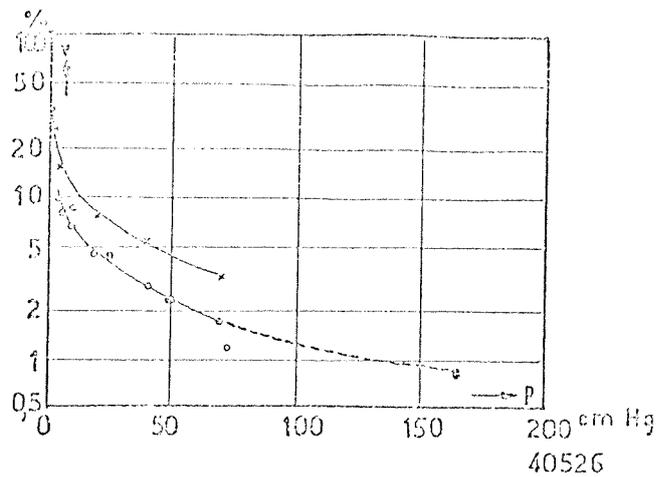
3) Lampes à filament spiralé en atmosphère gazeuse :

Le poids mortel n'est que de 3 à 5 % pour les spirales simples, et de 2 à 3 % pour les spirales doubles. On peut remarquer que la température moyenne de ces lampes est nettement plus élevée que celle des lampes à vide, et que le transfert du tungstène d'un endroit de la spirale à un autre ne se fait pas dans le gaz, comme dans le vide. La situation n'est donc pas comparable. Elle est influencée par le gradient longitudinal de température et le déplacement correspondant du T_u .⁽¹⁾

Il est par contre à noter que la nature du gaz (krypton au lieu d'argon, par exemple) n'a pas d'influence significative sur le poids mortel.

.../...

(1) HORSTER, KAUER et LECHNER expliquent ainsi le fait qu'une spirale courte (très bas voltage) se rompt près d'une extrémité et non dans la partie centrale.



vitesse de volatilisation v en fonction de la pression p (en cm mercure)
 égal à $\frac{1}{n}$ de la vitesse de volatilisation dans le vide

- x anode, solvant (acétaldéhyde)
- o anode avec 10% d'acétate, solvant (acétaldéhyde)
- e anode avec 14% d'acétate, solvant (acétaldéhyde)

Fig. 39 (Rev. Techn. Philips)

ROLE DU GAZ ET CONSIDERATIONS THEORIQUES :

Le remplissage gazeux a pour but de freiner la vitesse d'évaporation des filaments. Il permet d'augmenter la température de fonctionnement et est, à l'origine, malgré la perte de chaleur dans le gaz, d'une amélioration notable de l'efficacité lumineuse.

La figure 33, publiée par GEISS, montre par des résultats expérimentaux, comment varie le taux d'évaporation dans le gaz, le taux dans le vide étant désigné par 100 (mesures effectuées par OOSTERHUIS et par FONDA).

Pour un filament droit fonctionnant à 2870°K dans un mélange 86 % Ar - 14 % N₂, FONDA a donné les chiffres ci-après (fil de diamètre : $d = 0,096$ mm).

Les taux d'évaporation sont exprimés en $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$: TABLEAU XIII.

TABLEAU XIII

m_w en fonction de la pression

Pression cm de Hg	Taux m_w $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$
vide	230 $\cdot 10^{-9}$
5	23,5 "
10	20,5 "
25	10,3 "
50	5,4 "
70	4,2 "
165	2,0 "

Nous verrons plus loin comment on peut, par le calcul, relier taux d'évaporation et pression.

.../...

Pour étudier l'influence du gaz sur le taux d'évaporation du tungstène, FONDA met en évidence l'analogie entre la diffusion de la chaleur et la diffusion de la matière (ici, les atomes de tungstène) dans la couche de LANGMUIR. Il considère seulement la diffusion dite de concentration qui tend à rendre homogène la teneur d'un volume gazeux, primitivement en constituants inégalement répartis.

Si N_1 (nombre d'atomes par unité de volume) est la concentration de tungstène au contact du filament, cette concentration devient : $N_2 = 0$ à la surface extérieure de la couche de Langmuir. Il faut comprendre qu'elle devient nulle à la limite de la couche laminaire parce que la zone turbulente assure la dispersion immédiate des atomes.

En raisonnant par rapport à la concentration, comme par rapport à la température, il est facile de voir que l'on est conduit à une expression du type :

$$M_w = -2\pi r \delta \frac{dN}{dr}$$

M_w étant la masse de tungstène évaporée par seconde et par unité de longueur de filament, traversant la surface cylindrique concentrique de rayon r , δ est le "coefficient de diffusion" pour la vapeur de tungstène dans le gaz de remplissage.

Par intégration (par variables séparées) :

$$M_w = \frac{2\pi \delta}{\text{Log } \frac{d}{D}} N_1$$

Où, en reprenant les notations de Langmuir :

$$M_w = S \delta N_1$$

La concentration N_1 au contact du filament peut être reliée à la tension de vapeur saturante du tungstène à la température du filament. Comme celle-ci, elle varie sensiblement, dans la zone des températures 2 800 K - 3 000 K, avec $T^{3.5}$.

La présence de la fonction S conduit à la conclusion qu'un filament fin s'évapore à une vitesse plus grande qu'un gros filament, ce qui a été confirmé expérimentalement par FONDA.

Il y a une possibilité de transfert de tungstène d'un point à un autre d'une spirale de tungstène dont il sera question plus loin. Elle n'entraîne pas une augmentation notable du poids mortel mais peut jouer un rôle dans la rupture finale du filament. Cette influence est sensible lorsque les filaments sont courts (lampes de très bas voltage).

.../...

INTERET RELATIF DES DIFFERENTS GAZ DE REMPLISSAGE :

Le poids motal, nous l'avons signalé, est peu ou pas influencé par la nature du gaz.

Par contre, le gaz joue un rôle sur le taux d'évaporation par l'intermédiaire du coefficient de diffusion.

Pour le montrer, il faut expliciter δ mais le problème n'est pas simple. Il s'agit, en effet, d'un coefficient de diffusion mutuelle faisant intervenir les caractéristiques moléculaires du tungstène et du gaz de remplissage ; la température intervient d'autre part et constitue une variable supplémentaire.

Si l'on admet, ce qui est logique en première approximation, que ce coefficient est inversement proportionnel à la densité du gaz de remplissage, on est conduit à écrire en suivant un raisonnement analogue à celui que nous avons appliqué à la perte de chaleur que la variation de δ est du type :

$$\delta \propto \rho^{-1}$$

d'où :

$$M_w \propto S \rho^{-1} \propto B^{-0,3} \rho^{-1}$$

En reprenant les chiffres du tableau IX, on peut voir que M_w diminue à poids moléculaire croissant, dans l'ordre :

- azote,
- argon,
- krypton,
- xenon.

Cela est vérifié par les mesures d'EXALTO qui donne, sur la base 100, pour l'argon les chiffres expérimentaux du tableau XIV ci-après.

On remarquera que le chiffre de l'azote, double de celui de l'argon, reflète très probablement l'intervention de phénomènes consécutifs à la dissociation moléculaire de ce gaz, provoquée par la température élevée du filament.

TABLÉAU XIV

M_w en valeur relative pour les différents gaz

GAZ	M_w %
azote	200
argon	100
krypton	65
xenon	45

INFLUENCE DE LA PRESSION

Nous avons admis précédemment (Chapitre V) :

$$B \propto p^{-\frac{2}{3}}$$

Il paraît logique d'admettre que δ est inversement proportionnel à p :

$$\delta \propto p^{-1}$$

d'où :

$$M_w \propto B^{-0,3} \cdot p^{-1} \propto p^{-0,8}$$

Cet exposant $-0,8$ est en bon accord avec l'exposant empirique proposé par EXALTO et déduit des résultats obtenus sur les lampes courantes pour des pressions comprises entre 20 et 150 cm de mercure (pression de remplissage).

Il faut signaler, comme nous l'avons fait pour la perte dans le gaz, que pour des lampes ayant des caractéristiques telles que le rapport $\frac{d}{B}$ soit élevé (lampes aux halogènes), la valeur de l'exposant $-0,3$ sur B doit être remise en cause. On doit prévoir que M_w diminuera moins vite en fonction de la pression que ne l'indique la relation ci-dessus.

DIFFUSION THERMIQUE

Dans ce qui précède, le raisonnement s'appuyait sur le modèle de LANGMUIR et sur la diffusion dite "de concentration".

Nous avons vu, à propos de la perte de chaleur dans le gaz, qu'il y avait dans la réalité, autour du filament, une zone de convection laminaire dont le diamètre dépassait celui du modèle de LANGMUIR, et, au-delà de la zone laminaire, une zone de convection turbulente.

A la diffusion de concentration à travers la zone laminaire s'ajoute donc l'effet de la convection qui entraîne des atomes de tungstène.

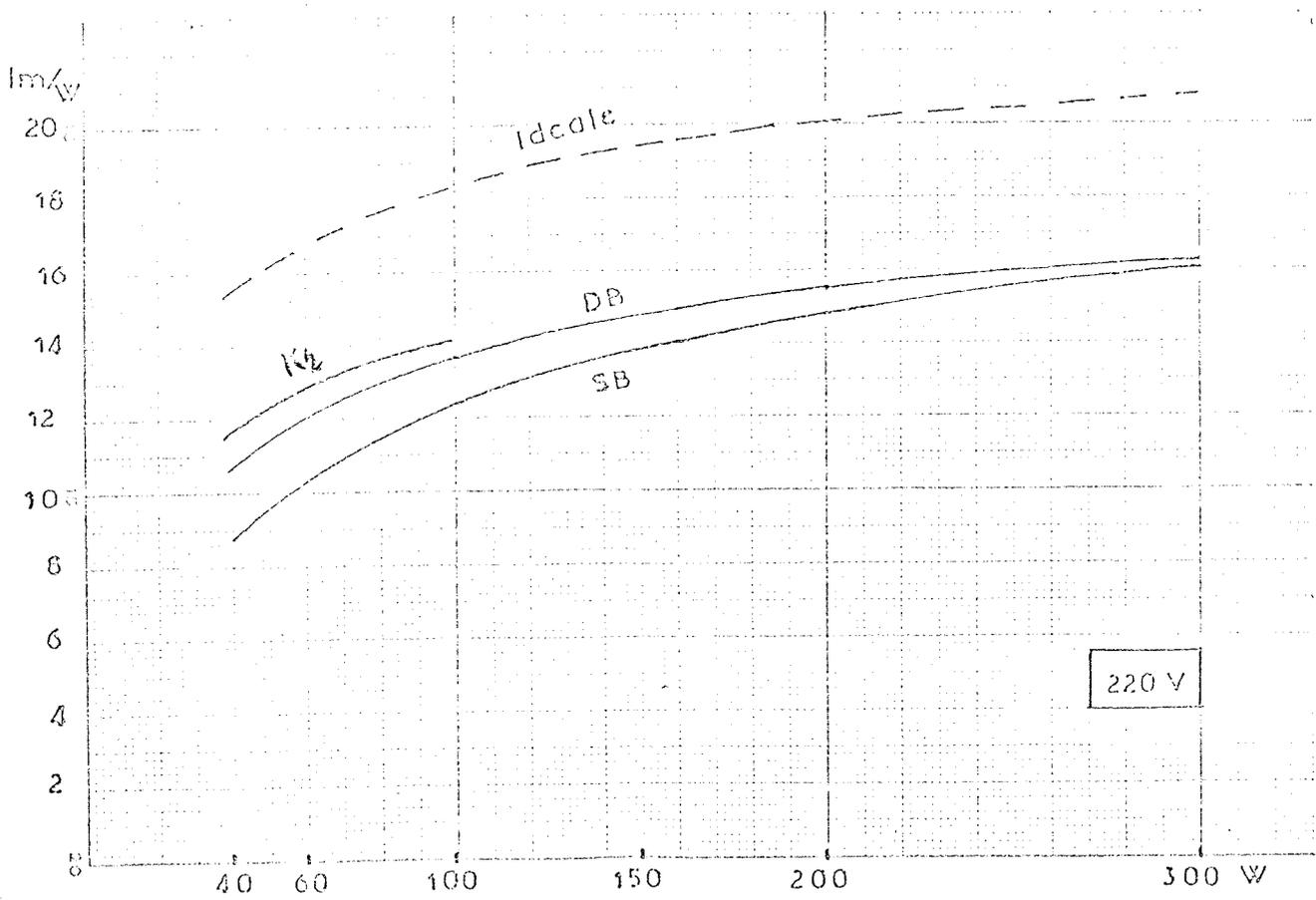
A ces causes de transfert, il faut ajouter éventuellement une troisième : celle qui résulte de la diffusion thermique.

La diffusion thermique explique un déplacement des atomes plus lourds - ici les atomes de tungstène - des zones chaudes vers les zones froides - ici vers l'ampoule - ou à l'intérieur des spirales.

Des estimations faites par des auteurs, comme BLEENBAAS et COVINGTON, il résulte que la diffusion thermique n'est responsable que du départ de quelques centièmes du tungstène évaporé. Elle est fonction de l'écart entre poids atomiques du tungstène et du gaz de remplissage. Elle devient presque négligeable dans le xénon, dont le poids atomique est de 131, contre 184 le tungstène.

Si la diffusion thermique de T_u joue un rôle dans certains cas, elle intervient aussi lorsque le gaz de remplissage est complété par des éléments actifs, avec lesquels il doit former un mélange homogène. Elle peut en effet être à l'origine d'une séparation gênante des constituants. Nous évoquons ici le cas des lampes aux halogènes et l'inconvénient d'une insuffisance d'halogène survenant dans une partie de l'ampoule.

.../...



Efficacité lumineuse des lampes courantes
(durée : 1 000 heures)

Fig. 34

GAINS DE TEMPERATURE :

Le remplissage gazeux permet un gain de température par rapport aux lampes à vide, pour une même durée de vie.

Ce gain de température est fonction de la nature du gaz et de sa pression. On peut le chiffrer grossièrement à 300 K.

L'utilisation d'un gaz plus lourd que l'argon permet un gain de température dont il ne faut pas exagérer l'importance. Compte tenu d'un poids molaire identique, et avec un taux d'évaporation de 65 au lieu de 100 (tableau XIV), on peut écrire pour deux lampes de même puissance et de même durée, krypton et argon.

$$\frac{T_{K2}}{T_{A2}} = \left[\frac{100}{65} \right]^{\frac{1}{35}} = 1,012$$

ce qui représente seulement 34° à 3 800 K.

Si le gain de température dû à la présence d'un gaz laisse prévoir un gain d'efficacité lumineuse, nous avons vu au chapitre précédent que la perte dans le gaz, variant également avec la nature du gaz et sa pression, venait en diminuer la portée.

L'influence de la nature du gaz s'exerce favorablement : plus le gaz est lourd, plus élevée est la température possible, et plus faible est la perte de chaleur. Il en est de même pour la "géométrie" des filaments : dans les deux cas, un gros filament et un filament court sont plus avantageux qu'un filament fin et un filament long. Seule la pression a une influence inverse : elle permet une température plus élevée, mais augmente la perte dans le gaz.

La figure 34 montre la variation de l'efficacité lumineuse des lampes courantes en fonction de la puissance (voltage : 220 V). La ligne pointillée montre ce que serait l'efficacité d'une lampe idéale, c'est-à-dire sans :

- perte dans le gaz,
- perte par conduction dans les entrées et crochets-supports,
- perte due au spirilage (effet de corps noir),
- perte par absorption de l'ampoule et du culot,

On constate, comme prévu, que le double spirilage et le remplissage au krypton n'ont d'intérêt que pour les lampes de puissance modérée.

Au-dessous de 40 W, la lampe à vide a la meilleure efficacité. On peut néanmoins lui préférer la lampe à atmosphère gazeuse, qui noircit moins, d'où un meilleur flux en durée.

.../...

LE RISQUE D'ARC :

Dans une ampoule remplie d'un gaz rare, et dont le filament incandescent est prêt à jouer le rôle d'une cathode, il y a un véritable risque d'arc.

Des dispositions doivent être prises pour limiter ce risque, qui ne peut pas être totalement éliminé au moment de la rupture du filament, donc de la mort normale de la lampe. La solution est de placer des fusibles sur les entrées de courant.

La théorie de la décharge électrique apporte des enseignements utiles sur les conditions dans lesquelles un arc jaillit.

L'établissement d'un arc suppose l'ionisation du milieu gazeux. L'ionisation résulte des chocs entre électrons venant de la cathode et atomes du gaz. Ceux-ci perdent, sous l'action d'un choc un électron de leur couronne périphérique et se transforme en ions positifs.

L'énergie nécessaire pour arracher un électron est donnée, en électrons-volts, par le tableau XV suivant :

TABLEAU XVPotentiel d'ionisation des gaz rares

GAZ	Ionisation (e.V.)
argon	15,8
krypton	14
xenon	12

Ce sont, pour des gaz, des valeurs relativement élevées. Pourtant les gaz rares jouent un rôle privilégié dans la décharge électrique dont ils facilitent l'établissement.

La raison en est que pour acquérir, sous forme d'énergie cinétique, une énergie supérieure aux minimums ci-dessus, les électrons doivent subir des chocs multiples préalables. Chaque choc entraîne une perte d'énergie. Les gaz rares monoatomiques permettent des chocs dits "élastiques" avec une perte minimale, ce qui facilite l'amorçage de la décharge. Un gaz diatomique, l'azote par exemple, est caractérisé par une tension de disruption beaucoup plus élevée, car les chocs entraînent au contraire une perte importante de l'énergie cinétique. Il est, dans une certaine mesure, "antiarc".

COATON a mesuré pour des lampes courantes (240 V - 60 W à filament doublement spiralé), remplies à une pression de 600 Torr d'argon avec une proportion croissante d'azote, les tensions ci-après :

<u>GAZ</u>	<u>TENSION D'AMORCAGE D'ARC</u>
- argon pur.....	236 V
- Ar + 5 % N ₂	369 V
- Ar + 10 % N ₂	435 V
- Ar + 30 % N ₂	493 V

Ces chiffres montrent pourquoi l'azote est resté un gaz indispensable pour la fabrication des lampes à incandescence. Afin d'éviter un amorçage entre les entrées de courant, il faut un pourcentage d'azote garantissant au moins 350 ou 400 Volts. Pour un remplissage à 600 Torr, des mélanges à 12, 13, ou 14 % sont souvent utilisés. L'azote pur reste le gaz de remplissage des lampes, où le risque d'arc est très accentué par la proximité des entrées de courant et la température élevée des ampoules. C'est le cas de certaines lampes très "poussées" (lampes de projection).

Il est admis que le krypton et le xenon demandent une proportion d'azote un peu plus forte que l'argon. GEISS recommande 5 % d'azote en plus pour obtenir la même sécurité.

La présence d'azote fait évidemment perdre un peu d'efficacité lumineuse. Les chiffres relatifs à la perte par convection ont montré une perte dans le gaz 1,7 fois plus élevée dans l'azote que dans l'argon, et les chiffres du tableau XIV donnent un taux d'évaporation deux fois plus grand.

En passant de l'argon avec 5 % d'azote, ce qui est un minimum, à l'azote pur, on perd 19 % d'efficacité lumineuse pour une lampe courante de 220 V - 40 W, et 11 % pour une lampe de 220 V - 500 W.

.../...

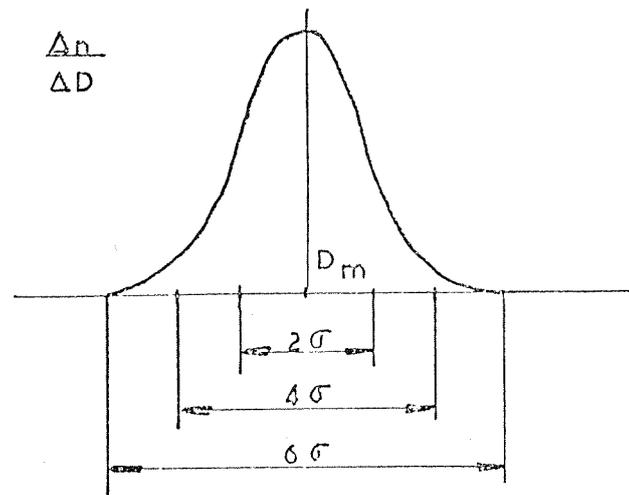


Fig. 25 - Loi de LAPLACE-GAUSS

DUREE INDIVIDUELLE & DUREE MOYENNE :

Quelles que soient les dispositions prises pour assurer l'identité des éléments composants et la régularité de la fabrication, il subsiste évidemment des différences très petites qui se traduisent par une variation notable des durées individuelles des lampes d'un même lot.

Il est à noter que des différences de température entraînent une variation de l'efficacité lumineuse, qu'il est facile de mesurer. On peut constater que la dispersion des durées est plus marquée que celle des efficacités constatée.

Il y a des facteurs de qualité intrinsèque. Nous avons signalé le rôle des variations de température le long des filaments.

Conformément aux lois de la statistique, lorsque les facteurs de variation sont petits et indépendants les uns des autres, la dispersion autour de la durée de vie moyenne correspond à une répartition normale, c'est-à-dire conforme à la loi de LAPLACE-GAUSS.

La courbe représentative est classique et figurée en 35. En abscisses est porté la durée, en ordonnées le nombre des lampes dont la durée est comprise dans un intervalle constant. La courbe est caractérisée par la durée de vie moyenne D_m et l'écart-type ou écart quadratique moyen :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D - D_m)^2}{n}}$$

n étant le nombre de lampes du lot, supposé suffisamment important.

La répartition est telle que :

- 68 % des lampes trouvent place autour de la moyenne entre $-\sigma$ et $+\sigma$
- 95 % des lampes " " " " " " -2σ et $+2\sigma$
- 99,8 % " " " " " " -3σ et $+3\sigma$

La valeur de l'écart-type est donc un élément significatif de la qualité intrinsèque. Il est évident qu'une dispersion trop grande pourrait remettre en cause l'adoption de la durée moyenne, comme caractéristique significative, et notamment toutes les considérations technico-économiques qui sont basées sur cette dernière.

Dans la pratique, l'écart-type varie un peu avec le type de lampe. Il tend à diminuer lorsque le diamètre du filament augmente.

.../...

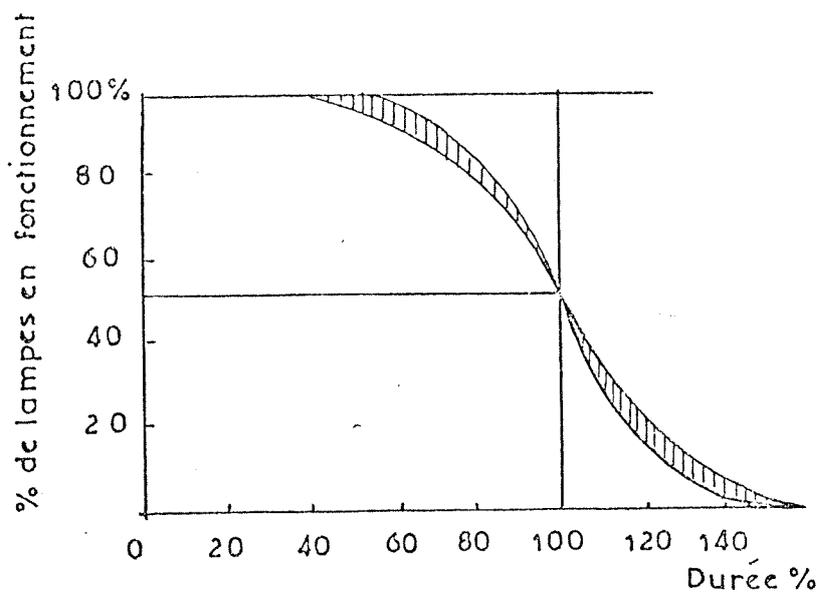


Fig. 36 - % des lampes restant en fonctionnement

L'objectif est de limiter le pourcentage des lampes dont la durée s'écarte trop de la durée moyenne, en plus ou en moins.

Soit $|U|$ cet écart en valeur absolue.

En fonction de $\frac{|U|}{\sigma}$, le tableau XVI ci-après montre, suivant la fonction de LAPLACE-GAUSS, le % de lampes en dehors des limites.

TABLÉAU XVI

% de lampes hors d'un écart déterminé

$\frac{ U }{\sigma}$	% hors limites	$\frac{ U }{\sigma}$	% hors limites
0,126	90 %	1,282	20 %
0,253	80 %	1,645	10 %
0,385	70 %	1,960	5 %
0,524	60 %	2,054	4 %
0,674	50 %	2,170	3 %
0,842	40 %	2,326	2 %
1,036	30 %	2,576	1 %

On voit, par exemple, que pour obtenir moins de 10 % des lampes en dehors des limites $D_m \pm 300$ H, l'écart-type ne devra pas être supérieur à :

$$\sigma < \frac{300}{1,645} \text{ soit } 182 \text{ heures}$$

Une façon usuelle de représenter les courbes de mortalité est de porter en ordonnées le % de lampes restant en fonctionnement au temps considéré. La figure 36 montre une telle courbe, la partie hachurée est relative à la dispersion expérimentale des durées.

On remarquera que ces courbes ont une valeur indicative quant au moment où il peut être souhaitable, pour limiter les frais d'intervention, de procéder à un rechange systématique (éclairage public, éclairages commercial et industriel).

On situe souvent ce moment à 10 % des lampes en service, hors d'usage.

C H A P I T R E V I I

LES RELATIONS FONDAMENTALES EN FONCTION DE LA TENSION

Pour relier entre elles les différentes caractéristiques des lampes à incandescence, puissance, flux, durée, etc..., on dispose de relations simples, confirmées par une longue expérience. Elles servent pour calculer les filaments et pour discuter les conditions d'utilisation des lampes.

Ces relations, traduisant le fait qu'il y a des fonctions linéaires entre les logarithmes des caractéristiques lorsque la tension varie, sont un peu différentes suivant les catégories de lampes, mais très voisines et valables dans des intervalles étendus. Elles sont d'usage particulièrement sûr si les variations sont peu considérables, ce qui est le cas en fabrication, où on les utilise pour ajuster la puissance et la durée, si celles-ci ne présentent pas exactement les valeurs désirées.

BASE THEORIQUE :

On peut voir aisément quelle est l'influence d'une variation de la tension aux bornes d'une lampe de puissance nominale W et de voltage V .

$$\text{En régime normal : } W = \frac{V^2}{R}$$

Si V varie, la température du filament varie et R et W varient. En même temps, le flux lumineux F et l'efficacité lumineuse η varient également.

Si la lampe fonctionne de façon stable sur une tension différente de la tension nominale, on constatera aussi une durée de vie moyenne différente. En ce sens, on peut donc dire que D est fonction de V .

En utilisant les relations entre les caractéristiques de rayonnement et d'évaporation des filaments (exitance énergétique et lumineuse, taux d'évaporation) et la température, discutées dans les précédents chapitres, on peut trouver facilement des formules exponentielles traduisant les différentes fonctions, dans le cas idéal des lampes à vide fonctionnant sans pertes.

Nous avons vu que :

$$R \propto T^{1,2}$$

à 2 400°K, on peut écrire (voir tableau III, chapitre III) :

$$W \propto M_e \propto T^{4,6}$$

$$F \propto M_v \propto T^{10,3}$$

$$\eta \propto T^{5,7}$$

et (voir tableau XII, chapitre VI) :

$$D \propto \frac{1}{m_w} \propto T^{-4,0}$$

Puisque $W = \frac{V^2}{R}$:

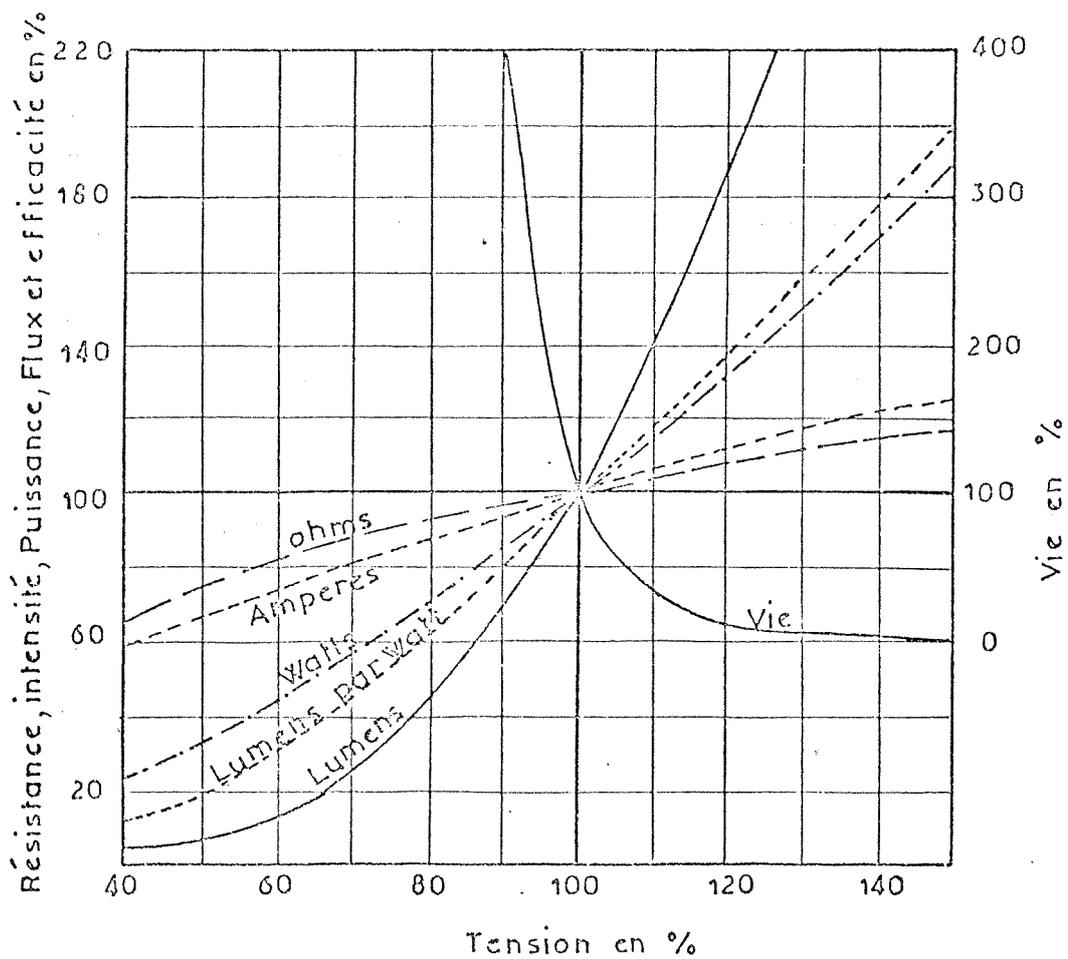
$$T^{4,6} \propto \frac{V^2}{T^{1,2}}$$

Donc : $T \propto V^{0,34}$

en découlent immédiatement les relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} W \propto V^{1,56} \\ F \propto V^{3,50} \\ \eta \propto V^{1,94} \\ D \propto V^{-13,6} \end{array} \right.$$

.../...



Caractéristiques sous tension variable

COEFFICIENTS LOGARITHMIQUES EXPERIMENTAUX :

Les coefficients établis par les mesures effectuées sur lampes réelles, tenant donc compte de l'influence des pertes et pour des températures de fonctionnement supérieures à 2 400°K, ne sont pas très différents des chiffres ci-dessus, comme le montre le tableau XVII ci-après :

TABLEAU XVII

Coefficients logarithmiques

catégorie de temps	$\frac{dW}{W} / \frac{dV}{V}$	$\frac{dF}{F} / \frac{dV}{V}$	$\frac{d\eta}{\eta} / \frac{dV}{V}$	$\frac{dD}{D} / \frac{dV}{V}$
à vide	1,57	3,55	1,98	
à gaz S. B. {	< 100 W	1,52	3,70	2,18
	> 100 W	1,54	3,40	1,86
à gaz D. B.	1,54	3,50	1,96	13 à 14
valeur arrondie	1,5	3,5	2	13,5

Nous avons indiqué des valeurs arrondies qui peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes d'application.

Les courbes de la figure 37 montrent comment varient, en % de la valeur nominale, les différentes caractéristiques. Des relations entre celles-ci et la tension, on peut déduire facilement des liens directs entre elles. C'est ainsi qu'entre efficacité lumineuse et durée, on a :

$$\eta \propto D^{-7}$$

L'efficacité lumineuse, facilement et rapidement mesurable, peut être un élément important pour prévoir la durée de vie d'une lampe déterminée.

.../...

INFLUENCE DES VARIATIONS DES DIMENSIONS DES FILAMENTS :

En reprenant les équations d'équilibre relatives aux dimensions des filaments, données au chapitre IV, on peut utiliser les coefficients ci-dessus pour calculer l'influence de petites variations de longueur et de diamètre des filaments.

Soit deux filaments de caractéristiques dimensionnelles : d et l, d'une part, d + dd, et l + dl, d'autre part ; il y a pour une même température de fonctionnement une différence dV de voltage, donnée par :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} - 0,5 \frac{dd}{d}$$

et une différence de puissance donnée par :

$$\frac{dW}{W} = \frac{dl}{l} + \frac{dd}{d}$$

Appliquons à la seconde lampe la même tension qu'à la première, c'est-à-dire, diminuons sa tension nominale propre de $\frac{dV}{V}$.

Sa température et sa puissance vont diminuer, et, finalement :

$$\frac{dW}{W} = \frac{dl}{l} + \frac{dd}{d} - 1,5 \left(\frac{dl}{l} - 0,5 \frac{dd}{d} \right)$$

Donc :

$$\frac{dW}{W} = - 0,5 \frac{dl}{l} + 1,75 \frac{dd}{d}$$

Les variations de flux lumineux et d'efficacité peuvent être évaluées de la même façon, et le tableau XVIII ci-après donne les coefficients que l'on peut appliquer pour de petites variations de diamètre ou de longueur d'un filament :

TABLEAU XVIII

coefficients de variations à partir du diamètre et de la longueur

dimensions	W	F	η	D
diamètre	1,75	2,15	1	- 16
longueur	- 0,5	- 2,5	- 2	+ 4,5

.../...

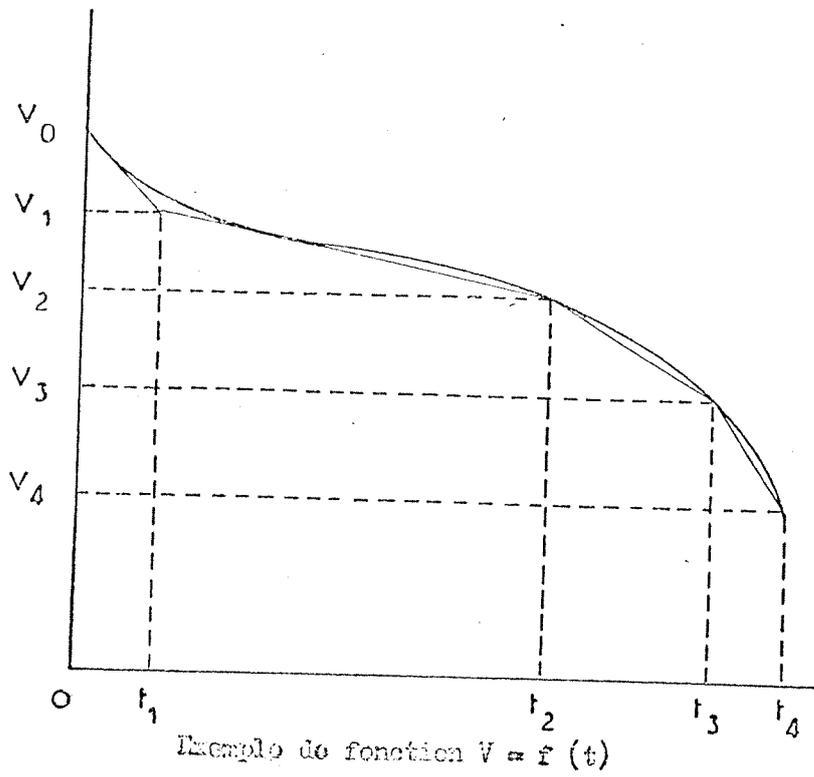


FIG. 32

VARIATIONS EN FONCTION DE LA TENSION - CONSEQUENCES PRATIQUES :

L'influence considérable des variations de tension sur les caractéristiques des lampes à incandescence, notamment sur le flux lumineux et la durée de vie a des conséquences pratiques importantes.

Pour les mesures de laboratoire, l'emploi d'une tension parfaitement stabilisée apparaît nécessaire. On voit, en effet, qu'une précision de 1 % sur le flux lumineux suppose une précision de 0,3 % sur la tension, et qu'une précision de 1 % sur la durée demande 0,07 %. Pratiquement, on doit se satisfaire d'une tension régularisée à $\pm 0,2$ % autour d'une valeur moyenne soigneusement contrôlée.

Dans le cas général, il faut veiller à adapter le voltage nominal des lampes à la tension moyenne réelle des réseaux de distribution. Un écart de ± 5 % sur la tension suffit, en effet, comme le montre le calcul, à réduire la durée de vie de moitié.

Un cas particulier qui peut donner lieu également à une évaluation théorique est celui d'une lampe fonctionnant sous une tension variable suivant une loi déterminée, par exemple celle d'une pile ou d'un accumulateur qui se décharge progressivement.

On peut procéder de la façon suivante :

La courbe de décharge $V = f(t)$ est décomposée en éléments linéaires. Au temps $t = 0$, la tension est V_0 et la durée de vie est D_0 (figure 38).

Considérons l'intervalle de t_n à t_{n+1} correspondant à V_n et V_{n+1} , on peut écrire :

$$du = \left[\frac{V}{V_n} \right]^{13,5} dt$$

du , est au point de vue durée, ce que nous appellerons l'usure, ou durée équivalente sous la tension V_n .

Entre t_n et t_{n+1} , on aura par intégration l'usure correspondant à cet élément linéaire :

$$U_n = \frac{t_{n+1} - t_n}{14,5} \frac{\left[\frac{V_{n+1}}{V_n} \right]^{14,5} - 1}{\frac{V_{n+1}}{V_n} - 1}$$

En rapportant l'usure sous V_n à l'usure sous V_0 :

$$U_0 = \left[\frac{V_n}{V_0} \right]^{13,5} U_n$$

Il est facile de faire la somme $\sum U_0$ des usures correspondant aux différents éléments linéaires et de la comparer à la durée de vie nominale D_0 . On en déduira le coefficient $\frac{D_0}{\sum U_0}$ qui montrera combien on peut obtenir de décharges sans changer la lampe.

LE PROBLEME ECONOMIQUE DE LA DUREE DE VIE :

Les relations fondamentales permettent d'aborder mathématiquement le problème de la durée de vie la plus économique des lampes à incandescence, c'est-à-dire de la durée qui donne le lumen-heure au meilleur prix.

Le lumen-heure, rappelons-le, est l'unité pratique de quantité de lumière. C'est le produit d'un flux par un temps.

Le coût C du lumen-heure résulte du prix d'achat de la lampe, soit ν_A , et du prix courant consommé, soit pour un kilowatt-heure : ν_L

Si une lampe de W watts a un flux de F lumens et une durée de D heures, C sera donné par :

$$C = \frac{\nu_A}{F \cdot D} + \frac{W}{F} + \frac{\nu_L}{1000}$$

On peut supposer que l'on fait varier légèrement la tension autour de la valeur nominale, ce qui entraîne une variation comme de W, F et D, donc de C.

Il s'agit d'étudier la fonction :

$$C = f(D)$$

Cette fonction passe par un minimum pour :

$$\frac{\nu_A}{FD} \left[\frac{dF}{F} + \frac{dD}{D} \right] = \frac{\nu_L W}{1000F} \left[\frac{dW}{W} - \frac{dF}{F} \right]$$

et, en remplaçant les coefficients par leur valeur en fonction de $\frac{dV}{V}$, on aboutit :

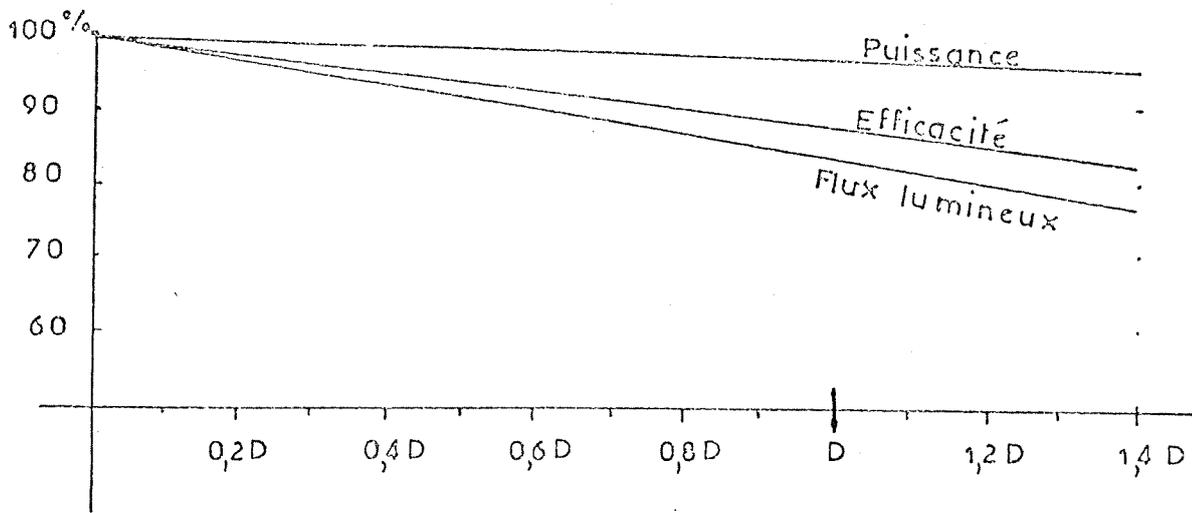
$$D \approx \frac{5000}{W} \cdot \frac{\nu_A}{\nu_L}$$

Cette expression montre, en prenant pour ν_A et ν_L des coûts usuels, qu'une durée relativement courte est -sur la base de ce raisonnement- économiquement justifiée dans le cas des lampes standard, qui sont bon marché.

Une durée moyenne supérieure à 1 000 heures peut être justifiée dans les cas suivants :

- les lampes présentent des particularités qui en augmentent le prix (lampes à réflecteur incorporé, lampes colorées, lampes à gaz très rare),
- les lampes sont difficiles à changer en fin de durée et à leur prix s'ajoutent des frais de maintenance importants,
- le prix du courant est exceptionnellement bas.

Dans certains pays, des lampes de durée de 2 500 heures sont prévues dans les programmes de fabrication.



Vieillissement d'une lampe courante de 200W

Fig. 39

VARIATIONS EN COURS DE DURÉE :

Le comportement des lampes à incandescence en cours de durée est déterminé par deux phénomènes :

- l'augmentation de la résistance du filament résultant de son amincissement par suite de l'évaporation - elle entraîne une diminution de la puissance,
- le noircissement de l'ampoule dû au tungstène évaporé qui s'y dépose (lampes aux halogènes mises à part) - il entraîne une absorption du flux lumineux.

On peut remarquer que la faiblesse du poids mortel (quelques centièmes du poids du filament) a un aspect paradoxalement positif puisqu'il limite le vieillissement des lampes.

La surface plus ou moins importante offerte par l'ampoule au tungstène évaporé joue évidemment un rôle déterminant vis à vis du vieillissement. L'emploi de getters (voir chapitre XII) est un procédé qui vise à atténuer le noircissement.

Les lampes à atmosphère gazeuse faisant appel à des filaments qui, à puissance égale, sont plus petits que ceux des lampes à vide, parce qu'à température plus élevée, noircissent moins que ces dernières. Le poids mortel étant moindre et les courants de convection tendant à entraîner les atomes de tungstène vers la partie supérieure des ampoules, il en est résulté un avantage marqué.

La figure 39 montre, à titre d'exemple, comment varient en fonction du temps, exprimé en % de la durée de vie nominale, la puissance, l'efficacité lumineuse et le flux lumineux d'une lampe standard de 200 watts.

C H A P I T R E VIII

TEMPS D'ALLUMAGE ET D'EXTINCTION

TAUX DE MODULATION

La capacité calorifique des filaments incandescents, compte-tenu de leur faible masse, est évidemment réduite. On doit s'attendre à ce qu'ils s'échauffent et se refroidissent rapidement. Il est de fait que dans la pratique courante de l'éclairage, on considère que les lampes à incandescence s'allument et s'éteignent instantanément. Pour certaines applications, néanmoins, lorsque le fonctionnement est bref et en répétition (clignotement), les périodes transitoires prennent de l'importance.

Une approche théorique du problème donne des indications intéressantes.

Pendant la période de mise en régime, l'énergie accumulée par le filament est la différence entre l'énergie électrique fournie et l'énergie rayonnée. Nous raisonnerons une fois de plus en supposant une lampe idéale fonctionnant sans pertes. Le temps t est mesuré à partir de la mise sous tension, la température est T , l'énergie électrique fournie est de la forme $f(T) dt$, l'énergie rayonnée de la forme $\varphi(T) dt$, et on peut écrire :

$$f(T) dt - \varphi(T) dt = Q dt$$

dt étant l'élévation de température pendant le temps dt et Q la capacité calorifique du filament, c'est-à-dire le produit de sa masse par la chaleur spécifique du tungstène. La chaleur spécifique varie peu avec la température, soit :

$$C = 160 \text{ J. Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Au moment de l'extinction, la chaleur accumulée est dissipée par rayonnement et l'équation différentielle est simplement :

$$(T) dt = -Q dt$$

Il est possible d'exprimer $f(T)$ et $\psi(T)$ en fonction des caractéristiques nominales de la lampe désignées ci-après par T_1 et W_1 .

Ce sont :

- les caractéristiques finales pour l'allumage,
- les caractéristiques initiales pour l'extinction.

Ce que nous savons de la variation de la résistance et de celle de l'exitance énergétique du tungstène, en fonction de la température (voir chapitre III), nous permet d'écrire :

Pour l'énergie électrique, en posant $\frac{T}{T_1} = X$:

$$f(T) = W_1 \left(\frac{T}{T_1} \right)^\alpha = W_1 X^\alpha$$

L'exposant α peut être pris égal à -1,2.

Pour le flux rayonné :

$$\psi(T) = W_1 \left(\frac{T}{T_1} \right)^\beta = W_1 X^\beta$$

L'exposant β est voisin de 4,5.

Les deux équations différentielles deviennent alors :

[En posant $CT_1 = Q_1$, contenu calorifique nominal]

- A l'allumage :

$$dt = \frac{Q_1}{W_1} \cdot \frac{dX}{X^\alpha - X^\beta}$$

- A l'extinction :

$$dt = - \frac{Q_1}{W_1} \cdot \frac{dX}{X^\beta}$$

L'intégration entre deux valeurs de X donnerait les temps correspondants. Nous retenons de ce qui précède le rôle du rapport :

$$\frac{Q_1}{W_1}$$

entre le contenu calorifique du filament et sa puissance nominale, puisque les temps sont proportionnels à ce rapport.

Pratiquement et compte-tenu de l'allure asymptotique des courbes de température en fonction du temps, à l'allumage et à l'extinction, on peut définir par t_{all} le temps nécessaire pour passer de 0 à 90% du flux nominal et par t_{ext} le temps nécessaire pour revenir de 100% à 10%.

Dans ce dernier cas, il est évident que le filament peut rester faiblement lumineux, c'est-à-dire visible dans l'obscurité, pendant un temps beaucoup plus long que t_{ext} .

Les tableaux relatifs au tungstène montrent que 90% du flux lumineux sont obtenus sensiblement avec $T = 99\% T_1$, quel que soit T_1 . Par contre, 10% du flux demandent 80% de T_1 si T_1 est voisin de 2 400 K, et seulement 75% de T_1 si T_1 est voisin de 3 000 K.

En se basant sur les chiffres expérimentaux publiés, résultant de mesures sur des lampes réelles, on peut conseiller l'emploi de formules très simples, pour évaluer t_{all} et t_{ext} en secondes, avec une approximation raisonnable :

$$t_{all} \approx \frac{Q_1}{W_1} \quad (\text{lampes à vide et à gaz})$$

Avec Q_1 en joules et W en watts.

$$t_{ext} \approx \frac{1}{3} \frac{Q_1}{W_1} \quad (\text{lampes à vide})$$

$$t_{ext} \approx \frac{1}{2} \frac{Q_1}{W_1} \quad S \quad (\text{lampes à gaz})$$

Les données ci-dessus appliquées à quelques lampes courantes, conduisent au tableau.XIX.

TABLEAU XIX

Temps d'allumage et d'extinction

Type de lampe	Température (K)	1 (j)	t_{all} (s)	t_{ext} (s)
225V - 25W (vide)	2 500	2	0,08	0,03
225V - 40W gaz S.S.	2 655	1,89	0,05	0,025
225V - 40W gaz D.S.	2 670	2,79	0,07	0,035
225V - 100W gaz S.S.	2 760	10,21	0,10	0,05
225V - 100W gaz D.S.	2 765	13,05	0,13	0,06
225V - 500W gaz S.S.	2 900	167	0,33	0,16

S.S. : simple spiralage - D.S. : double spiralage/...

MODULATION DE LA LUMIERE

Sur courant alternatif, la température des filaments subit l'influence de la variation sinusoïdale de la tension. Il y a donc une certaine modulation du flux.

La fréquence de variation de la température et des caractéristiques qui lui sont associées est évidemment le double de celle de la tension, les demi-alternances positive et négative étant équivalentes.

Sur courant à 50 Hz, la période sera de 1/100 de seconde, donc courte par rapport aux valeurs de t_{all} et t_{ext} données plus haut.

On doit donc s'attendre à un faible "taux de modulation".

Le taux de modulation de la température est défini par :

$$\tau_T = \frac{T_{max} - T_1}{T_1}$$

S'il est faible (99 %), on peut admettre que les taux relatifs aux autres caractéristiques lui sont proportionnels, et utiliser les coefficients exponentiels correspondants (voir chapitre VII). Pour le flux lumineux, on écrit :

$$\frac{dF}{F} = 9 \frac{dT}{T}$$

On écrira donc :

$$\tau_F = 9 \tau_T$$

Il est logique de penser que le taux de modulation de la température est en relation inverse avec la fréquence f et avec le paramètre :

$$\frac{Q_1}{W_1}$$

qui détermine comme nous l'avons vu, les durées d'allumage et d'extinction. Cela amène à supposer que :

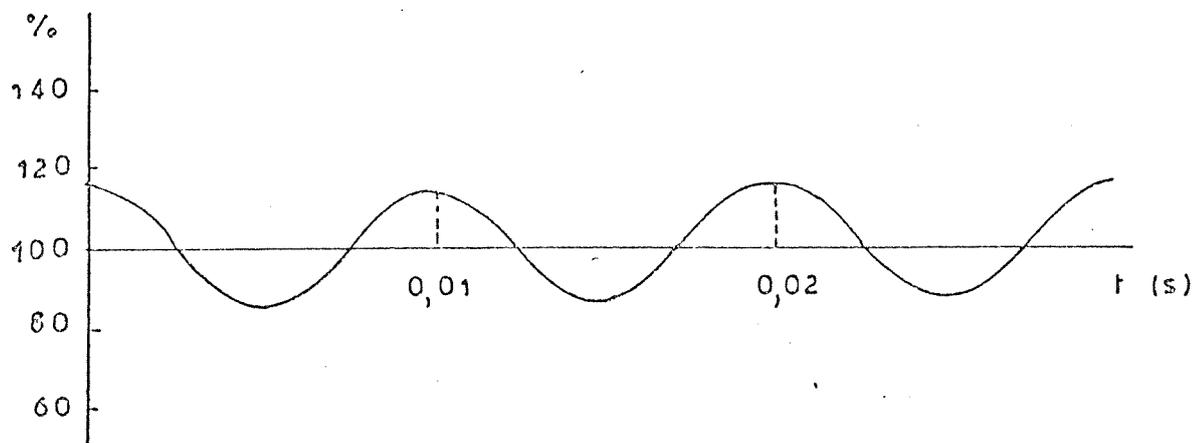
$$\tau_F \propto \frac{W_1}{f Q_1}$$

Les chiffres expérimentaux connus montrent effectivement qu'une évaluation satisfaisante pour la pratique est donnée par :

$$\tau_F = 0,65 \frac{W_1}{f Q_1} \quad (\text{lampes à vide})$$

$$\tau_F = 0,45 \frac{W_1}{f Q_1} \quad (\text{lampes à gaz})$$

.../...



Fluctuations du flux lumineux
Lampe 225 V - 25 W (vide) sur 50 Hz

Fig. 40

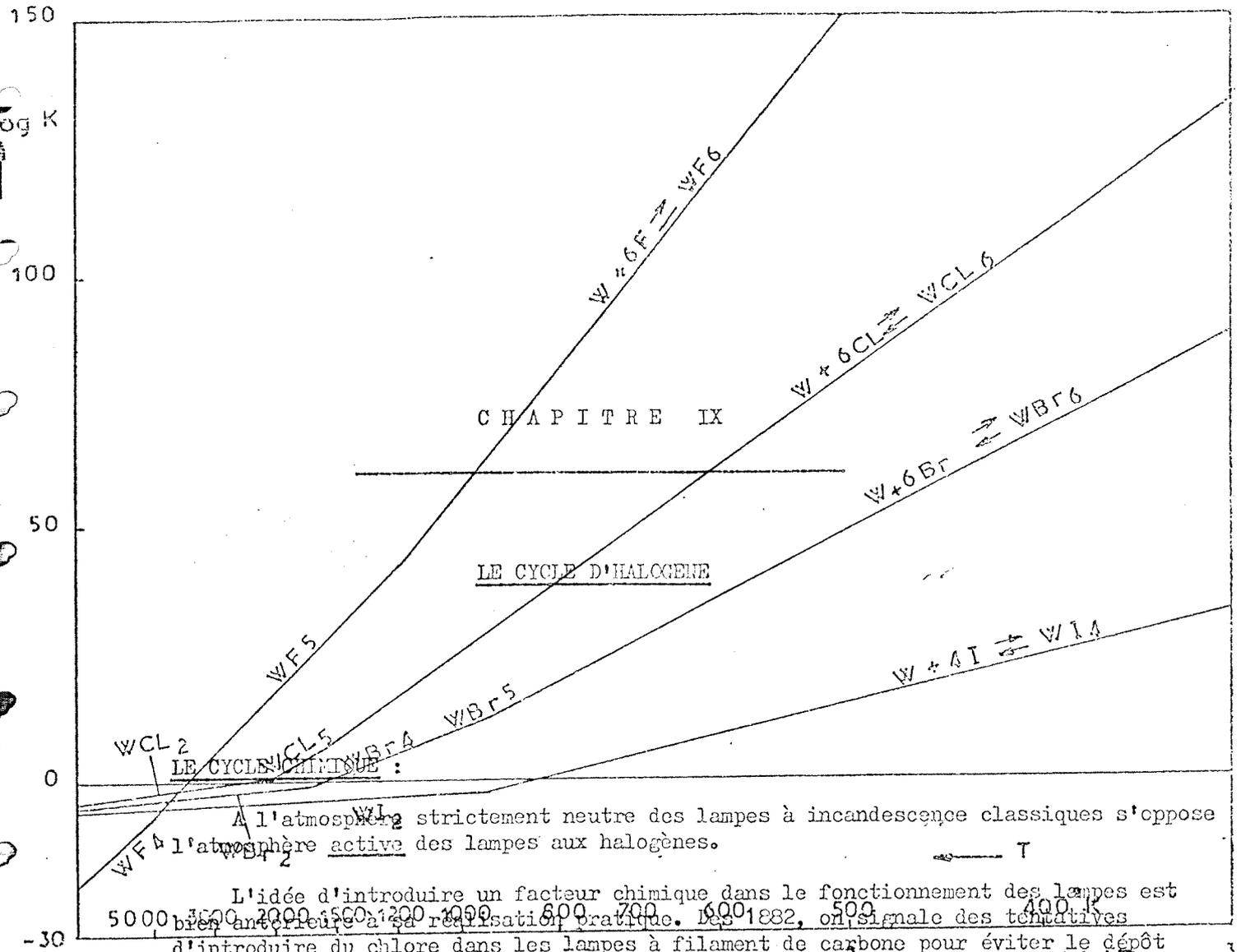
En reprenant les exemples donnés plus haut, les formules ci-dessus conduisent au tableau XX.

TABLEAU XX

Taux de modulation

type de lampe	τ_F (50 Hz)
220 V - 25 W (vide - S. S.)	0,16
220 V - 40 W (gaz - S. S.)	0,18
220 V - 40 W (gaz - D. S.)	0,13
220 V - 100 W (gaz - S. S.)	0,09
220 V - 100 W (gaz - D. S.)	0,06
220 V - 500 W (gaz - S. S.)	0,03

La figure 40 montre la variation du flux lumineux d'une lampe à vide 220 V - 25 W, enregistrée avec un oscilloscope. La courbe n'est évidemment pas purement sinusoïdale. Si l'on fait une analyse, on constate que la fonction, décomposée en série de Fourier, est néanmoins très voisine. Le second coefficient de la série, représente en effet moins de 10 % du premier coefficient.

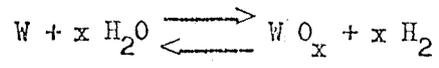


A l'atmosphère strictement neutre des lampes à incandescence classiques s'oppose l'atmosphère active des lampes aux halogènes.

L'idée d'introduire un facteur chimique dans le fonctionnement des lampes est bien antérieure à sa réalisation pratique. Dès 1882, on signale des tentatives d'introduire du chlore dans les lampes à filament de carbone pour éviter le dépôt de carbone opaque dans les ampoules. Langmuir aux U. S. A., Hamburger en Hollande expérimentent également l'action du chlore dans les lampes à filament de tungstène.

On peut noter d'autre part que les fabricants de lampes connaissaient depuis longtemps un cycle chimique inopportun, responsable d'un noircissement prématuré des lampes à vide et appelé : "cycle de l'eau".

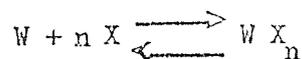
La présence d'un peu de vapeur d'eau dans les ampoules suffisait en effet à provoquer la double réaction :



L'oxyde de tungstène formé au contact du filament à haute température, réduit sur l'ampoule, y déposait du tungstène en libérant l'eau pour un nouveau cycle.

.../...

Dans les lampes aux halogènes, la réaction de base est :



Le tungstène se compose avec l'halogène ajouté au gaz neutre pour donner un halogénure de tungstène volatil. La réaction a lieu de gauche à droite à la température de l'ampoule, et de droite à gauche à la température du filament. La température de l'ampoule doit être supérieure à un minimum.

L'halogène est introduit dans l'ampoule en très petite quantité, le gaz rare de remplissage jouant son rôle habituel.

La position d'équilibre de la réaction ci-dessus est fonction de la température. Si l'on désigne par P_W , P_X et P_{WX_n} les pressions partielles des trois corps en présence, cette position d'équilibre est déterminée par :

$$\frac{P_{WX_n}}{P_W (P_X)^n} = K$$

K étant la constante d'équilibre pour une température donnée.

Si :

$K > 1$, il y a prédominance de l'halogène,
 $K < 1$, il y a prédominance des constituants..

La figure 41 donne $\log K$ en fonction de T pour tous les halogènes de tungstène. Elle montre que pour des températures d'ampoule de 250 - 600°C, l'équilibre est du côté des halogénures. Par contre, pour 3 000 K, le logarithme est négatif et l'équilibre est du côté des constituants. Elle traduit également le fait que l'activité des halogènes décroît dans l'ordre : fluor, chlore, brome, iode.

Une température d'inversion très élevée est évidemment favorable à un dépôt de tungstène aux endroits les plus chauds, donc les plus minces du filament, au bénéfice de la durée de vie ; mais une agressivité trop grande vis à vis des parties froides du filament conduit à une attaque de celui-ci près des supports, sinon à une attaque des supports eux-mêmes. On voit donc immédiatement la difficulté de mettre en oeuvre un cycle régénérateur parfaitement satisfaisant.

En fait, le retour du tungstène sur le filament n'a pas lieu de façon régulière et homogène. L'avantage du cycle d'halogène est d'éviter tout noircissement des ampoules et de conduire à une nouvelle technologie, marquant un progrès remarquable par suite d'une température accrue des filaments, au bénéfice de l'efficacité lumineuse et de la luminance des sources.

.../...

LES HALOGENES UTILISES :

L'iode, le moins actif des halogènes, a été très naturellement le premier utilisé (ETATS-UNIS : 1959). La température nécessaire des ampoules était d'environ 600°C, ce qui conduisit à l'emploi d'ampoules de quartz.

Pour atteindre cette température, il faut que le volume de l'ampoule soit relativement très petit par rapport à la puissance de la lampe. Les lampes de tension normale, 220 V, furent donc des lampes cylindriques de petit diamètre et relativement longues. Avec un diamètre d'un centimètre et des filaments simplement spiralés, la charge nécessaire par unité de longueur n'est obtenue qu'avec une puissance nominale supérieure ou égale à 500 Watts. Des puissances beaucoup plus faibles sont par contre possibles avec des filaments courts à très basse tension.

Sans entrer ici dans les problèmes de fabrication, on peut signaler les difficultés inhérentes au dosage de l'iode, et la présence indispensable, à dose très faible, d'oxygène dans l'ampoule. Chaque type de lampe pose un cas particulier.

L'utilisation d'autres halogènes, théoriquement moins favorables que l'iode, a finalement montré des avantages notables. En premier lieu, il a été possible de les introduire dans les ampoules sous forme de composés gazeux stables, en même temps que le gaz de remplissage, ce qui n'était pas le cas pour l'iode. L'inconvénient d'une activité chimique plus grande sur les éléments froids de la lampe a pu être limité grâce à un dosage minimum et précis de l'halogène.

C'est ainsi que le brome ou plus exactement des composés du brome, tels que le bromure de méthyle ($\text{CH}_3 \text{Br}$) et le bromure de méthylène ($\text{CH}_2 \text{Br}_2$), conduisent à un cycle efficace sur la base de l'hydracide HBr . Une température d'ampoule moins élevée est possible, ce qui permet d'étendre le champ d'application. Les hydrocarbures halogénés se décomposent au-dessus de 500°C en hydracide d'halogène et en carbone qui n'est pas gênant. L'hydracide donne lieu au cycle désiré.

Le bromure de méthyle, plus riche en hydrogène, convient mieux que le bromure de méthylène pour les lampes de longue durée dans lesquelles il y a risque de disparition progressive de l'hydrogène par diffusion dans les ampoules de quartz.

On a signalé l'utilisation de dérivés chlorés et de mélanges dans lesquels plusieurs halogènes, dont l'iode, sont associés. Il y a là une chimie complexe, encore riche d'avenir.

EFFICACITE LUMINEUSE DES LAMPES AUX HALOGENES :

Le cycle d'halogène a conduit à une évolution du gaz de remplissage, tant au point de vue nature que pression dans le sens d'une augmentation notable de la température de régime possible.

On remarque d'abord que, compte tenu de la température des ampoules, il y a un écart très marqué entre la pression de remplissage ou pression à froid et la pression en fonctionnement ou pression à chaud. D'après Covington, le rapport pression à chaud sur pression à froid varie pratiquement de 3,5 à 5, suivant les types. Pour les lampes linéaires à culots lumineux, un rapport 4,5 est constaté. Cette augmentation naturelle de pression agit sur le taux d'évaporation (voir chapitre VI) et permet donc d'adopter une température plus élevée.

Mais le fait que les ampoules de quartz soient petites et très robustes rend possible un remplissage froid sous plusieurs atmosphères, l'utilisation des gaz lourds Krypton et Xenon donnant un avantage supplémentaire. Rappelons que la perte par conduction et convection dans le gaz augmente avec la pression (voir chap. V) ce qui justifie également dans le cas présent l'emploi des gaz dont la conductivité est la plus faible.

On constate que le recours au Krypton ou mieux au Xenon, recule la limite au-delà de laquelle l'augmentation de pression n'améliorerait plus l'efficacité lumineuse parce que la perte dans le gaz prendrait une valeur trop élevée.

Indépendamment de l'efficacité lumineuse, on peut d'ailleurs chercher à élever la température du filament et la luminance, qui constitue alors la caractéristique principale. Nous aurons l'occasion d'y revenir.

Si nous prenons l'exemple des lampes aux halogènes de 220 V - 1 000 W de durée 2 000 heures, destinées à fonctionner dans des projecteurs d'illumination, la comparaison avec les lampes classiques de même puissance montre un gain d'efficacité, allant de 15 à 35 % suivant la nature et la pression du gaz.

POSITION DE FONCTIONNEMENT - COMPORTEMENT EN DUREE :

Compte tenu de leur prix de revient relativement élevé, on a adopté pour les lampes aux halogènes d'éclairage général une durée double de celle des lampes classiques correspondantes.

Certains types, notamment les lampes cylindriques à cycle d'iode et remplissage argon sous pression modérée ne peuvent fonctionner qu'horizontalement, sous risque de provoquer une séparation entre iode et gaz de remplissage.

En position verticale ou inclinée, il y a en effet un noircissement de la partie supérieure de l'ampoule, montrant que les conditions d'un cycle correct de l'iode ne sont plus correctement remplies.

Covington rend compte de ce phénomène en utilisant la théorie de la diffusion thermique. Sont à considérer : les dimensions de la lampe, la nature et la pression du gaz de remplissage, le coefficient de diffusion de l'halogène dans le gaz, fonction de l'halogène, du gaz et de la température. Le problème n'est pas simple, mais on peut retenir que l'augmentation de la pression et le choix d'un gaz lourd, déjà intéressants du point de vue de l'efficacité lumineuse, vont dans le sens d'un meilleur brassage des constituants dans les lampes cylindriques de faible diamètre (1). C'est ainsi que des lampes à iode du type cylindrique, remplies de Xenon à haute pression, fonctionnent parfaitement dans toutes les positions.

.../...

(1) Deux circonstances semblent intervenir favorablement :

- moins d'écart entre les poids moléculaires ou atomiques des constituants,
- concentration de la zone de convection laminaire autour du filament (voir chap. V) au profit d'une zone turbulente extérieure qui assure le brassage des constituants;

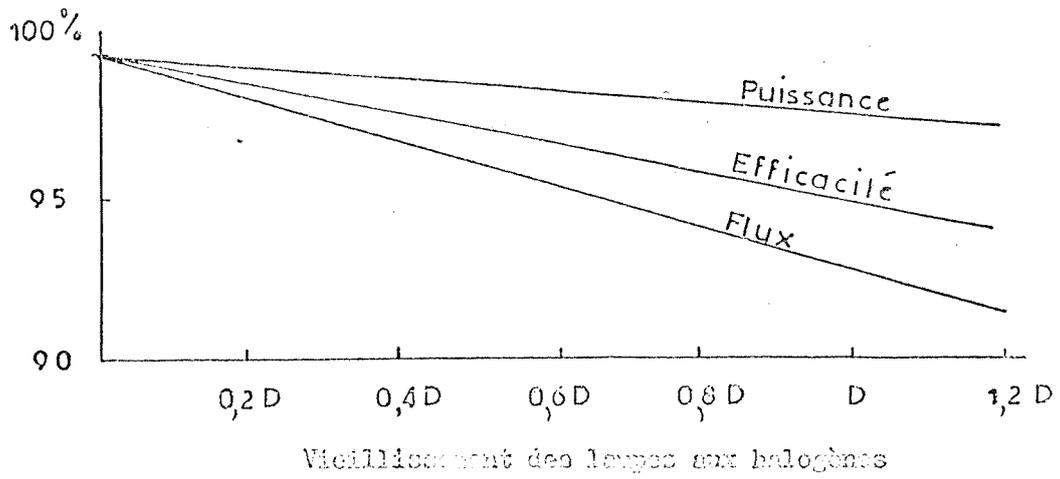


Fig. 42

Le fait que les lampes aux halogènes ne noircissent pas en cours de durée, ne signifie pas que les caractéristiques de ces lampes restent rigoureusement constantes. Il y a augmentation de la résistance du filament et modification de son état de surface, par retour du tungstène, ce qui agit sur l'exitance.

Finalement, la température, la puissance, le flux et l'efficacité lumineuse diminuent légèrement. La figure 42 montre les variations, en valeurs relatives, pour un type de lampe de 500 W prévu pour une durée de 2 000 heures.

Pour que les lampes aux halogènes aient un comportement satisfaisant, il faut prendre certaines précautions dans leur manipulation et éviter de les toucher à main nue. La moindre trace de matière grasse déposée à leur surface peut être en effet à l'origine d'un phénomène d'altération du quartz, se manifestant par des taches constituant une amorce de dévitrification.

LAMPES AUX HALOGENES EN VERRE DUR :

L'utilisation de composés halogénés à base de brome demandant une température moins élevée que l'iode pour donner un cycle correct (250° seulement pour le minimum), a rendu possible la fabrication de lampes aux halogènes avec ampoules en verre (type "extra-dur"). Nous en verrons un exemple dans le chapitre consacré aux lampes de projection. Ces lampes ont des caractéristiques moins bonnes que les lampes de quartz. Elles présentent néanmoins l'avantage important dans cette catégorie de l'absence de noircissement en cours de durée.

.../...

B A S E S T H E O R I Q U E SBIBLIOGRAPHIE

- Vocabulaire International de l'Eclairage - Publication CIE n° 17 (1970)
- Traité de Pyrométrie Optique - G. RIBAUD - 1931 - Paris - Revue d'Optique
- The characteristics of tungsten filaments as functions of temperature
JONES & LANGMUIR - Gen. El. Rev. 30 - 1927 - 310
- The properties of tungsten and the characteristics of tungsten lamps
FORSYTHE & WORTHING - Astrophys. Journal 61 - 1925 - 146
- Physische Eigenschaften van Wolfram by hoge Temperaturen
ZWIKKER - Dissertatie - Amsterdam 1925
- The effect of end losses on the characteristics of filaments of tungsten
and other materials
LANGMUIR - MAC LANE & BLODGETT - Phys. Rev. 35 - 1930 - 478
- Einfluss der Strahlungsschwärzung auf die Lichtausbeute bei Leuchtkörpern
LAX & RUNGE - Zts. Techn. Phys. 6 - 1925 - 317
- The Emissivity of Tungsten Ribbon
DEVOS - Dissertatie - Amsterdam 1953
- Characteristics of coiled filament in incandescent lamps
FONDA & VERNON - J. O. S. A. 22 - 1932 - 223
- Convection and conduction of heat in gases
LANGMUIR - Phys. Rev. 34 - 401 - 1912
- Evaporation of tungsten under various pressures of argon
FONDA - Phys. Rev. 31 - 260 - 1928
- Amélioration de l'efficacité lumineuse des lampes à incandescence
GEISS - Rev. Techn. Philips 6 - 333 - 1941
- Rate of evaporation and heat dissipation of a heated filament in a gaseous atmosphere
ELENBAAS - Philips - Res. Repts 18 - 147 - 1963
- The tungsten transport through the Langmuir layer
ELENBAAS - Philips - Res. Repts 22 - 5 - 1967
- The Langmuir Film Model in incandescent lamps
COVINGTON - Ill - Eng. 63 - 134 - 1968
- The temperature distribution in gas-filled lamps
J. FITZGERALD & H. HORSTER - Rev. Tech. Philips - Tome 32 - 206 - 1971

- The burn-out mechanism of incandescent lamps
HORSTER, KAUER & LECHNER - Rev. Tech. Philips - Tome 32 - 155 - 1971
- Krypton filled large incandescent lamps
THOURNET - ANDERSON - KAUFMAN - National Conference IES - 1969
- Les lampes à incandescence - Aspects théoriques et pratiques des questions de durée de vie
J. CAHEN - RGE - 74 - 649 - 1965
- Hot to cold pressure ratios in tungsten halogen lamps
COVINGTON - Ill - Eng. 65 - 654 - 1970
- Lampes à incandescence contenant de l'iode
VAN TIJEN & BALDER - Rev. Techn. Philips 23 - 234 - 1962
- Gas phase thermal diffusion separation in regenerative cycle lamps
COVINGTON & GREEN - National Conference IES - 1970
- The optimum operating gas pressure for incandescent tungsten filament lamps
COATON - LIGHT - Res. and Techn. 1 - 2 - 1969
- Le papillotement des sources de lumière
BOUFA - Rev. Techn. Philips - 6 - 302 - 1941
- Ein-und ausschaltenlinien von Gluchlampen
EXALTO & V.O. WHEEL - Lichttechnik - Tome 8 - 343 - 1956
- EXALTO - documentation Philips non publiée
- Hot spot burnout of tungsten filaments
COVINGTON - Journal IES Vol.2 Page 372 - 1973
- Hot spots and their effect on the lives of incandescent lamps
DAWSON - NELSON - RADZELOVAGE & SELL - Journal IES Vol.2 Page 381 - 1973
- A concept for the burning-out mechanism of an incandescent tungsten wire
HORSTER - KAUER - LOCHNER - Journal IES Vol.1 Page 309 - 1972
- Failure of incandescent tungsten filaments by hot spot
GROWTH - HARVEY - Journal IES - Vol.3 Page 295 (1974)
- Heat and mass transport-gas filled incandescent lamps
FISHER - FITZGERALD - HORSTER - Journal IES - Vol.4 Page 271 - 1975
- Calculation of the radial tungsten transport in cylindrical gas filled incandescent lamps
ALMER & DE RIDDER - Journal IES - Vol.8 Page 31 (1976)

CHAPITRE X

LA FABRICATION DES LAMPES A INCANDESCENCE

LE FILAMENT

Le filament sous forme spiralisée, ou bispiralée, constitue le coeur de la lampe à incandescence.

On a choisi le tungstène parce que ce métal offre, comme nous l'avons vu, l'avantage essentiel du point de fusion le plus élevé : 3650 K. Il présente également des caractéristiques positives pour la fabrication : résistivité pas trop basse, faible tension de vapeur, résistance à la traction et ductilité satisfaisantes.

Le tungstène est un métal anciennement connu (1783), et tungsten, en langue suédoise, signifie "pierre dure". On considère qu'il vient sur la Terre, au trentième rang dans l'ordre de l'abondance. Il n'existe jamais libre, mais le plus souvent sous forme de wolframite (Fe Mn W O_3) ou de sheelite (Ca W O_4). On le trouve dans de nombreuses régions du monde.

L'utilisation du tungstène dans l'industrie de l'éclairage ne représente qu'une faible partie des débouchés (1,5% seulement aux U.S.A. par exemple).

.../...

Document PHILIPS

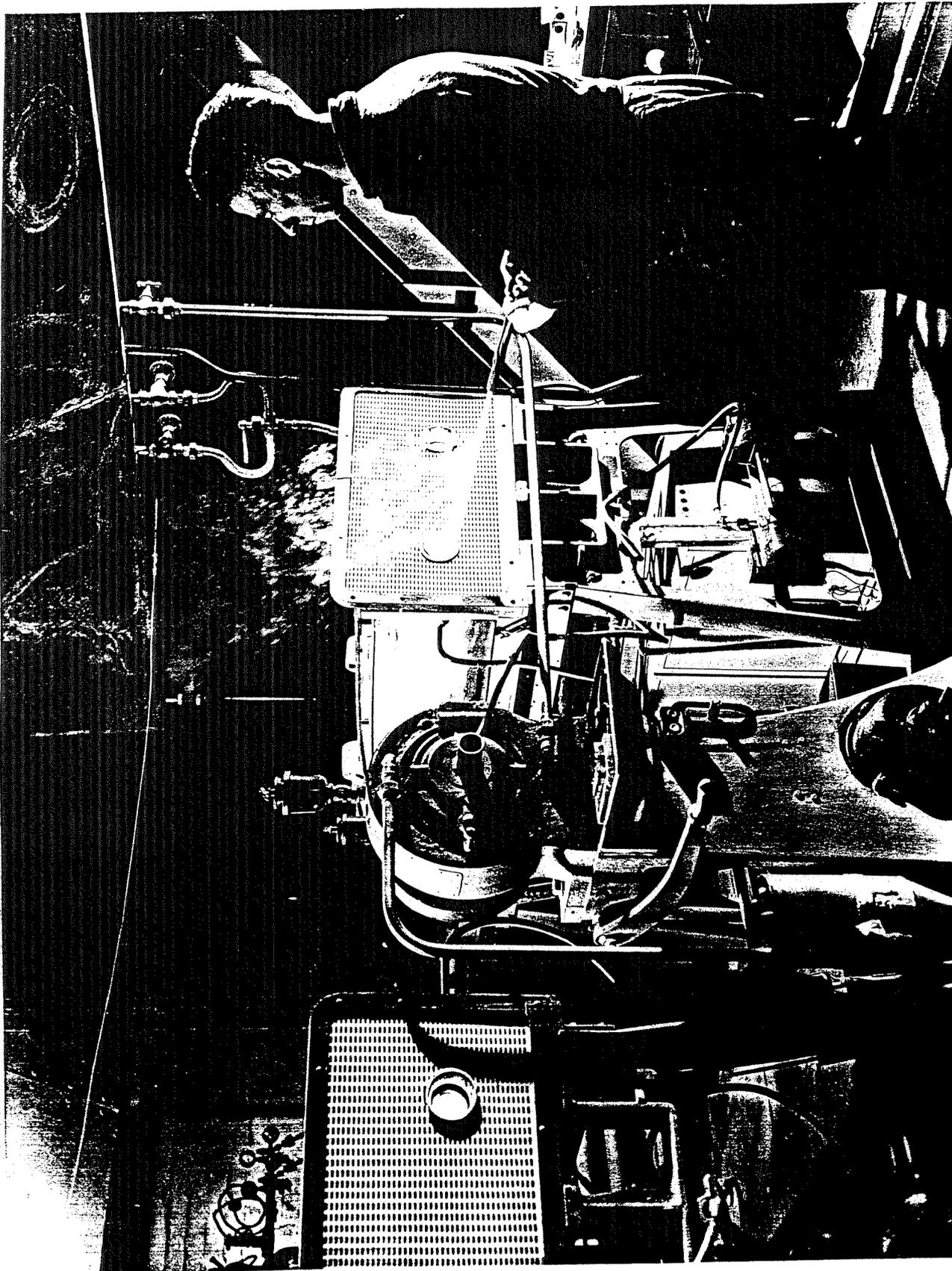


Fig. 43 - Préparation des barreaux de tungstène
(Four et machine à marteler)

C'est surtout sous forme d'alliages notamment pour la fabrication des aciers à haute résistance qu'il est employé en grande quantité. Il a été considéré pendant la dernière guerre comme métal "stratégique".

Pour l'éclairage et l'électronique on a besoin d'un métal pur dont l'obtention pose un problème difficile. La purification par fusion n'est en effet pas possible, faute de creusets appropriés. Seul, le carbone pourrait supporter la température nécessaire mais le métal serait contaminé.

C'est par transformation chimique à partir d'une wolframite suffisamment riche que l'on aboutit au tungstène sous forme d'une poudre brune constituée de grains d'une finesse déterminée. Parmi les intermédiaires, nous citerons le tungstate de potassium ou de sodium (obtenu par action de potasse ou de soude) l'acide tungstique (par action d'acide chlorhydrique) et l'oxyde de tungstène $W O_3$ qui doit être très pur.

L'oxyde tungstique, placé dans des nacelles métalliques, est réduit dans des fours à hydrogène. C'est avant cette réduction que sont ajoutées en quantité très faible ce que l'on appelle des "dopes" dont le rôle ultérieur sera très important.

Pour obtenir un métal ductile à partir de la poudre de tungstène, on fait appel à une métallurgie de frittage. Celle-ci est conduite de la façon suivante :

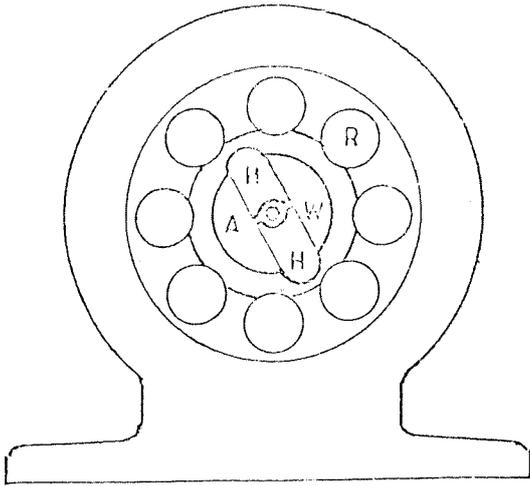
La poudre est d'abord constituée en barreaux par compression dans des presses hydrauliques. Le passage en nacelles dans des fours à hydrogène à une température de 1000 - 1200°C donne déjà une certaine consistance à ces barreaux dont la densité atteint 10 - 12 (Fig. 43).

L'étape suivante est décisive en ce qui concerne la cohésion. Elle a pour but d'obtenir la cristallisation en portant le lingot à une température voisine du point de fusion. On fait passer un courant intense (plus de 2000A) dans le lingot placé verticalement, sa partie inférieure plongeant dans un bac à mercure - le tout en atmosphère d'hydrogène. La densité passe à 17-18 car il y a une rétraction du lingot de 10 à 15% par rapport à la longueur initiale. Ce traitement contribue à éliminer les dernières impuretés.

Le barreau ayant subi cette opération de "sintering" reste néanmoins cassant. Après l'avoir porté à 1600°C, on le soumet à un martelage mécanique à cadence très rapide qui l'arrondit et l'allonge progressivement. De 15mm de côté au départ il est transformé en une tige de 1mm de diamètre avec une structure cristalline fibreuse d'une ductilité suffisante pour le tréfilage.

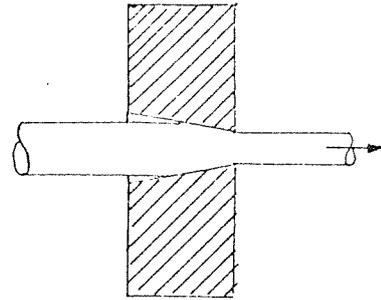
Les filières sont en carbure de tungstène puis en diamant. Le graphite colloïdal est utilisé comme lubrifiant. Bien entendu des recuits sont indispensables pour éliminer les forces de tension développées pendant ces opérations. Un décapage et un nettoyage éliminent les traces de graphite.

La densité est finalement de 19,2 à 19,3, ce dernier chiffre correspondant au métal massif.



MARTELAGÉ

Fig. 44



TREFILAGE

Fig. 45

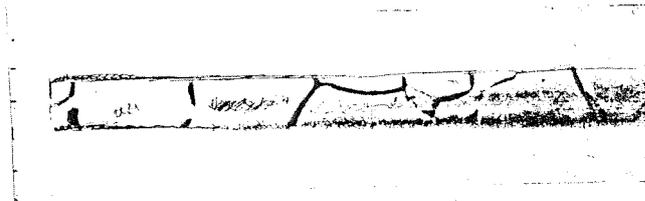


Fig. 46 Structure après cristallisation
(Tu pur)



Fig. 47 Structure après cristallisation
(Tu dopé;)

La figure 44 montre le schéma d'une marteleuse. Le barreau de tungstène est au centre. Les deux éléments H du marteau viennent frapper W en tournant, chaque fois que le contact avec les rouleaux R les rapprochent.

La figure 45 schématise une filière. Il est remarquable que la ductilité du filament augmente au cours des opérations ce qui permet de réduire progressivement la température et évite une recristallisation gênante.

A titre indicatif, un lingot de tungstène de 1,5 kg peut fournir 1000km de fil en diamètre 0,01mm. La tolérance sur le diamètre est de 1%.

Les filaments sont classés, non par leur diamètre, mais par leur poids p correspondant à une longueur de 200mm.

Entre d et p, on a la relation :

$$d = 0,01814 \sqrt{p}$$

LE DOPING

Le comportement des filaments est en rapport étroit avec la structure cristalline du tungstène et il est fondamental de contrôler cette dernière.

L'examen microscopique des filaments de tungstène pur, résultant du tréfilage des barreaux de tungstène laisse apparaître une structure fibreuse, les cristaux étant très allongés.

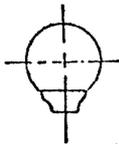
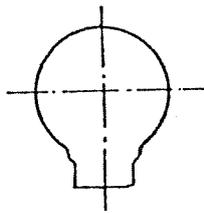
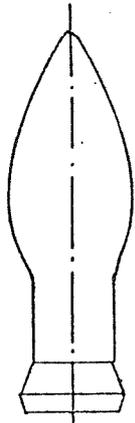
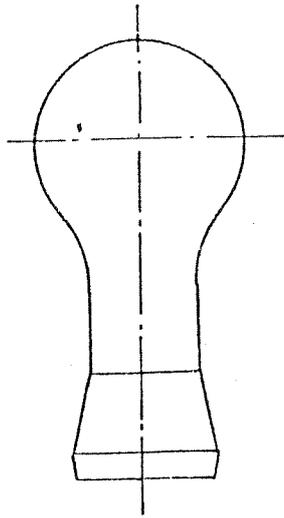
Après chauffage à haute température, il se produit une recristallisation. Les cristaux d'abord petits, se développent progressivement et peuvent remplir la totalité de la section transversale des filaments (Fig. 46). A ce moment, le fil devient fragile car les forçés de jonction entre cristaux constituent le point faible de la structure cristalline, très résistante par ailleurs. Il peut y avoir un véritable glissement des cristaux les uns par rapport aux autres qui sera à l'origine d'un affaissement (sagging effect) tout à fait préjudiciable à la tenue des filaments.

Le but du doping est d'influencer le régime de cristallisation. Les dopes sont des traces de certains corps, comme les composés alcalins KCl et K₂SiO₃ dont le rôle a été mis en évidence empiriquement. Ajoutés avant réduction à l'oxyde tungstique, ils provoquent une recristallisation différente (Fig. 47). On constate la présence de cristaux qui se chevauchent, avec des liaisons en "dents de scie" beaucoup plus favorables à la résistance transversale des filaments.

Non seulement la présence des dopes, mais la nature des traitements auxquels sont soumis les filaments après spiralage et double spiralage, sont très importants quant à leur comportement ultérieur. Nous y reviendrons plus loin.

LES AMPOULES

Les ampoules destinées à la fabrication des lampes d'éclairage général bénéficient d'une production de masse, susceptible d'assurer le prix de revient le plus bas.



EBAUCHES D'AMPOULES USUELLES

Un progrès décisif dans cette production a été la mise au point des machines à ruban (ribbon machines) qui fournissent des ampoules à une cadence horaire allant jusqu'à 50 000 ampoules. Leur utilisation suppose des besoins considérables chiffrés en millions d'unités.

Les groupes de production travaillent de façon continue. Toutes les opérations depuis l'arrivée des matières premières jusqu'à l'emballage des ampoules terminées sont automatiques.

Au départ, de très grands silos renferment les constituants de base : sable, soude, chaux, dolomite, feldspath et déchets de verre (les "culots").

Par l'intermédiaire de balances automatiques ces éléments passent dans des tambours mélangeurs rotatifs avant de gagner des fours chauffés au gaz et donnent naissance à un ruban continu de verre incandescent qui passe entre deux cylindres refroidis par eau. Le ruban est alors entraîné par une courroie perforée constituée de plaques métalliques. En progressant, il rencontre une chaîne continue de têtes de soufflage qui viennent au-dessus de lui dans une position qui coïncide avec les trous de la courroie. Un jet d'air, la fermeture d'un moule rotatif entraîné par une chaîne qui est, elle, au-dessous de la courroie, assurent la formation de l'ampoule. Après refroidissement par projection d'eau, le moule s'ouvre et se dégage. Les ampoules, séparées du ruban, sont recueillies et transmises à une bande porteuse vers un four de recuit. Celui-ci assure une décroissance progressive de la température, opération indispensable pour éliminer les tensions dans le verre. Contrôlées au passage les ampoules vont directement à l'emballage. Les culots de verre sont renvoyés aux silos.

Pour la fabrication d'ampoules en quantités plus limitées impossible à réaliser avec les machines "ribbon" on dispose de machines circulaires équipées d'un certain nombre de têtes de soufflage (16 par exemple) utilisant chacune une paraison, prélevée sur un filet de verre formé de façon continue et découpée par un dispositif à ciseaux. On peut adapter ces machines à la production simultanée d'ampoules de formes différentes mais demandant le même poids de verre. Cadence possible : 4000 ampoules à l'heure.

La fig. 48 montre des ébauches d'ampoules telles qu'elles sortent des verreries. Leur forme est en rapport avec le mode de scellement qui sera adopté pour la fabrication des lampes.

L'industrie des lampes consomme également beaucoup de tubes de verre.

Ces tubes sont formés par passage de verre liquide dans une ouverture annulaire avec insufflation d'air dans l'axe. Le calibre désiré est obtenu par étirage avant solidification.

Les ampoules de petites dimensions sont fabriquées couramment à partir de tubes ou de tubules.

La partie inférieure du tube est fondue pour permettre soufflage et moulage. La partie supérieure est séparée à l'aide d'un diamant et d'un courant d'air froid.

Les verreries fournissent en grandes quantités des tubes tels que : tubes à rebord et queusots dont nous verrons le rôle dans la fabrication des montures.

Il est évident que la nature des verres utilisés en prévision des assemblages et des scellements des différentes pièces, n'est pas indifférente. Les caractéristiques de fusion notamment doivent être considérées attentivement.

Pour les lampes chauffant beaucoup (plus de 350° par exemple) il est indispensable de faire appel à des verres durs dit borosilicates ou même à des verres extra-durs tels que les aluminosilicates.

Au-dessus de 500° c'est le quartz qui est nécessaire. On devrait d'ailleurs parler de silicé fondue et non de quartz qui est la forme cristalline. La production de quartz a lieu uniquement sous forme de tubes et la technologie de fabrication des lampes est plus complexe.

Les ampoules de verre dont il vient d'être question sont des ampoules en verre soufflé. L'industrie des lampes fait appel également à la technique du verre pressé, pour des lampes qui constituent, en fait de véritables appareils d'éclairage. Ces lampes résultent de l'assemblage de deux éléments séparés, en verre dur, moulés sous pression dans des coquilles métalliques. Les unités de production correspondantes mettent en oeuvre des moyens considérables supposant une demande très importante.

LES CULOTS

Le culot est défini comme la partie de la lampe qui sert à la fixer sur une douille et à la relier électriquement.

Le culot a été longtemps et uniquement une pièce métallique scellée à l'ampoule à l'aide d'un ciment, c'est quelquefois à l'heure actuelle la base même de l'ampoule, formée à cet effet.

La normalisation des culots, nécessaire pour garantir l'interchangeabilité est systématique. Elle est du domaine de la Commission Electro-technique Internationale (C.E.I.).

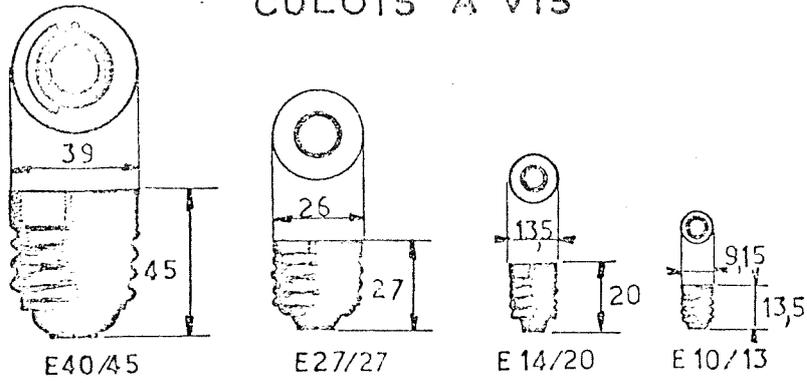
Il existe une assez grande variété de culots justifiée par les dimensions et les caractéristiques différentes des lampes. Néanmoins, pour des raisons historiques, on trouve certaines dualités par exemple le culot baïonnette (type SWAN) utilisé au Royaume-Uni et en France et le culot à vis (type EDISON) ailleurs.

Signalons un code de la C.E.I. pour identifier les culots. Il définit un symbole constitué en premier lieu par une ou plusieurs lettres suivies d'un nombre variable indiquant approximativement la dimension principale (en général le diamètre) par sa valeur en millimètres :

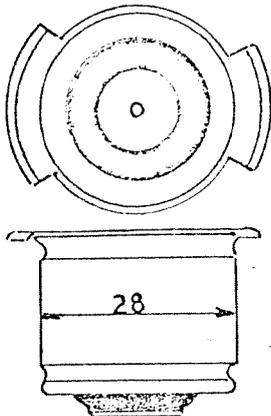
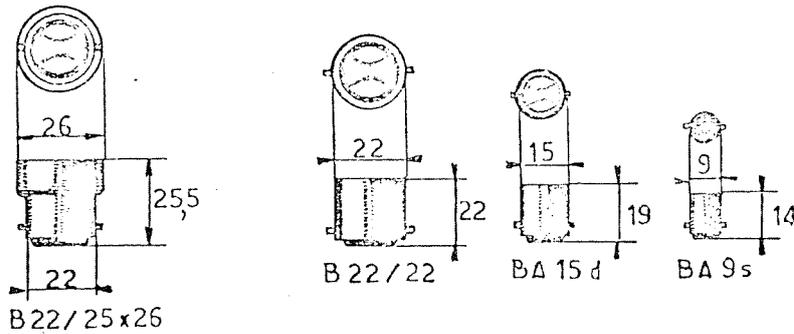
- B culot baïonnette (modèle le plus courant : B 22)
- BA culot baïonnette automobile (exemple : BA 15)
- E culot à vis (exemples : E 14 - E 27 - E 40)
- G culot à deux ou plusieurs broches (exemple G 13 le chiffre donnant l'écartement des broches d'axe en axe)
- K culot à câbles
- P culot "préfocussé"

.../...

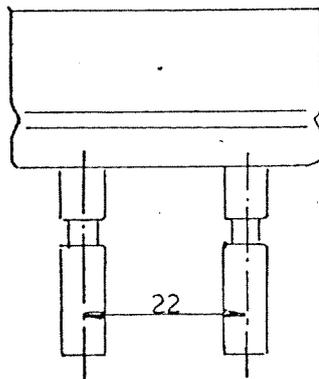
CULOTS A VIS



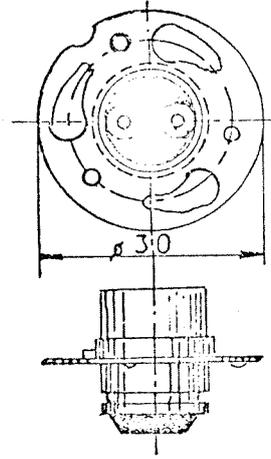
CULOTS BAÏONNETTE



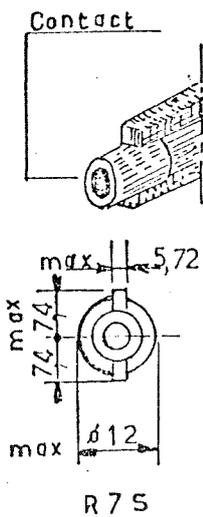
P28s
CULOT A AILETTES



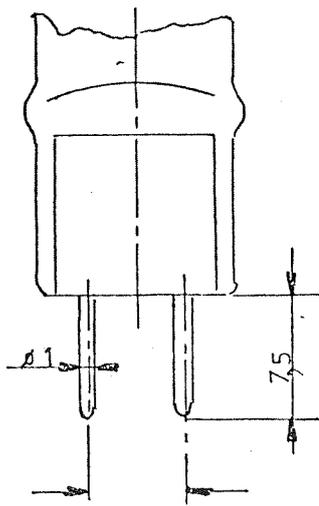
G22
CULOT A BROCHES



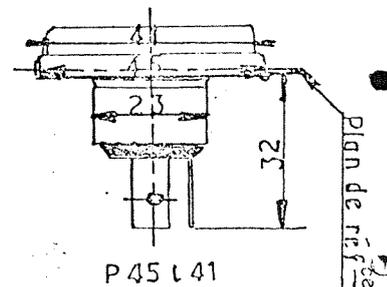
P15d
CULOT A COLLERETTE



R7S
CULOT POUR LAMPES



G6,35 Echelle 2/1
CULOT A BRANCHES POUR



P45 L41
CULOT POUR LAMPE AUTO
(TYPE EUROPEEN)

R culot à contact encastré
 S culot cylindrique lisse
 W n'indique pas un culot véritable mais une "base" de lampe sur laquelle les contacts électriques sont réalisés directement par les entrées de courant.

La désignation complète d'un culot peut faire intervenir un deuxième chiffre indiquant la hauteur et séparé du premier par une barre oblique. Eventuellement, un troisième chiffre séparé par le signe x indique le diamètre de la collerette, c'est-à-dire, de la partie la plus large au contact de l'ampoule.

EXEMPLE : culot B 22d/25x26

Si l'on veut préciser le nombre des contacts on ajoute une lettre minuscule ; pour un contact : s; pour deux contacts : d; pour trois contacts : t.
 EXEMPLE : BA 21d

Les culots "préfocussés" répondent au problème du centrage des filaments dans les lampes dites "de projection". Ces culots présentent en effet une possibilité de réglage au moment de la fabrication. Ils déterminent un plan de référence et une orientation. Il existe différents modèles, soit qu'une chemise extérieure coulisse sur une chemise interne fixée à l'ampoule soit qu'un anneau glisse sur un culot lisse avant d'être soudé.

Les culots sont le plus souvent en laiton ou laiton nickelé. Pour les lampes courantes on utilise également l'aluminium. La partie isolante qui maintient les plots de contact au fond du culot est en "vitrite", simple verre teinté à l'oxyde de manganèse.

Les lampes aux halogènes en quartz exigent des culots en céramique à moins que l'on fixe deux broches dans le "pincement" du quartz qui forme la base de la lampe.

La figure 49 montre les culots usuels à vis ou à baïonnette et, à titre d'exemples, quelques culots particuliers.

LE SPIRALAGE

Le filament d'une lampe à incandescence présente dans les ampoules des formes variées dont la fig. 50 donne des exemples. La première opération est "le spirilage".

Le spirilage est effectué dans des ateliers spécialisés sur des boudineuses. Ces machines enroulent suivant un pas déterminé, le filament autour d'un mandrin dont le diamètre est également déterminé. Les paramètres du spirilage sont, comme nous l'avons vu, les rapports $K = \frac{D}{d}$ et $G = \frac{p}{d}$

Le mandrin est en acier ou en molybdène.

La vitesse d'enroulement peut aller jusqu'à 30 000 tours-minute. On distingue spirilage continu le plus rapide et spirilage discontinu, parce qu'il ménage les parties droites entre boudins successifs. Les montages de la fig. 50 permettent de voir des spirales obtenues suivant les deux procédés. Le premier est applicable aux lampes courantes utilisant des fils relativement fins, le second aux lampes puissantes et aux lampes de basse tension.

Le contrôle du spirilage sur les boudineuses peut être fait à vue directe à l'aide d'une optique de microscope et d'un dispositif stroboscopique.

Un procédé d'analyse intéressant est de saisir une image instantanée à l'aide d'un flash électronique. L'image est vue par l'intermédiaire d'un écran de télévision à mémoire, c'est-à-dire qu'elle est affectée d'une rémanence d'une quinzaine de secondes.

Le traitement des spirales est indispensable pour assurer leur tenue ultérieure dans les lampes. Il est indispensable de les fixer, c'est-à-dire d'éliminer les tensions dues au spirilage. Cette opération a lieu en les faisant passer, de façon continue dans des fours électriques en atmosphère de "forming gas". Le forming gas est un mélange d'hydrogène et d'azote.

Les filaments simplement spiralés sur mandrin acier passent dans un four à 1000°C en atmosphère de forming gaz humide pour éliminer les traces de graphite. Après coupure à la longueur désirée, l'élimination des mandrins est faite à l'aide d'acide chlorhydrique concentré n'attaquant pas le tungstène.

Les spirales sont ensuite soumises à un traitement de sintering, dans des nacelles placées dans des fours à 1500 - 1800°C pendant un temps déterminé pour assurer la précristallisation nécessaire.

L'atmosphère est de forming gas sec.

Pour les filaments doublement spiralés le mandrin est en molybdène et peut être conservé jusqu'à la fin du traitement avant d'être éliminé à l'aide d'un mélange sulfonitrique. La première fixation a lieu en continu, dans une atmosphère de forming gas humide à 1100°C. Elle est suivie d'un passage en forming gas sec à 1650°C qui assure la précristallisation.

Le contrôle des spirales terminées, au point de vue longueur et aspect est effectué sur des tables lumineuses. Après prélèvement sur lots, certaines spirales sont pesées et leur résistance électrique mesurée. Au besoin quelques lampes - tests sont fabriquées.

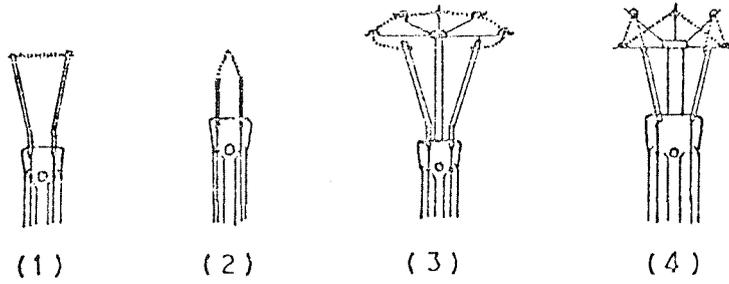
Les spirales sont alors mises à la disposition des ateliers de fabrication des lampes.

LES ENTREES DE COURANT

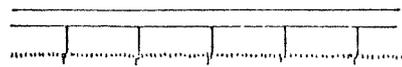
Les entrées de courant constituent des pièces délicates dans le sens qu'elles doivent traverser les ampoules sans nuire à leur étanchéité. Elles posent donc le problème des passages métal-verre.

Pour les lampes d'éclairage général on utilise des entrées de courant faites de trois éléments soudés électriquement sur des machines automatiques :

- Elément interne : fil de cuivre, de cuivre nickelé, d'acier nickelé ou de nickel pur.
- Elément de passage : fil de dumet. Le dumet est un ferro-nickel recouvert de cuivre ; dans la proportion de 20 à 30% en poids, présentant un coefficient de dilatation très voisin de celui du verre.

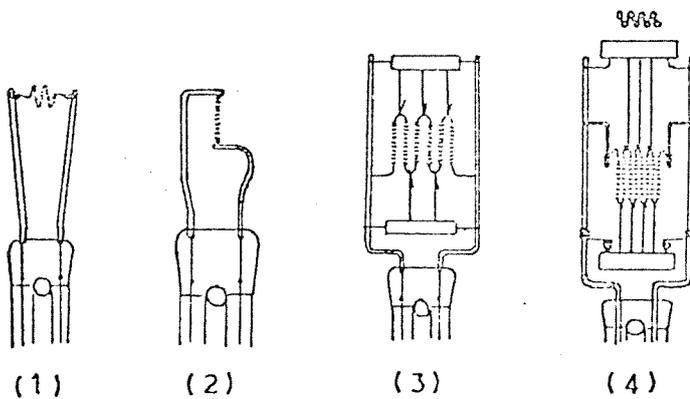


Lampes courantes - Montages (1, rectiligne, 2, en V, 3, en couronne, 4, en feston)

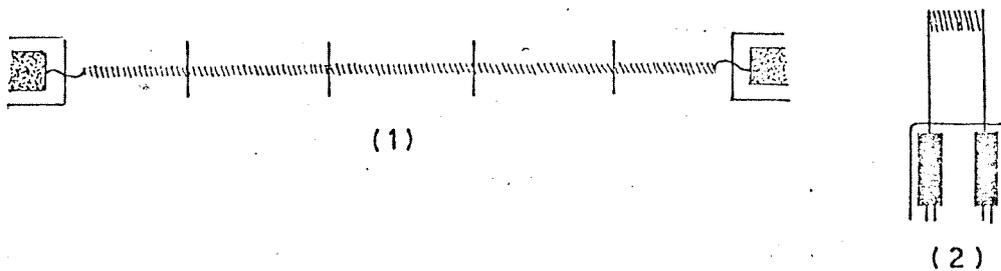


(5)

Montage linéaire



Lampes type "Projection" (1. Double spirale - 2. axiale - 3. grille - 4. double grille)



Lampes aux halogènes - (1 rectiligne - 2 plan)

EXEMPLES DE MONTAGES DE FILAMENTS

Notons que le dumet est boraté par trempage dans un bain de borate de soude pour améliorer l'adhérence avec le verre.

- Elément externe à l'ampoule : un fil de cuivre.

Entre dumet et fil de cuivre on interpose souvent un fusible (fil fin de ferro-nickel ou de monel qui est un alliage de cuivre, de nickel et de fer) à titre de protection contre les arcs en fin de durée (voir chapitre VI).

Lorsque le passage doit être assuré dans le verre dur dont le coefficient de dilatation est inférieur à celui du verre ordinaire, les entrées sont en tungstène enrobé de verre ou en molybdène.

Le passage dans le quartz ne peut s'accommoder d'aucune dilatation. La solution adoptée est basée sur l'emploi d'un ruban très mince de molybdène (épaisseur d'environ 25 microns) dont la dilatation transversale est donc très faible. C'est le cas des lampes aux halogènes (fig. 50).

LES GETTERS

Un élément peu apparent mais qui permet la fabrication à cadence rapide des lampes à incandescence est le getter.

Les getters sont des substances introduites dans les ampoules afin d'éliminer les impuretés résiduelles. Ils combattent le noircissement en cours de durée.

L'action des getters est d'abord chimique et due à la présence de phosphore qui réagit au premier allumage. L'action à long terme résulte de phénomènes d'adsorption.

Dans les lampes à vide les getters comportent des produits tels que la cryolithe (Na_3AlF_6) qui, vaporisée avec le phosphore forme un léger film sur la paroi interne des ampoules et provoque avec le tungstène vaporisé des composés moins opaques que le tungstène pur. Dans ces lampes le "flashing" qui est la première mise sous tension de la lampe en cours de fabrication contribue de façon importante par la décharge électrique et l'ionisation qui en résulte, à la résorption des impuretés.

Dans les lampes à gaz, des getters de longue durée - au zirconium- améliorent le fonctionnement par une action prolongée d'adsorption. Ils peuvent être pulvérisés sur les pieds de lampe, constitués d'un fil enroulé autour d'une entrée de courant ou d'une petite plaquette fixée sur la monture. Ils ne jouent leur rôle que si leur température est suffisamment élevée. Ils ont surtout de l'intérêt pour les lampes chauffant beaucoup et menacées par le noircissement.

FABRICATION DES MONTURES

La fabrication des différentes lampes à incandescence demande un certain nombre d'opérations qui, avec quelques variantes, répondent au même objet et nécessitent des machines semblables.

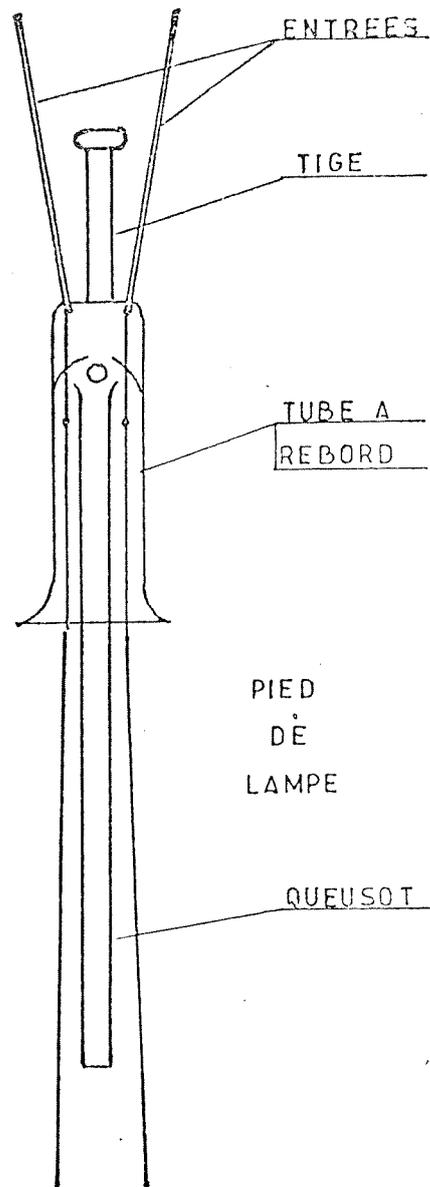
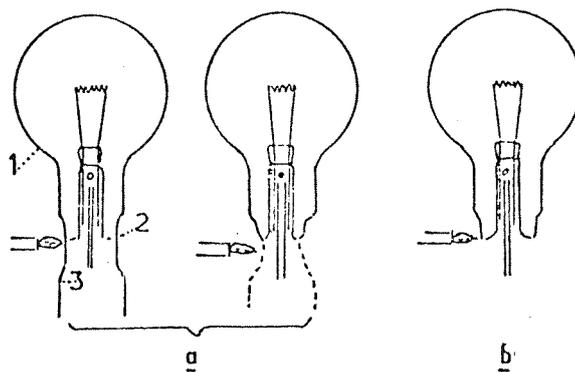


Fig. 51



Differents modes de scellement

a) Drop seal. b) Rim seal

Fig. 52

Pour des lampes de très grande série, les différentes machines, reliées entre elles par un système transfert, constituent une unité de fabrication.

La première opération est l'assemblage des pieds de lampes qui, par l'intermédiaire des entrées de courant ou à l'aide d'un montage particulier soutiennent le filament. La fig. 50 montre différentes dispositions du filament.

Le pied d'une lampe Standard résulte de l'association des éléments suivants :

- un tube à rebord ou évasement,
- un queusot,
- une tige-support,
- deux entrées de courant.

Disposés au moment voulu sur une machine circulaire équipée de brûleurs à gaz ces éléments sont rendus solidaires par le pincement résultant de l'aplatissement du tube à rebord. La fig. 51 montre un pied de lampe.

Le queusot, grâce à un jet d'air comprimé est débouché dans le pincement avant solidification de celui-ci. On distingue l'orifice latéral qui en résulte.

Le filament des lampes courantes est pincé par les extrémités recourbées des entrées de courant, directement sur la spirale. C'est la fixation la plus simple.

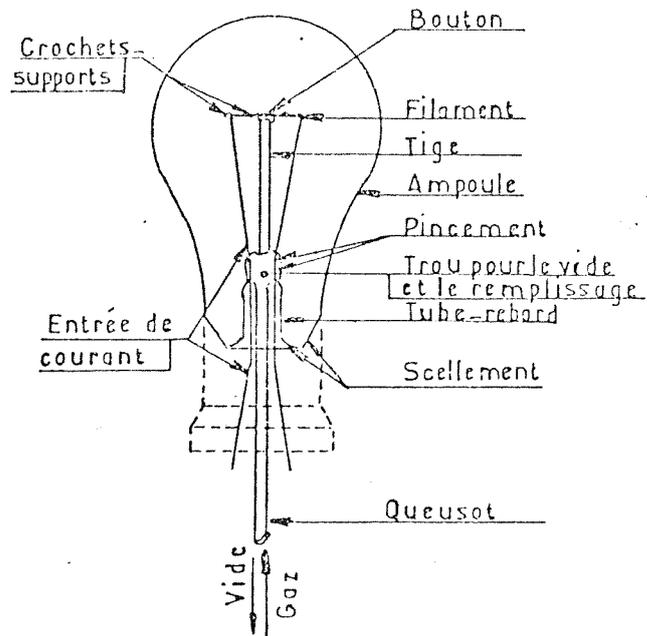
Un filament plus gros doit être soudé sur une partie droite. Pour améliorer le contact, des éléments de mandrin sont souvent introduits dans les extrémités des spirales de façon à faire la soudure sur cette partie renforcée.

Il est important que l'écartement des entrées de courant et la disposition automatique des crochets-supports par les machines "à piquer" soient réglés de façon à ce que le filament soit convenablement tendu, sans excès, pour ne pas écarter les spires.

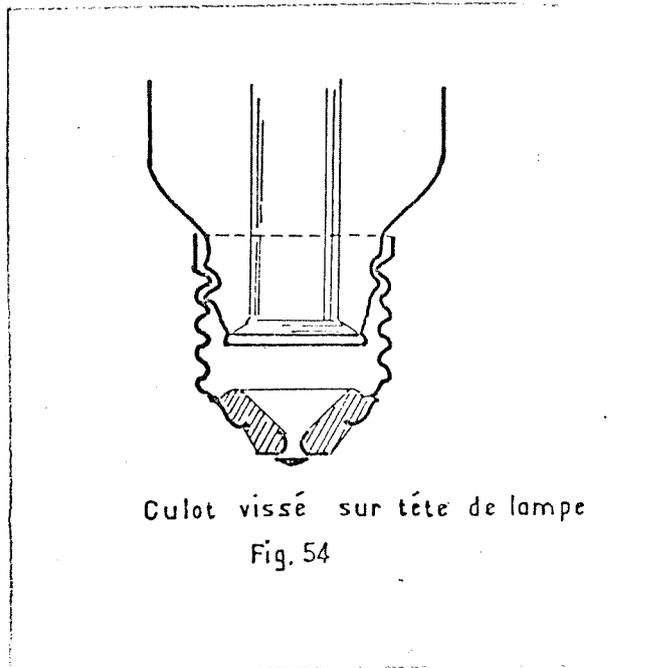
LE SCELLEMENT

Le scellement du pied sur l'ampoule par l'intermédiaire du rebord fait appel à des méthodes différentes suivant le type d'ampoule. En (a) sur la figure 52, est schématisée la méthode "drop-seal" utilisée sur les groupes destinés aux lampes standard. L'ébauche d'ampoule a un col; les montures coiffées de l'ampoule tournent dans la flamme des brûleurs à gaz qui provoquent le resserrement du col et la soudure verre sur verre. La partie inférieure de l'ampoule tombe.

Fig. 53



Monture et Ampoule



Culot vissé sur tête de lampe

Fig. 54

La méthode (b) dite "rim-seal" est appliquée à des ampoules qui ont leur forme définitive. La soudure a lieu bord à bord, ce qui suppose une adaptation plus précise des dimensions.

Après le scellement, l'ampoule reste en communication avec l'extérieur par son queusot. (fig. 53).

POMPAGE - REMPLISSAGE - FLASHING

Le pompage des lampes a lieu sur les positions successives d'un plateau circulaire. Les canalisations de vide, branchées sur des pompes à palettes, exercent leur action par les orifices d'un plateau fixe sur lequel le plateau mobile tourne en faisant joint étanche, la jonction n'étant établie que lorsqu'il y a coïncidence des orifices du plateau mobile et du plateau fixe.

Pendant le vidage, les ampoules sont chauffées (à 450°C maximum) pour assurer leur dégazage. Lorsqu'il s'agit de lampes à vide les stations successives des lampes assurent un vide progressif (vide de 30 à 50 microns) qui serait insuffisant sans l'action des getters et du flashing. Avec les lampes à gaz on peut agir plus vite et plus efficacement en réalisant l'expulsion de l'air par un véritable lavage des ampoules avec un jet d'azote répété à plusieurs reprises. Le remplissage gazeux a lieu sur les dernières positions qui sont en communication avec des canalisations alimentées en argon-azote.

Une pression de remplissage de 650 à 700 Torr est couramment pratiquée. Légèrement inférieure à la pression atmosphérique, elle permet la fermeture du queusot, dès ramollissement par les brûleurs, sans intervention mécanique. On peut néanmoins prévoir une telle intervention, ce qui permet d'augmenter la pression de remplissage et donc offre l'avantage signalé dans les précédents chapitres.

Le premier allumage des lampes présente une importance particulière due à son rôle dans l'élimination des impuretés. Les lampes à vide sont soumises à une tension progressive allant jusqu'à 150% de la tension nominale. Les lampes à gaz sont soumises à une tension plus lentement progressive et ne dépassant pas 75% de la tension nominale, compte-tenu, cette fois-ci, du risque d'arc.

LE CULOTAGE

Le culot des lampes courantes est fixée à l'aide d'un ciment à base de résines polymérisables déposé sur le rebord interne des chemises métalliques. Une cuisson par brûleurs à gaz à une température de 200°C environ, assure le durcissement. Les ciments sont "améliorés" par la présence de silicones, et certains, résistant mieux à une température élevée sont applicables aux lampes les plus puissantes.

Les entrées de courant sont, pendant le culotage, introduites dans les trous des pastilles du culot ou dans les encoches latérales des chemises.



Document PHILIPS

Fig. 55 - Photomètre digital

L'opération terminale consiste à les couper et les souder.

Le point de fusion des soudures ordinaires (étain-plomb) dépasse 180°C. En portant au maximum la teneur en plomb d'une soudure (plomb-antimoine), on peut admettre 300°C.

Pour améliorer la tenue des culots sur les lampes qui chauffent beaucoup dans leurs conditions d'utilisation, on doit renoncer à l'emploi de ciments et réaliser une véritable fixation mécanique. On pratique "l'agrafage" du culot dans des alvéoles ménagées dans le verre des ampoules au moment du scellement ou, mieux encore, le vissage du culot (E 27 ou E 40) sur un filetage formé dans le verre de la base de la lampe (fig. 54).

LES CONTROLES

La qualité des lampes à incandescence est sous la dépendance comme l'ont montré les chapitres précédents, de multiples influences qu'il est nécessaire de maîtriser à chaque instant. Le contrôle doit donc avoir un caractère permanent.

Sur les groupes automatiques des lampes d'éclairage général, on prévoit des dispositifs dont la fonction est d'éliminer, au moment voulu, les éléments non conformes. Le contrôle automatique sur toutes les lampes terminées, d'une caractéristique bien déterminée et facilement mesurable comme l'intensité de courant sous tension nominale, signale immédiatement toute anomalie ou déviation.

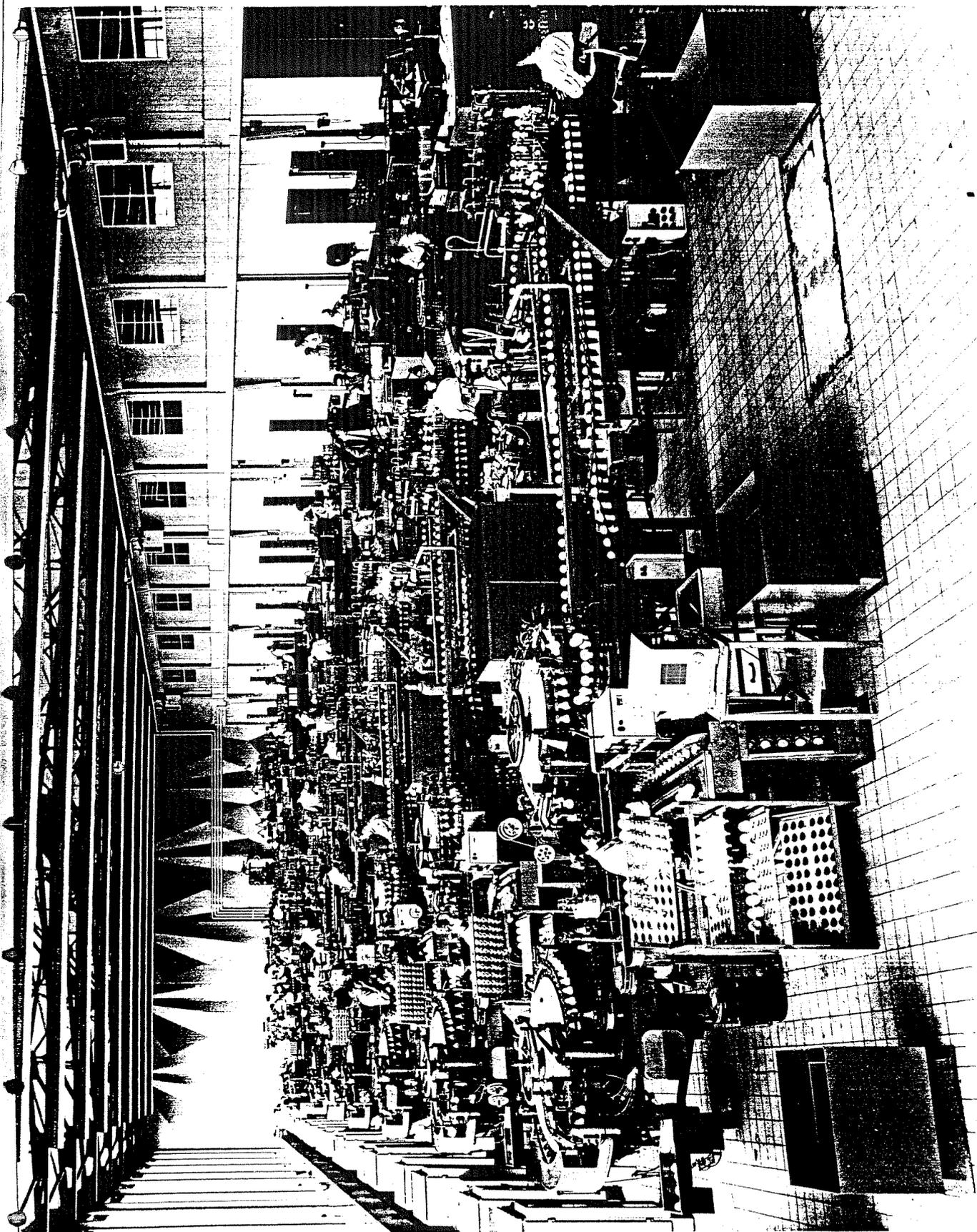
Ces contrôles seraient insuffisants s'ils n'étaient pas complétés par des prélèvements méthodiques pour des examens détaillés. Un laboratoire de photométrie spécialement équipé et établissant constamment des procès-verbaux d'essais constituent un rouage aussi indispensable dans une usine de lampes que les ateliers de fabrication.

Après vérification de l'aspect, des dimensions et de la résistance mécanique (notamment par application d'un couple de torsion sur les culots) les lampes sont mesurées au point de vue électrique et photométrique.

Il est possible d'augmenter la rapidité des mesures et de réduire les manipulations avec des appareil spécialement adaptés à ce travail.

La fig. 55 montre un photomètre automatique qui, dix secondes après introduction de la lampe dans le cube photométrique imprime sur un formulaire : la tension d'essai, (à 0,1% près) la puissance, le flux lumineux et l'efficacité lumineuse de la lampe.

L'essai de durée, évidemment indispensable, est malheureusement long et immobilise sur de nombreuses rampes les lampes prélevées à cet effet. Des allumages et des extinctions périodiques sont prévues. On pratique couramment une surtension de 10% sur les lampes de durée 1000h pour accélérer les essais. On applique alors pour calculer la durée réelle sous voltage nominal la formule exponentielle donnée au chapitre VII et admise dans les cahiers des charges.



Document PHILIPS

Fig. 56 - Groupes de fabrication entièrement automatisés

Pour montrer les progrès accomplis dans la production des lampes d'éclairage général signalons qu'en 1921 il fallait cinq hommes pour produire 300 à 400 lampes à l'heure. Cinquante ans plus tard, les groupes automatiques comme ceux de la figure 56 ne demandent plus que réglages et surveillance pour en fournir 3000.

QUELQUES OPERATIONS PARTICULIERES

Les ampoules claires ne sont pas les seules dont on approvisionne les unités de fabrication. Il y a une production importante de lampes à ampoules diffusantes colorées ou réfléchissantes.

- AMPOULES DIFFUSANTES

Une opération très courante est le dépolissage interne des ampoules par solutions acides. Il faut deux passages successifs. Le second passage a pour but de régulariser et d'adoucir la surface du verre, attaquée au premier passage. On élimine ainsi des sillons, visibles au microscope, qui pourraient être à l'origine d'une fêlure.

Pour obtenir une diffusion plus complète de la lumière, on pratique couramment le poudrage interne des ampoules qui donne à celles-ci un aspect opalisé aussi satisfaisant que le verre autrefois traité dans la masse, tout en absorbant moins de lumière. Le poudrage est à base de silice (appliqué par voie gazeuse ou par procédé électrostatique) ou de blanc de titane (appliqué par voie liquide).

- AMPOULES COLOREES

Des dépôts poudrés à base de colorants minéraux conduisent, suivant la même technique, à des lampes à lumière colorée. Il faut noter que les couleurs émises résultant de nombreuses réflexions à l'intérieur des ampoules sont peu saturées. Seule, une coloration par transmission permet d'obtenir une répartition spectrale plus sélective. Si les lampes poudrées conviennent bien aux illuminations, il y a un besoin pour des ampoules filtrantes de divers types. On peut citer les ampoules en verre jaune (au sulfure de cadmium) pour les lampes destinées aux projecteurs des automobiles.

Il existe une technique de coloration partielle des ampoules réservée notamment à la partie frontale des lampes à réflecteur incorporé. Elle est basée sur la diffusion dans la masse du verre d'un colorant déposé extérieurement, après passage dans un four à température de ramollissement.

- AMPOULES REFLECHISSANTES

Un poudrage blanc interne recouvrant une partie seulement des ampoules peut constituer un réflecteur diffusant.

On réalise ainsi des lampes (voir chapitre XI), qui, en position verticale, culot en haut émettent beaucoup plus de lumière vers le bas que vers le haut.

.../...

Le poudrage est obtenu par ascension d'un liquide contenant la poudre en suspension. Cette ascension est limitée à la hauteur requise dans les ampoules retournées.

Pour obtenir une réflexion spéculaire, on peut déposer une couche métallique. On transforme ainsi une lampe en un véritable projecteur dont le miroir est inaltérable. Un nombre croissant de lampes sont fabriquées de cette manière.

On peut métalliser à l'aide d'un bain d'argenture classique c'est-à-dire par réduction d'une solution argentifère (solution ammoniacale de nitrate d'argent) à l'aide de glucose, ou déposer une couche d'aluminium sous vide. Cette dernière technique est basée sur l'emploi de petits cavaliers d'aluminium placés sur une grosse spirale de tungstène que l'ampoule vient coiffer. Après vide sous une cloche la spirale est portée électriquement à 1300°C ce qui provoque la vaporisation des cavaliers et le dépôt sur l'ampoule. Le vide doit être meilleur que 1,5 micron .

Si l'argenture ou la métallisation sous vide ne peuvent être limitées à la partie des ampoules formant réflecteur on doit décaper le superflu à l'aide de solutions à base d'acide chromique pour l'argent, de soude pour l'aluminium.

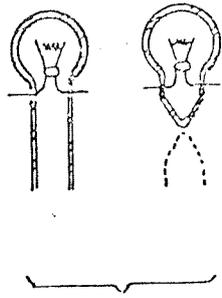
La technique de la vaporisation sous vide a conduit à la réalisation très évoluée d'ampoules à "miroir dichroïque". En déposant des couches ultra-minces d'épaisseur interférentielle, on obtient des miroirs réfléchissants la lumière, mais laissant passer l'infrarouge, ce qui permet de limiter les effets calorifiques de l'éclairage intensif par lampes à réflecteur incorporé. On vaporise alternativement sur l'ampoule des couches d'épaisseur $\frac{\lambda}{4n_1}$ d'un sel métallique ayant un indice de réfraction n_1 élevé, et

des couches d'épaisseur $\frac{\lambda}{4n_2}$ d'un sel métallique ayant un indice de réfraction n_2 faible, afin d'obtenir une réflexion privilégiée pour une bande spectrale centrée sur la longueur d'onde λ .

Avec deux valeurs de λ on peut couvrir pratiquement le spectre visible. Il y a donc deux systèmes interférentiels successifs et 17 couches déposées au total. On peut utiliser comme sels métalliques le sulfure de zinc d'indice $n_1 = 2,3$ et le fluorure de magnésium d'indice $n_2 = 1,35$.

Ces sels sont disposés à l'intérieur d'une cloche à vide dans des coupelles chauffées électriquement. Le procédé s'applique à la partie parabolique des lampes en verre pressé.

.../...



SCELLEMENT DES LAMPES
MINIATURES
_TYPE : BUTT-SEAL

Fig. 57

LAMPES MINIATURES

La fabrication des lampes miniatures bénéficie d'un certain nombre de simplifications. Nous signalerons les principales.

Il n'y a pas de pied de lampe. Le scellement dit " butt-seal " est schématisé sur la figure 57. Un tube directement scellé sur l'ampoule fixe les entrées de courant et sert de queusot.

Les entrées de courant, d'une seule pièce, sont en dumet. Leur écartement dans l'ampoule est maintenu par une simple perle de verre.

LAMPES AUX HALOGENES

Pour le travail du quartz une température de 1800°C doit être atteinte, ce qui demande un équipement de brûleurs alimentés en oxygène-hydrogène.

Le passage des entrées de courant est obtenu par pincement du tube de quartz sur un ruban très mince de molybdène.

La pureté des matériaux utilisés est d'autant plus nécessaire que les getters si importants dans la fabrication des lampes classiques, ne sont pas utilisables. Le pompage doit donc être poussé pendant un temps relativement long et exige des pompes à diffusion.

L'introduction d'iode suppose la mise en communication des queusots avec un récipient contenant des cristaux d'iode et chauffé à une température donnant la tension de vapeur convenable, la lampe étant bien entendu, à une température légèrement supérieure. Il faut attendre la mise en équilibre.

Le brome et ses dérivés peuvent être introduits avec le gaz de remplissage ce qui est un gros avantage. Le remplissage gazeux : Argon, Krypton ou Xénon à une pression de plusieurs atmosphères fait appel à la technique de la cryogénie. Les lampes, mises en communication par le queusot avec un volume déterminé de gaz à la pression normale, sont plongées dans l'azote liquide. Il y a condensation du volume de gaz désiré donc contrôle de la pression à la température normale.

Le culotage est particulier. Si des culots sont rapportés ils sont agrafés (culots métalliques) ou soudés à l'aide de silicate de soude (culots céramique).

Les fils qui viennent des plaquettes de molybdène et qui sont généralement aussi en molybdène sont soudés électriquement sur le métal des culots.

Lorsque la base de la lampe c'est-à-dire le pincement du quartz forme culot, les deux fils de molybdène sont remplacés par deux tiges minces mais très rigides qui constituent les broches. C'est le cas de nombreuses lampes de projection.

B I B L I O G R A P H I E

-
- METALS AND METALLOIDS - Espe - Pergamon Press - 1966
 - LA PREPARATION DES METAUX COMPOSES PAR COMPRESSION ET CEMENTATION
Fast - Rev. Techn. Ph 4 - 521 - 1939
 - TUNGSTEN IN THE LAMP INDUSTRY
Moritz - Ill. Eng. 48 - 397 - 1953
 - LA FONCTION DES SUBSTANCES ADDITIONNELLES DANS LE TUNGSTENE POUR FILAMENTS
Meyering et Rieck - Rev. Techn. Ph 19 - 113 - 1957/58
 - OBSERVATION VISUELLE PROLONGEE SUR LA BOUDINEUSE
Einramhof - Rev. Techn. Ph 22 - 237 - 1960/61
 - L'AUTOMATISATION D'UNE BOUDINEUSE A L'AIDE DE COMPTEURS ACTIFS
Rev. Techn. Ph. Einramhof et Havas - 21 - 310 - 1959/60
 - FROSTING OF GLASS - HAAMSTRA ET ZYLSTRA
Rev. Techn. ph. 29 - 142 - 1967/68
 - MULTILAYER INTERFERENCE FILM REFLECTORS
Schoeder - Beesley - Makurlec - Ill - Eng. 57 - 596 - 1962
 - PHOTOMETRE DIGITAL POUR LAMPES A INCANDESCENCE
Rev. Techn. Ph. 23 - 242 - 1961/62

LES DIFFERENTES FAMILLES DE LAMPES

CHAPITRE XI

LES LAMPES D'ECLAIRAGE GENERAL

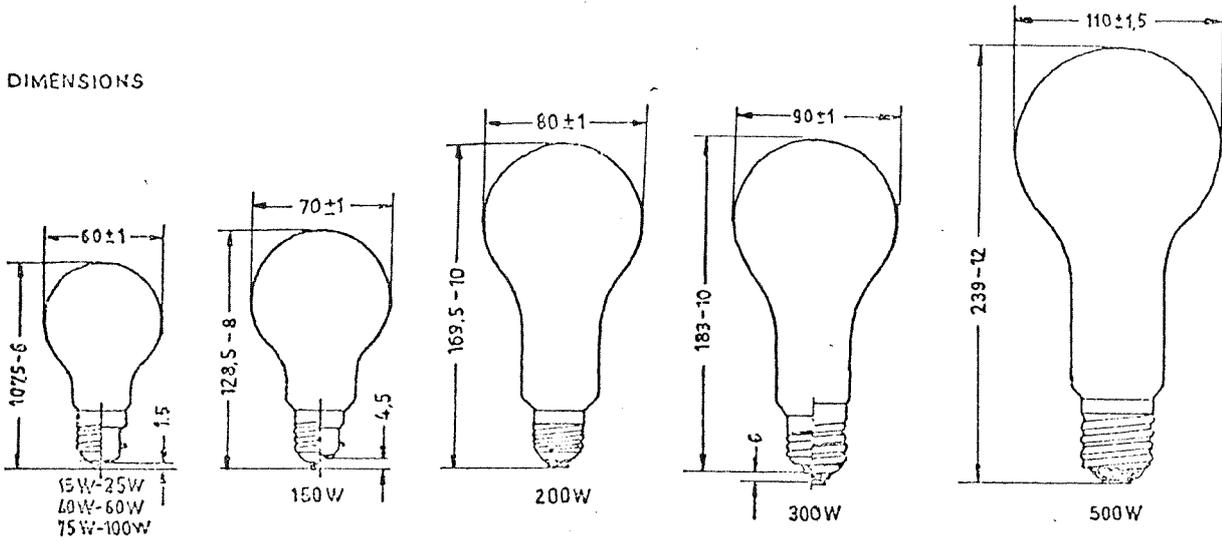
Dans le domaine de l'éclairage général les lampes à incandescence ont conservé une position très importante, malgré l'apparition des lampes à décharge et des lampes fluorescentes qui les ont supplantées pour éclairer les rues, les magasins et les usines. Elles sont restées sans rivales pour l'éclairage de nos habitations et on les trouve encore un peu partout comme auxiliaires là où on leur a préféré d'autres sources. On doit leur reconnaître des qualités spécifiques déterminantes : faible encombrement, émission d'une lumière blanche et stable, allumage immédiat, fonctionnement possible sous basse tension, facilité d'installation. Elles sont, en outre, peu coûteuses. Ces avantages font oublier leur efficacité lumineuse modeste.

La première lampe à incandescence d'éclairage général est la lampe piriforme dite "STANDARD" ou "NORMALE" mais à côté d'elle et avec des filaments semblables on trouve des lampes de formes diverses pour la lustrerie et la décoration.

Servent également à l'éclairage général, les lampes à réflecteur incorporé qui donnent une solution unique à de nombreux problèmes.

.../...

DIMENSIONS



LAMPES NORMALES

Fig. 58

LES LAMPES STANDARD

Elles satisfont aux prescriptions admises internationalement : celles de la Publication N° 64 de la Commission Electrotechnique Internationale, reprises par la Norme NFC 72-100 de l'U.T.E. pour la FRANCE.

Ces textes spécifient " Les conditions techniques auxquelles les lampes doivent satisfaire et les méthodes d'essai à employer pour établir les qualités des lampes et leur interchangeabilité sur une base scientifique ainsi que la sécurité de leur utilisation, tant en ce qui concerne un lot particulier que l'ensemble de la production d'un fabricant afin de maintenir une communauté d'intérêts entre l'acheteur et le fabricant".

Elle s'applique aux lampes ayant :

- une puissance nominale comprise entre 25 et 1500 Watts
- une tension nominale comprise entre 100 et 250 Volts (1)
- une durée moyenne de 1000 heures
- une ampoule claire ou dépolie intérieurement
- un culot normalisé à vis ou à baïonnette.

Un additif à cette publication (publié en 1962) envisage le cas des lampes d'une durée de 2500 heures utilisées dans certains pays.

Le tableau XXI donne les dimensions des lampes STANDARD - Figure 58.

On remarque que les puissances 75W et 1500W sont indiquées ^{en} caractères italiques, ces puissances devant disparaître dans l'avenir.

TABEAU XXI - DIMENSIONS (en millimètres) DES LAMPES "STANDARD"

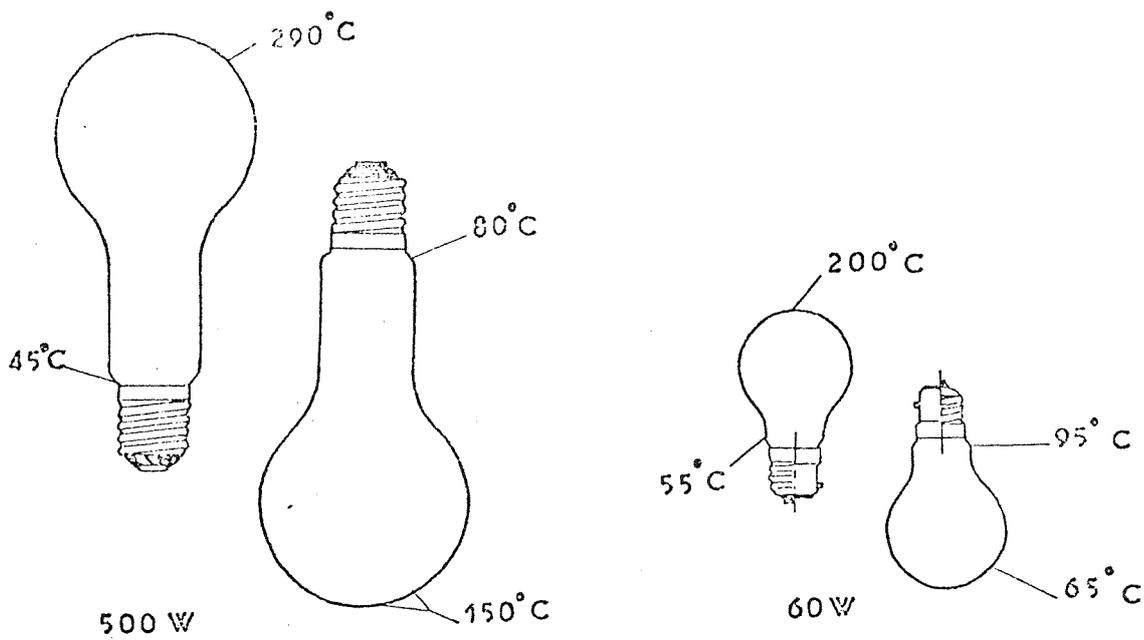
Puissance nominale W	Culots pour lesquels les dimensions sont indiquées (a)	Diamètre			Hauteur du centre lumineux (b)		Hauteur totale maximale (c)	
		Max. de l'ampoule	Col		Nominale	Tolérance	Culot à baïonnette	Culot à vis
			min.	max. (b)				
25	B22/25 × 26 ou E27/27	62	32	34	A déclarer par le fabricant	± 3 (c) ± 4 (c) ± 4 (c)	108,5	110
40		62	32	34			108,5	110
60		62	32	34			108,5	110
75		62	32	34			108,5	110
100		62	32	34			108,5	110
150		82	32	40			165	166,5
200	E27/27	82	32			166,5		
300	E27/30	91			133	± 4 (c)		184
300	E40/41	91			138	± 4 (c)		189
300 (d)	E40/45	111,5	49		178	± 5		240
500		111,5	49		178	± 5		240
1 000 (d)		151,5	49		225	± 8		309
1 000		131,5	49		202	± 6		275
1 500		171,5	49		250	± 8		344

(a) Dans le cas où les culots mentionnés ci-dessus seraient remplacés par d'autres culots, les hauteurs totales maximales et les hauteurs des centres lumineux indiquées peuvent être changées en conséquence.

(b) S'applique seulement aux lampes munies de culots à baïonnette.

(c) Pour les lampes dépolies intérieurement, cette tolérance est de ± 5 mm.

(d) Ces modèles ne sont pas fabriqués en France.



Températures sur les ampoules
Fig 59

La tendance des fabricants a toujours été de réduire les dimensions des lampes. Pour cette raison suel un maximum a été indiqué pour les diamètres et hauteurs totales.

Les dimensions doivent être néanmoins suffisantes pour que la température au culot n'atteigne pas une valeur excessive. La mesure de température est faite par une méthode normalisée à partir d'un manchon en laiton épousant étroitement le culot, dont la base est entourée d'un couple thermoélectrique.

Les échauffements (écarts de température par rapport à l'ambiance) maximaux tolérés sont les suivants :

- 120° - Lampes de puissance < 60W - E 27
- 125° - Lampes de puissance < 60W - B 22
- 130° - Lampes de puissance > 60W - E 27 ou E 40
- 135° - Lampes de puissance > 60W - B 22

Au-dessus de 150W les culots baïonnette ne sont plus admis par crainte d'un contact insuffisant entre plots de contact et pistons des douilles.

La température des ampoules n'est pas réglementée par la norme. A titre purement indicatif la figure 59 fournit quelques valeurs expérimentales. Celles-ci varient avec la puissance de la lampe et sa position. L'échauffement des ampoules vient surtout du remplissage gazeux (perte dans le gaz-Voir chapitre V) car le verre, très mince, absorbe peu d'infrarouge. Rappelons que l'émission par les filaments de radiations infrarouges de longueur d'onde supérieure à 3 microns est très faible. Les lampes à vide relativement froides supportent sans risque les intempéries lorsqu'elles sont utilisées à l'extérieur.

La Publication 64 fixe les valeurs minimales des flux lumineux nominaux en distinguant lampes à "flux lumineux normal" et lampes à "flux lumineux relevé" - Tableau XXII.

Il faut comprendre que cette seconde catégorie concerne les lampes à filament doublement spiralé qui constituent la série "STANDARD" dans de nombreux pays dont la FRANCE.

.../...

T A B L E A U X X I I

V	W										
	25	40	60	75	100	150	200	300	500	1000	1500
120	220	435	760	1000	1400	2320	3250	5000	8800	18800	30000
	265	495	830	1020	1560						
127	220	425	750	980	1380	2300	3200	4950	8800	18800	30000
	260	490	820	1070	1560						
220	220	350	630	850	1250	2090	2920	4610	8300	18600	29000
	230	415	715	950	1350						
230	220	345	620	840	1240	2070	2900	4580	8250	18500	28800
	230	415	710	940	1340						
240	215	340	610	830	1320	2060	2880	4550	8200	18400	28700
	225	410	700	930	1330						

En-dessous : lampes à "flux relevé"

FLUX LUMINEUX NOMINAUX MINIMAUX D'APRES LA PUBLICATION 64 DE LA C.E.I.

Suivant le voltage et la puissance, les valeurs relatives du flux par rapport aux valeurs initiales ne doivent pas être inférieures aux chiffres ci-dessous : TableauXXIII .

T A B L E A U XXIII

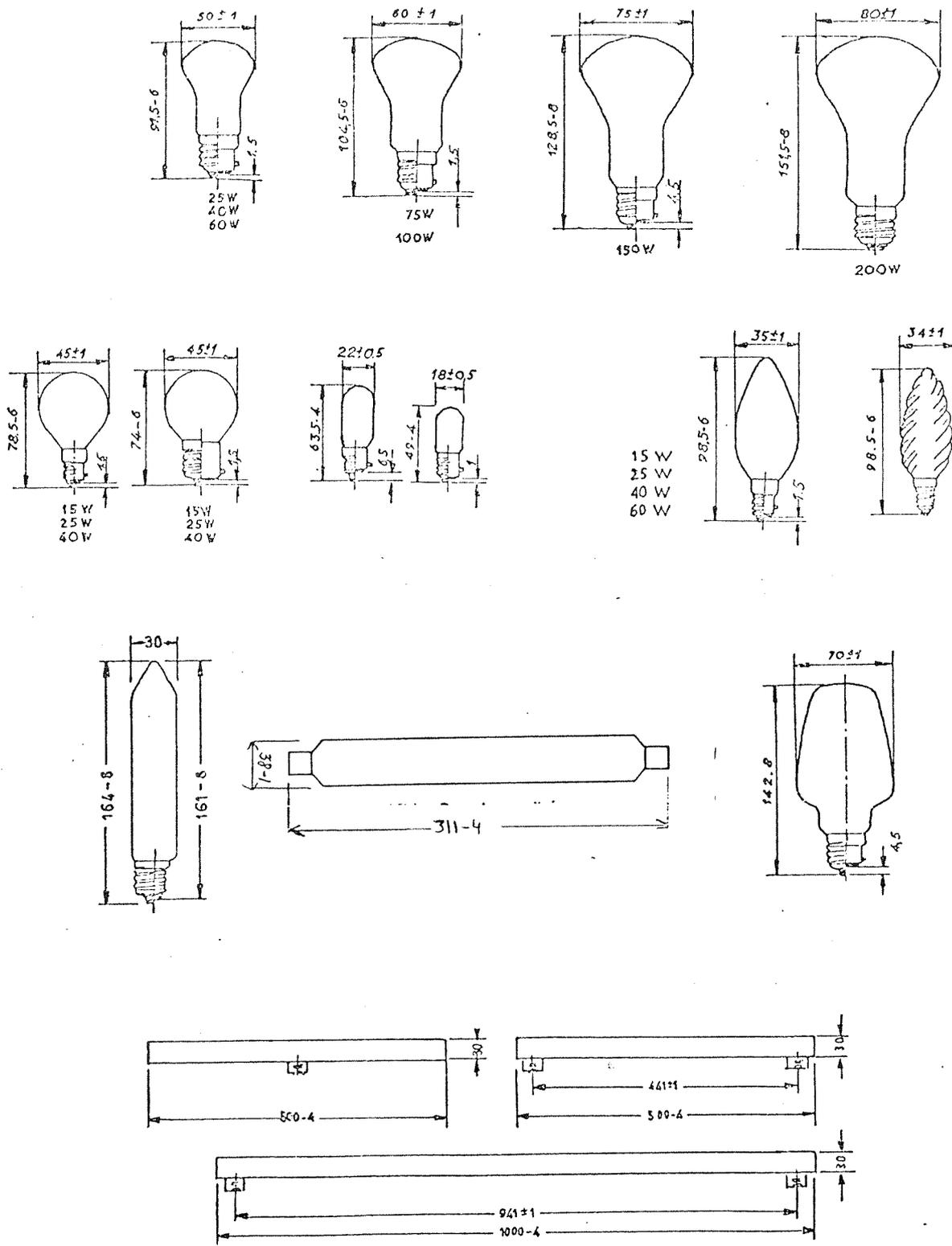
Flux en durée

W	V	
	110 à 150	200 à 250
25	72%	74%
40 à 200	85%	85%
300 à 500	80%	85%
1000	70%	80%
1500	65%	80%

Nous laisserons de côté les autres clauses de la norme qui portent sur des caractéristiques secondaires. Notons toutefois que le marquage d'une lampe doit indiquer obligatoirement :

- * a) - La marque d'origine (marque commerciale),
- b) - Le voltage nominal,
- c) - La puissance nominale.

.../...



LAMPES D'ÉCLAIRAGE GENERAL

FORMES DIVERSES

Fig. 60

Le flux lumineux nominal ne figure pas nécessairement sur la lampe. On doit néanmoins le trouver dans les catalogues et documents commerciaux.

L'ampoule des lampes STANDARD peut être dépolie intérieurement ou opalisée pour éviter la vue directe du filament.

Le dépolissage intérieur n'entraîne qu'une perte de lumière négligeable (1 à 2%) et dans certains pays, la lampe STANDARD est en fait une lampe dépolie. La luminance ne représente plus que le 1/30 environ de celle du filament.

Plus efficace est l'opalisation, qui réduit la luminance à 2 ou 3 cd/cm². Notons néanmoins que cette valeur est encore supérieure à celle qui est admise en éclairagisme pour une source située dans le champ visuel normal : 0,4 cd/cm². L'opalisation qui est obtenue par poudrage interne et voie liquide (voir chapitre X) fait perdre 5 à 7% de lumière.

Les lampes de lustrerie constituent une catégorie toujours très vivante de lampes à incandescence. On les recherche pour l'équipement des luminaires dans lesquels les lampes sont apparentes. On crée encore des formes nouvelles de lampes "flammas" qui témoignent d'un attachement prolongé à un certain style de luminaire. Pour éviter l'inconvénient d'une luminance excessive, ces lampes devraient toujours avoir des dimensions suffisantes.

La figure 60 montre des lampes de formes variées.

Signalons le développement important des lampes à calotte métallisée qui trouvent place dans de nombreux luminaires modernes.

Les lampes de couleurs pour illuminations sont obtenues par poudrage interne des ampoules. Elles doivent être "à vide" pour supporter les intempéries.

LES LUMINAIRES POUR LAMPES A INCANDESCENCE

La spécification N°25 de la CEE (Commission Internationale en vue de l'approbation de l'Équipement Électrique) s'applique "aux appareils d'éclairage à lampes à incandescence pour usages domestiques et analogues". Elle concerne particulièrement les conditions de sécurité, c'est-à-dire la protection contre les chocs électriques ainsi que les prescriptions relatives à la résistance mécanique, à l'échauffement et éventuellement à l'étanchéité des luminaires.

Un point important est la température limite au culot de la lampe dans le luminaire. Un échauffement maximal de 185° est fixé. Tout luminaire doit satisfaire cette condition pour la puissance indiquée et au minimum avec une lampe de 60W (culot B22 ou E27) ou avec une lampe de 40W (culot E14 ou B15).

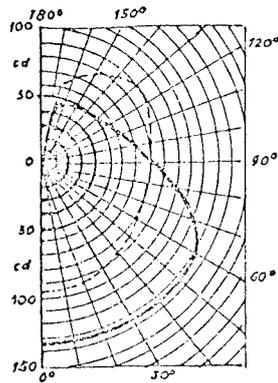
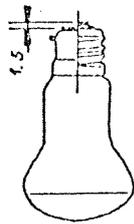


Fig. 61

Lampe poudrée à calotte claire et diagramme des intensités

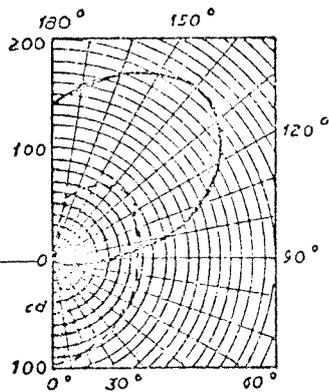
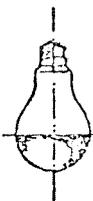


Fig. 62

Lampe à calotte réfléchissante et diagramme des intensités.

On constate dans le tableau XXII la décroissance du flux lumineux, pour une puissance déterminée, lorsque le voltage augmente. La raison en a été donnée dans un précédent chapitre. On relève ce qui semble être une anomalie dans le cas des lampes à flux normal de 25W: un cas inverse c'est que le flux indiqué pour 120 et 127V est le flux d'une lampe à gaz et celui indiqué pour 220 - 230 - 240V le flux d'une lampe à vide.

La Publication 64 fixe les tolérances admises pour les caractéristiques nominales :

- la puissance réelle ne doit pas être supérieure à 103% + 0,5W de la puissance nominale
- si le flux lumineux nominal indiqué est supérieur à la valeur du tableau XXII le flux réel d'une lampe quelconque ne doit pas être inférieur à 93% du flux déclaré
- la durée moyenne ne doit pas être inférieure à 1000 heures (960 heures pour un lot de 20 lampes)
- les durées individuelles ne doivent pas être inférieures à 700 heures.

Les essais de durée peuvent être effectués en surtension (entre 100 et 110%) et les durées réelles sont calculées sur la base de :

$$L_0 = L \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

avec L_0 durée sous tension nominale V_0

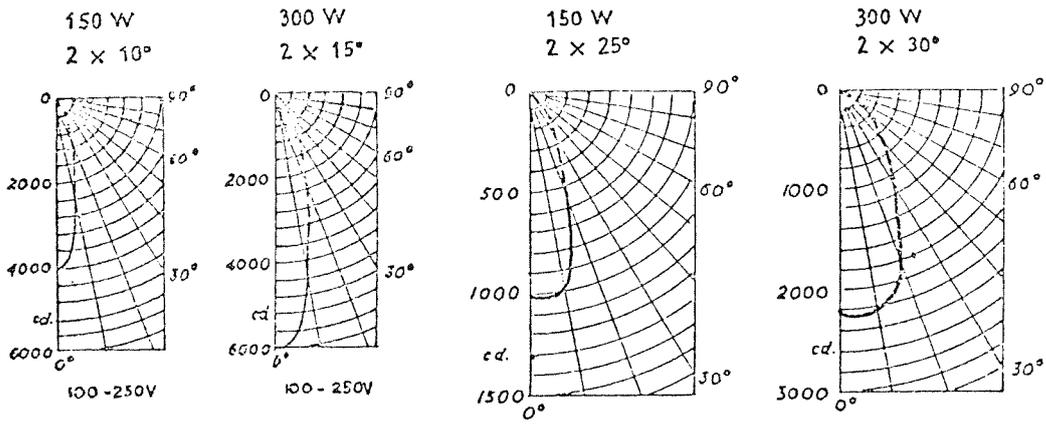
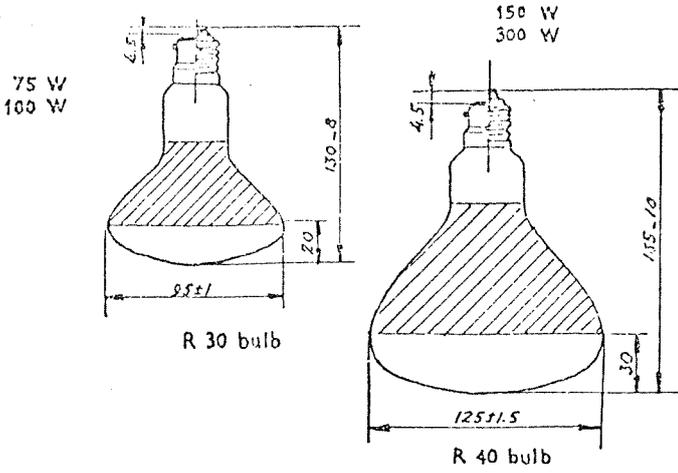
L durée sous tension d'essai V .

L'exposant n est pris égal à 13 pour les lampes à vide et à 14 pour les lampes à gaz.

Le comportement des lampes en durée est contrôlé par une mesure du flux lumineux à 750 heures.

.../...

AMPOULES
EN VERRE
SOUFFLE



AMPOULES
EN VERRE
PRESSE

TYPE INTENSIF

TYPE EXTENSIF

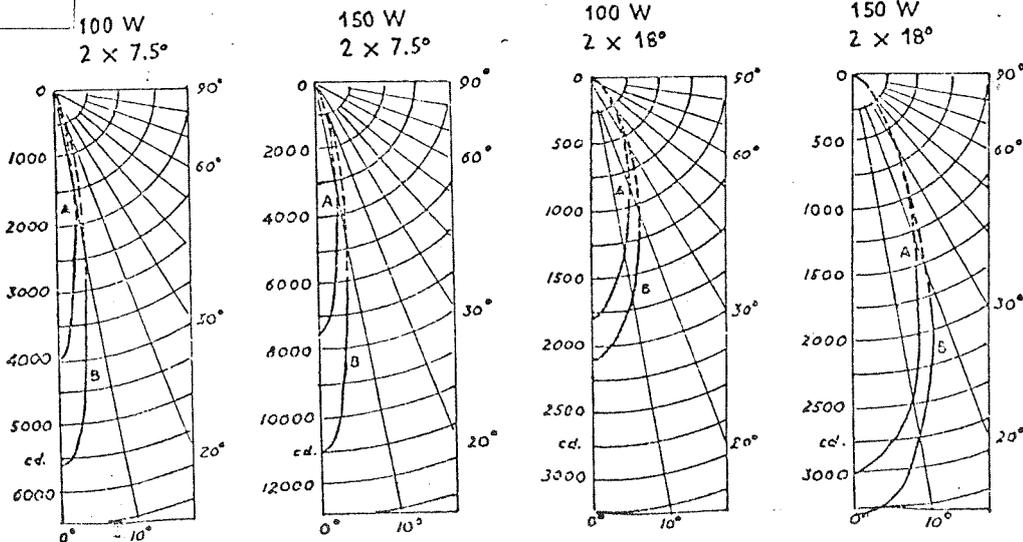
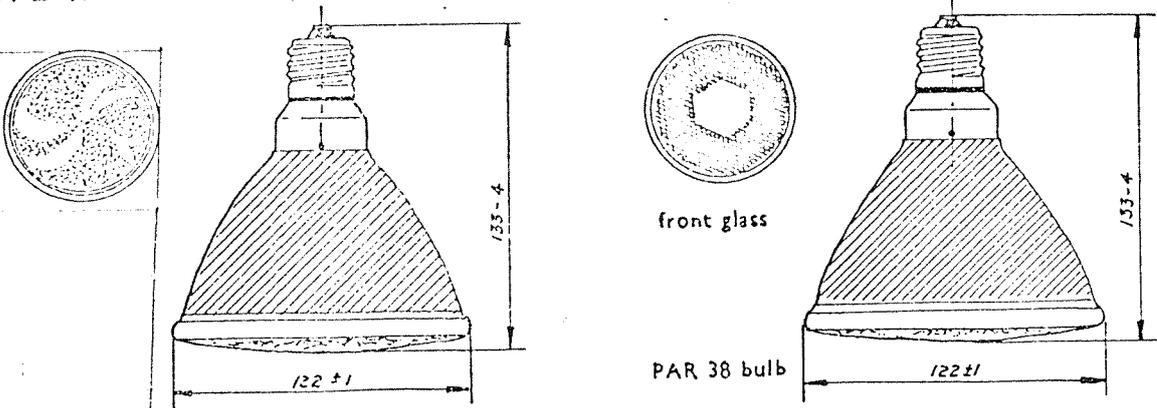


Fig 63

COLLECTION
PATRICK
BINON

LAMPES A FLUX DIRIGE

On peut distinguer deux catégories :

- des lampes à poudrage interne partiel ayant un effet directif par réflexion diffuse
- des lampes à ampoule métallisée ayant un effet directif marqué par réflexion spéculaire.

La figure 61 montre une lampe du premier type et son diagramme des intensités comparé à celui d'une lampe claire de même puissance (en pointillé).

La figure 62 montre une lampe du second type à calotte argentée.

La figure 63 concerne des lampes du second type à réflecteur incorporé dont il existe des modèles variés. Il y a des modèles intensifs (spot) et des modèles extensifs (flood). Les ampoules sont en verre soufflé ou en verre pressé. La courbe des intensités permet de caractériser l'ouverture du cône d'émission lumineuse. On définit l'ouverture "utile" par la direction suivant laquelle l'intensité est égale à la moitié de l'intensité dans l'axe. La technique de la lampe en verre pressé permet un réglage précis de la position du filament par rapport au fond du réflecteur et par suite un faisceau lumineux plus régulier et plus intensif ce qui est particulièrement intéressant pour les types "spot".

Les types "flood" utilisent une glace avant moulée donnant par réfraction un faisceau nettement plus ouvert que les types spot.

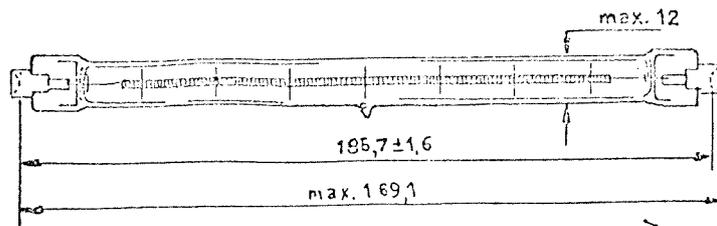
Le voltage, qui conditionne les dimensions du filament, influence la répartition du flux comme on peut le voir sur les diagrammes : courbes A pour 220V, courbes B sur 120V. Des modèles spéciaux en très basse tension (24V ou même 6V) permettent d'obtenir des pinceaux lumineux très étroits.

L'éclairagisme fait un emploi croissant de lampes à incandescence à flux dirigé pour obtenir des effets de lumière, c'est-à-dire des reflets et des ombres que ne peuvent donner dans l'éclairage des magasins par exemple, les lampes fluorescentes, dont la lumière est très diffuse.

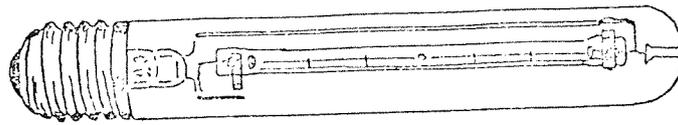
LES LAMPES AUX HALOGENES

Dans le sens de la recherche de lumières dirigées à partir de sources peu encombrantes, la technique des lampes aux halogènes a apporté une contribution importante. Elle a étendu le champ d'application des lampes à incandescence, notamment pour les éclairages de monuments où des sources puissantes sont nécessaires.

.../...

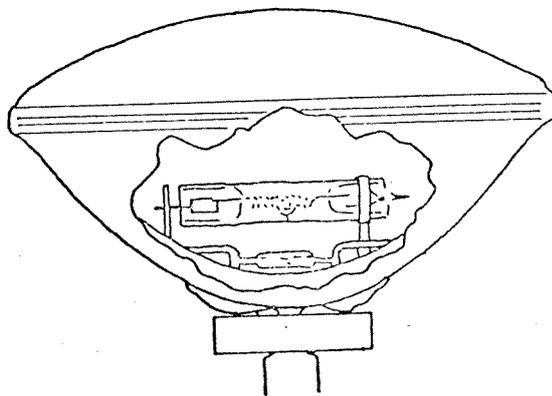


Lampe type < halogène quartz >
Fig 64



Lampe aux halogènes à
< double enveloppe >

Fig. 65



Lampe aux halogènes en
ampoule type < verre pressé >

Fig. 66

Mentionnons les lampes rectilignes avec un culot à chaque extrémité du type "quartzline" de 1000 et 2000W, d'une efficacité de 22 lm/w et d'une durée de 2000 heures. Inconvénients : elles doivent fonctionner horizontalement et ne peuvent être manipulées à main nue (voir chapitre IX).

Des lampes dites à double enveloppe, peuvent fonctionner dans toutes les positions et sont équipées d'un culot à vis classique. Leur efficacité lumineuse est un peu plus élevée car elles font appel à un remplissage Xenon à forte pression (25 lm/w).

Les figures 64 et 65 montrent ces deux types de lampes généralement utilisés dans des projecteurs du type cylindro-parabolique dont elles occupent le foyer.

On peut combiner les avantages des lampes aux halogènes et ceux des lampes à réflecteur incorporé comme le montre la figure 66. Un tube court de quartz avec filament doublement spiralé d'une puissance de 1000W par exemple est placé au foyer d'une ampoule parabolique.

NOTE CONCERNANT LES TENSIONS

Il est admis internationalement de classer les tensions en :

Très bas voltages (Extralow voltages) si $V < 65$

Bas voltages (Low voltages) si $65 < V < 165$

Hauts voltages (High voltages) si $165 < V < 260$

Très hauts voltages (Extrahigh voltages) si $V > 260$

Si une lampe porte un double marquage, c'est le voltage moyen qui est le voltage de fabrication. L'écart entre les tensions extrêmes et la tension moyenne ne doit pas dépasser 2,5%.

C H A P I T R E XII

LES LAMPES MINIATURESCARACTERISTIQUES PARTICULIERES

Les considérations théoriques et technologiques relatives aux lampes courantes développées dans les précédents chapitres, ne s'appliquent que partiellement aux lampes miniatures. En résumant leurs propriétés et caractéristiques particulières, on peut noter les points communs suivants :

- Voltage inférieur ou égal à 24V
- Puissance de quelques watts ou d'une fraction de watt. Les lampes miniatures sont souvent marquées en ampères et non en watts, le débit de courant en fonctionnement sur batteries de piles ou d'accumulateurs étant une caractéristique importante.
- Formes et dimensions diverses mais les ampoules sphériques de diamètre 10mm et 15mm sont les plus courantes.
- Culot le plus utilisé: vis E 10. Il existe également une baïonnette de très petit diamètre dite BA 9s et d'assez nombreux culots spéciaux.

.../...

- Fabrication très simplifiée par rapport à celle des lampes courantes et faisant appel au scellement butt-seal (fig. 57 Chapitre X). Le queusot est soudé directement sur la base de l'ampoule. Il fixe les entrées de courant dont l'écartement est maintenu par une perle de verre. Quelquefois un crochet-support, exceptionnellement deux, sont piqués dans la perle de verre et contribuent au soutien du filament.

Notons encore que la lampe miniature est le plus souvent une lampe à vide. Le remplissage gazeux est néanmoins utilisé dans certains cas parce que les caractéristiques permettent une augmentation de l'efficacité lumineuse ou, sans améliorer celle-ci, une réduction du noircissement en durée. Pratiquement le remplissage Argon demande au moins 2,5V en tension et 0,6A en intensité. Le remplissage Xenon donne des possibilités plus étendues.

La perte par conduction dans les entrées de courant (voir chapitre V) prend une importance relative d'autant plus grande que les filaments sont plus courts. Par suite l'efficacité lumineuse qui normalement augmente à voltage décroissant (et puissance constante) décroît au contraire pour les lampes miniatures après être passé par un maximum vers 6V ou 12V suivant les modèles. Des lampes de 1,2V avec une faible efficacité constituent un exemple extrême.

Compte-tenu des basses tensions en jeu, les lampes miniatures doivent être particulièrement contrôlées au point de vue contact entre filament et entrées (fixation par pincement). Un dispositif sonore rend ce contrôle facile : la lampe insérée dans un circuit comprenant un microphone est soumise à des vibrations. Un mauvais contact éventuel provoque un crépitement caractéristique.

LA DUREE DE VIE

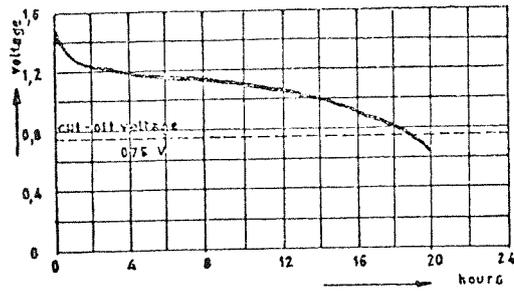
La durée de vie choisie pour les lampes miniatures est essentiellement fonction des applications visées. Très courte pour les lampes d'éclairage sur piles, elle est longue pour les lampes de signalisation. On peut appliquer à ces lampes les coefficients exponentiels permettant de relier entre elles les différentes caractéristiques (voir chapitre VII). Nous remarquons que ces coefficients conduisent notamment pour l'intensité à :

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{I_0}{I} \right)^{24}$$

I_0 étant l'intensité nominale (ampères) et D_0 la durée nominale (heures).

Cet exposant très élevé est à considérer dans le cas particulier où l'on place une lampe miniature en série avec une résistance sur 220V. Les écarts normaux de la tension de distribution autour d'une valeur moyenne entraînent des écarts proportionnels sur l'intensité ($V = RI$ avec R pratiquement constant) Il est facile de voir qu'il en résulte une

.../...



DECHARGE D'UN ELEMENT DE PILE

Fig. 67

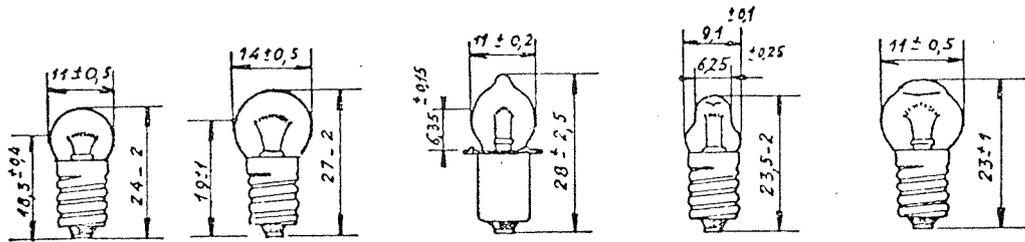
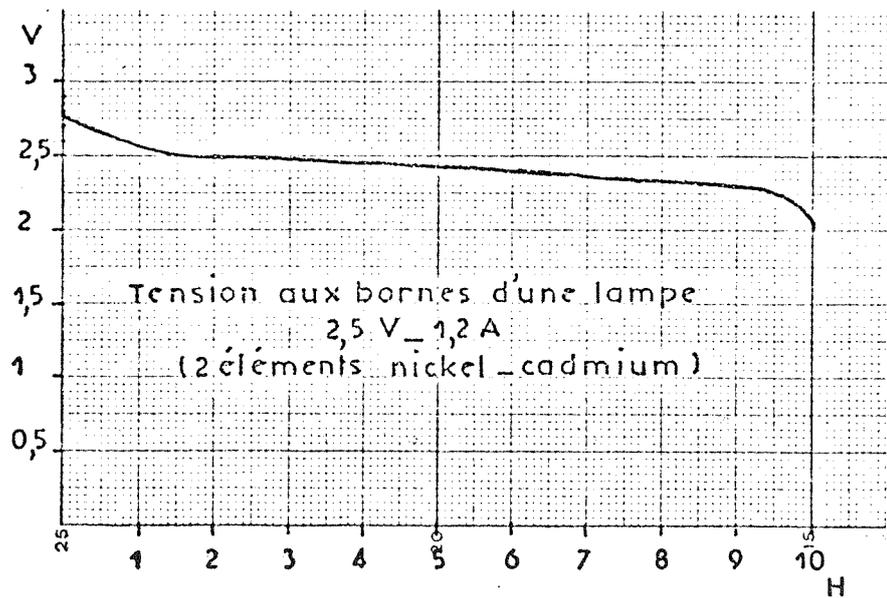


Fig. 68 _ LAMPES POUR PILES DE POCHE ET TORCHES

Fig. 69
DECHARGE
D'UN ACCU DE
MINEUR



influence sérieuse sur la durée de la lampe.

LAMPES POUR PILES DE POCHE

Ces lampes sont destinées aux boîtiers cylindriques ou plats utilisant un ou plusieurs éléments de piles. Il existe des boîtiers en plastique destinés à être jetés lorsque la pile est usée et dans lesquels la lampe, scellée, ne sert qu'une fois.

Le choix de caractéristiques nominales pour ces lampes soulève un problème puisque le fonctionnement a lieu sous une tension mal déterminée, car elle décroît continuellement pendant la décharge de la pile.

La f.e.m d'un élément de pile Leclanché est normalement chiffrée à 1,5V. La figure 67 montre la variation de tension aux bornes d'une résistance de 5 Ohms, en fonction du temps de fonctionnement, en supposant 30 minutes d'éclairage par jour. Le régime d'allumages et d'extinctions est un des facteurs du problème car il conditionne les possibilités de dépolarisation des piles et par suite, leur durée utile.

Pratiquement, les voltages nominaux choisis sont: 1,2V, 2,5V et 3,5V pour un, deux ou trois éléments. Nous avons vu au chapitre VII comment on pouvait relier durée réelle, dans des conditions déterminées de variation de tension, et durée nominale (fig. 38).

Les lampes pour piles de poche et torches les plus répandues ont une intensité nominale de 0,2 et 0,3 Ampères. Des durées nominales de 15 heures, plus rarement de 10H et 5H ont été choisies. La figure 68 montre différents modèles. On remarquera des ampoules formant une lentille au sommet de façon à augmenter l'intensité lumineuse dans l'axe de la lampe.

L'efficacité lumineuse des lampes de 1,2V est très faible (3 à 4 lm/w) celle des lampes de 3,5V est voisine de 10 lm/w.

LAMPES POUR BATTERIES D'ACCUMULATEURS

La f.e.m. des accumulateurs au plomb est assez constante, à raison de 2V par élément. Les multiples 4 - 6 - 12 - 24V sont couramment admis comme voltages nominaux des lampes.

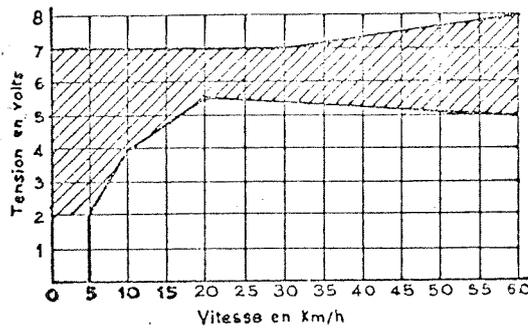
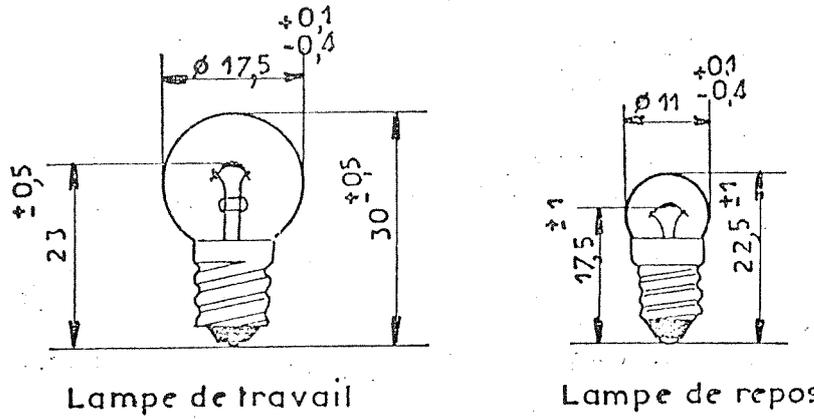
La f.e.m. des accumulateurs au nickel-cadmium subit, en cours de décharge, une chute un peu plus marquée. La f.e.m. est chiffrée à 1,25V par élément. La figure 69 montre une courbe de décharge d'une batterie de deux éléments sur une lampe de 2,5V - 1,2A.

Deux applications importantes sont à signaler : Lampe de mines, et Lampes de sécurité.

L'éclairage dit "au chapeau" est basé sur l'emploi d'un petit projecteur fixé sur le casque du mineur et d'un accumulateur qu'il porte à la ceinture. Deux éclairages sont utilisés : un éclairage de travail fourni par la lampe principale et un éclairage de repos donné par une lampe auxiliaire de puissance plus réduite.

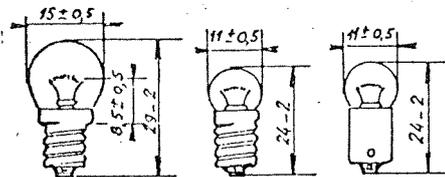
Eclairage 'au chapeau'

Fig.70
LAMPES
DE
MINES



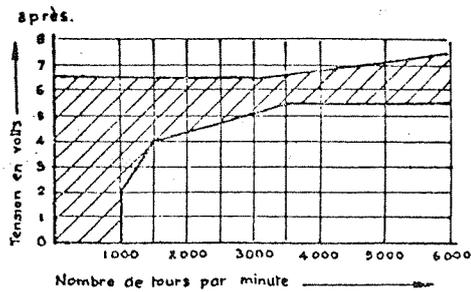
GENERATEUR POUR CYCLE

Fig. 71



LAMPES POUR CYCLES ET CYCLOMOTEURS

Fig.72



GENERATEUR POUR CYCLOMOTEUR

Fig.73

Pour obtenir la plus grande efficacité possible on estime que le remplissage des ampoules au Krypton ou mieux au Xenon est parfaitement justifié. On dispose par exemple des lampes de caractéristiques nominales : 3,75V - 0,90A - 500H avec une efficacité légèrement supérieure à 11 lm/w. La lampe auxiliaire est une petite lampe à vide de durée 1000H (Fig. 70).

Dans les établissements recevant du public, un éclairage de sécurité est obligatoire et fait appel à des blocs autonomes de sécurité.

Ces appareils basés sur l'emploi d'une batterie au nickel-cadmium chargée en permanence par le réseau normal de distribution utilisent des lampes analogues aux lampes de mines. Des lampes au Xenon d'une durée de 100H ou 200H seulement permettent de satisfaire au mieux les normes relatives à ces blocs.

LAMPES POUR BICYCLETTES ET CYCLOMOTEURS

Un éclairage de bicyclette comprend un "feu avant" et un "feu arrière" alimentés par une génératrice donnant environ 3W sous 6V (caractéristiques nominales).

La figure 71 représente, par sa partie hachurée, la zone dans laquelle doit s'inscrire la courbe de tension en fonction de la vitesse de la bicyclette pour répondre à la réglementation. Condition supplémentaire : la tension aux bornes du feu arrière ne doit pas être supérieure à 11V pour une vitesse de 15 km/h.

Les caractéristiques normalisées des lampes sont les suivantes :

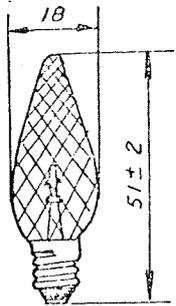
- AV - 6V - 0,4A Efficacité minimale 8,5 lm/w - Durée 100H
- AR - 6V - 0,1A " " " 3,5 lm/w - {Durée 8H
sous 12V

La figure 72 montre ces lampes. Le culot E 10 du feu-avant, un peu particulier, présente une face d'appui après le dernier filet du pas de vis qui définit un plan de référence pour la position du filament. Le remplissage gazeux est utile, moins pour améliorer l'efficacité que pour diminuer le noircissement en cours de durée.

En France, le feu avant est obligatoirement en verre jaune sélectif.

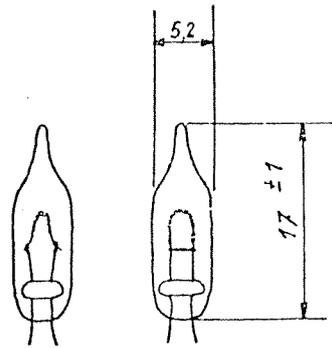
Les cyclomoteurs sont également alimentés en 6V, tension généralement fournie par le volant magnétique du moteur. La partie hachurée de la figure 73 montre les tensions admissibles en fonction de la vitesse de rotation, exprimée en tours-minute.

Les lampes feu avant ont couramment une puissance de 6W et les lampes feu arrière de 3W pour une durée de 250 heures (sous 6V).



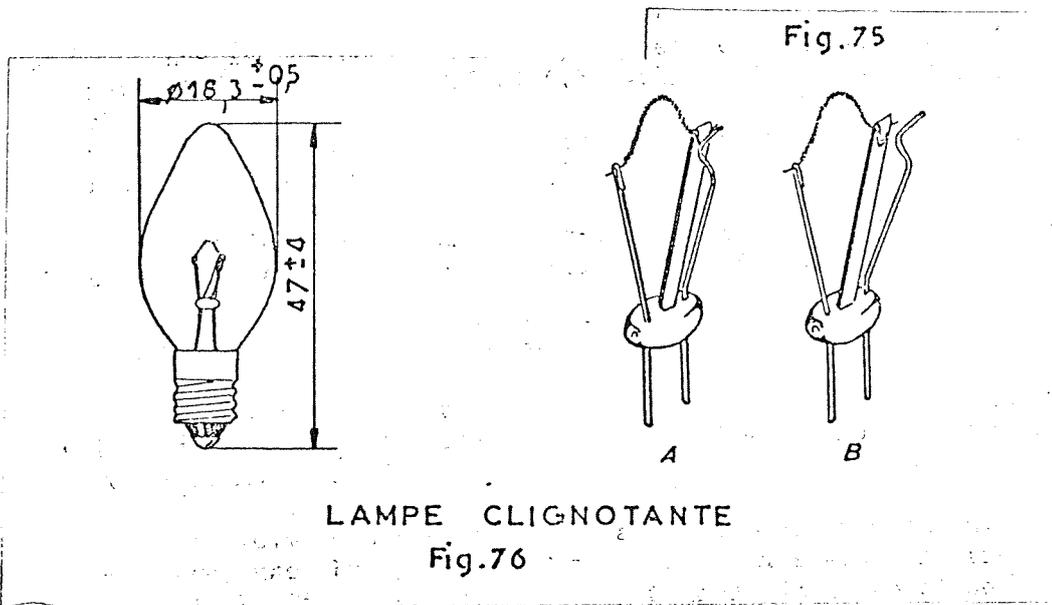
LAMPE POUR ARBRE DE NOEL

Fig 74



with short
circuit device

LAMPE < LUCIOL >



LAMPE CLIGNOTANTE

Fig.76

Il existe également des lampes plus puissantes : 15W; ou à deux filaments: 15W/15W, pour route et croisement, d'une technique se rapprochant de celle des lampes automobiles qui font l'objet d'un autre chapitre.

LAMPES DECORATIVES

Des lampes miniatures souvent colorées et de formes diverses peuvent être montées en série pour constituer des guirlandes lumineuses très recherchées pour arbres de Noël. Ainsi sous 220V, on peut utiliser couramment 8 lampes de 30V ou 16 lampes de 16V (Fig. 74). On a réalisé des "bouquets de lumière" avec des lampes de 6V (45 lampes) d'une fabrication simplifiée, (lampe "Luciol").

Un inconvénient du montage en série est l'extinction complète de la guirlande en cas de défaillance d'une seule lampe. La solution est de munir chaque lampe d'un "dispositif de court-circuit" très simple. Il existe différents systèmes. Citons celui qui consiste à réunir les deux entrées de courant à l'aide d'un fil isolé par une légère couche d'alumine. Cette couche "claque" si, par suite de la rupture du filament, la tension appliquée devient la tension aux bornes de la guirlande, c'est-à-dire la tension du réseau de distribution. Notons que la fiabilité de ces dispositifs est médiocre.

LAMPES CLIGNOTANTES

Le fonctionnement intermittent d'une lampe miniature peut être obtenu sans faire appel à un dispositif extérieur. Le principe est le suivant : une lampe bimétallique qui se déformera sous l'action de la chaleur est placée dans l'ampoule afin d'ouvrir et fermer le circuit du filament.

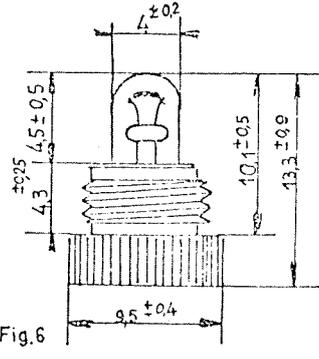
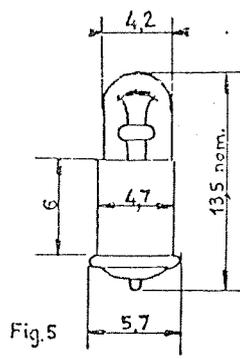
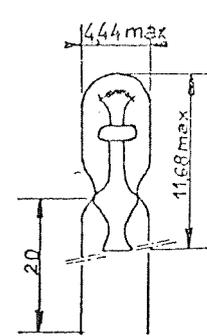
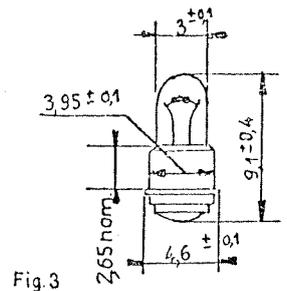
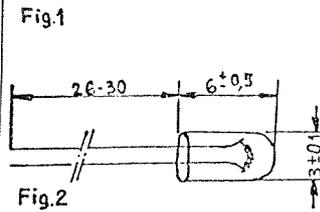
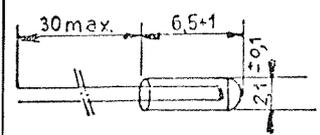
La figure 5 montre la disposition de cette bilame sur laquelle est pincé le filament. Au repos, elle est en contact avec une entrée de courant. Après déformation et ouverture du circuit, elle se refroidit et reprend sa position initiale.

Pour éviter le jaillissement d'une étincelle au moment de l'ouverture, on fait travailler la bilame dans une atmosphère d'azote à faible pression.

LAMPES POUR CADRANS - POUR SIGNALISATION - LAMPES "SUBMINIATURES"

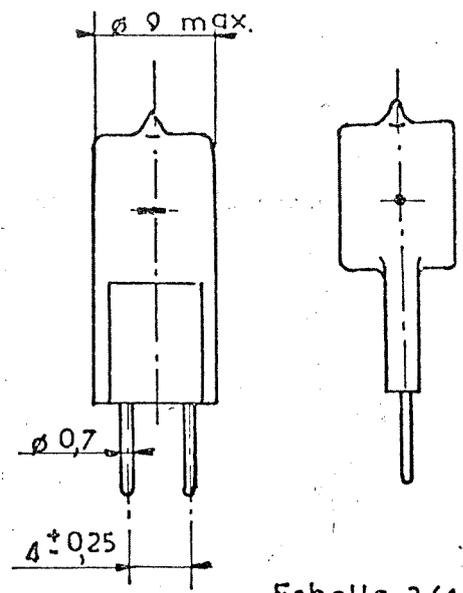
Les tableaux de bord des voitures, ceux des avions et tous les dispositifs à circuits multiples réclament un nombre croissant de lampes miniatures pour éclairer les appareils de mesure et pour signaler le bon fonctionnement de certains organes, ou au contraire leur défaillance. L'industrie du jouet consomme également beaucoup de lampes miniatures.

DIMENSIONS



LAMPES
SUBMINIATURES
2 mm, T 1 AND T 1/4

Fig.76



Echelle 2/1

LAMPE MINIATURE AUX HALOGENES

Fig.77

Les voltages sont adaptés aux différentes applications. Les problèmes relatifs à l'automobile et à l'aviation seront exposés dans d'autres chapitres. Les durées des lampes sont très variables. Si l'on peut se contenter de peu de lumière, une durée théorique très longue, augmentant la fiabilité est choisie.

Les lampes dites "subminiatures" méritent une mention particulière. Leur fabrication est plus coûteuse que celle des lampes ordinaires du fait même de la miniaturisation. Elles ne sont utilisées que dans des applications très particulières. Nous les retrouverons parmi les lampes de bord en aviation. Citons également des dispositifs d'affichage numérique dans lesquels douze lampes doivent trouver place derrière les trous d'un module de très faibles dimensions.

La figure 76 montre quelques exemples de lampes subminiatures. Leur puissance nominale est toujours inférieure à 1,5W. Elles émettent un flux qui peut descendre à une fraction de lumen. On a créé pour ces lampes des culots également miniaturisés, mais les plus petites sont directement connectées par leurs entrées de courant.

LAMPES AUX HALOGENES

Les lampes aux halogènes sont caractérisées d'une façon générale par leurs petites dimensions. On peut donc considérer qu'elles offrent des possibilités particulières pour la miniaturisation.

Une ampoule de quartz de 8,5mm de diamètre permet de réaliser des lampes de 10W ou 20W sous 6V, alors qu'une lampe classique d'un volume équivalent n'admettrait qu'un ou deux watts. La figure 77 montre une telle lampe dont l'efficacité est de 20 lm/w. Avec des ampoules en verre "extra-dur" des lampes aux halogènes à culot classique E 10 pourraient être comparées à certaines lampes miniatures courantes, mais donneraient l'avantage de rester parfaitement claires.

C H A P I T R E X I I I

LES LAMPES POUR AUTOMOBILES

Compte tenu des lampes témoins sur le tableau de bord, il y a couramment plus de 20 lampes à incandescence sur une voiture. Il faut distinguer nettement les lampes pour projecteurs qui servent à résoudre un problème optique difficile et les autres.

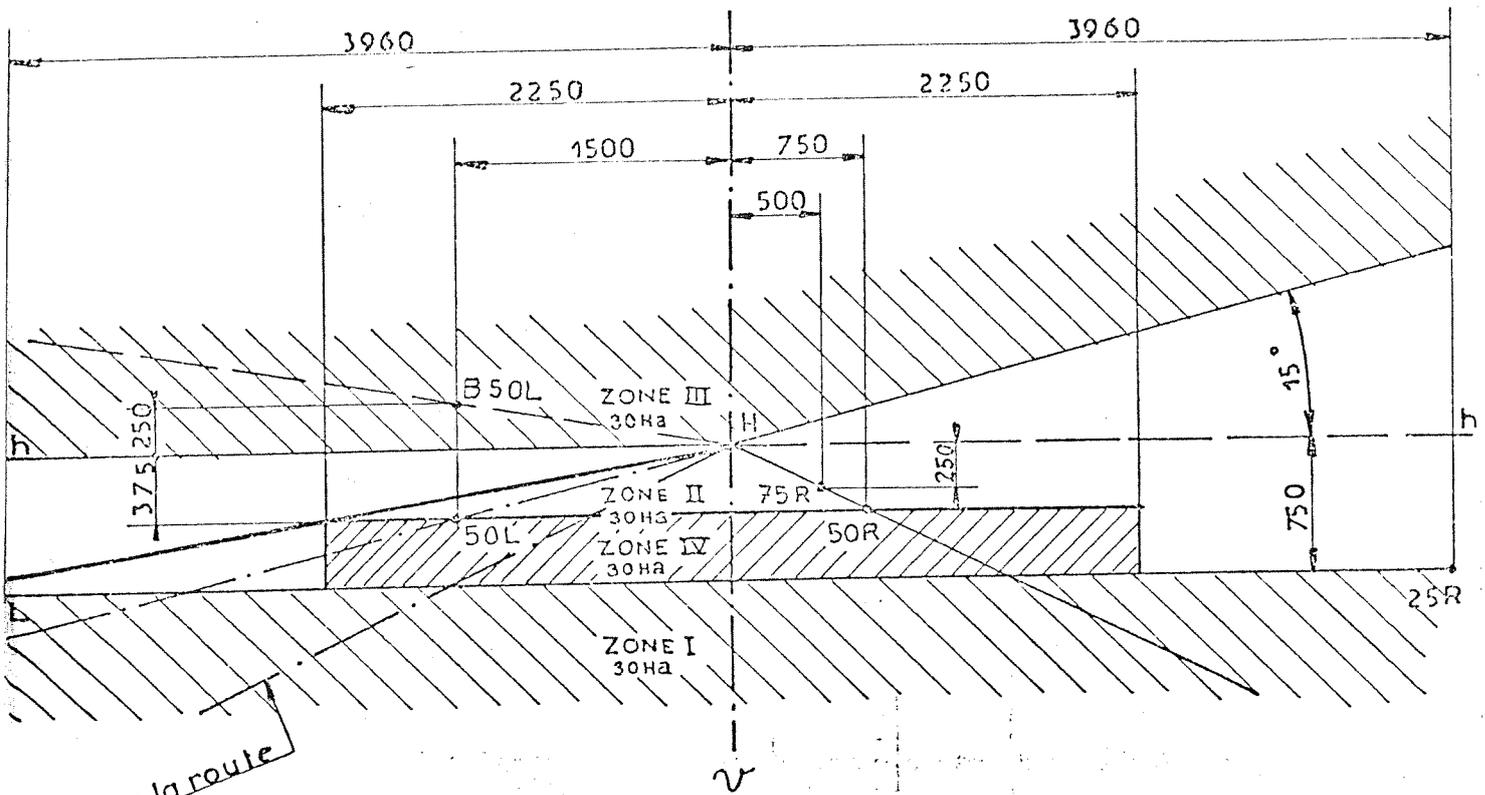
Le générateur de courant fut longtemps une dynamo. C'est maintenant un alternateur et la puissance disponible à bord des voitures n'a cessé de croître grâce à une charge plus efficace des accumulateurs. La tension nominale la plus répandue est 12V. On trouve encore 6V sur de petites voitures et 24V sur certains poids lourds.

La tension réelle aux bornes des lampes est fonction de nombreux facteurs : vitesse, caractéristiques du générateur, qualité du régulateur, état de la batterie d'accumulateurs, charge totale du circuit, pertes en ligne.

De nombreuses mesures ont été effectuées par les fabricants d'accessoires électriques pour connaître cette tension. Ces mesures ont montré que la tension moyenne était sensiblement supérieure aux valeurs nominales ci-dessus. Une normalisation officieuse recommande de choisir pour les essais de matériel au lieu de 6, 12 et 24V les valeurs ci-après :

6,3V - 13,2V - 28V
pour les lampes de projecteurs et

6,75V - 13,5V - 28V
pour les lampes auxiliaires



Axe de la route

ECRAN DE MESURE
PROJECTEUR POUR SENS DE CIRCULATION A DROITE

LAMPE A
FAISCEAU
EUROPEEN
Cotes en mm

Fig.78

REGLEMENTATION

L'éclairage des automobiles et particulièrement les projecteurs ont donné lieu pour des raisons de sécurité à des réglementations strictes. Celles-ci, d'abord nationales sont devenues internationales, dans le cadre de l'Organisation des Nations Unies. Un certain nombre de pays ont en effet signé un accord (Genève 1958) relatif à "l'adoption de conditions uniformes d'homologation et la reconnaissance réciproque de l'homologation des équipements et pièces des véhicules à moteur" dans lesquels figurent les dispositifs d'éclairage.

La réglementation relative aux projecteurs distingue deux fonctions : l'éclairage de route et l'éclairage de croisement. Ces deux fonctions peuvent être remplies par des projecteurs séparés, il y en a alors quatre, ou par deux projecteurs qui combinent les deux exigences.

Lorsque le projecteur et la lampe constituent un ensemble inséparable (c'est le cas de la formule américaine (1) "sealed-beam") une seule réglementation peut suffire. Si, comme c'est le cas le plus fréquent en Europe, le projecteur et la lampe sont indépendants, deux réglementations complémentaires sont nécessaires. Le but est d'obtenir en toute circonstance un éclairage "route" élevé mais tolérable et un éclairage croisement strictement limité.

Le document relatif aux projecteurs prévoit un contrôle, qui est effectué en mesurant les éclaircissements sur écran vertical placé à 25 m en avant du projecteur, perpendiculairement à l'axe de celui-ci. On utilise une lampe sélectionnée c'est à dire avec des tolérances sur la puissance et le flux lumineux particulièrement réduites.

Le projecteur, en régime de croisement, doit produire une coupure sur l'écran, qui est obligatoirement horizontale dans la moitié gauche, mais qui peut être relevée de 15° au maximum, dans la moitié droite (2). On réalise ainsi la coupure dite du "Faisceau Européen Unifié" assurant un éclairage de plus grande portée sur la partie droite de la route sans gêne pour les véhicules venant en sens inverse. Fig. 78.

.../...

(1) Les U.S.A. ne sont pas signataires de l'accord de Genève. La limitation des intensités dans les directions supérieures à l'horizontale n'est pas imposée.

(2) Si la circulation a lieu à gauche, c'est évidemment la coupure de la moitié droite du faisceau qui doit être horizontale (cas de la Grande Bretagne)

Le projecteur contrôlé est orienté de façon que la partie horizontale de la coupure soit située parallèlement et à 25 cm au-dessous de la trace hh. On doit alors constater pour les zones hachurées et à l'endroit des points repérés, des valeurs d'éclairage satisfaisant aux conditions ci-après :

T A B L E A U XXIV

Eclairages sur l'écran de contrôle
(faisceau européen)

<u>Lux</u>	<u>Lux</u>
B 50·L ≤ 0,3	Zone III ≤ 0,7
75 R ≥ 6	Zone IV ≥ 2
50 R ≥ 6	Zone I ≤ 20
25 L ≥ 1,5	
25 R ≥ 1,5	

Le point B 50 L est considéré comme un point critique. Il est à 50 m en avant, sensiblement à l'emplacement des yeux d'un conducteur venant en sens inverse.

En éclairage route on doit avoir au point H un éclairage d'au moins 32 lux et obtenir encore 16 lux à 1,125 m à droite et à gauche de H, et 4 lux à 2,50 m.

On vérifie par un simple contrôle visuel que le projecteur en faisceau croisé ne provoque pas à la vue directe un éblouissement supérieur à celui que procurerait une source diffusante circulaire de 23,5 cm de diamètre avec une luminance uniforme de 1 cd/cm².

A la réglementation concernant l'homologation des projecteurs est annexée celle des lampes. Sont d'abord fixées les caractéristiques électriques et lumineuses sous tension nominale.

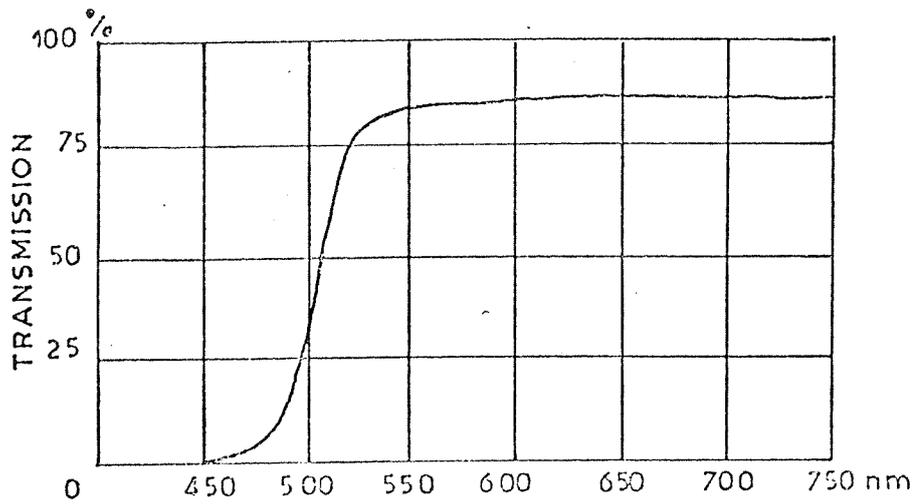
T A B L E A U XXV

Normalisation des lampes pour projecteurs d'automobiles

Voltage nominal V	Puissance nominale W croisement route		Puissance maxi	Flux lumineux lm		
				croisement		route
				mini	maxi	mini
6 - 12	40	45	Nominale ± 10 %	400	550	600
24	50	55				

.../...

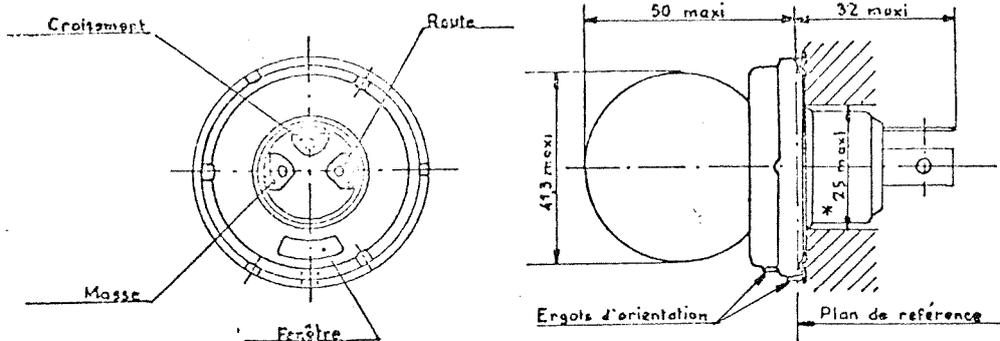
Verre jaune sélectif



TRANSMISSION SPECTRALE
DU VERRE JAUNE

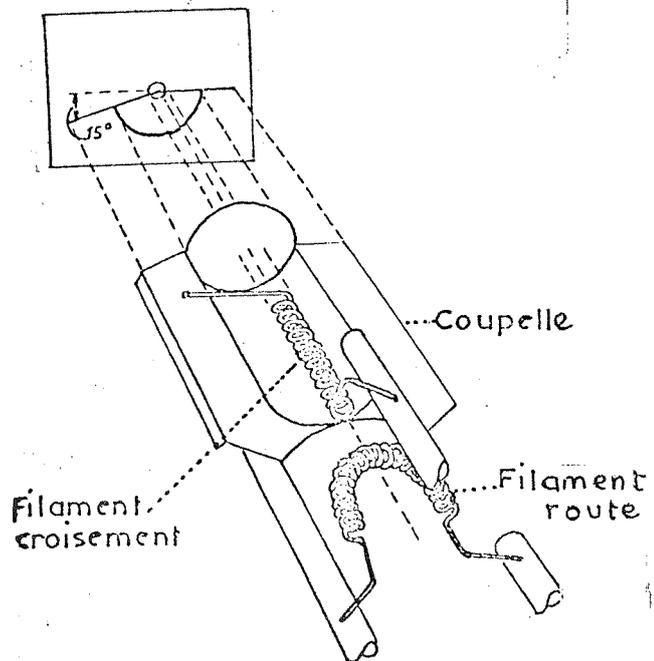
Fig 79

(FAISCEAU EUROPEEN UNIFIE)



LAMPE EUROPEENNE

Fig 80



La durée n'est pas imposée dans la spécification mais les fabricants ont adopté 75 H pour le filament route et 150 H pour le filament croisement.

Les flux lumineux indiqués sont ceux des lampes incolores. Si l'ampoule est en verre jaune, celui-ci doit avoir des caractéristiques colorimétriques déterminées : longueur d'onde dominante entre 575 et 585 nm, facteur de pureté compris entre 0,90 et 0,98. Le facteur de transmission doit être au moins égal à 0,78. Les mesures sont faites avec une lampe à incandescence étalonnée à 2800 K.

La figure 79 montre la courbe de transmission spectrale du verre au sulfure de cadmium répondant à cette prescription (les mesures doivent être faites sur un fragment d'ampoule)

Au point de vue construction, les cotes et tolérances sont celles qui figurent dans les normes publiées par l'I.S.O. (International Standard Organisation).

La caractéristique fondamentale de ces lampes à deux filaments est la présence dans l'ampoule d'une coupelle métallique. Alors que le filament route occupera le foyer du projecteur, le filament croisement sera exfocalisé et donnera un faisceau divergent dont la partie supérieure sera éliminée. Le rôle de la coupelle est donc d'arrêter les rayons dirigés vers le bas, qui seraient réfléchis par la parabole dans la direction indésirable. C'est par l'inclinaison de cette coupelle que l'on obtient l'asymétrie du faisceau européen (fig.80).

Le réglage précis de la position des éléments internes, en fabrication, est évidemment fondamental. Il fait appel à un procédé optique. Les images grossies des éléments sont vues sur un écran et doivent occuper des places déterminées par rapport à des repères tracés sur celui-ci. Le même procédé est utilisé pour fixer la distance entre foyer lumineux et collerette de référence du culot dit P 45/41 t, lorsque la lampe est terminée.

Le culot P 45/41 t est réservé à ce type de lampe. Il présente deux épaulements, de diamètres 41 et 45 mm, pour s'adapter à deux ouvertures possibles des projecteurs.

Les contacts électriques sont établis par trois broches plates dont la disposition est normalisée.

Notons pour terminer que la conformité des lampes doit donner lieu à un agrément par un laboratoire officiel. Cet agrément est rappelé sur chaque lampe qui doit porter la lettre E suivie d'un chiffre permettant d'identifier le Pays d'origine, le tout à l'intérieur d'un cercle.

LAMPES AUX HALOGENES

LAMPE H4 - La technique du cycle d'halogène a trouvé un domaine d'élection dans l'éclairage des automobiles. En portant les filaments à une température plus élevée que celle des lampes classiques (3100 K au lieu de 2800 K) on augmente notablement la luminance qui, avec le diamètre des paraboles est le facteur fondamental de la portée des projecteurs. L'utilisation comme halogènes des dérivés du brome, au lieu de l'iode d'abord utilisé, a été un progrès déterminant en donnant notamment la possibilité d'introduire dans la lampe une coupelle sans que celle-ci soit attaquée.. Cette coupelle est en molybdène.

L'apparition des lampes halogènes a motivé une réglementation nouvelle, adaptée à leurs caractéristiques particulières. Cette réglementation suit les grandes lignes du document relatif aux lampes à faisceau européen unifié.

Sur l'écran de contrôle (fig.81) ou figure en plus de la ligne de coupure inclinée à 15° une variante sous forme d'une ligne brisée comportant deux parties horizontales reliées par un trait oblique à 45° au voisinage du centre. Cette disposition répond au désir d'éviter le risque d'éblouissement dans les virages à grand rayon de courbure. Le tableau des conditions imposées est le suivant :

T A B L E A U XXVI

Eclairements sur l'écran de contrôle
(faisceau H4)

<u>Lux</u>	<u>Lux</u>
B 50 L \leq 0,4	Zone III \leq 0,7
75 R \geq 12	Zone IV \geq 0,3
75 L \leq 12	Zone I \leq 2 E _{50 R} (1)
50 R \geq 12	
50 L \leq 15	
50 V \geq 6	
25 R \geq 2	
25 L \geq 2	

(1) Valeur réelle mesurée

Pour satisfaire à cette réglementation il faut des projecteurs dont la glace de fermeture diffère de celle des projecteurs pour lampes ordinaires, ce qui interdit, le remplacement des lampes classiques dans les projecteurs anciens. Un culot d'ailleurs différent, le culot P 43 t-38 a été créé pour les lampes aux halogènes.

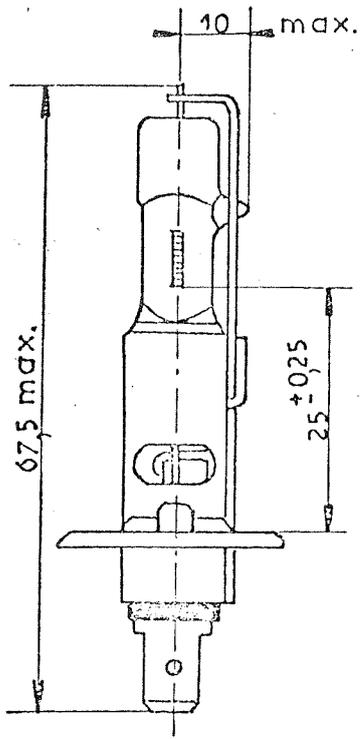
Les caractéristiques des lampes sont fixées sous tension d'essai et non sous tension nominale. La figure 82 montre la lampe et son culot. Le tableau XXVII donne les caractéristiques normalisées des lampes H4.

T A B L E A U XXVII

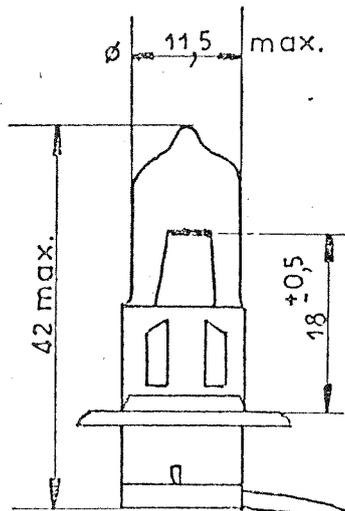
Caractéristiques des lampes H4

Voltage nominale V	Puissance nominale W		Tension d'essai V	Puissance en W		Flux en lm	
	route	croisement		route	croisement	route	croisement
12	60	55	13,2	70 \pm 5%	62 \pm 5%	1650 \pm 15%	1000 \pm 15%

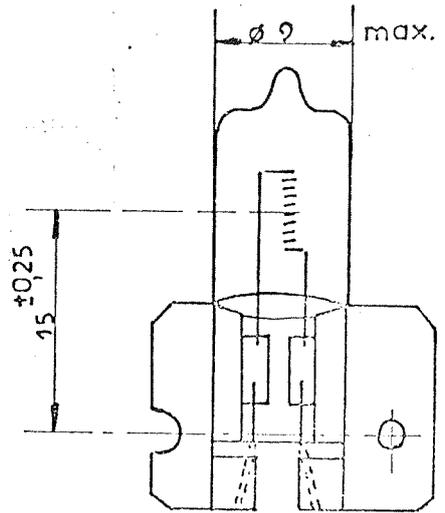
.../...



Type H1



Type H3



Type H2

Fig.83 LAMPES AUX HALOGENES H1_H2_H3

Sous tension d'essai la durée de vie minimale adoptée est de 100 heures pour le filament route et de 200 heures pour le filament croisement.

Il s'agit de lampes claires. Pour obtenir de la lumière jaune, avec les caractéristiques imposées, il faut avoir recours à un filtre extérieur qui vient coiffer l'ampoule de quartz, celle-ci ne pouvant être colorée dans la masse.

LAMPES AUX HALOGENES A UN SEUL FILAMENT

Les lampes aux halogènes désignées par les symboles H1, H2 et H3 sont des lampes à un seul filament destinées aux projecteurs route, dans le système à quatre projecteurs et aux projecteurs auxiliaires c'est à dire à des projecteurs d'appoint ou antibrouillard.

La lampe H1, le plus ancien modèle des lampes aux halogènes, est un type à "deux pincements", l'entrée de courant opposée au culot étant alimentée par un conducteur extérieur à l'ampoule. Le culot est un "Préfocuse P 14,5 S". Le modèle H1 A comme les modèles H2 et H3, est à un seul pincement, disposition plus proche de celle des lampes classiques. Munis de culots très particuliers, les modèles H2 et H3 conviennent bien à l'équipement de projecteurs de dimensions très réduites du type antibrouillard.

La puissance nominale de ces trois lampes est 55W (sous 6 et 12V) et 70W (sous 24V). La durée de vie est 150 H sous les tensions d'essai définies plus haut. Fig.83.

AUTRES LAMPES D'AUTOMOBILES

Les dispositifs de signalisation : feux de position, feux Stop, feux de changement de direction, l'éclairage des plaques de signalisation ont également donné lieu à des spécifications internationales.

S'il y a nécessité de fixer des intensités minimales pour une perception satisfaisante, il est recommandé de fixer également des limites supérieures pour éviter une gêne par éblouissement. Cela conduit logiquement à distinguer le régime de jour et le régime de nuit. A défaut, les valeurs spécifiées sont des valeurs de compromis.

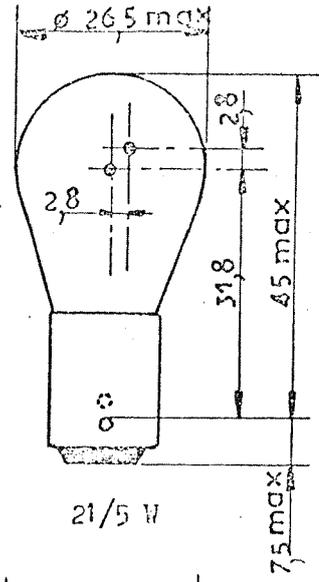
Les feux Stop, de couleur rouge, doivent avoir une intensité lumineuse comprise entre 40 cd et 100 cd, cas du régime unique. Si le double régime est prévu, on demande 130 à 520 cd pour le jour et 30 à 80 cd pour la nuit.

Les feux de changement de direction, de couleur "jaune-auto" dirigés vers l'avant, doivent avoir une intensité de 175 à 700 cd et ceux dirigés vers l'arrière de 50 à 200 cd. S'il y a double régime, les feux dirigés vers l'arrière doivent donner 175 à 700 cd le jour, et 40 à 120 cd seulement, la nuit.

Pour les feux de position arrière, de couleur rouge, on indique une intensité comprise entre 2 et 12 cd. On doit constater un rapport supérieur à 5 entre l'intensité des feux-stop et celle des feux de position.

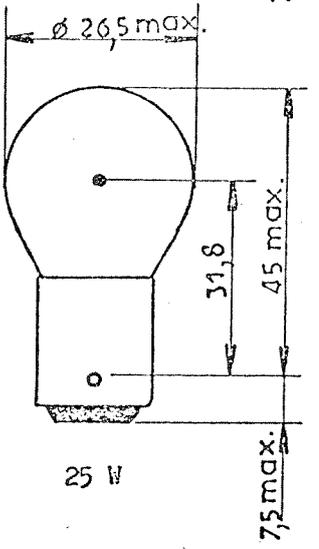
Le contrôle de la visibilité des plaques d'immatriculation est fait par référence à la luminance d'une surface blanche diffusante, d'un facteur de réflexion supérieur à 0,7, placée à l'endroit de la plaque. La luminance dans la direction normale doit être supérieure à 2,5 cd/m².

Lampe à deux filaments Stop et feu de position



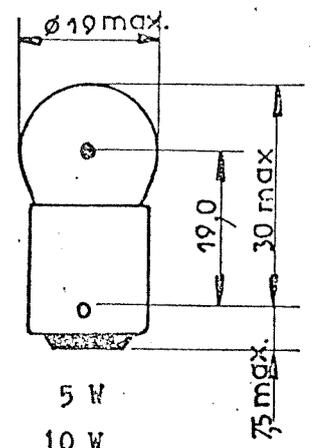
21/5 W

Lampe Stop ou clignotant



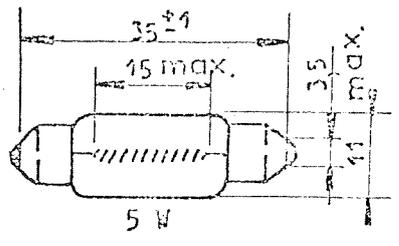
25 W

Feux de position



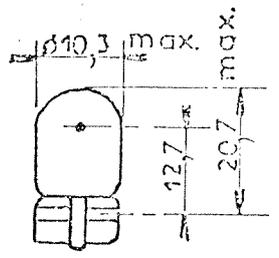
5 W
10 W

Lampe navette Feux de position Eclairage intérieur



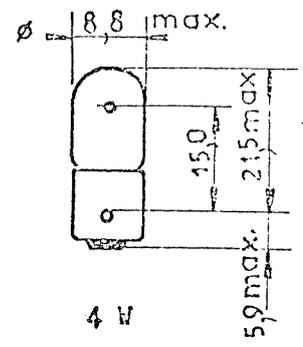
5 W

"wedge base" Feux de position



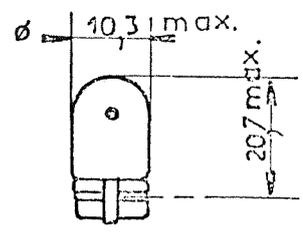
5 W

Miniature Feux de position



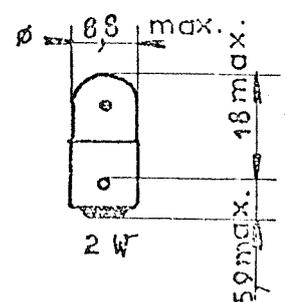
4 W

"wedge base" Tableau de bord



2W3 W

Miniature Tableau de bord



2 W

Fig.84 LAMPES AUXILIAIRES POUR AUTOMOBILES

Aux lampes créées pour équiper tous ces dispositifs et satisfaire aux conditions énumérées ci-dessus, il faut ajouter les lampes destinées à l'éclairage intérieur de la voiture et au tableau de bord. Pour éviter la multiplication des types, une gamme complète de lampes, résultant d'une sélection, a été choisie. Elles sont représentées sur la figure 84. On remarquera un type à deux filaments pour la double fonction de feu Stop et de feu de position. On remarquera également le culot type "Wedge-base" de certaines lampes. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un culot mais d'une formation particulière de la base de la lampe sur laquelle les fils d'entrée de courant sont rabattus et viennent constituer les contacts.

Toutes ces lampes sont fabriquées en 6, 12 et 24V, tensions nominales. Les tensions d'essai ont été indiquées au début du chapitre.

Les durées de vie (sous tension d'essai) sont de 100 H pour les Stop et de 200 H pour les autres modèles. Seul le filament "feu de position" de la lampe à deux filaments a été prévu pour 1000 H.

LAMPES FONCTIONNANT EN CLIGNOTEMENT

Les feux de direction fonctionnent en clignotement, ce régime intermittent étant commandé par un accessoire dit "centrale clignotante". Le fonctionnement est en général contrôlé par une lampe de signalisation sur le tableau de bord. La fréquence de clignotement doit être comprise entre 60 et 120 à la minute. On peut se poser la question de l'influence de ce régime très particulier sur la durée de vie des lampes, problème existant dans d'autres domaines : (aviation, marine, publicité, etc...). Le fonctionnement intermittent n'a en principe aucun effet accélérateur sur l'évaporation du filament, puisque la valeur moyenne de la température comme la valeur de crête, sont plus faibles qu'en fonctionnement continu. Il y a, néanmoins un effet de fatigue (1) mais de nombreuses applications dont celle de l'automobile, montrent que son influence peut être pratiquement négligée.

(1) Voir - The effects of flashing on lamp life
Wesler -I.E.S.- 63 - 526 - 1968

CHAPITRE XIV

LES LAMPES POUR L'AVIATION

L'aviation a besoin de lampes à incandescence pour des applications diverses. Deux catégories très différentes doivent être distinguées : les lampes de bord et les lampes d'éclairage au sol.

LAMPES DE BORD

Les lampes de bord comprennent elles-mêmes plusieurs familles :

- Lampes de signalisation des appareils en vol.
- Lampes pour l'éclairage des cabines et des tableaux de bord.
- Lampes pour les projecteurs d'atterrissage et de roulage.

Les feux de signalisation sont réglementés par l'O.A.C.I. (Organisation de l'Aviation Civile Internationale).

Chaque avion doit être muni de feux d'ailes encastrés : vert à tribord, rouge à babord, d'un feu de queue blanc, clignotant en alternance avec un feu rouge et enfin de deux feux <fuselage> blancs situés sur le dessus et le dessous de l'appareil.

.../...

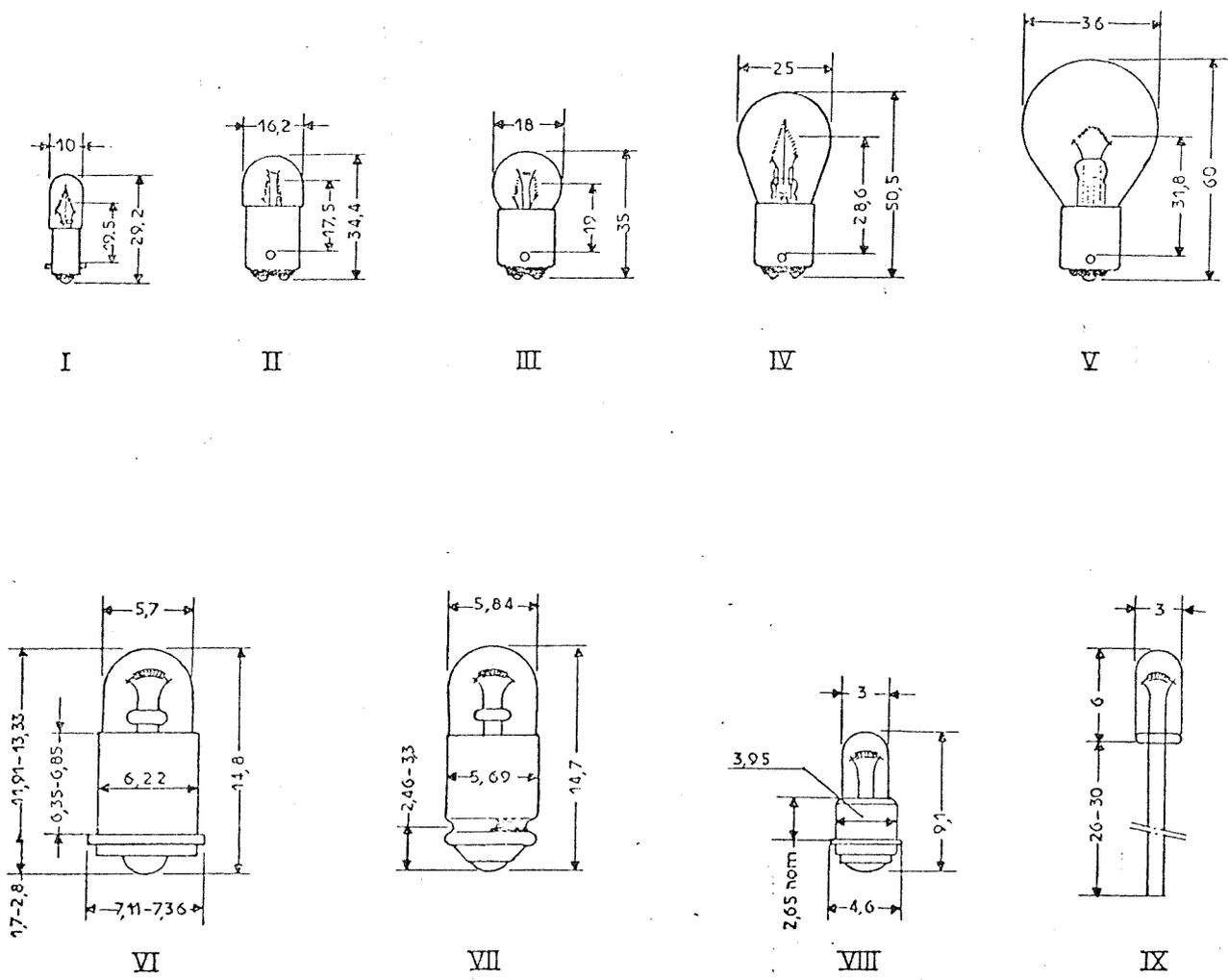


Fig. 85 - Lampes pour éclairage de bord et signalisation

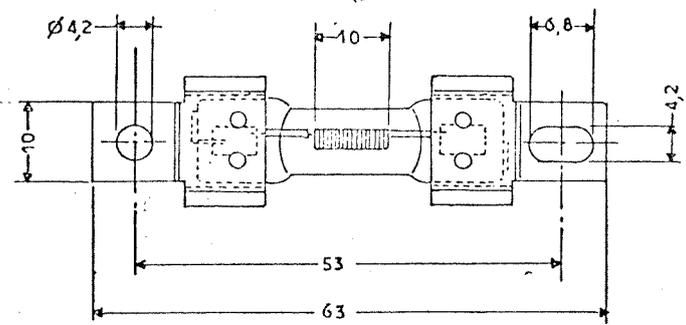
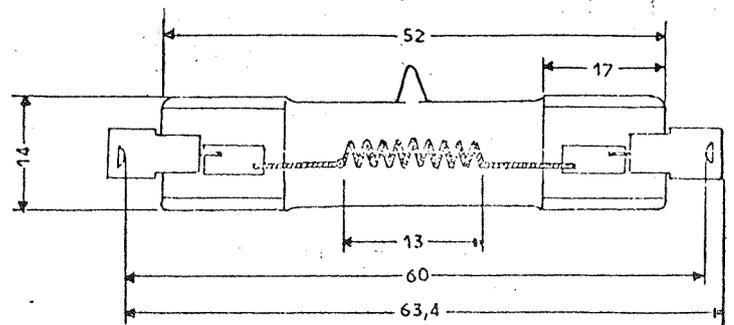


Fig. 86 - Lampes aux halogènes pour feu anti-collision

Fig 87 - Lampe aux halogènes pour projecteur d'atterrissage



Pour le temps bouché, un feu rotatif rouge dit anti-collision est placé au sommet de l'empennage. Toutes ces lampes sont alimentées par une génératrice donnant 28V.

Sur les tableaux de bord on trouve un grand nombre de lampes miniatures et subminiatures. Ces dernières intégrées dans les appareils de mesure, éventuellement noyées dans le plexiglas, doivent avoir une durée de vie pratiquement infinie. De nombreuses lampes témoins ont un rôle de signalisation : voyants verts ou bleus de contrôle de fonctionnement, voyants ambrés d'alerte, voyants rouge d'alarme.

Pour disposer de filaments très courts et plus robustes, la tension d'alimentation de ces petites lampes peut être abaissée à 5V.

Sont rassemblées dans le tableau XXVIII et sur la figure 85 des lampes typiques choisies parmi celles qui ont été inventoriées par la C.E.I. pour en normaliser les caractéristiques.

Dans les feux anti-collision et les projecteurs d'atterrissage, on utilise des lampes aux halogènes qui apportent la meilleure solution.

La figure 86 montre une lampe 28V-85W - 250H pour feux anti-collision et la figure 87 une lampe 28V-260W - 300H pour projecteur d'atterrissage.

T A B L E A U XXVIII

Lampes de bord

	Voltage nominal (V)	Type	Puissance nominale (W)	Durée (H)	Ampoule	Culot
Feux de cabine	28	II	4,8	500	claire	BA 15s
	28	III	8,5	500	claire dépolie	BA 15s
	28	IV	18	300	claire dépolie	BA 15s
	28	V	36	300	$\frac{1}{2}$ argentée claire	BA 15s
Tableau de bord	28	I	4,8	500	claire ou colorée	BA 9s
	28	VI et VII	1,12	1000	claire ou colorée	{ S 6s ou BA 9s
	28	I	2,8	1000	claire ou colorée	BA 9s
	5	VIII et IX	0,3	> 40 000	claire ou colorée	{ S 3s ou sans culot
	5	VIII et IX	0,6	> 40 000	claire ou colorée	{ S 3s ou sans culot

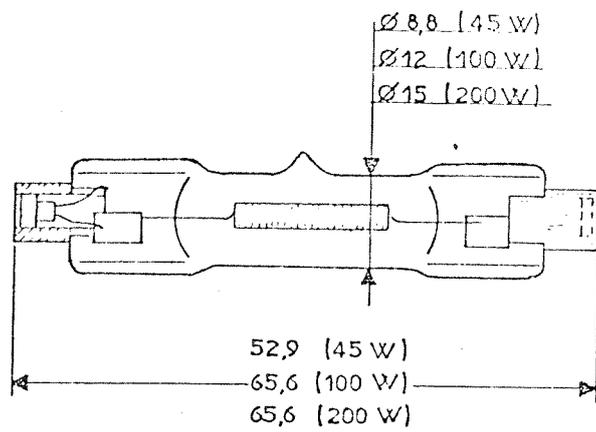
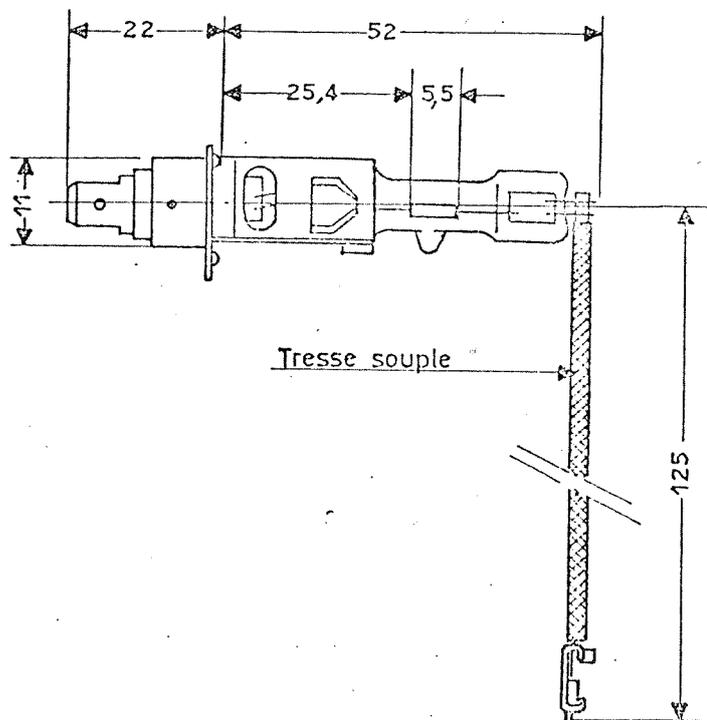


Fig.88_Type 2 pincements pour feux de piste à culot R7s



LAMPES AU SOL

La signalisation des aérodromes par feux d'approche et feux de pistes est également du domaine de l'O.A.C.I. qui a du admettre plusieurs systèmes, une normalisation, évidemment souhaitable, n'ayant pas encore été possible.

Les lampes trouvent place dans des feux "hors sol" ou dans des feux "encastrés".

Les feux hors sol conviennent bien pour les zones d'approche. Les seuils de piste et les pistes elles-mêmes demandent des feux ne faisant qu'une faible saillie dans le béton. Pour les lignes axiales, les appareils du type "pancake" ne doivent pas présenter de saillie supérieure à 6 mm.

L'alimentation électrique de ces feux est à intensité variable par l'intermédiaire de transformateurs d'isolement. L'intensité maximale de 6,6 A est l'intensité nominale. On réduit et on la règle en fonction de la visibilité. Les feux fonctionnent rarement à plein régime.

Les feux d'approche peuvent être comme aux U.S.A. constitués de lampes à réflecteur incorporé en verre pressé : 300W - 6,6 A par exemple, ou basés sur des lampes aux halogènes de 250W dans des systèmes optiques appropriés.

Les feux de piste utilisent des lampes aux halogènes qui apportent le double avantage de leur luminance élevée et de leurs faibles dimensions. Dans les "pancake" on trouve des lampes à deux pincements et culots en bout ou un seul pincement avec un réglage précis de la position du filament.

La figure 88 indique les dimensions de modèles à deux pincements utilisés aux U.S.A.

Le tableau XXIX en donne les caractéristiques et la figure 89 les dimensions d'un modèle développé en France sur la base d'un culot préfocus analogue à celui des lampes pour projecteurs d'automobile.

T A B L E A U XXIX

Lampes pour feux de piste

	Puissance W	Intensité A	Flux lm	Durée H	Culot
1 pincement	45	6,6	1000	1000 (1)	Spécial
	100	6,6	2500	1000 (1)	Spécial

1) Sous un régime à intensité variable fixé par cahier des charges.

C H A P I T R E X V

LES LAMPES DE PROJECTION

Parmi les lampes à incandescence, les lampes de projection ou lampes pour projecteurs constituent une catégorie très diversifiée de lampes dont le caractère commun est d'être adaptées au fonctionnement dans un système optique. Cette application demande des caractéristiques particulières du foyer lumineux incandescent.

LA LUMINANCE DEVIENT FONDAMENTALE

Considérons par exemple un projecteur. On démontre que l'intensité lumineuse dans l'axe, qui détermine la portée, est égale au produit de la luminance de la fenêtre de sortie du faisceau lumineux par l'aire de celle-ci. En aucun cas cette luminance ne peut être supérieure à celle du foyer lumineux lui-même. C'est une conséquence de la relation de Clausius qui exprime, dans le cas idéal d'une propagation de lumière sans absorption ni diffusion, la constance du rapport $\frac{L}{n^2}$ (L étant la luminance et n l'indice de réfraction du milieu optique).

Dans la réalité il y a diffusion et absorption de lumière et la luminance de la fenêtre de sortie dépend du flux lumineux disponible. On peut dire que le but du système optique est de capter le maximum de flux d'une source de luminance aussi élevée que possible. Ces systèmes utilisent des miroirs et des lentilles, et fournissent un faisceau de lumière, plus ou moins ouvert, suivant les applications.

La luminance du tungstène en fonction de la température a été donnée au chap. III. Elle croît très vite comme l'indique les chiffres ci-après :

T A B L E A U XXX

Luminance du tungstène

Température	Luminance
K	cd/cm ²
2800	725
3000	1310
3200	2210
3400	3510

En fait, les lampes de projection n'utilisent pas une surface plane de tungstène mais un filament spiralé, disposé en un ou plusieurs boudins.

Nous avons vu que la luminance moyenne d'un tel foyer peut être plus élevée que celle du tungstène plan malgré les vides constatés à l'intérieur du contour. Cela résulte des interréflections dans les spirales et entre spirales si elles sont proches les unes des autres (effet de corps noir).

Si le mode de formation du filament doit être étudié pour tirer le meilleur parti de cet effet, la température de fonctionnement la plus élevée possible reste le premier objectif. Pour augmenter la température, on dispose de trois moyens :

- 1) Adopter une durée de vie nominale aussi courte que possible compte tenu de l'utilisation. De nombreux appareils ne servent que pendant des temps assez brefs et les usagers peuvent s'accommoder de durées de lampes réduites et 100 H, 50 H, 25 H ou même moins, sont des durées courantes.
- 2) Choisir, malgré l'inconvénient d'un transformateur, un voltage très bas, ce qui conduit à des filaments plus gros et plus courts donc plus "poussés" et également plus faciles à concentrer.
- 3) Généraliser la technique des lampes aux halogènes. Nous avons vu que grâce à des ampoules de quartz et une pression de remplissage élevée on pouvait gagner jusqu'à 200° par rapport aux lampes classiques.

Les dimensions réduites des ampoules des lampes aux halogènes les rendent plus logeables dans les appareils. Elles supportent des conditions de fonctionnement plus dures au point de vue échauffement et enfin, caractéristique essentielle, elles ne noircissent pas en cours de durée.

.../...

Si les trois conditions ci-dessus, basse tension, courte durée, lampe aux halogènes sont satisfaites simultanément, on atteint la luminance maximale que l'on peut espérer d'une lampe de projection à filament de tungstène. Il semble que l'on puisse situer cette limite vers 5000 cd/cm², chiffre déjà considérable si on le compare à la luminance des filaments des lampes d'éclairage général (250 à 1200 cd/cm² suivant la puissance) mais luminance faible par rapport à celle des lampes à arc à électrodes de carbone et de certaines lampes à décharge.

T A B L E A U XXXI

Luminance de lampes à décharge spéciales

	<u>cd/cm²</u>
Arcs au charbon :	15 000 - 150 000
Lampes au mercure très haute pression :	20 000 - 45 000
Lampes au Xénon :	10 000 - 70 000

La lampe à incandescence ne peut rivaliser avec ces sources, qui seules, permettent la projection cinématographique dans les grandes salles.

CARACTERISTIQUES GENERALES DES LAMPES DE PROJECTION

Les puissances nominales normalisées sont les suivantes : 50 - 100 - 150 - 250 - 650 - 1000 - 2000 - 5000 - 10 000 Watts.

Aux tensions usuelles de distribution s'ajoutent les très basses tensions, le plus souvent : 12 et 24 Volts.

Les culots normalisés par la C. E. I. et surtout ceux qui assurent la position exacte du foyer lumineux sont utilisés. L'interchangeabilité doit être évidemment garantie sans réajustement du système optique.

Avec ces culots du type Préfocus la tolérance sur la cote du foyer lumineux par rapport au plan de référence est en général de $\pm 0,5$ mm, exceptionnellement de $\pm 0,25$ mm dans les très petites lampes.

Pour indiquer les dimensions du foyer lumineux, on donne la longueur et la largeur du rectangle enveloppe de la partie incandescente, la précision demandée étant de ± 10 %.

Les dimensions extérieures de la lampe, diamètre et hauteur totale, sont moins critiques et les tolérances peuvent atteindre plusieurs millimètres sans inconvénient. Les constructeurs de projecteurs doivent toujours réserver un certain espace libre autour des lampes pour éviter leur échauffement exagéré. Une ventilation forcée peut être nécessaire.

.../...

Il faut rappeler à ce sujet les températures limites des ampoules en fonction de la nature du verre :

Verres tendres	: 400°C
Verres durs (horosilicates)	: 470°C
Verres très durs (aluminosilicates)	: 650 - 700°C

En fait, le constructeur doit indiquer les températures maximales d'utilisation évidemment inférieures aux valeurs ci-dessus. Si la lampe est équipée d'un culot classique, on admet comme maximums au culot :

200°C (E 27)	250°C (E 40)
--------------	--------------

Les lampes aux halogènes supportent des températures plus élevées, le point critique étant le pincement. On a normalisé une méthode de mesure de sa température et on admet 350°C pour les lampes de longue durée, 400°C pour les lampes de courte durée (50 H par exemple) et 450°C pour les lampes dont la durée est réduite à quelques heures. Pour l'ampoule de quartz, la limite est fixée à 900°C.

Le noircissement a toujours été un problème sérieux pour la qualité des lampes de projection du type classique. L'emploi de getters de longue durée (plaquettes de zirconium) améliore la situation. Des solutions complémentaires, telles que disposition d'une grille de nickel au dessus du filament pour recueillir une partie du tungstène transporté par le gaz de remplissage, voire introduction de cristaux de tungstène dans les grosses ampoules de lampes "Studio" pour en racler la surface interne en les secouant par mouvement de va et vient, ont été pratiquées. C'est finalement le cycle d'halogène qui a apporté la réponse définitive à la question du maintien en durée.

Nous citerons les lampes de projection les plus utilisées. Suivant les applications, des points techniques particuliers sont à mettre en évidence.

LAMPES POUR LA PHOTOGRAPHIE, LE CINEMA ET LA TELEVISION

Il s'agit des lampes destinées à l'éclairage des studios ou aux prises de vue extérieures (reportages).

Une caractéristique, importante ici, alors qu'elle est secondaire ailleurs, est la température de couleur des lampes ou plus exactement la température de distribution (Voir chap.II). L'équilibrage des couches sensibles en photo couleur, celui des signaux couleur en télévision, suppose une composition spectrale de la lumière bien déterminée. C'est la température $T_c = 3200$ K qui a été retenue. Elle est utilisée par tous les professionnels intéressés. Signalons néanmoins une demande complémentaire, dans certains Pays, de lampes à $T_c = 3350$ K.

Il faut noter que photo et télévision s'accrochent de tolérances non négligeables. On admet en effet :

$$T_c = 3200 \text{ K} \pm 100$$

.../...

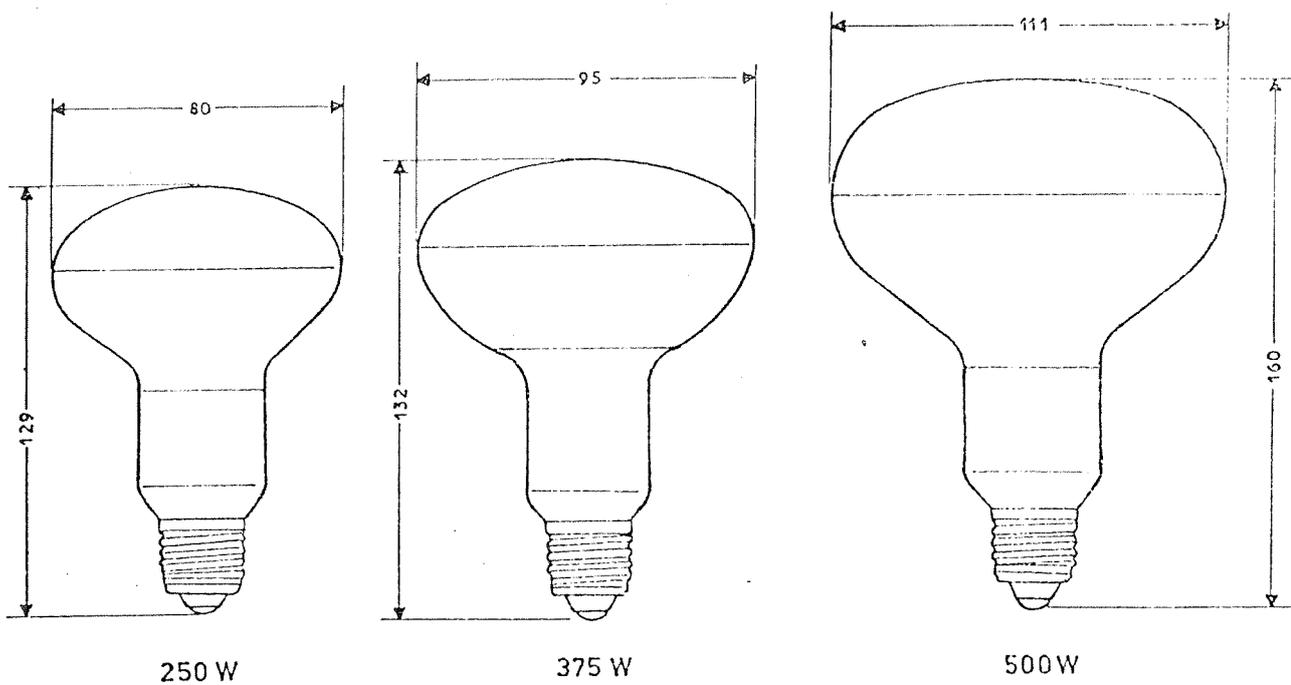


Fig.90_LAMPES POUR PRISES DE VUE D'AMATEURS (lampes classiques)

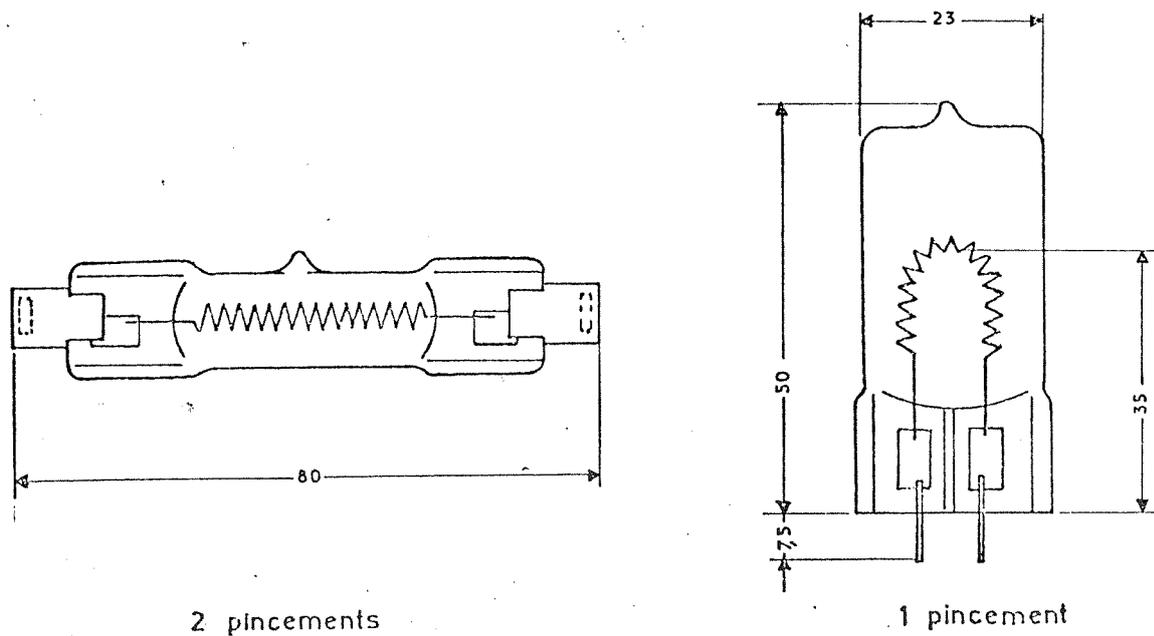


Fig.91_LAMPES POUR PRISES DE VUE D'AMATEURS (lampes aux halogènes)

Si l'on veut utiliser des lampes donnant une lumière analogue à la lumière du jour, donc à température de couleur beaucoup plus élevée, il faut corriger la répartition spectrale avec des ampoules en verre bleu. La température de couleur est de 4800 K environ mais la coïncidence avec la température de distribution n'est plus garantie.

La température de couleur des lampes à incandescence est très influencée par les variations de la tension d'alimentation. On peut utiliser la relation :

$$\frac{T}{T_0} = \left[\frac{V}{V_0} \right]^{0,37}$$

Elle montre qu'autour de 220 V la température de couleur varie de 5° environ par volt. On peut voir également que la tolérance de 100 K correspond à 8 % sur la tension d'alimentation. Si la température de couleur doit être la même pour une gamme de lampes de voltage déterminé, il est évident que la durée de vie devient une variable. Elle augmente avec la puissance.

1) MODELES POUR PHOTO ET CINEMA D'AMATEUR (ou reportage)

Pour cette application, il importe surtout de tirer le maximum de lumière de lampes d'une puissance limitée. La durée est réduite à quelques heures pour une température qui peut atteindre 3400 K. L'efficacité dépasse 30 lm/w.

Les lampes les plus anciennes dans ce domaine placées dans des réflecteurs en aluminium poli sont très voisines d'apparence des lampes Standard. Avec ampoule format réflecteur on a pu éviter la nécessité d'un réflecteur extérieur. Ainsi les lampes de 250, 375 et 500 W de la figure 90.

On a toujours cherché à réduire l'encombrement des dispositifs d'éclairage, voire à le fixer sur la caméra elle-même. Les lampes aux halogènes ont, dès leur apparition, donné naissance à des dispositifs dont la puissance et la "compacité" sont remarquables.

La fig. 91 montre deux lampes de 650 W de ce type : lampe à 1 pincement et 2 pincements. La durée est seulement de 15 heures.

2) MODELES POUR STUDIOS

Ces lampes prennent place dans des projecteurs très différents suivant qu'il s'agit d'un éclairage d'ambiance ou d'un éclairage dirigé. Les appareils du premier type, simples réflecteurs, ("Scoop") demandent des lampes à $T_c = 3200$ K. La luminance des foyers lumineux est secondaire. Les appareils du second type sont de véritables projecteurs ("Spot") qui doivent donner des faisceaux lumineux d'ouverture réglable et exigent des lampes à foyer lumineux de forte luminance, donc concentré.

Les lampes aux halogènes du type linéaire à $T_c = 3200$ K conviennent bien pour l'éclairage d'ambiance; gamme de puissances 650 - 800 - 1000 - 1250 W - durée variant de 75 à 200 H suivant la puissance.

.../...

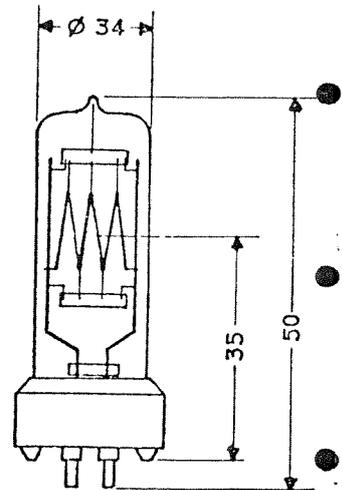
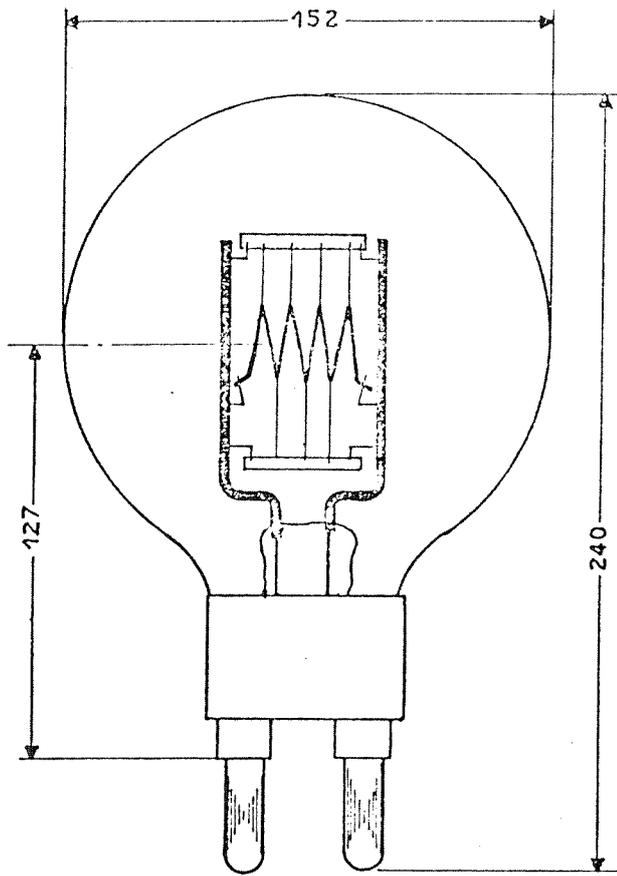
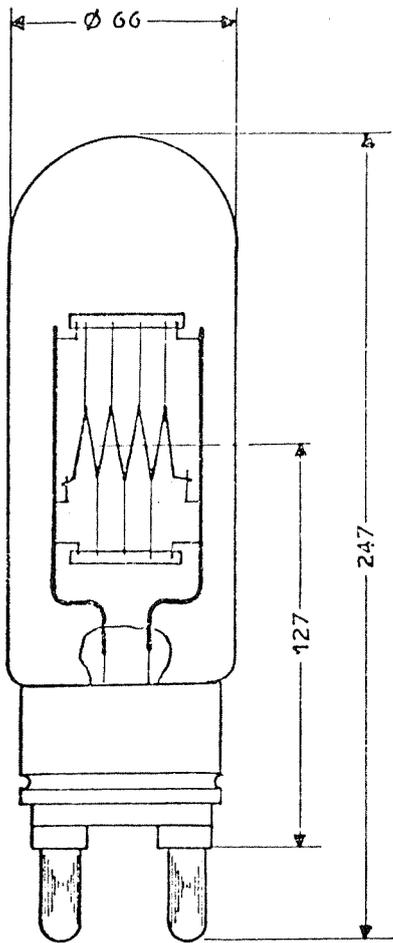


Fig. 92. Lampes Studio

Pour les projecteurs "Spot" à lentilles de Fresnel, on utilise les lampes "Studio" proprement dites, dont le foyer lumineux est une grille constituée de plusieurs boudins parallèles. Fig. 92.

Pour remplacer les lampes classiques, il existe deux séries de lampes aux halogènes, dont le filament est monté de la même façon : une série de lampes en verre extra-dur qui trouvent leur place dans les optiques existantes et apportent, sinon tous les avantages de la technique "halogène", tout au moins l'absence de noircissement en fonctionnement et une série de lampes de quartz à foyer lumineux plus concentré et à luminance plus élevée.

La figure 92, montre pour une même puissance les trois types de lampes. Gamme des puissances : 650 - 1000 - 2000 - 5000 et 10 000W.

Les lampes de quartz, que ce soit pour la photo, le cinéma ou la télévision, doivent être protégées par des fusibles rapides, de façon à éviter tout éclatement qui résulterait d'un arc en fin de durée. Le tableau XXXII, donne les valeurs de ces fusibles.

La télévision pose le problème du réglage en intensité des projecteurs suivant les effets recherchés. En noir et blanc, le gradateur électronique apporte une bonne solution. Pour la couleur, une variation de la température étant exclue, on utilise quelquefois, des lampes avec deux filaments de 1250W ou deux filaments de 2500W.

TABLEAU XXXII

Fusibles pour lampes Photo et Studio (fusibles rapides - 500V)

BV (1)	650W	6A
HV (2)	650W	4A
BV	1000W	10A
HV	1000W	6A
BV	2000W	25A
HV	2000W	10A
BV	5000W	25A
HV	5000W	50A

(1) BV : 115 et 125V

(2) HV : 220 et 240V

.../...

Le tableau XXXIII donne à titre indicatif, la gamme des lampes de quartz pour Studio qui, semblent couvrir l'ensemble des besoins des télévisions européennes. Les culots sont des culots à deux ou quatre broches.

TABLEAU XXXIII

Lampes Studio type quartz - halogènes

D I M E N S I O N S (mm)				
Rating	Diamètre	O/A.L.	L.C.L.	Culot
650W	40 max.	125 max.	55	2 broches GX 9.5
1000W	40 max.	125 max.	55	2 broches GX 9.5
2000W	40 max.	135 max.	70	2 broches GY 16
2500W (1 $\frac{1}{4}$ /1 $\frac{1}{4}$ kW)	70 max.	220 max.	143	4 broches GX 38q
5kW	75 max.	280 max.	165	Bipost G.38
5kW (2 $\frac{1}{2}$ /2 $\frac{1}{2}$ kW)	70 max.	220 max.	143	4 broches GX 38q

LAMPES POUR FILMS ETROITS ET DIAPOSITIVES

Ces lampes prennent place dans des appareils destinés à la projection de vues fixes ou mobiles de très petites dimensions. Rappelons les formats usuels :

Film 8mm	:	3,3x4,5mm
Film super 8	:	4x5,4mm
Film 16mm	:	7,3x9,8mm
Diapo	:	24x36mm

SCHEMAS OPTIQUE

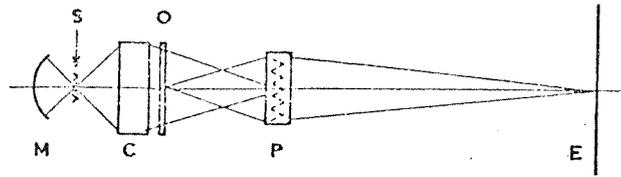


Fig. 93_ Pour projecteur de diapositives

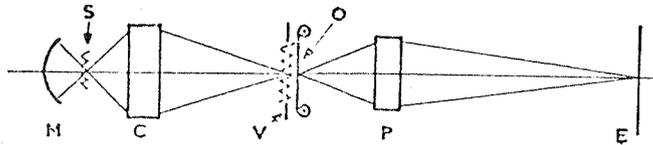


Fig. 94_ Pour projecteur de film avec condenseur-lentille

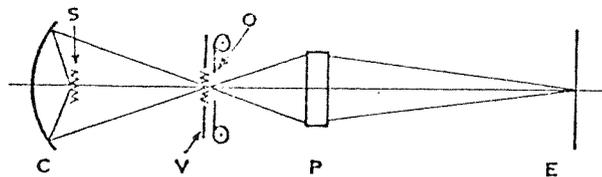


Fig 95_ Pour projecteur de film avec condenseur-miroir

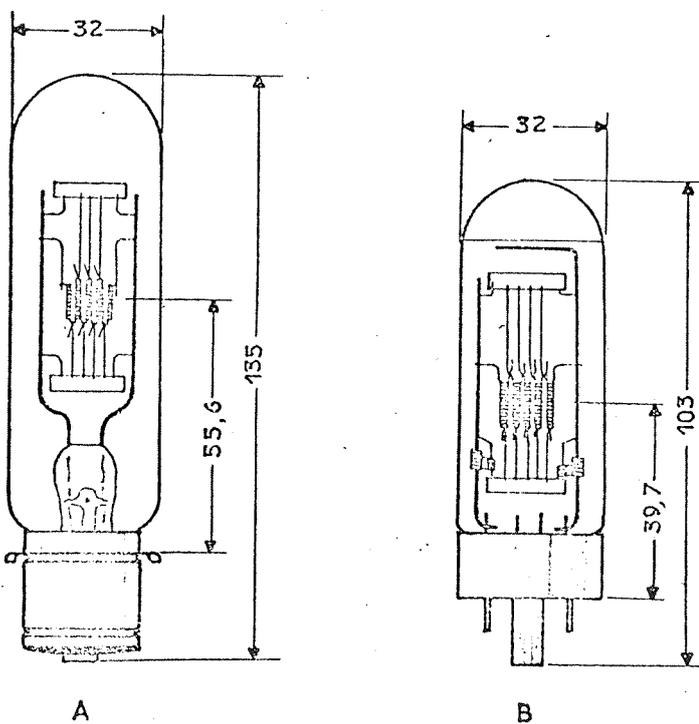


Fig. 96_ Lampes de projection pour films et diapositives (tensions normales)

Les films demandent une fenêtre de projection rectangulaire, les diapos une fenêtre carrée, compte-tenu du passage possible dans le sens horizontal ou vertical.

Pour obtenir le meilleur rendement, un condenseur dirige le maximum du flux émis par la source vers l'objectif qui doit avoir l'ouverture la plus grande possible.

La figure 93, montre le schéma optique d'un projecteur de diapositives dont le condenseur - lentille C forme l'image de S dans l'objectif P. La fenêtre de projection O est juste devant le condenseur. Un petit miroir sphérique M forme l'image du filament sur lui-même (pour améliorer la luminance) ou donne une image juxtaposée (pour augmenter les dimensions apparentes du foyer lumineux).

Pour la projection des films de 8mm, le problème est différent car la fenêtre passe-film a des dimensions très inférieures au diamètre de l'objectif. On la place près du foyer du condenseur et le foyer lumineux doit avoir la même forme que la fenêtre passe-film avec une luminance aussi uniforme que possible.

La figure 94, donne le schéma optique avec un condenseur-lentille et la figure 95, avec un condenseur-miroir.

Un condenseur-miroir du type elliptique permet de capter une fraction plus grande du flux émis par la lampe qu'une lentille. Le filament est alors au premier foyer de l'ellipsoïde et la fenêtre passe-film au second.

1°) Lampes pour tensions normales (120V ou 220V)

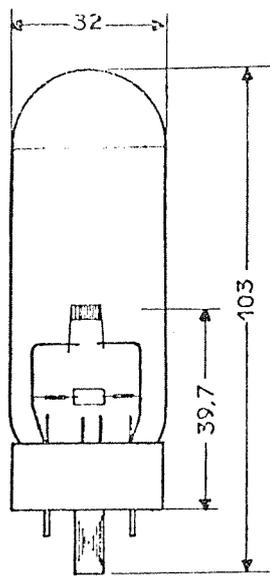
Ces lampes, de moins en moins utilisées, sont restées de construction classique. Le foyer est constitué en grille par des boudins parallèles, éventuellement montés en quinconces. Le culot est souvent du type Préfocus à ailettes P 28S. Un exemple est donné par la figure 96-A.

Une fabrication plus évoluée fait appel à une monture de lampe fixée sur une base de verre sur laquelle l'ampoule est scellée ce qui permet un bon centrage. Le culot est un culot à broches genre radio - culot G 17q. La figure 96-B montre une telle lampe. La figure 96-C concerne une lampe du même type avec miroir auxiliaire interne dit réflecteur de proximité. Puissances courantes : 150 - 300 et 500 Watts.

2°) Lampes de très bas voltages

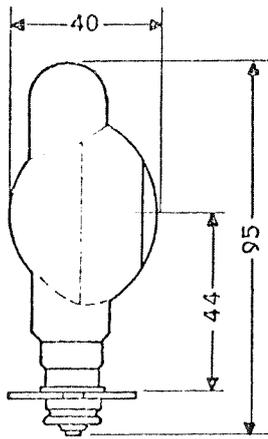
Elles s'imposent particulièrement pour la projection du film de 8mm. Avec une lampe de voltage normal en effet, le rapport entre le flux lumineux parvenant sur l'écran (obturateur tournant en fonctionnement) et le flux utilisé de la lampe n'est même pas de 2%.

Une lampe de 12V, grâce à son filament court boudiné sur mandrin plat, demande cinq fois moins de puissance pour obtenir un résultat supérieur. Puissances courantes : 50 - 100 - 150W - Durée 25h.



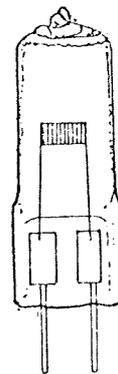
A

Technique classique



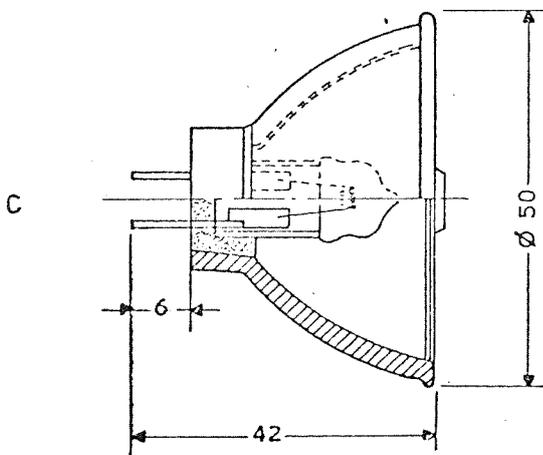
B

Lampe métallisée



C

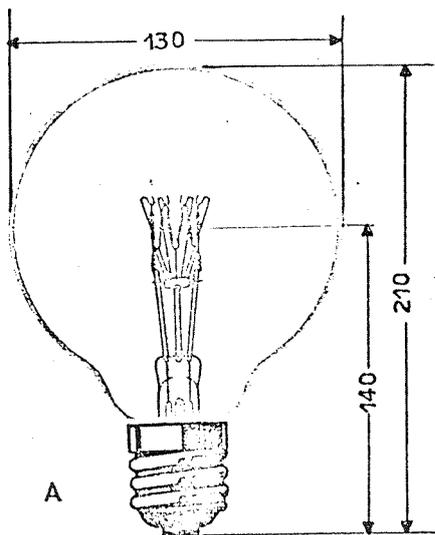
Technique halogènes



C

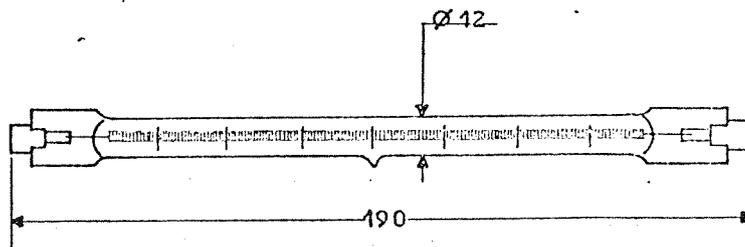
Ensemble optique

Fig. 97 - LAMPES POUR PROJECTION DE FILMS ET DIAPOSITIVES



A

1000W classique



B

1000W halogènes

Fig. 98 - LAMPES POUR PROJECTEURS D'ILLUMINATION

La figure 97-A montre un modèle de technique classique.

La figure 97-B concerne également une lampe de technique classique mais très étudiée au point de vue rendement optique. Métallisée extérieurement, l'ampoule est elliptique à l'arrière et sphérique à l'avant, la fenêtre de sortie étant plane. Les rayons lumineux trop divergents pour être utilisés sont renvoyés par la zone sphérique vers le filament.

La technique "lampe aux halogènes" appliquée aux filaments plats de très bas voltage conduit à une luminance plus élevée (4500 cd/cm² pour une lampe de 12V-100W contre 3000 environ) et à la suppression du noircissement. La durée choisie est double (50h au lieu de 25h).

La figure 97-C montre une telle lampe.

La figure 97-D concerne la dernière et remarquable étape, celle de la création d'un véritable ensemble optique avec une lampe aux halogènes et un condenseur-miroir, extérieur, mais solidaire de la lampe. Ce miroir capte le flux du filament au foyer de l'ellipsoïde, sous un angle supérieur à 180°. Il est, de plus, "dichroïque", c'est-à-dire transparent pour l'infrarouge, ce qui apporte une solution au problème de l'échauffement des films soumis à un éclairage énergétique qui n'a cessé de croître avec l'efficacité des projecteurs.

Pour la projection des diapositives il faut signaler la lampe aux halogènes de 24V-150W à filament sur mandrin plat rectangulaire dont la surface apparente est rendue carrée dans les projecteurs par doublement suivant le schéma optique de la figure 93. (utilisation du miroir arrière)

LAMPES POUR PROJECTEURS D'ILLUMINATION

Ces lampes, compte-tenu de leur emploi pour l'éclairage des grands espaces (terrains de sport, parkings, etc ...) ou des monuments publics sont prévues pour une durée de vie relativement longue : 1000 ou 2000 heures. On peut donc, dans une certaine mesure, les considérer comme des lampes d'éclairage général, prolongeant le champ d'application des lampes à réflecteur incorporé. Pendant longtemps les projecteurs d'illumination ont été des réflecteurs du type parabolique, d'assez grand diamètre, dans lesquels les lampes Standard de 1000 ou 1500W pouvaient prendre place à défaut de lampes offrant une disposition mieux adaptée du filament (fig.98-A).

Les lampes aux halogènes du type linéaire (fig. 98-B) ont permis la fabrication de projecteurs cylindro-paraboliques très compacts et offrant, de ce fait, des avantages nombreux.

Puissances les plus utilisées : 1000 et 2000 Watts - Durée 2000 heures.

.../...

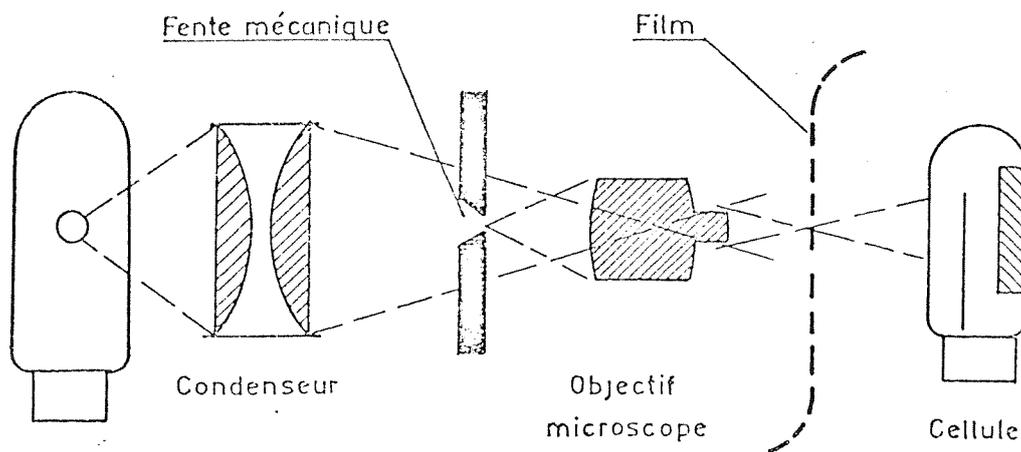
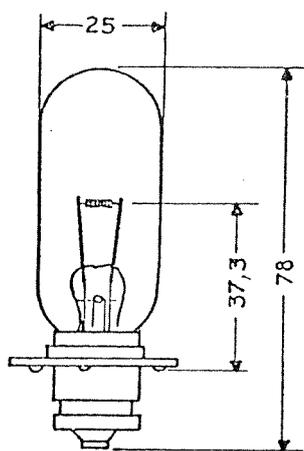
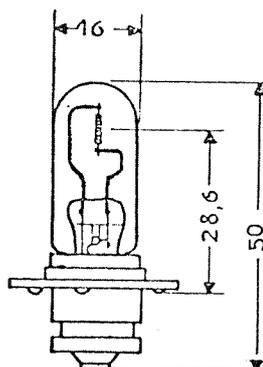


Fig. 99 _LECTEUR DE SON _ Schéma optique



10V_7,5A

Fig. 100



6V_1A

Fig. 101

LAMPES POUR EXCITATION DE CELLULES (LECTEURS DE SON)

LAMPES POUR EXCITATION DE CELLULE

On groupe souvent sous ce titre de très petites lampes de projection d'applications diverses ayant en commun les caractéristiques suivantes :

- très bas voltage (12V ou moins)
- puissance réduite (75W ou moins)
- durée réduite (100H ou 50H)

Elles sont souvent équipées d'un culot du type Préfocus.

Les lampes pour lecteurs de son des projecteurs cinématographiques sont destinées à des dispositifs optiques comme celui qui est schématisé sur la fig.99. L'image d'une fente est par l'intermédiaire d'un objectif de microscope projetée sous forme d'un trait d'épaisseur 0,02mm sur la piste sonore du film.

Il est évidemment important que la lampe ait une ampoule sans défaut et un filament positionné avec précision. Il faut, dans une telle application, éviter l'influence des fluctuations du courant sur la cellule photoélectrique. On utilise soit un filament assez gros pour présenter une bonne inertie thermique, soit un filament plus fin mais, alimenté en courant redressé et filtré. D'où des lampes très différentes. La figure 100 montre une lampe de 10V-7,5A du premier type et une lampe de 6V-1A du second (Fig. IOI)

Des lampes analogues trouvent place dans les petits systèmes optiques demandant une source ponctuelle : appareils de commande par cellules photoélectriques, visionneuses, appareils de mesure et d'enregistrement, etc...

LAMPES DIVERSES

Les lampes de projection que nous venons de décrire sont celles qui figurent habituellement dans les catalogues.

Nous citerons les lampes pour pharès côtiers et balises maritimes, les lampes pour l'armée et la marine de guerre, les lampes pour éclairage des tables d'opération, les lampes pour appareils de reproduction etc... aucune liste ne peut être exhaustive.

C H A P I T R E X V I

LES LAMPES A RAYONNEMENT INFRAROUGELES LAMPES I-R EN VERRE

On peut dire que la lampe à incandescence est un émetteur de rayonnement infrarouge avant d'être une source de lumière. C'est ainsi que les lampes Standard de 40W et de 500W, (en 120V) sont caractérisées par les bilans thermiques suivants :

T A B L E A U X X X I V

Bilan thermique des lampes Standard

	<u>LAMPES</u>	
	<u>ST. 40W</u>	<u>ST. 500W</u>
Energie I-R rayonnée par le filament	64 %	70 %
Energie lumineuse	7,5 %	12 %
Energie venant de l'ampoule (rayonnement I-R et convection)	* 28,5 %	18 % *

.../...

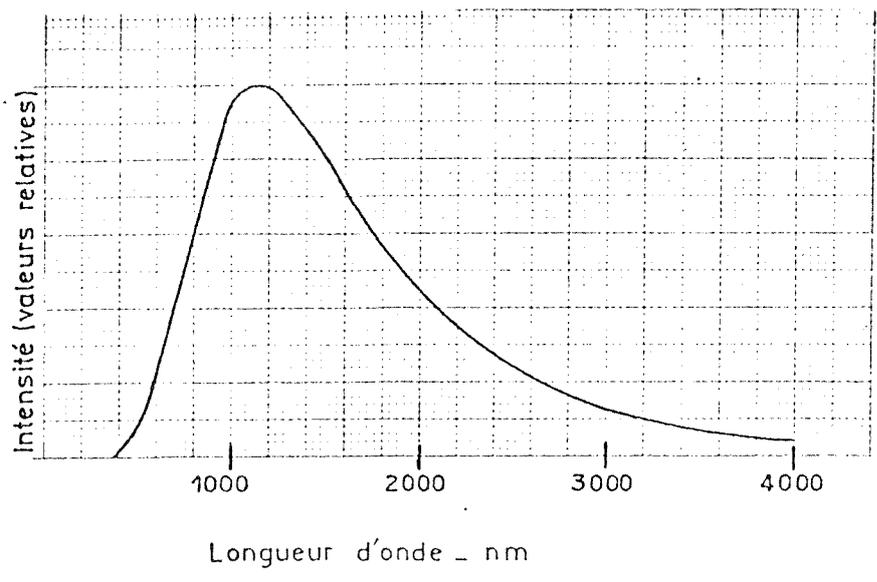
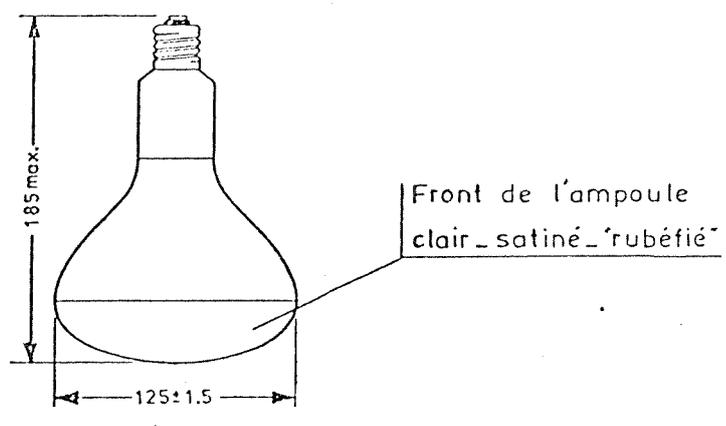


Fig. 102 - Emission spectrale T = 2400 K



Fig_103 Lampe I.R.

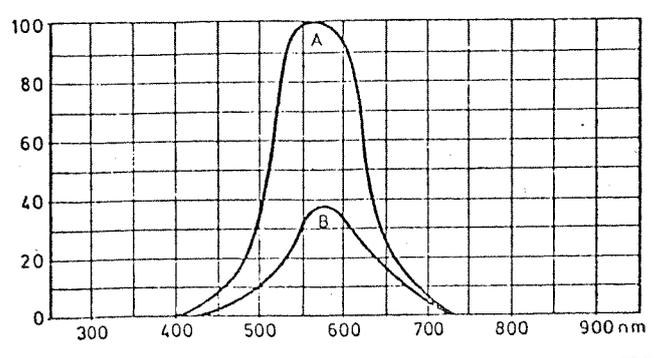


Fig. 104 - A = Emission lumineuse d'une lampe claire
B = Emission lumineuse d'une lampe rubéfiée

L'utilisation du rayonnement des lampes pour sa valeur calorifique apparait aux U.S.A. dès les années 30. Il s'agissait alors de lampes à filament de carbone dans des réflecteurs plaqués or pour sécher des raccords de peinture sur carrosseries d'automobiles.

Les lampes carbone, fonctionnant avec filament dans le vide, rayonnaient la presque totalité de la puissance fournie, mais présentaient l'inconvénient d'un noircissement en durée très important. Elles furent rapidement abandonnées au profit de lampes à filament de tungstène en atmosphère d'azote et à ampoule formant réflecteur, d'aspect très voisin des lampes d'éclairage.

Une température de fonctionnement de 2400-2500 K a été adoptée, ce qui réduit l'émission lumineuse (mais l'efficacité reste néanmoins de 7,5 lm/w) et confère au filament une durée de vie théorique presque illimitée. La durée réelle de la lampe, surtout dans les applications industrielles, est fortement tributaire des conditions d'emploi.

La fig. 102 montre la courbe d'émission spectrale, un peu décalée vers les grandes longueurs d'onde par rapport à celle d'une lampe d'éclairage, mais néanmoins telle que l'absorption de rayonnement par le verre des ampoules (qui commence à $\lambda = 2,5 \mu\text{m}$) reste très faible.

La fig. 103 indique les dimensions du modèle le plus courant. Les ampoules sont en verre ordinaire ou en verre dur, ce dernier indispensable lorsqu'il y a risque pendant l'utilisation de projection de liquides. Le culot est un culot E 27 fixé mécaniquement, c'est à dire vissé sur la base de l'ampoule, filetée à cet effet.

Les puissances sont : 150-250 et 375 W. Les applications sont très variées. Nous citerons les principales comme radiateurs de chauffage.

On fait un large emploi de lampes de 150 W et 250 W pour l'élevage des jeunes animaux (poulets, porcelets etc...). La partie frontale des lampes est simplement satinée c'est à dire légèrement dépolie ou "rubéfiée" (red-front). Il faut comprendre que par un traitement spécial (voir chap. XII) elle est colorée en rouge. Cette coloration réduit l'émission de lumière à environ 25% de la valeur pour une lampe claire. La fig. 104 donne les courbes d'émission lumineuse correspondantes.

Les lampes claires de 375 W trouvent des applications comme sources de chauffage d'appoint dans des circonstances ou leurs qualités propres : mise en route immédiate, faible encombrement, sécurité d'installation, voire solaire grâce à la lumière émise, sont appréciés. On en trouve dans les piscines, les salles de bain, les vestiaires, les kiosques à journaux, etc...

On peut rattacher à ces utilisations, certaines lampes I-R adaptées spécialement à des applications médicales. Des lampes rubéfiées de 150 W en verre pressé, d'une durée de 300h seulement, permettent des applications locales de rayonnement infra-rouge. La courbe durée est justifiée par la recherche d'une température de fonctionnement élevée et d'une émission spectrale mieux adaptée à la pénétration des radiations dans l'épiderme, compte tenu de la transmission à travers l'eau et l'hémoglobine.

.../...

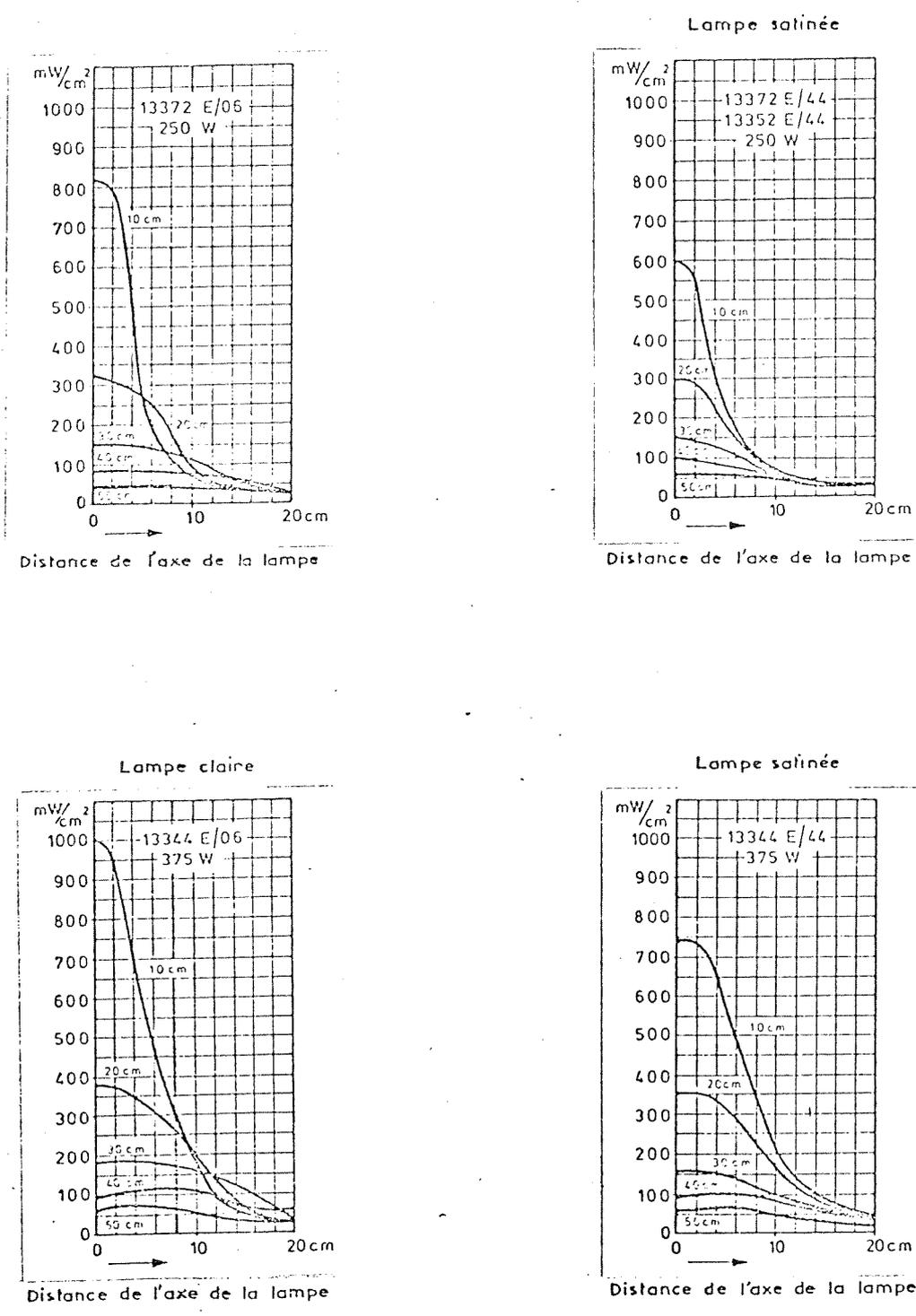


Fig. 105—Courbe d'éclairage énergétique sur des plans situés sous les lampes à la distance indiquée

LAMPES POUR L'INDUSTRIE

Une norme internationale (Publication C.E.I. n° 240) fixe les dimensions des lampes I-R pour garantir leur interchangeabilité.

Elle indique les températures limites suivantes :

	Verre ordinaire	Verre dur
Sur l'ampoule	420° C	500° C
au culot	275° C	325° C

Températures qui supposent non seulement la fixation mécanique des culots mais si nécessaire des dispositions particulières concernant les soudures des entrées de courant : soudures haute température, ou brasure à l'argent.

Les puissances courtes sont 250 W (lampes à miroir aluminium par vaporisation sous vide) et 375 W (lampes à miroir argent).

Les températures indiquées plus haut correspondent à une température d'ambiance maximale d'environ 200° C pour les lampes de 250 W et 250° C pour les lampes de 375 W.

Les conditions d'emploi étant beaucoup plus éprouvantes que celles des lampes d'éclairage, la durée de vie moyenne réelle des lampes I-R industrielles est évaluée à 5000h.

Les diagrammes photométriques donnés par la fig. 105 concernent les éclairagements énergétiques exprimés en mw/cm^2 sur des plans successifs dont la distance à la partie frontale de la lampe est indiquée. Le cône de flux énergétique est plus ouvert pour les lampes satinées que pour les lampes claires.

Le rendement, défini comme le rapport du flux énergétique rayonné à la puissance nominale de la lampe, est sensiblement égal à 0,65.

On cherche généralement à obtenir une action uniforme à l'aide de lampes disposées sur les parois d'un four. Pour cela une distance entre lampes et surfaces irradiées, au moins égale au double de l'écartement des lampes (mesuré d'axe en axe) est recommandée. Dans un four-tunnel, les parois réfléchissantes, généralement en aluminium poli et le mouvement de translation des pièces traitées contribuent beaucoup à égaliser les éclairagements et le flux absorbé.

Par rapport aux autres modes de chauffage les lampes ^{sont} caractérisées par une action immédiate mais superficielle. Celle-ci permet lorsqu'il s'agit de matières offrant une grande surface, des résultats d'une surprenante rapidité. L'absence d'inertie thermique donne une grande souplesse aux dispositifs de régulation qui peuvent être utilisés pour se tenir toujours au plus près de la température maximale admissible.

.../...

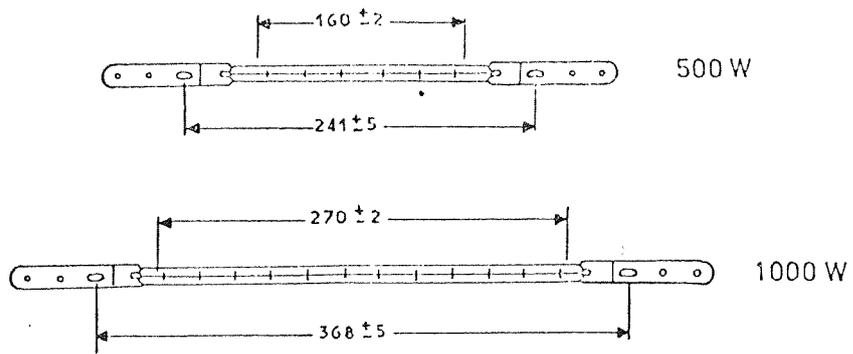


Fig.I06. Lampe infrarouge type quartz

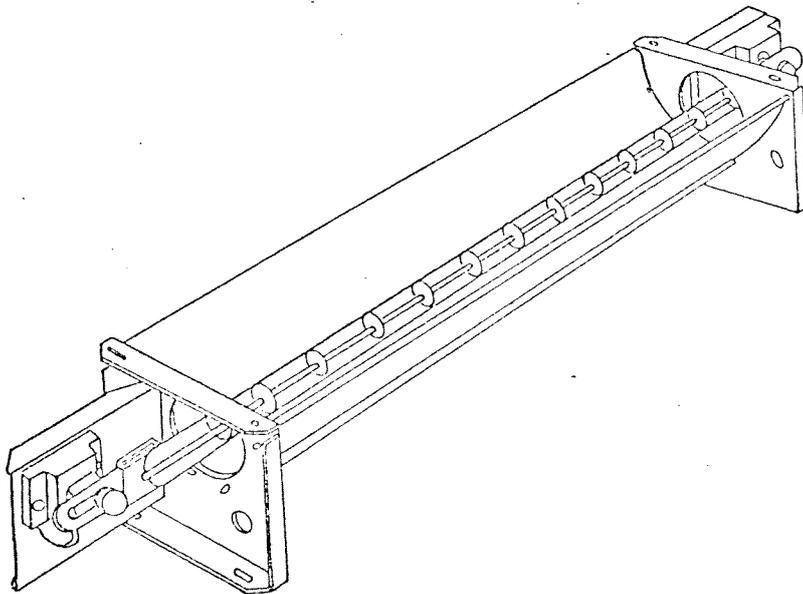


Fig.I07 .Lampe infrarouge de 1000 W dans un réflecteur

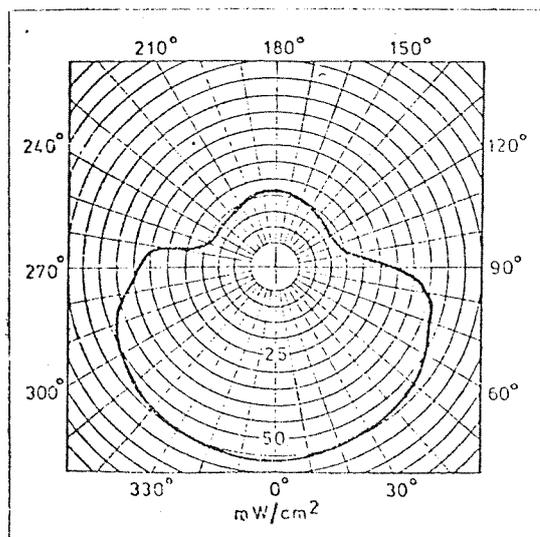


Fig. 108 Diagramme d'une lampe avec recouvrement céramique

Les lampes s'appliquent aux traitements thermiques ne réclamant pas une température supérieure à 250° C environ. On peut citer particulièrement le séchage des peintures sur tôle dans l'industrie automobile.

EMETTEURS DE QUARTZ

L'emploi des lampes à ampoule de verre est concurrencé par celui des "émetteurs" de quartz, plus puissants et supportant des températures très élevées.

Le filament de ces lampes ou "émetteurs I-R" est maintenu par des rondelles de tantale dans l'axe d'un tube de quartz d'un diamètre voisin de 1 cm.

La température de fonctionnement est la même que celle des lampes : 2400 K donc relativement faible, ce qui évite pratiquement le noircissement des ampoules. Le remplissage est fait à l'argon. Rendement : environ 0,80 pour l'énergie rayonnée. Durée de vie : supérieure à 5000 heures.

Comme toujours avec les ampoules de quartz, on doit utiliser au pincement des passages sur rubans de molybdène. La connexion électrique n'est pas faite avec de véritables culots mais par des lames flexibles de nickel dans lesquelles sont percés deux trous et une boutonnière (fig. 106).

En principe ces lampes dont la puissance est : 500-1000 ou 2000 W - plus rarement 3000 W doivent fonctionner horizontalement. On peut fabriquer des lampes spéciales pour fonctionnement vertical sous réserve de bloquer les supports du filament dans les tubes de quartz.

Les températures limites d'emploi sont : 900° C pour l'ampoule - 300° C pour le pincement afin d'utiliser la lampe en longue durée. Une température supérieure à 300° C est admissible en admettant quelque sacrifice. Par exemple : pour 1000 heures seulement : 400° C. Les pincements étant les points sensibles des lampes, on doit les soustraire autant que possible à un échauffement exagéré. La fig. 107 montre un émetteur de 1000 W dans un réflecteur métallique laissant en dehors les deux extrémités.

La formule : lampe à réflecteur incorporé n'est pas possible dans le cas des émetteurs en quartz, mais une réflexion diffuse du flux peut être obtenue en les recouvrant extérieurement sur la moitié de leur circonférence avec revêtement céramique. La fig. 108 montre le diagramme des intensités qui caractérise les lampes ainsi traitées.

Les éclairagements énergétiques fournis par les émetteurs de quartz peuvent être considérables car la puissance linéaire des filaments atteint 30 à 40 W/cm et l'encombrement des lampes est très réduit. Dans une application particulière : l'étude des contraintes thermiques sur avions supersoniques et missiles, on n'hésite pas à survolter momentanément les lampes pour augmenter encore leur puissance (par exemple puissance triple en passant de 220 V à 400 V).

.../...

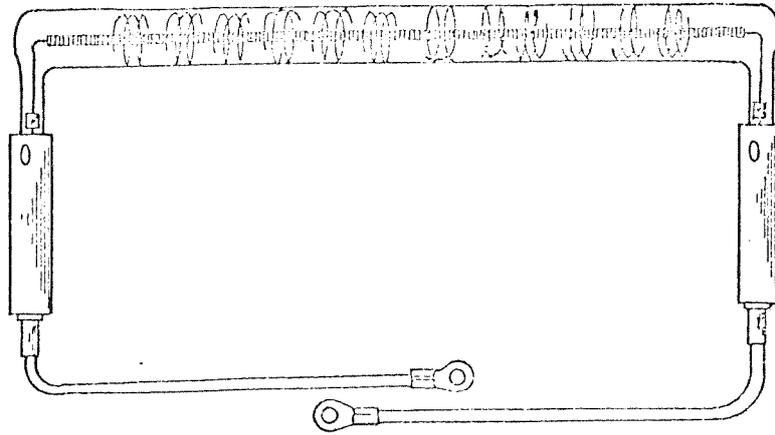


Fig.109 .Lampe infrarouge aux halogènes 20KW_380V

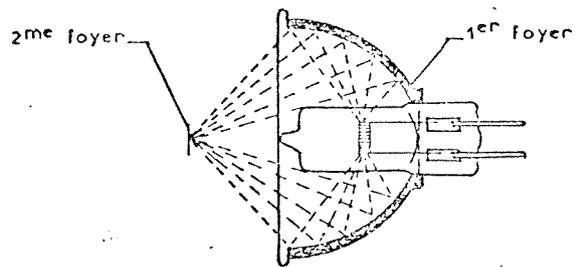


Fig.110 -Lampe 24V_150W dans un réflecteur elliptique

Dans l'industrie, les émetteurs de quartz apportent, par rapport aux lampes, l'avantage de leur robustesse. On distingue sur la fig. 106 leur présence à la partie inférieure d'un four-tunnel.

LAMPES AUX HALOGENES

Pour atteindre des valeurs encore plus élevées d'éclairage énergétique et sans survoltage, une solution possible est d'adopter une température de fonctionnement comparable à celle des lampes d'éclairage avec la technique "lampe aux halogènes", qui élimine le noircissement. C'est ainsi que des lampes de 12 ou 20 KW (sur 420V) fonctionnent à 3000 K, avec une puissance linéaire du filament de 300 W/cm, ont été réalisées. Ces lampes doivent être utilisées dans des réflecteurs refroidis par une circulation d'eau. La fig. 109 montre une telle lampe dont les extrémités sont recourbées pour les placer hors du réflecteur.

Des lampes I-R aux halogènes ont également été développées pour les machines à photocopier utilisant des papiers thermosensibles.

Signalons pour terminer que la concentration du flux calorifique à partir de filaments à haute température dans des miroirs appropriés a permis de résoudre des problèmes de soudure.

La fig. 110 montre une lampe aux halogènes de 24 V - 150 W au foyer d'un réflecteur en verre métallisé du type elliptique pour des soudures ponctuelles au second foyer.

TABLE DES MATIERES

=====

CHAPITRE I - HISTORIQUE

Les débuts de l'éclairage électrique - Les précurseurs dans le domaine
l'incandescence - L'oeuvre d'EDISON - Les premières caractéristiques
techniques - Les lampes à filament métallique.

CHAPITRE II - LES LOIS DU RAYONNEMENT THERMIQUE - LE CORPS NOIR

Grandeurs énergétiques : flux - intensité - Luminance - Exitance
énergétique - Loi de Lambert - Emission spectrale et grandeurs
lumineuses - Radiations lumineuses, ultraviolettes, infrarouges -
Courbe CIE d'efficacité lumineuse - Courbe de répartition spectrale -
Flux, intensité, luminance, exitance lumineuse - Efficacité lumineuse
d'une source - Le corps noir et sa définition - L'équation de Planck -
Variation de l'exitance lumineuse - Couleur du corps noir - Réalisation
pratique du corps noir - Candela et lumen -

CHAPITRE III - LES CORPS NON NOIRS - LE TUNGSTENE

Emissivité spectrale - Emissivité directionnelle spectrale - Loi de
Kirchhoff - Température de luminance, de couleur, de distribution -
Caractéristiques des corps non noirs - Carbone - Platine - Tantale -
Tungstène - Emetteurs sélectifs -

Rayonnement d'une spirale de tungstène

CHAPITRE IV - LES EQUATIONS D'EQUILIBRE THERMIQUE

Résistance du tungstène - Paramètres de spiralage - Equilibre thermique -
Chiffres de Jones et Langmuir - Rayonnement d'un filament spiralé.
Influence sur l'efficacité -
Exitance moyenne d'une spirale -

CHAPITRE V - LES FACTEURS DE PERTE

Perte par les entrées de courant et crochets - supports - Perte par conduction et convection dans le gaz - Le modèle de Langmuir - La formule d'Elenbaas - Influence de la nature du gaz - Influence de la température et de la pression. Couche de gaz laminaire - Quelques chiffres - Autres facteurs de perte.

CHAPITRE VI - EVAPORATION DES FILAMENTS ET DUREE DE VIE

L'efficacité lumineuse réelle -
Le poids mortel - Rôle du gaz et considérations théoriques - Intérêt relatif des différents gaz de remplissage - Influence de la pression - Gains de température - Le risque d'arc - Durée individuelle et durée moyenne.

CHAPITRE VII - LES RELATIONS FONDAMENTALES EN FONCTION DE LA TENSION

Base théorique - Coefficients logarithmiques expérimentaux - Influence des variations des dimensions des filaments - Variations en fonction de la tension - Conséquences pratiques. Le problème économique de la durée de vie. Variations en cours de durée.

CHAPITRE VIII - TEMPS D'ALLUMAGE ET D'EXTINCTION - TAUX DE MODULATION

CHAPITRE IX - LE CYCLE D'HALOGENE

Le cycle chimique - Les halogènes utilisés - Efficacité lumineuse des lampes aux halogènes - Position de fonctionnement - Comportement en durée.

CHAPITRE X - LA FABRICATION DES LAMPES A INCANDESCENCE

Le filament - Le doping - Les ampoules - Les culots - Le spiralage - Les entrées de courant - Les getters - Fabrication des montures - Le scellement - Pompage - Remplissage - Flashing - Culotage - Contrôles -

Quelques opérations particulières - Ampoules diffusantes - Ampoules colorées - Ampoules réfléchissantes - Miroirs dichroïques - Lampes miniatures.

CHAPITRE XI - LES LAMPES D'ECLAIRAGE GENERAL

Les lampes "Standard". La Publication 64 de la C.E.I.
Températures sur les ampoules et sur les culots. Lampes de lustrerie.
Les luminaires pour lampes à incandescence - Lampes à flux dirigé - Lampes au halogènes. Note concernant les tensions.

CHAPITRE XII - LES LAMPES MINIATURES

Caractéristiques particulières - La durée de vie - Les lampes pour piles de poche - Lampes pour batteries d'accumulateurs.
Lampes de mines - Lampes pour blocs de sécurité - Lampes pour cycles et cyclomoteurs. Lampes décoratives - Lampes clignotantes - Lampes pour cadrans - pour signalisation. Lampes sub-miniature - Lampes aux halogènes.

CHAPITRE XIII - LES LAMPES POUR AUTOMOBILES

Tension d'alimentation - Réglementations - La lampe à faisceau Européen - Les lampes aux halogènes : lampe H4 à deux filaments - Lampes pour projecteurs auxiliaires H1, H2, et H3 - Autres lampes d'automobiles : pour feux de position - feux stop - feux de changement de direction - tableaux de bord - Lampes fonctionnant en clignotement.

CHAPITRE XIV - LES LAMPES POUR L'AVIATION

Lampes de bord pour signalisation - pour tableaux de bord - pour projecteurs d'atterrissage - pour feux anti-collision - Lampes au sol pour feux d'approche et feux de piste.

CHAPITRE XV - LES LAMPES DE PROJECTION

Rôle de la luminance - Moyens d'augmenter la luminance des foyers - Caractéristiques générales des lampes projection - Lampes pour la

photographie - le cinéma - la télévision. Lampes studio - lampes pour films étroits et diapositives. Lampes pour projecteurs d'illumination - Lampes pour excitation de cellule - Lampes diverses.

CHAPITRE XVI - LES LAMPES A RAYONNEMENT INFRAROUGE

Les lampes I.R. en verre - Les lampes comme radiateurs de chauffage -
Les lampes pour l'industrie - Les lampes de quartz ou émetteurs -
Quelques applications -

.../...

LEXIQUE

=====

A

Allumage (durée d')	66	Condenseur lentille	125
Aluminure	90	Condenseur miroir	125
Ampoule	46-81	Conduction	36-38
Anti-collision (feu)	116	Conductibilité	36-38
Arbres de Noël (lps pour)	106	Contrôles	88
Arc électrique	3-55	Convection	38
Argenture	90	Corps gris	24
Argon 45-52-54-55-91-103		Corps noir	11-16-21
Atterissage (projecteurs d')	116	Couche de Langmuir	39
Auër (manchon)	27	Court-circuit (dispositif de)	106
Auër Von Welsbach	8	Covington	73
Azote	43-52	Crochets-supports	37

B

Batteries (lps pour)	104	Cryogénie	91
Bicyclettes (lps pour)	105	Culotage	87
Bilan thermique	128	Culot préfocus	120
Blocs de sécurité (lps pour)	105	Culots	82
Bougie	7	Culot vissé	88
		Cycle de l'eau	71
		Cycle d'halogène	71

D

		Davy	3
Candela	15-20	Dégazage	87
Carbone	7-24-25	Demi-watt (lampe)	9
CEE	98	Dévitrication	75
CEI	82-120	Diapositives (projecteurs)	126
Chauffage	129	Diffusion de concentration	51
Clignotement	114	Diffusion thermique	53
Coefficients logarithmiques	61-62	Dimensions (lampes standard)	94

.../...

K			
Kirchhoff (loi de)	23	Marquage lampes autos	111
Krypton	43-52-54-74-91	Martelage	79
L			
Lambert (loi de)	13	Miroir dichroïque	90
Lampe auto	111	Monel	85
aux halogènes	119	Monowatt (lampe)	8
bicyclettes (pour)	105	Montage butt-seal	91
Blocs de sécurité (pour)	104	drop-seal	86
Carbone	7-129	rim-seal	87
Clignotante	106	Monture	85
de bord (avions)	116	N	
diapositives (pour)	126	Nernst (lampe)	27
excitation de cellule	127	Noircissement	65
film étroit (pour)	126	Norme NFC 72-100	94
H1, H2, H3, H4,	112-113	O	
infrarouge	129-130	O.A.C.I.	115
lustrerie	98	Osmium	8
mines (pour)	104	Oosterhuis	50
miniatures	99	P	
photo	122	Pertes par conduction	38
standard	93	Pertes dans le gaz	45
studios (pour)	126	Photométrie (lampes)	88
Langmuir	8-38-53-71	Pied de lampe	86
Laplace-Gauss (loi de)	57	Pincement	83-86
Lumen	15-20	Poids mortel	47
Lumen-heure	64	Poudrage	89
Luminance énergétique	12	Q	
Luminance (lumineuse)	15-25-26-118	Quartz	82-131
M			
Manchon Auër	7	Queusot	81-86
Mandrin	83		
Marquage			
lampes standard	97		

R		V	
Réfecteur incorporé	100	Verre	82
Résistance (électrique)	29	Verre jaune	89-105
Résistivité	30	Vitesse d'évaporation	48-50
Ribbon machine	81	Vitrite	83
Ruban de tungstène	28	Viscosité	41
S		W	
Sagging effect	80	Wien (loi de)	18
Scellement	86		
Schémas optiques	125	X	
Siemens et Halske	8		
Silice fondue	82	Xenon	43-74-91
Sintering	79-84		
Spiralage	28-32-83		
Sprengel	4		
Stefan-Boltzmann (loi de)	17		
T			
Tantale	25		
Température (des ampoules)	94		
Température de couleur	19-121		
Température de répartition	23		
Températures limites	121-130		
Tube à rebord	81		
Tungstène	26-78-119		
U			
Usure	63		