

LE PRINCIPE DE LA SIGNALISATION LUMINEUSE DE JOUR ET LE PROBLÈME PHYSIQUE DES VERRES DE SIGNALISATION

Alors que l'emploi de feux, blancs ou colorés, pour la signalisation de nuit, soit par signaux fixes, soit par signaux à main, est depuis longtemps en usage, la signalisation lumineuse de jour date de quelques années seulement. La première installation fut établie en Angleterre sur l'ensemble des lignes de « Charing Cross » et « Cannon Street » à « Borough Market Junction » et de « Holborn » à « Elephant and Castle » et décrite dans un mémoire présenté le 18 mai 1927 devant l'« Institution of Railway Signal Engineers » à Londres.

Appliquée surtout en Amérique du Nord, elle ne tarda pas à se répandre dans le monde entier, mais l'étendue de son emploi est encore assez restreinte. En Europe, la Grande-Bretagne, la Suède, la Norvège, quelques chemins de fer français, ainsi que, sur une petite échelle, le Danemark, la Finlande et les Pays-Bas font usage de signaux lumineux de jour. Notre pays ne s'est pas désintéressé de cette importante question : la Société Nationale des Chemins de fer belges a entrepris des essais et il est probable que d'ici peu plusieurs lignes seront équipées selon le nouveau procédé.

Particulièrement avantageuse sur les lignes où les conditions de courbure et de visibilité sont difficiles, ayant donné, dans les essais qui ont été faits, des résultats pratiques extrêmement favorables, la signalisation lumineuse de jour paraît appelée à

prendre, dans un avenir très proche, une grande extension.

L'emploi de verres spéciaux présentant, pour les rayons lumineux émis par la source, des absorptions parfaitement déterminées est à la base de ce mode de signalisation.

Avant d'aborder leur étude, nous avons jugé utile de rappeler brièvement le principe du mode actuel de signalisation, ainsi que le mécanisme du nouveau procédé et d'attirer quelque peu l'attention sur les avantages que présente ce dernier.

I. — Notions préliminaires

A) Signalisation actuelle des chemins de fer belges. — Les modes de signalisation employés sur les réseaux ferrés des différents pays présentent certaines variantes. Par exemple, la signalisation adoptée sur le réseau des chemins de fer de l'Etat Belge est quelque peu différente de celle en usage sur les réseaux français ou allemands et même sur le réseau de la Compagnie du Nord. Ce fait explique le bouleversement que subit pendant la guerre la signalisation du réseau belge, une des premières préoccupations de l'occupant ayant été de remplacer les appareils existants par ceux qui étaient familiers aux mécaniciens d'outre-frontière.

Le principe de la signalisation est de couvrir par un signal d'arrêt absolu, répété lui-même par un signal à distance avertisseur, tout point de la voie que les mécaniciens ne peuvent atteindre sans danger — (station, bifurcation, croisement, etc.).

Le signal d'arrêt absolu est en général placé à une soixantaine de mètres du point dangereux.

Le signal avertisseur, qui doit être visible à une distance minima de 300 mètres, se trouve normalement à une distance de 800 mètres du signal d'arrêt, cette distance pouvant être réduite à 600 mètres, en rampe, ou portée à 1000 mètres, en pente. Son existence est signalée aux mécaniciens par cinq barrières blanches horizontales, obliques par rapport à l'axe de la voie, situées à une hauteur déterminée au dessus du rail et numérotées de 1 à 5 au moyen de traits obliques formés par des lattes en relief peintes en noir, la plus rapprochée du signal portant le numéro 1.

Les signaux belges ont généralement la forme sémaphorique c'est-à-dire qu'ils sont composés d'un mât portant une palette mobile autour d'un axe horizontal; ce bras est placé à gauche de son support par rapport à la direction des trains arrivants. On emploie aussi des disques à distance, des signaux carrés d'arrêt absolu ainsi que des disques de ralentissement.

La signification du signal sémaphorique est déterminée par la forme et la position de la palette. La palette d'arrêt a la forme d'un rectangle allongé dont la face avant est peinte en rouge avec raie blanche, la face arrière en blanc avec raie transversale noire. Dans sa position horizontale, qui est sa position normale, elle commande l'arrêt et montre la nuit un feu rouge. La position inclinée (feu jaune la nuit) commande la précaution et indique que le signal suivant est à l'arrêt. La position verticale (feu vert la nuit) autorise le passage.

La palette-avertisseur a la forme d'un rectangle terminé par une flèche, peint en jaune avec 2 raies transversales noires en flèche.

Dans sa position horizontale (feu jaune, la nuit) elle autorise le passage mais indique que le signal suivant est à l'arrêt.

Dans la position inclinée (double feu jaune et vert, la nuit) elle commande la précaution et indique au mécanicien qu'il va rencontrer un signal de ralentissement; la position verticale (feu vert, la nuit) donne le passage à vitesse normale.

Tel est, dans ses grandes lignes, le principe de la signalisation actuelle des voies de l'Etat belge. En réalité de très nombreux appareils ou combinaisons existent encore qui règlent l'entrée des voies de garage avec ou sans rebroussement et les fins d'itinéraires dans les grandes gares, commandent les voies de manœuvres, indiquent les directions dans les bifurcations, etc... Nous ne nous étendrons pas à leur sujet, pas plus que nous ne parlerons des disques à distance, des disques de ralentissement et des signaux carrés encore couramment utilisés, mais dont l'emploi ne rentre pas dans le cadre de la présente étude.

Nous dirons cependant que les manœuvres ou les mouvements de garage peuvent être commandés

par des palettes de dimensions restreintes pouvant occuper les 3 positions : inclinée, horizontale ou verticale. La face avant est rouge, la face arrière blanche.

La palette de manœuvre commande l'arrêt dans sa position horizontale et la nuit est pourvue d'un feu violet ; la position inclinée (feu jaune la nuit) autorise la manœuvre jusqu'à un signal déterminé à fleur de sol et la position verticale (feu vert la nuit) autorise la manœuvre sans limitation de parcours.

Il existe donc, pour la signalisation des voies de l'Etat belge, 4 espèces différentes de verres colorés : les verres rouge, vert, jaune et violet.

B) Mécanisme de la signalisation lumineuse de jour. — Le principe du nouveau mode de signalisation a été très clairement exposé dans un important travail de M. Thorowgood publié en 1927 par le *Bulletin de l'Association Internationale du Congrès des Chemins de Fer*.

La signalisation lumineuse de jour est basée sur l'emploi de 3 couleurs et 4 images, chacune ayant une signification bien nette.

Le sens des feux colorés est bien défini : le vert indique que la voie est libre, le jaune signifie avertissement et marche prudente, le rouge commande l'arrêt.

Quant aux images, elles sont au nombre de 4 : feu vert, double feu jaune, simple feu jaune, feu rouge et leur signification est la suivante :

Feu vert : voie libre — passage.
 Double feu jaune : avertissement. — Attendez-vous à trouver le prochain signal à marche prudente.
 Simple feu jaune : marche prudente. — Attendez-vous à trouver le prochain signal à l'arrêt.
 Feu rouge : arrêt.

L'ordre de succession des images est tel qu'avant d'atteindre un feu rouge ou signal d'arrêt, il faut que le mécanicien franchisse un double feu jaune ou signal d'avertissement, puis un simple feu jaune ou signal de marche prudente.

Par conséquent, il rencontre 2 signaux qui le mettent en garde au lieu d'un seul dans le système des sémaphores.

Les 4 lampes formant les signaux lumineux à 4 images sont montées sur une plaque de tôle qui sert de fond aux images. Chacune des lampes consiste en une cage en aluminium devant laquelle est fixée une lentille à échelons (lentille de Fresnel) en verre clair de 20 centimètres de diamètre. Derrière cette lentille claire, à une distance de 54 millimètres, se trouve une lentille en verre coloré, vert, jaune ou rouge à échelons renversés ou avec les échelons sur la face convexe de la lentille, appelée lentille de Torric.

Les deux lentilles captent tous les rayons lumineux venant de la source et tombant sur leur face arrière. Le faisceau lumineux sort ensuite par la face avant de la lentille claire, en rayons parallèles.

A noter que les rayons ne sont parallèles que si la source est petite, théoriquement un point, et il faut que toute la lumière soit concentrée dans le petit filament car la lumière qui se trouve en dehors du foyer est très inefficace.

On utilise des lampes électriques à incandescence, à double filament. Ceux-ci sont enroulés en spirales de 5 millimètres de longueur et disposés côte à côte. L'un des filaments se trouve au foyer de la lentille, l'autre, tout à côté. Les deux filaments donnent environ 30 bougies.

Chaque lampe de signal lumineux coloré est munie en outre d'un feu latéral. Celui-ci est émis par une deuxième lampe. Il y a donc 2 lampes dans chaque signal coloré, l'une pour le faisceau principal, l'autre pour le faisceau du feu latéral. Si un filament se consume, l'autre lui supplée mais en émettant une lumière atténuée.

Il en résulte :

- 1 que le signal lumineux n'est pas éteint,
- 2 que le mécanicien voit que le signal lumineux a moins d'éclat que d'habitude et prévient le signaleur.

Si les 2 filaments sont usés ou brisés, le faisceau lumineux principal est éteint et le mécanicien ne le voit pas. Mais en arrivant dans le voisinage du signal, il verra le feu latéral qui fait dans ces conditions l'office du feu auxiliaire.

Comme les filaments sont plus grands qu'un

point, une partie de la lumière qui sort de la lentille est dispersée. La diffusion du faisceau varie de 20 à 50°.

Aux endroits où les voies sont en courbe, des lentilles diffusantes donnant 20, 15 et 10% de diffusion sont montées au dessus de la face avant de la lentille ordinaire de 20 cm.

En pratique, le mécanicien voit le faisceau principal d'une façon nette et distincte à une distance de plus de 750 mètres mais, comme la lumière est concentrée en un faisceau de rayons parallèles, en approchant du mât des signaux, il ne verra plus le faisceau lumineux. C'est alors qu'intervient le feu latéral qui donne un faisceau lumineux brillant et distinct faisant un angle vers le haut, le côté ou le bas du faisceau principal.

Chaque image est protégée contre les rayons du soleil par un petit écran, la forme de ces derniers étant telle qu'ils ne peuvent gêner la perception d'aucune des images par le mécanicien.

Les lentilles colorées ne peuvent être employées seules à cause des fantômes lumineux qui se produisent toujours quand le soleil brille et même simplement le jour. Par conséquent une lentille claire d'avant ou un verre dépoli est toujours nécessaire.

La signalisation lumineuse du jour présente sur la signalisation sémaphorique des avantages certains : d'abord, ses indications sont très précises, alors qu'en pratique, le signal sémaphorique à distance actuel prend des significations multiples quand il est dans la position horizontale ou d'arrêt. En outre, le signal à distance doit être placé à une distance de freinage complète en amont du signal d'arrêt dans les conditions les plus défavorables. Le mécanicien ne remarque que ce seul signal tandis qu'avec la signalisation lumineuse à 4 images, il connaît parfaitement les conditions de la voie en aval. Ce système, au reste, évite au mécanicien la nécessité de franchir un signal d'arrêt donné par un feu rouge quelles que soient les circonstances. Il évite également l'emploi de signaux répétiteurs aux points où le mécanicien ne peut voir le signal dont il approche, assez à temps pour se conformer à ses indications, puisque les feux de

couleur qu'il a franchis le renseignement sur les conditions de la voie en aval. Dans les cas très rares où cela peut être nécessaire, on a prévu l'emploi d'un signal auxiliaire qui affecte la forme d'une croix blanche brillamment éclairée sur fond noir au dessus d'un signal lumineux coloré à 3 images : vert, simple jaune et double jaune. Il n'y a pas de feu rouge. L'image normale est la croix grecque blanche sur fond noir.

Si le signal principal est un feu rouge, le signal auxiliaire est un simple feu jaune ; le signal auxiliaire est un double feu jaune ou un feu vert si le principal est un simple feu jaune.

La signalisation lumineuse de jour s'adapte également au service des manœuvres de gare et l'on emploie alors un feu rouge pour commander l'arrêt et un feu vert pour autoriser le mécanicien à avancer aussi loin que la voie est libre.

La distinction est très nette entre les signaux de manœuvres de gare et les signaux de circulation. Ces derniers comme nous l'avons dit comportent des lentilles blanches de 20 cm de diamètre ; les seconds n'ont que des lentilles colorées de 10 cm de diamètre avec devant elles un verre dépoli séparé qui donnent un faisceau lumineux suffisant et diffusent la lumière en même temps à droite et à gauche, sous un angle très ouvert ce qui permet au mécanicien de l'apercevoir à distance quand il se trouve sur une voie adjacente. Ajoutons enfin que le système de signalisation lumineuse de jour se combine aisément aux indicateurs lumineux de direction qui indiquent clairement la voie à suivre dans les bifurcations.

Réalisant l'identité d'aspect des signaux le jour et la nuit, étant, par suite de l'absence de tout élément mobile d'une extrême simplicité, réalisant enfin l'unification complète des signaux et supprimant les chevauchements de signaux par groupes, de telle sorte que seul le feu commandant la véritable manœuvre apparaisse au mécanicien, la signalisation lumineuse de jour présente sur le système sémaphorique encore généralement employé des avantages si nettement marqués, que l'on peut prédire son extension dans une très large mesure.

Les verres, notamment les verres colorés, jouent dans l'emploi du procédé nouveau, un rôle de premier plan. Leur étude mérite une attention toute spéciale.

C) **Choix des couleurs de signalisation** (1). — La première question qui se pose dans l'établissement d'une signalisation lumineuse est celle du choix des couleurs de signalisation. Le problème est complexe car il importe de satisfaire à toute une série de conditions dont aucune ne peut être, même quelque peu, négligée.

Le but d'un signal séraphorique étant de donner une indication nettement définie à une distance déterminée, la première condition que doivent réaliser les couleurs est d'être parfaitement caractérisées à des distances définies. Les facteurs de nature à affecter ces deux conditions essentielles de visibilité et de portée du signal se rattachent à la qualité de la source lumineuse, à la quantité de lumière qu'elle émet, aux conditions atmosphériques de nature à influencer l'émission lumineuse par le signal (brouillard, poussières et fumées, neige, pluie et grêle), à l'alignement des lampes séraphoriques, à la portée minima exigible, à l'intensité de la source, aux variations de teintes dues à l'aberration chromatique, au voisinage d'autres lumières. Les éléments à prendre en considération sont donc nombreux et pour bien comprendre le choix des couleurs actuelles de signalisation, nous les passerons rapidement en revue.

Les couleurs (2), on le sait, se différencient les unes des autres, par trois propriétés que l'on a désignées sous le nom de « constantes des couleurs ». Ce sont : la « nuance » ou la « teinte », la « saturation », l'« intensité ».

La teinte désigne l'espèce de couleur : rouge, vert, jaune. Selon la quantité de « blanc » qui dilue la couleur, la teinte est pâle, normale ou foncée. Le

(1) La majeure partie des données consignées dans ce chapitre ont été empruntées au remarquable travail de W. Churchill : « The Roundel Problem ». (5. Congrès Annuel de Sign. des Chem. de fer. Niagara Falls, N. Y., octobre 1905).

(2) Pour alléger l'exposé nous employons dans la suite le terme « couleur A » pour « faisceau lumineux de couleur A ».

spectre d'une lumière blanche, par exemple la lumière solaire, donne toutes les teintes appréciables par l'œil humain à l'exception des pourpres, formés par une combinaison des couleurs extrêmes.

La saturation traduit le contraste entre la sensation produite par la couleur considérée et le blanc et le gris, les couleurs les plus saturées d'une gamme déterminée de teintes étant celles qui, comparées au blanc, donnent pour l'œil le contraste le plus marqué. Le rose et le bleu pâle sont des couleurs faiblement saturées, le bleu de Prusse est une couleur fortement saturée.

L'intensité d'un faisceau lumineux pour un intervalle de longueurs d'onde ($\lambda, \lambda + d\lambda$) est la quantité d'énergie transportée par les constituants de ce faisceau dont les longueurs d'onde sont comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$. Pour une source lumineuse à raies ou à bandes, les intensités relatives des différentes raies du spectre satisfont à certaines lois ayant déjà fait l'objet de nombreuses recherches tant expérimentales que théoriques (décroissance au sein d'une série, lois d'intensité des composantes de multiplets...). Pour une lumière blanche issue d'un corps « noir » ou « presque noir », la répartition de l'intensité en fonction de la longueur d'onde suit sensiblement la loi de Planck.

En particulier dans le cas du rayonnement solaire, la courbe de répartition de l'intensité en fonction de la longueur d'onde a été bien établie : elle présente un maximum dans le jaune (vers 5750 Å) ; l'intensité dans le rouge ou le violet est nettement plus faible ; si l'on désigne par 100 l'unité vers 5750 Å, on ne trouve plus que 25 vers 6500 Å, 10 vers 7000 Å, 25 vers 5000 Å et 10 vers 4700 Å.

On possède actuellement de bons étalons lumineux dont on connaît parfaitement la répartition du rayonnement en fonction de la longueur d'onde (voir p. ex. Piccard et Homès, Congrès de Bruxelles de l'A. F. A. S., 1932 ; Philips donne pour des lampes spéciales les courbes d'intensité en fonction de λ).

A tout faisceau lumineux d'une couleur déterminée, (le vert excepté) on peut associer un autre faisceau ayant une couleur appelée complémentaire

la *qualité* de la source lumineuse et la *quantité* de la *lumière projetée* par cette source.

Longtemps la flamme de pétrole assura l'éclairage des sémaphores et ce n'est que depuis peu que la lampe à incandescence tend à se substituer à elle.

Sauf à la base, où elle est bleuâtre, la flamme de pétrole est jaune et pauvre en rayons bleus, beaucoup plus pauvre que la lumière solaire, mais plus riche en jaune et en rouge que cette dernière : cette observation expérimentale peut, comme on sait, s'interpréter théoriquement en tenant compte des différences de température de la flamme de pétrole et du soleil. La loi de Wien indique que la répartition des intensités en fonction de la longueur d'onde dans le rayonnement du corps noir dépend de la température de la source : la courbe qui représente cette répartition présente un maximum et ce maximum correspond à une longueur d'onde d'autant plus courte que la température de la source est plus élevée. En assimilant, en première approximation, les deux sources lumineuses à des corps noirs, on trouve immédiatement l'explication de la prédominance relative du jaune dans la flamme de pétrole.

Par suite, l'intensité d'une flamme de pétrole observée à travers un écran coloré transmettant du bleu et du violet sera très faible ; même une lentille blanche, complètement éclairée par la partie jaune de la flamme paraîtra plus jaune qu'une flamme nue qui transmet tout de même un peu de bleu.

Le filament d'une lampe à incandescence, du type utilisé dans la signalisation lumineuse, donne un spectre assez semblable à celui d'une flamme de pétrole avec une proportion plus faible cependant de jaune et de rouge, du moins quand la lampe est neuve. Une lampe un peu usagée ou marchant à un voltage trop faible donne un spectre analogue à celui de la flamme de pétrole et les différences légères pouvant exister ne justifient pas l'emploi de verres différents pour l'un ou l'autre cas. L'interprétation de ces faits relève également d'une application judicieuse de la loi de Wien.

La *quantité de lumière projetée* à travers le verre par une lampe de sémaphore dépend à la fois du

de la première telle que la superposition des deux faisceaux donne dans l'œil, l'impression de blanc.

Le mélange de 2 couleurs non complémentaires donne une teinte intermédiaire et la coloration résultante dépend des proportions des couleurs combinées et de leurs saturations respectives, l'effet produit par une couleur saturée étant plus marqué que celui produit par une non saturée. La couleur résultante peut d'ailleurs être moins saturée que les constituantes. Les couleurs dont l'association produit ainsi une teinte intermédiaire plus pâle sont dites « partiellement complémentaires ».

Quand deux couleurs différentes sont placées très proches l'une de l'autre, chacune d'elles modifie l'apparence de sa voisine. Les couleurs complémentaires se voient plus saturées qu'apartenant, les couleurs non complémentaires changent de teinte jusqu'à s'approcher fortement des couleurs complémentaires : l'orange vu à côté du jaune se voit plus rouge que s'il était examiné isolément. Ce fait acquiert une importance très grande dans les combinaisons de feux colorés et la signalisation a tiré de la loi des contrastes un parti des plus efficace.

Nous avons dit que la condition essentielle d'une couleur de signalisation est que cette couleur soit nettement caractérisée à une distance définie. Cette condition dépend de 2 constantes de couleur : la teinte et la saturation. Le fait de distinguer un signal coloré réside essentiellement dans l'écart qui sépare sa teinte des autres avec lesquelles il peut être utilisé et de la lumière blanche. Un signal rouge pour être nettement distinct ne doit tendre ni vers l'orange ni vers le pourpre. Il ne peut être l'impression du blanc. Le vert doit être également faiblement saturé pour ne pas donner à distance l'impression du jaune et du bleu et aussi saturé que possible. La visibilité du signal ne dépend, elle, que de l'intensité de la couleur. Celle-ci doit être suffisamment élevée pour assurer la portée voulue et il importe de déterminer dans quelle mesure on peut associer une autre lumière à celle considérée pour accroître l'intensité de cette dernière.

Parmi les autres facteurs, nous avons cité d'abord

type et des dimensions du foyer lumineux, de l'angle solide de la lumière reçue par la lentille, de la grandeur et de la forme de cette dernière, du type et de la grandeur du réflecteur quand il existe, de l'état de propreté du verre et du degré d'exactitude dans le centrage de la flamme par rapport à la lentille.

Tous ces points méritent d'être pris en très sérieuse considération et, en veillant à chacun d'eux, le rendement des signaux peut être doublé et même triplé.

L'importance des conditions atmosphériques n'est pas non plus négligeable. On sait qu'une couche assez épaisse d'air normal absorbe d'une manière appréciable le bleu et le violet et surtout l'ultra-violet, alors que le rouge et l'infra-rouge sont beaucoup moins absorbés.

Il suffira de citer à ce sujet les beaux travaux des astro-physiciens R. W. Wood (1911) ⁽¹⁾, W. H. Wright (1926) ⁽²⁾, et F. E. Ross (1928) ⁽³⁾. Les observations de Wright notamment, sont très concluantes : des photographies de San José, prises du Mont Hamilton, montrent tout le détail de la ville lorsqu'on emploie un écran rouge et des plaques panchromatiques, alors que des plaques ordinaires ne donnent absolument rien ; les rayons violets sont donc beaucoup plus absorbés par la couche d'air que les rayons rouges. Des photographies de la Sierra Nevada, prises du Mont Hamilton (Observatoire Lick) distant de 200 kilomètres, avec des plaques panchromatiques et un écran rouge montrent tous les détails des pics situés à l'horizon. Wood, Wright et Ross ont appliqué ce résultat à la photographie de Vénus, Mars, Jupiter et Saturne en différentes lumières monochromatiques et en ont déduit des résultats extraordinairement intéressants concernant les atmosphères de ces planètes.

La présence de vapeur d'eau ou de brouillard augmente l'absorption et cette augmentation se fait de façons très différentes pour les différentes longueurs d'onde. On a fait déjà de nombreuses

⁽¹⁾ *Bull. Soc. Astr. France*, 25, 241, 1911.

⁽²⁾ *Monthly Notices of the Royal Astr. Society*, 88, 709, 1928 et *Astronomy*, 43, 481, 1929.

⁽³⁾ *Astrophysical Journal*, 68, 57, 1928.

expériences sur ce sujet ; les radiations de grandes longueurs d'onde (rouges, jaunes) traversent le brouillard beaucoup plus aisément que les rayons bleus ou violets, ce qui explique la préférence donnée dans certains cas à la flamme jaune de la lampe à pétrole ; cette lumière peut traverser des épaisseurs de brouillard supérieures aux épaisseurs limites atteintes p. ex. par une lampe à arc. (Expériences de l'Observatoire Maritime Allemand).

La diminution de portée, due au brouillard, d'une source lumineuse, n'est pas exactement déterminée. Par brouillard léger, elle peut être de 20%. Par brouillard très dense, elle est beaucoup plus considérable.

Les petites particules de carbone provenant des fumées et les autres poussières de l'atmosphère ont plus d'action sur les courtes que sur les grandes longueurs d'onde et au point de vue de la portée d'un signal, les fumées ne sont pas moins nuisibles que le brouillard.

La neige constitue un inconvénient sérieux car elle peut s'accumuler en couche compacte à la surface des verres et couper fortement la transmission lumineuse. Moins d'une demi-heure après une tempête de neige, la visibilité de certains signaux a été réduite de près de 80%. La pluie et la grêle sont moins gênantes. Epurant l'air des poussières, elles sont plutôt un secours qu'un ennui tout en provoquant, cependant une absorption qui dans certains cas peut atteindre 30%.

L'alignement judicieux des lampes sémaphoriques est aussi, très important. Les lentilles sémaphoriques sont prévues pour converger la lumière de la source en un faisceau à peu près parallèle. Pratiquement cependant, une grande partie de la lumière diverge graduellement et l'angle de divergence détermine l'expansion de la lentille en un point donné. Le pouvoir dispersif dépend du reste beaucoup aussi de la forme de la source et sera très différent selon qu'on utilise la surface plate d'une mèche ou la ligne incandescente d'un filament.

Toute déviation dans la disposition des lampes décale l'axe des faisceaux lumineux projetés, réduit la quantité de lumière envoyée dans la direction voulue et diminue la portée des signaux.

Quand on étudie les causes d'altération de la couleur, il faut également tenir compte de l'aberration chromatique, défaut qui existe dans toutes les lentilles simples. La théorie montre en effet que, par suite du pouvoir dispersif du verre, une lentille simple présente, non une distance focale unique, pour toutes les longueurs d'onde, mais pour chaque lumière monochromatique une distance focale propre.

Il importe enfin qu'aucune confusion ne soit possible entre les feux de signalisation et les lumières qui les environnent.

Compte tenu de ces considérations, 4 couleurs seulement dans le spectre se révèlent aptes à desservir les buts de la signalisation ; ce sont le rouge, le jaune, le vert et le bleu.

Toutes les autres apparaissent comme des mélanges des précédentes. Par rapport au blanc, le jaune semble le plus proche ; puis viennent le vert, le rouge et le bleu. Le pourpre, assez éloigné du rouge et du bleu, peut éventuellement aussi être employé, mais seulement pour de faibles portées.

Le rouge fut de tout temps employé comme teinte signalant le danger. On lui adjoignit d'abord le blanc (flamme de pétrole) pour la sécurité et le vert pour la précaution. Toutefois comme le braise d'un écran vert ou rouge était de nature à montrer la flamme de pétrole, donc le blanc, alors qu'il y avait précaution ou danger, on décida d'adopter le vert pour la sécurité, ce qui paraît à cet inconvénient.

L'emploi de deux couleurs seulement se révéla insuffisant et l'on adopta une troisième teinte, le jaune ambré pour la précaution. On eut recours au pourpre et au bleu pour les indications des voies de manœuvres et pour réaliser le blanc on employa un bleu très clair, qui avec la flamme de pétrole, donne la teinte connue sous le nom de blanc lunaire. Cette teinte, dont la portée fut réglée pour être analogue à celle du rouge et du vert se distingue nettement de celle de la flamme nue de pétrole et de celle des lumières voisines.

Six couleurs sont donc maintenant adoptées pour la signalisation tant de jour que de nuit. Nous aurons l'occasion de préciser leurs caractéristiques dans le chapitre spécialement réservé aux verres de signalisation.

D) Verres de signalisation. — Les verres de signalisation sont différents selon les usages auxquels ils sont affectés : les principaux sont les globes et les verres plats pour lanternes, les verres plats pour disques et les lentilles, ces dernières surtout employées pour projeter à distance le faisceau lumineux émis par une source de faible intensité ; flamme de pétrole ou lampe électrique placée dans le signal.

Dans le cas des lampes de sémaphore, la lentille joue le double rôle de projecteur et de source de couleur. Elle doit donc réunir les qualités d'exactitude de fabrication et d'exactitude parfaite de la teinte. C'est pour ces motifs que l'on n'utilise pas les lentilles plan- ou bi-convexes qui seraient lourdes, peu précises et dont l'épaisseur, très variable du bord au centre, causerait une variation très importante de la teinte.

Les lentilles généralement employées sont du type à échelons, dit de Fresnel, constituées comme on sait par une succession de zones annulaires dont la section correspond à un prisme d'angle déterminé. Elles sont beaucoup moins lourdes que les lentilles massives ; leur épaisseur est uniforme et elles peuvent être obtenues par moulage à la presse dans une forme mathématiquement exacte. Certains modèles possèdent un relief spécial donnant un faisceau approprié à des buts particuliers.

Même avec des sources de faible consommation d'huile ou d'électricité, les lentilles judicieusement fabriquées donnent un signal à rendement lumineux élevé.

Pour les lentilles ayant jusqu'à 175 mm de diamètre, la grandeur du foyer lumineux ne doit pas dépasser 10 mm ; pour celles de diamètre plus grand : 15 mm. Quand le système ainsi adopté de la source et de la lentille est observé suivant l'axe d'une distance de 6 à 12 m, toute la lentille paraît également éclairée, la présence des échelons ne se marquant que par des anneaux un peu plus foncés.

Au début des faisceaux de signalisation étaient obtenus à l'aide d'une petite lampe à pétrole placée au foyer d'une lentille. En ces derniers temps on eut recours à des petites lampes électriques de construction spéciale qui rempla-

cèrent la flamme de pétrole dans l'équipement existant et l'on combina un système optique constitué par deux lentilles, une extérieure en verre blanc du type « optique » et une intérieure pour usage avec ces lampes. Ce système double utilise une plus grande proportion du flux lumineux produit par la lampe, résultat qu'il est impossible d'obtenir avec une lentille simple.

Plusieurs combinaisons du reste sont employées selon le but à atteindre et aux Etats-Unis, notamment, cinq types différents de lentilles sont adoptés dans la signalisation : (1)

- 1) Le type « optique » à échelons intérieurs qui est le plus courant, fournit un faisceau intense de faible ouverture.
- 2) Le type « inversé » à échelons extérieurs muni d'un verre protecteur, donne un faisceau d'une ouverture un peu supérieure.
- 3) Le type « Jard » pour gares de triage fournit un faisceau de très grande ouverture mais d'intensité relativement faible.
- 4) Le type « dispersif » est un compromis entre le 1^{er} et le 3^e. Il étale les rayons lumineux en éventail dans un plan horizontal et permet d'obtenir un faisceau suffisamment intense. Il est particulièrement utile pour les signaux placés dans les courbes.
- 5) Le type « Torie » a très faible ouverture, est employé pour les signaux lumineux dont la portée de jour doit être particulièrement grande. Un faisceau lumineux secondaire est réfracté vers le sol pour fournir une bonne indication de visibilité rapprochée.

On a aussi envisagé l'emploi de miroirs de fabrication très précise.

Les faisceaux lumineux obtenus par la combinaison de lampes électriques avec des miroirs et des lentilles produisent des signaux d'une intensité suffisante pour être utilisés pendant le jour même

(1) Bull. de l'Assoc. Int. du Congr. des Chem. de fer, octobre 1927.

par plein soleil, ce qui dispense de la nécessité d'observer la position des bras de sémaphore pendant le jour et facilite grandement la construction des appareils.

Il importe de remarquer que lorsqu'un faisceau lumineux traverse le verre, une petite proportion de la lumière, environ 8 à 15%, est toujours perdue par réflexion superficielle. Celle-ci dépendant généralement peu de la longueur d'onde, n'a pas d'influence notable sur la teinte. Dès lors, une lumière contenant beaucoup de jaune, par exemple comme celle d'une flamme de pétrole, donne une lumière jaune et non une lumière blanche quand elle traverse un verre blanc.

En outre la traversée de verre par un faisceau lumineux implique une certaine absorption. Celle-ci varie avec l'épaisseur mais il est aisé de montrer expérimentalement qu'elle est très réduite avec un verre clair quand son épaisseur ne dépasse pas une dizaine de millimètres : un écran en verre clair de cette épaisseur laisse passer à peu près toute la lumière qui le frappe. Aucun verre clair, non plus, ne modifie sa longueur d'onde — les lumières pauvres en rouge, par exemple, le restent après la traversée du verre.

Par contre, les verres colorés peuvent être comparés à des filtres. Ils sont perméables à certaines longueurs d'onde et arrêtent plus ou moins complètement certaines autres. La lumière non transmise ou réfléchie est absorbée par le verre et transformée en énergie thermique.

Il s'explique ainsi que la lumière transmise par un verre coloré dépend de deux facteurs : 1^o la nature de la source lumineuse ; 2^o l'absorption du verre. Une partie du faisceau lumineux est arrêtée par le verre ; le reste, obéissant aux lois définissant le mélange des couleurs, donne une couleur différente de celle du faisceau primitif.

La teinte et la saturation donnée par tout verre coloré sont l'effet combiné des différentes ondes lumineuses transmises et dépendent de deux facteurs : des intensités des lumières transmises de chaque longueur d'onde ainsi que de leur degré respectif de saturation. Celui-ci est une constante

physique indépendante du verre et de la source lumineuse. Le premier facteur seul est variable et dépend à la fois de la quantité relative de lumière de chaque longueur d'onde reçue de la source et du pourcentage de transmission des diverses longueurs d'ondes par le verre.

En supposant fixe la qualité de la source lumineuse, on conclut que la transmission de chaque verre est la seule variable dont dépendent à la fois la teinte et la saturation. Quant à l'intensité elle varie avec le degré de transmission du verre et le pouvoir illuminant de la source.

Avant l'usage des lentilles, les verres employés étaient découpés dans des plaques et selon la teinte à obtenir, étaient soit colorés dans la masse, soit obtenus par doublage du verre blanc par du verre coloré quand l'intensité de la couleur était telle qu'on ne pouvait en employer qu'une mince pellicule pour obtenir l'effet voulu.

Toutefois, les colorations adoptées étaient assez variables selon les compagnies qui employaient ces verres, ce qui compliquait extrêmement les choses et rendait difficile le travail des fabricants qui devaient pourvoir à la fourniture de teintes multiples et de formes plus ou moins nombreuses.

Une standardisation des couleurs s'imposait. Elle nécessitait toutefois des essais méthodiques de nature à rechercher les verres qui, à une distance donnée, avaient une teinte parfaitement caractéristique. Une importante contribution à ce problème fut apportée par les travaux de Churchill qui non seulement précisa par leur courbe d'absorption la coloration des verres, mais indiqua les limites dans lesquelles elle pouvait varier.

Verre rouge. — Il doit être de qualité telle que tous les rayons jaunes émis par une flamme de sodium soient absorbés, le spectre de la lumière blanche qui a traversé ce verre étant soit rouge, soit rouge-orangé. Pour éviter toute confusion à distance avec un signal jaune, les verres contenant un certain pourcentage de jaune, de vert et de bleu doivent être écartés.

Churchill donne les transmissions suivantes pour les différentes rates du spectre.

	A	B	C	D
	7593,8	6867,2	6562,8	5893
Limite claire...	73,6	81	75,8	40,4
Moyenne.....	54	64,8	71,3	39
Limite foncée..	47	63	63	0

Verre jaune. — Le spectre doit donner le plus possible de rouge, tout le jaune, un peu de vert et pas de bleu.

On adopte donc une teinte jaune assez voisine du rouge, dite jaune ambré. Il est préférable de la choisir telle plutôt que proche du vert car la confusion avec le rouge ne peut avoir de conséquences graves. Churchill admettait les transmissions ci-après :

	A	B	C	D	E	F	G
	7593,8	6867,2					
I	30	58	51	53	15	10,5	5
II	?	38	55	45	42	12	9
III	?	38	41	40	39	11	8

I. Limite inférieure; II. Moyenne; III. Limite supérieure.

Verre vert. — La teinte adoptée est le « vert marine ». Elle est légèrement bleuâtre. Le spectre doit montrer le plus possible de bleu et de vert, un peu de jaune et une trace seulement d'orangé ou de rouge. Le vert « herbe » ne convient pas à cause de la trop forte proportion de jaune qu'il transmet.

	C	D	E	F	G	H
	6562,8	5893	5269,6	4851,3	4307,8	3968,5
I	0	6	31	43,8	52,6	34
II	0	4	26,3	39,8	43,8	24
III	0	2,5	19,5	30	34	30

I Limite claire; II Moyenne; III. Limite foncée.

Verre bleu. — Il doit donner un spectre montrant le plus possible de bleu, un peu de vert et pas de rouge.

Le verre bleu idéal donne l'analyse spectrophotométrique suivante :

A, a, B	C	D	E	F	G	H
6562,8	5893	5269,6	4861,3	4307,8	3968,5	
0	0,05	2,5	3,5	5,4	24	46

Le verre bleu toutefois n'est pas recommandable comme teinte de signalisation. Il est à la fois de teinte trop forte et de portée trop faible.

Verre pourpre. — Il doit donner un spectre montrant le plus possible de bleu, pas de vert et une faible bande de rouge extrême. Pour de faibles portées, il donne de beaucoup meilleurs résultats que le bleu. Le meilleur pourpre est celui qui, à la lumière du jour, se montre bleu foncé et à la flamme de pétrole, donne un bleu-rougeâtre.

Churchill caractérise ce verre par l'analyse spectrophotométrique suivante :

a	B	C	D	E	F	G	H
6867,2	6562,8	5893	5269,6	4861,3	4307,8		
42	42	0	0	0	2	43	42

Verre blanc lunaire. — Il doit montrer du bleu et du vert avec environ 10% de jaune et d'orangé et un peu de rouge.

Il semble bleuâtre quand on le regarde à la lumière du jour et montre blanche la flamme de pétrole.

D'après Churchill les transmissions moyennes peuvent être les suivantes :

A	a	B	C	D	E	F	G	H
?	62	49	17	15	25	38	65	74
	?							

La teinte est bien distincte à toute distance correspondant à une visibilité nette. Sa portée est

au moins égale à celle du rouge ou du vert. Les conditions atmosphériques n'altèrent pas sa teinte.

La spécification adoptée en 1908 par la « Railway Signal Association » pour l'Amérique et le Canada, indique pour les différentes espèces de verres les transmissions données au tableau I et traduites par les courbes de la figure 1.

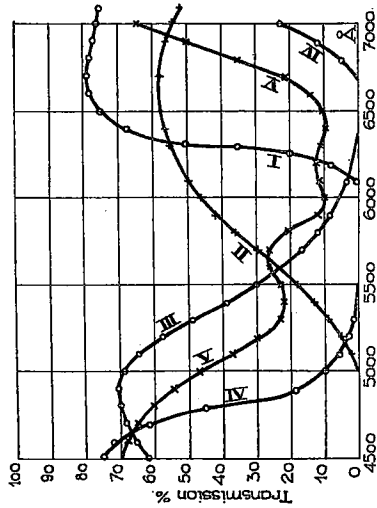


Fig. 1.

Tableau I.

Longueur d'onde	Rouge	Jaune	Vert	Bleu	Pourpre	Blanc lunaire
0,41	—	—	40	80	90	90
0,43	—	—	53	73	82	80
0,45	—	—	62	68	74	69
0,47	—	—	68	54	59	65
0,49	—	—	70	27	18	54
0,51	—	2	64	10	5	38
0,53	—	8	48	2	1	22
0,55	—	18	30	2	0,5	23
0,57	—	29	16	1	0,5	26
0,59	—	42	6	0	0	11
0,61	—	50	2	0	0	12
0,63	47	54	3	0	0	11,5
0,65	74	57	1	0	0	10,5
0,67	78	57	—	—	—	23
0,69	75	55	—	—	—	51
0,71	74	52	—	—	—	52

Cette spécification fut modifiée en 1918 et l'American Railway Association définit comme suit en pour cent la moyenne et les limites claire et foncée en chaque couleur :

	Rouge	Jaune	Vert	Bleu	Pourpre	Blanc lunaire
I	160	140	175	125	125	120
II	130	120	150	100	100	100
III	100	100	135	75	75	80
IV	30%	20%	25%	25%	25%	20%

I Limite claire; II Moyenne; III Limite foncée;
IV. Ecart à la moyenne

Les résultats de transparence et de teinte que l'on peut obtenir sont essentiellement fonctions de la composition du verre. On peut aisément s'en rendre compte par la lecture de l'important travail de Zschimmer (*Sprechsaal*, t. 59, p. 818, 833, 858, 1926) sur les verres verts de signalisation, qui montre de façon très complète la complexité du problème de la composition et le rôle des constituants des verres dans l'obtention de résultats voulus.

Des études semblables doivent être faites par tout verrier soucieux d'atteindre de façon précise le but désiré.

Nous ne traiterons pas cette question — ce qui nous entraînerait trop loin.

Après avoir étudié un certain nombre de verres plats actuellement employés dans la signalisation des chemins de fer belges, pour voir dans quelles mesures ils répondent aux exigences précitées de la signalisation, nous nous étendrons quelque peu sur les nouveaux verres récemment étudiés et fabriqués par les Cristalleries du Val-St-Lambert pour lentilles de signalisation et les comparerons à certains verres de provenance étrangère.

II. — Mode opératoire adopté

L'absorption des verres a été étudiée par deux méthodes différentes et indépendantes.

Pour l'application de la première méthode, nous avons employé le spectrophotomètre de Jobin et Yvon, basé sur la réduction de l'intensité d'un faisceau lumineux par croisement de deux nicols et utilisé dans les conditions indiquées par le schéma figure 2. La source lumineuse S est constituée par une lampe Philips à filament de tungstène soumise à un courant de 15 ampères sous 220 volts.

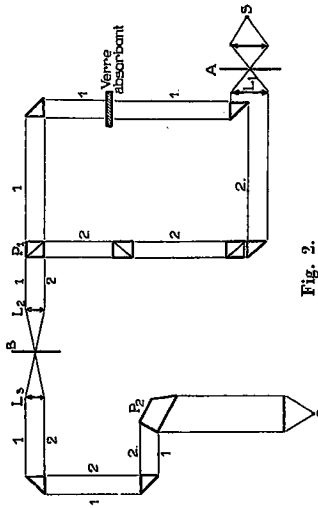


Fig. 2.

Le faisceau émis par cette lampe est concentré en A où se trouve une ouverture circulaire de 1 mm de diamètre. Le point A est au foyer d'une lentille L_1 qui rend le faisceau parallèle. Celui-ci est divisé en deux parties 1 et 2. Le faisceau 1 traverse éventuellement le corps absorbant et le prisme de Lummer et Brodhun P₁ et est concentré en B par une lentille L_2 ; le faisceau 2 traverse deux nicols dont les sections principales font un angle variable et mesurable, le prisme de Lummer et Brodhun et est concentré en B par la lentille L_3 . En B se trouve une fente verticale réglable en largeur. Le prisme P₂ à déviation constante associé à une échelle préalablement graduée en longueurs d'onde constitue le spectromètre.

Lorsqu'on observe en C, on voit dans le champ circulaire trois plages disposées comme l'indique la figure ci-centre.

L'éclairement des plages 1 et 3 est dû au faisceau 1; l'éclairement de la plage 2 est dû au faisceau 2.

On sait que l'intensité de la lumière



après traversée de deux nicols est fonction de l'angle de leurs sections principales. Si I_2 est l'intensité du faisceau 2 lorsque les sections principales sont parallèles et I_2' l'intensité correspondante à un angle α entre les sections principales, il existe entre I_2 et I_2' la relation $I_2' = I_2 \cos^2 \alpha$.

Cela étant, on peut mesurer le rapport des intensités I_1 et I_2 des faisceaux 1 et 2 en l'absence de corps absorbant sur le trajet 1. Le principe de cette mesure repose sur la possibilité d'amener l'égalité d'éclairement des plages 1, 2 et 3 en réduisant l'intensité du faisceau qui suit le trajet 2 par rotation d'un des nicols. Comme nous venons de le voir, si I_2' est l'intensité du faisceau 2 lors de l'égalité d'éclairement des plages et α l'angle correspondant formé par les sections principales des nicols il existe entre I_2' et I_2 la relation $I_2' = I_2 \cos^2 \alpha$.

Comme dans ce cas, $I_1 = I_2'$, on a :

$$I_1 = I_2' = I_2 \cos^2 \alpha. \quad (1)$$

Si l'on interpose le verre étudié sur le trajet 1, à l'endroit indiqué par la figure, l'intensité du faisceau devient après traversée du verre absorbant :

$$I_1' = I_1 e^{-\mu l} \quad (2)$$

où μ est le coefficient d'absorption du verre et l son épaisseur (la lumière réfléchie sur les faces de la lame est négligée). $e^{-\mu l}$ définit l'absorption du verre.

Pour obtenir l'égalité d'éclairement des plages on doit, dans ce cas, tourner l'un des nicols de façon que l'angle entre les sections principales des deux nicols soit β , et l'on a la relation :

$$I_1' = I_2 \cos^2 \beta \quad (3)$$

Par division de (3) par (1) membre à membre, on trouve, en tenant compte de (2) :

$$e^{-\mu l} = \frac{I_1' \cos^2 \beta}{I_1 \cos^2 \alpha}$$

Dans les conditions où nous avons travaillé, l'erreur sur la longueur d'onde peut atteindre 50 Å et l'erreur sur le rapport est de l'ordre de 5%.

La seconde méthode a consisté dans la mesure des transmissions d'écrans colorés dans la région de 7000 à 4000 Å, au moyen d'un couple thermo-électrique.

Le principe de la méthode consiste à recevoir sur un thermocouple, une lumière de longueur d'onde λ_0 avant et après traversée de l'écran coloré. Les déviations du galvanomètre relié au thermocouple étant proportionnelles aux intensités lumineuses reçues par le couple, on obtient par simple quotient le coefficient de transmission de l'écran pour la longueur d'onde considérée.

Pratiquement, la mesure est faite au moyen du dispositif décrit ci-dessous : (fig. 3) (4).

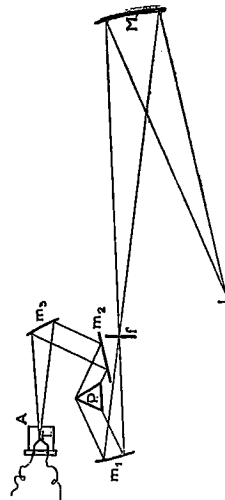


Fig. 3.

Un miroir M donne sur le plan de la fente f d'un spectrographe, une image parfaitement achromatique de la source lumineuse L. Un miroir m_1 sert de collimateur et rend parallèle le faisceau issu de f ; ce faisceau parallèle est dispersé par le prisme de verre P, puis réfléchi par le miroir plan m_2 dans la direction du miroir concave m_3 ; celui-ci donne sur la face avant A du thermocouple T un spectre de la source L. Le spectre obtenu a une excellente définition lorsque les réglages — d'ailleurs assez délicats — des positions des miroirs m_1 , m_2 , m_3 , du prisme P, des fentes f et F ont été effectués avec soin.

(4) Cet appareil est fabriqué par la maison Kipp en Zonen, à Delft, Hollande; il est d'habitude utilisé comme spectrographe enregistreur infra-rouge.

Le prisme P est fixé à une plate-forme à laquelle on peut donner au moyen d'une vis micrométrique, un mouvement de rotation lent permettant de faire défiler toutes les longueurs d'onde sur la fente F du thermocouple ; il est évidemment aisé de tracer une courbe de dispersion de ce spectrographe, avec, en abscisses, les lectures à la vis micrométrique et, en ordonnées, les λ coïncidant avec la fente du thermocouple (nous nous sommes servis comme spectres de comparaison des arcs au mercure et au cuivre).

Le galvanomètre employé est du type de Zernike, modèle b (de Kipp en Zonen) ; il donne une déviation de 1 mm, pour 15.10^{-10} ampère ou pour 15.10^{-8} volt, l'échelle étant placée à 1 mètre du galvanomètre ; la période est d'environ 3 secondes.

Pour les longueurs d'onde suivantes, $\lambda \lambda$ 4500, 4700, 4900, 5100, 5300, 5600, 5800, 5900, 6100, 6250, 6500, 6750, 7000, la source L a été une lampe Philips à ruban de tungstène (12 V, 14 A) ou une lampe de cinéma (15 V, 50 A ; pour les $\lambda \lambda$ 5462, 4350, 4047 Å, on a employé) un arc au mercure Heraeus de grande intensité.

Les lectures des déviations du galvanomètre sont faites sur une échelle en mm placée à une distance d'environ 1 mètre du miroir galvanométrique.

Supposons que le prisme P soit placé dans une position telle qu'il passe dans la fente F du thermocouple, une longueur d'onde déterminée λ_0 . On lira la déviation galvanométrique D_1 ; puis on placera devant la fente f l'écran E dont on veut déterminer la transmission pour la longueur d'onde λ_0 . On lira la nouvelle déviation galvanométrique D_2 ; l'expression $100 D_2/D_1$ représente le pourcentage de transmission de l'écran E pour la radiation λ_0 .

Pratiquement, il faut prendre soin de mettre toujours l'écran E exactement dans la même position par rapport au faisceau lumineux concentré sur la fente f du spectrographe ; sinon les mesures pour les diverses λ ne seraient plus comparables (les zones différentes d'un même écran peuvent être légèrement différentes en transmission ; la lumière réfléchie peut aussi varier). Dans ce but l'interposition de l'écran E se faisait au moyen d'une vis micrométrique à laquelle était fixé E et que l'on déplaçait d'une longueur constante.

Il eût semblé logique d'opérer par enregistrement photographique de la déviation galvanométrique et c'est ce que nous avions d'abord pensé faire. Nous avons cependant préféré, pour ce problème particulier, faire des mesures directes pour les raisons suivantes :

1° Nous étions certains de cette façon que la mesure de la quantité de lumière transmise par l'écran E était bien faite pour la même λ que la mesure de la quantité de lumière non absorbée ; en procédant par enregistrement de tout le spectre (continu), on aurait pu faire une erreur sur la détermination des λ et déterminer le coefficient de transmission en λ_0 en se basant sur deux mesures ne correspondant pas rigoureusement à cette longueur d'onde ; pour certains échantillons une telle erreur $\Delta \lambda_0$, même faible, aurait pu vicier considérablement les résultats.

2° Nous pouvions plus aisément obtenir la sensibilité désirée pour chaque longueur d'onde λ_0 , en agissant sur la source et sur les fentes.

Parmi les longueurs d'onde pour lesquelles les mesures ont été faites, certaines ne pouvaient donner des résultats très sûrs ; ce sont $\lambda \lambda$ 4500, 4700, 4900 et 5100 ; les déviations galvanométriques pour ces λ étaient en effet relativement faibles et les erreurs de mesure assez importantes.

Comparaison entre les résultats des mesures faites au moyen du thermocouple (ThCP) et au moyen du spectrophotomètre visuel à polarisation (SPPh visuel).

Comme le montrent les diagrammes de transmission, l'accord entre les 2 espèces de mesures (faites d'une façon absolument indépendante, par des personnes différentes) est relativement satisfaisant. Les différences sont dues aux erreurs accidentelles de mesure et, en plus, aux facteurs suivants :

1° La zone de sensibilité maximum pour les mesures au spectrophotomètre visuel est celle du maximum de sensibilité de l'œil. Lorsque $\lambda > 6200$ Å, les mesures deviennent plus difficiles. Au contraire, c'est là la meilleure région pour la mesure thermoelectrique qui, en revanche, laisse à désirer dans le vert-bleu, le bleu et le violet (sauf pour les raies du Hg 4350 et 4047 Å) ; les mesures au spec-

trophotomètre visuel sont incertaines au voisinage de 4000 Å, alors que la mesure au thermocouple au moyen de la raie 4047 Hg est bonne.

2° Dans chacune des deux méthodes, on a seulement mesuré l'absorption pour un certain nombre de λ ; ces λ n'ont pas été choisies toutes les mêmes dans les deux types de mesures (à dessin). Il se peut donc que de petites irrégularités dans les courbes de transmission aient été aperçues par une méthode et pas par l'autre.

3° La fente du spectrophotomètre visuel tout comme celle du thermocouple ont nécessairement dû être ouvertes suffisamment pour pouvoir procéder aux mesures dans les deux cas. Il en résulte qu'il y a une certaine incertitude sur la λ . On peut dire que (sauf dans le cas des raies du Hg), on a mesuré la transmission moyenne pour une région d'environ 80 Å (un peu moins dans le violet, un peu plus dans le rouge) entourant la λ indiquée dans les graphiques (40 Å de part et d'autre).

4° La position de l'écran n'ayant pas été nécessairement la même dans les deux séries de mesures, il peut y avoir aussi des différences résultant de ce que :

a) L'épaisseur des lames n'est pas absolument constante et il y a donc de légères différences de transmission d'un point à l'autre ;

b) Au spectrophotomètre visuel, les mesures ont été faites en prélevant une surface très réduite des écrans, alors qu'au thermocouple la région était plus grande (1) ;

c) Le pourcentage de lumière réfléchi a pu être différent dans les deux séries de mesures ;

d) Si la normale à l'écran forme un angle i avec le rayon lumineux incident, la longueur du trajet du rayon à l'intérieur de l'écran est non pas l'épaisseur e de la lame, mais bien :

$$e + \Delta e = e \left(1 + \frac{1}{2n^2} \sin^2 i \right)$$

n étant l'indice de réfraction de la lame au point

(1) Dans le premier cas, l'écran était placé contre la fente; dans le second cas, un peu en avant de la fente.

considéré et pour la λ considérée; $\frac{\Delta e}{e}$ peut atteindre 1 à 2%.

III. — Résultats expérimentaux

Comme il a été dit précédemment, nous avons examiné un grand nombre de verres colorés actuellement employés en Belgique pour les buts divers de la signalisation lumineuse, actuellement de nuit, afin de nous rendre compte de la mesure dans laquelle ils répondent aux exigences formulées dans la première partie de cette note.

Nous avons étudié ensuite quelques verres de fabrication étrangère plus particulièrement utilisés pour la signalisation lumineuse de jour et enfin de nombreux verres colorés, en vue de trouver parmi eux, ceux dont les courbes d'absorption répondent le mieux aux standards actuellement reconnus comme résolvant le plus complètement les problèmes posés par le nouveau mode de signalisation.

Il ne nous est guère possible de passer en revue tous les verres étudiés. Nous ne mentionnerons que ceux qui ont plus particulièrement retenu notre attention et qui nous paraissent pouvoir atteindre le but poursuivi.

Pour chacun des verres examinés, nous avons pris un spectre qui nous a permis de préciser les limites de transparence et nous avons tracé les courbes d'absorption par l'une ou par les deux méthodes dont l'exposé fait l'objet du chapitre II.

Comme on pourra s'en rendre compte, les résultats trouvés dans ce dernier cas présentent en général une concordance satisfaisante qui plaide en faveur de l'exactitude des courbes données.

Les résultats des mesures sont réunis dans une série de planches (fig. 4 à 25) dont l'examen ne demande guère de commentaires. Nous les passons très succinctement en revue en nous bornant à caractériser quelque peu les échantillons qui ont servi à les établir.

Les écrans 1 à 11 sont des verres employés par la Compagnie des Chemins de fer du Nord-Belge, étudiés sous l'épaisseur sous laquelle ils sont couramment utilisés.

Ecran 1. — Verre incolore de lanternes donnant les feux dits « blancs » de la signalisation fixe ou mobile de nuit. C'est un bon verre ordinaire d'une épaisseur de 3 mm.

Ecran 2. — Verre rouge-foncé de falots portés à l'arrière du dernier véhicule des trains en marche qui permet aux agents de la voie et des stations de s'assurer que le train est complet.

Ecran 3. — Verre rouge plus foncé que le précédent (épaisseur 2,25 mm) utilisé dans un but analogue.

Ecrans 4 et 5. — Verres rouges employés dans les électro-sémaphores et les signaux d'arrêt absolu.

Les verres rouges cités ci-dessus sont des verres blancs transparents doublés sur une face d'une mince pellicule de verre rouge au cuivre dont l'épaisseur détermine la teinte à réaliser.

Ecrans 6 et 7. — Verres bleus utilisés dans les lanternes de signaux d'arrêt absolu donnant le feu bleu, en arrière quand ce signal est effacé.

Ecran 8. — Verre pourpre donnant le feu dit violet des indicateurs de direction pour signaler la direction qui n'est pas donnée par l'aiguille.

Ecran 9. — Verre vert donnant le feu vert des disques de ralentissement et des électro-sémaphores.

Ecrans 10 et 11. — Verres verts analogues mais dépolis sur une face. Utilisés dans les avertisseurs à damier vert et blanc précédant les signaux d'arrêt absolu.

Ecrans 20, 21, 22. — Verre vert (I), verre rouge (II), verre jaune (III) employés dans la signalisation de la Société Nationale des Chemins de fer belges.

Ecran 12. — Verre vert de signalisation lumineuse de jour, de fabrication étrangère. Sa teinte rentre dans le cadre des « Green admiralty » (vert marine) et se caractérise par une forte proportion de bleu et de vert.

Ecran 15. — Verre rouge de signalisation lumineuse de jour, de fabrication étrangère.

Ecran 18. — Verre pourpre de signalisation lumineuse de jour, de fabrication étrangère.

Ecrans 23 et 24. — Verres jaunes de signalisation lumineuse de jour, de fabrication étrangère.

Ecran 14. — Verre rouge de signalisation lumineuse de jour, fabriqué par les Cristalleries du Val-St-Lambert.

Ecrans 16 et 17. — Verres rouges d'essai fabriqués en vue de l'obtention d'un verre approprié à la signalisation lumineuse de jour. L'un est trop foncé, l'autre trop clair. L'écran 14 qui tient la place intermédiaire entre les deux précédents répond aux conditions exigées.

Ecran 19. — Verre pourpre fabriqué par les Cristalleries du Val-St-Lambert pour les buts de la signalisation lumineuse de jour. Il remplit les conditions exigées.

Ecrans 28, 29, 30. — Verres jaunes d'essai en vue de trouver la teinte appropriée à la signalisation lumineuse de jour.

Ecrans 25, 26, 27. — Verres jaunes de signalisation lumineuse de jour répondant aux exigences spécifiées. Le verre 27 résout particulièrement bien le problème.

IV. — Conclusions

Comme on peut s'en rendre compte par l'examen des courbes données précédemment, les verres de signalisation lumineuse de nuit actuellement employés, tout en rendant pendant les services que l'on en attend — ne répondent guère aux conditions beaucoup plus strictes de la signalisation lumineuse de jour. Aussi était-il intéressant de rechercher des écrans susceptibles de résoudre le problème et d'être à même de faire face aux exigences dans le cas où le nouveau mode de signalisation serait adopté.

La question est d'importance, et M. Blondel dans sa remarquable étude sur « les signaux colorés des phares maritimes »², a, tout récemment encore, attiré l'attention sur la nécessité de disposer d'écrans appropriés à la signalisation.

Les nouveaux essais entrepris par les Cristalleries du Val-St-Lambert ont conduit à la réalisation de

verres qui, comme le montre l'étude spectrophotométrique, possèdent les caractéristiques imposées et mettent à l'actif de l'industrie nationale une fabrication nouvelle pour laquelle elle aurait dû être tributaire de l'étranger.

* * *

Le spectrophotomètre de Jobin et Yvon utilisé dans ce travail a été accordé à l'un de nous par la Commission Administrative du Patrimoine de l'Université de Liège. Nous tenons à exprimer notre vive gratitude aux membres de cette Commission et particulièrement à M. le Recteur J. Duesberg et à M. l'Administrateur-Inspecteur Dehalu.

Au cours de cette étude, nous avons reçu l'aide précieuse de Mme P. Swings pour l'obtention des courbes d'absorption par la 2^e méthode; de MM. J. Piéard et L. Dubrul pour le tracé des diagrammes par la 1^{re} méthode et de M. A. Minne pour les spectres d'absorption.

Nous tenons à remercier ces dévoués collaborateurs.

Nous remercions également : la Société Anonyme des Cristalleries du Val-St-Lambert en la personne de son Directeur Général, M. M. de Fraipont; M. Deleclos, Inspecteur de la Compagnie des Chemins de fer du Nord-Belge et M. Thirion, Chef de Station du Val-St-Lambert ainsi que M. Goosse, Chef de Station de Liège-Guillemins qui ont bien voulu mettre à notre disposition la plupart des échantillons nécessaires à notre étude.

Décembre 1933.

BIBLIOGRAPHIE

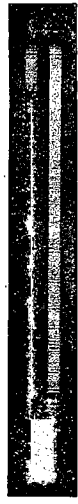
1. Institution of Railway Signal Engineers. Londres.
2. Thorowgood. *Bulletin de l'Association internationale du Congrès des chemins de fer*, 1927.
3. W. Churchill. The roundel Problem. 9^e Congrès annuel de la Railway Signal Association (Niagara Falls. N. Y., U. S. A.), 1905.
4. H. P. Gage. Railway Signalling, septembre 1929.
5. Blondel. Sur les signaux colorés des phares maritimes. *R. G. E.*, 34, 3, 13 (8 juillet 1933).
6. E. Zechimmer. Signalgrün und die Absorption des Kupferoxyde in versäuerter zusammengesetzten Gläsern. *Spektralanal.*, 59, p. 818 (1926).

3735	3800	3860	3900	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4800	5000	5200	5300	5900	6210	6600	6900
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



Fig. 4. — Ecran n° 1. Raies limites (6710 Å. / 3860 Å.

3735	3800	3900	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4800	5000	5200	5300	5500	5700	5940	6160	6650
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



Ecran n° 2.
Raies limites (6650 Å. / 5940 Å. Epaisseur : 2,14 mm.

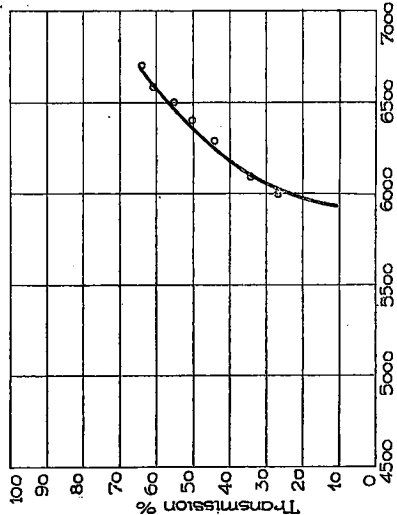
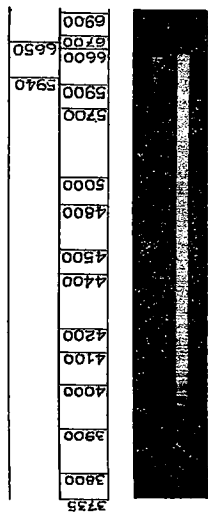


Fig. 5.



Ecran n° 3.

Raies limites (6620 Å. Epaisseur : 2.20 mm.
 (5940 Å.

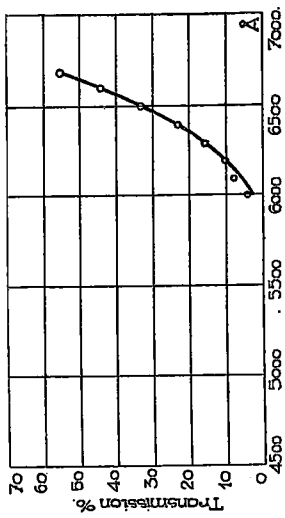
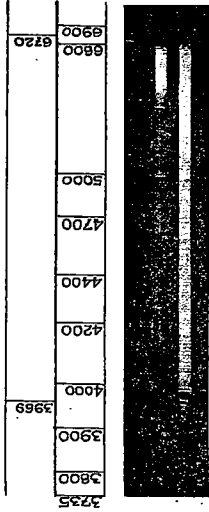


Fig. 6.



Ecran n° 4.

Raies limites (6720 Å. Epaisseur : 2.50 mm.
 (3969 Å.

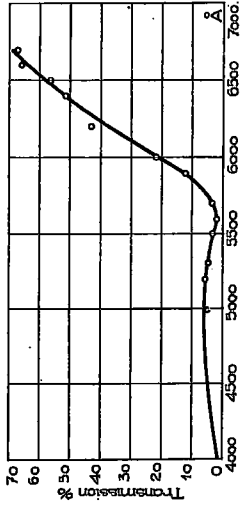
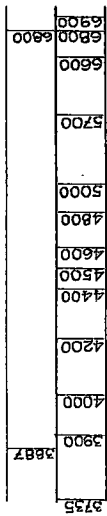


Fig. 7.



Ecran n° 5.
Raies limites (6800 Å. Epaisseur : 3 mm.
/ 3687 Å.

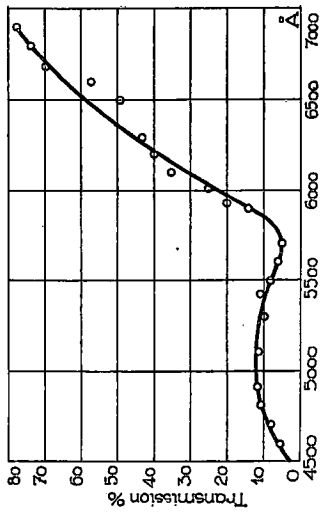
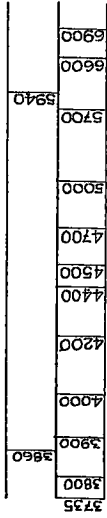


Fig. 8.



Ecran n° 6.
Raies limites : 5940 Å-3860 Å. Epaisseur : 2,86 mm.

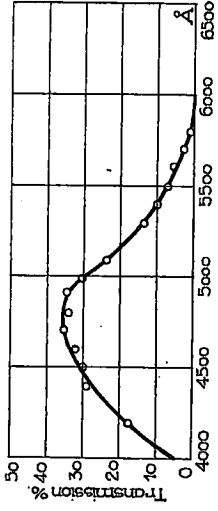
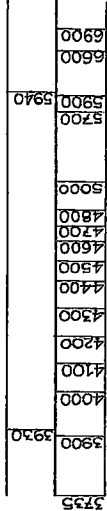


Fig. 9.



Ecran n° 7.
Raies limites : 5940 Å-3930 Å. Epaisseur : 2,7 mm.

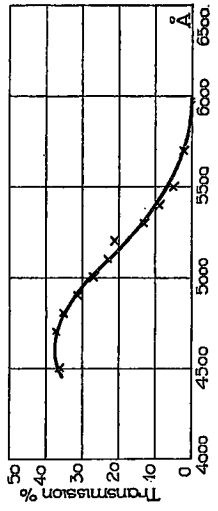
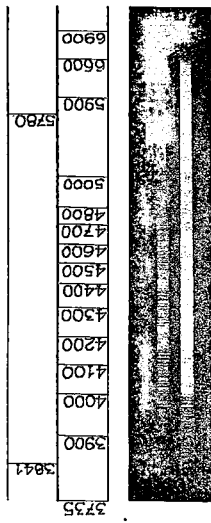


Fig. 10.



Ecran n° 8.
Rates limites : 5780 Å-3841 Å. Epaisseur : 3,5 mm.

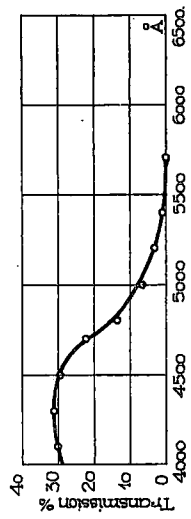
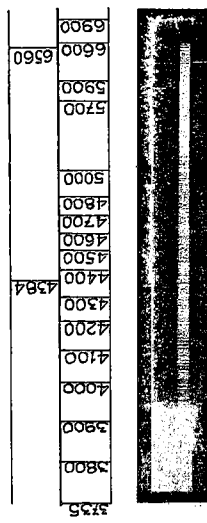


Fig. 11.



Ecran n° 9.
Rates limites : 6560 Å-4384 Å. Epaisseur : 2,68 mm.

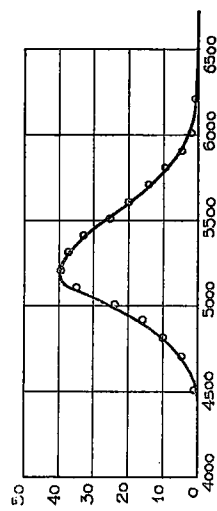


Fig. 12.

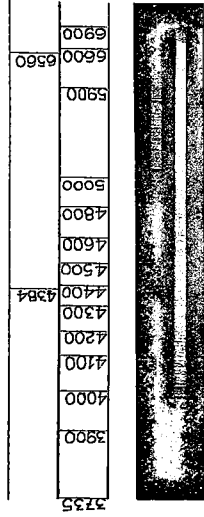
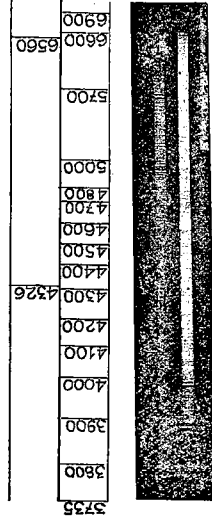


Fig. 13. — Ecran n° 10. Rates limites : 6560 Å-4384 Å.



Ecran n° 11.
Rates limites : 6560 Å-4326 Å. Epaisseur : 2,47 mm.

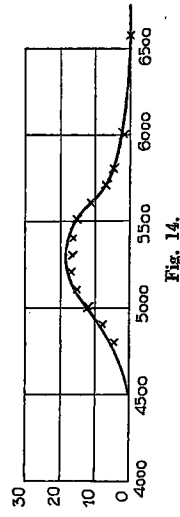


Fig. 14.

3735	3800	3900	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000	5300	5500	5700	5900	6600	6710
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



Ecran n° 12.
 Raies limites : 3788 Å-6710 Å. Epaisseur : 1,9 mm.

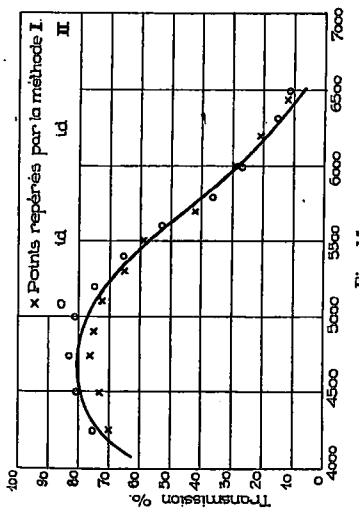


Fig. 15.

3735	3800	3900	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000	5300	5500	5700	5900	6600	6610
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



Ecran n° 13.
 Raies limites : 6610 Å-3750 Å. Epaisseur : 2 mm.

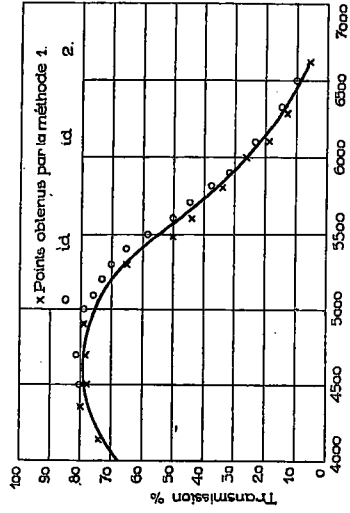


Fig. 16.

3735
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4800
5000
5100
5200
5300
5500
5700
5900
5940
6600
6900



Ecran n° 14.
 Raies limites : 6900 Å-5940°. Epaisseur : 2,2 mm.

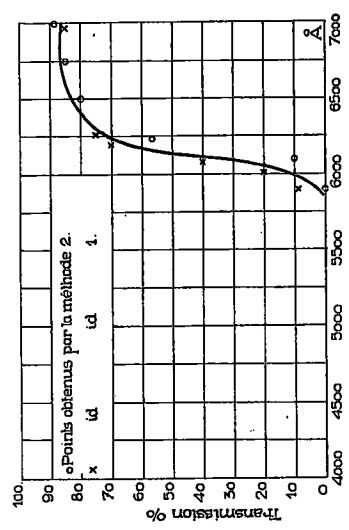


Fig. 17.

3735
3800
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4600
4700
4800
4900
5000
5300
5500
5680
5700
5960
6600
6900



Ecran n° 15.
 Raies limites : 6900 Å-5680 Å. Epaisseur : 2,2 mm.

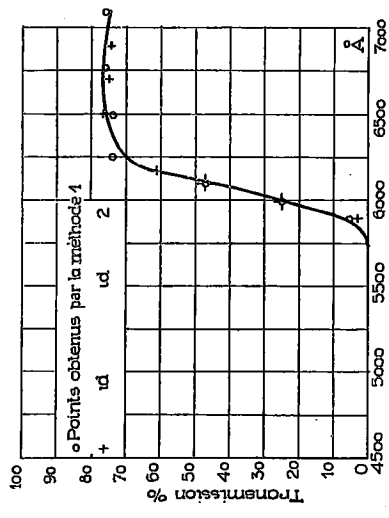


Fig. 18.

17



3735
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4600
4700
4800
5000
5300
5500
5700
5900
6100
6300
6500
6600
6900

16



Ecrans n°s 16 et 17.

Rates limites } 16 : 6900 Å.
 } 16 : 6100 Å. Epaisseur } 16 : 1,9 mm.
 } 17 : 6980 Å.
 } 17 : 4650 Å.

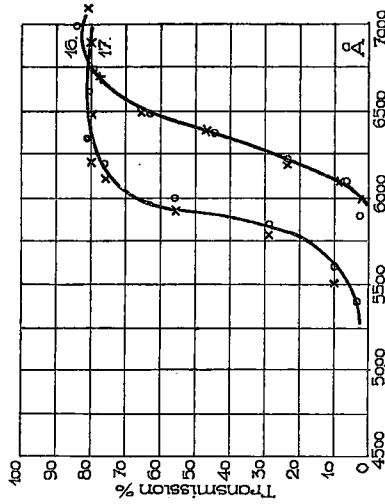


Fig. 19.

3735
3800
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4600
4700
4800
4900
5000
5100
5300
5500
5700
5900
6300
6600
6900



Ecran n° 18.

Rates limites } 6900 Å.
 } 3735 Å. Epaisseur : 1,6 mm.

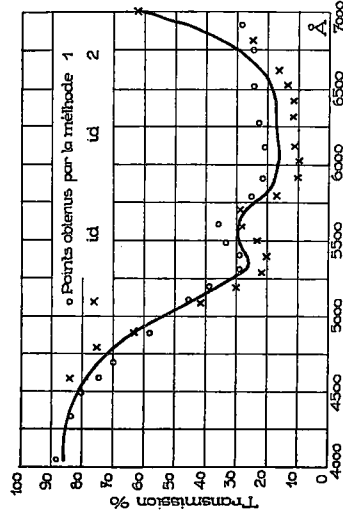


Fig. 20.

3735	3735
3900	3900
4000	4000
4100	4200
4200	4300
4300	4400
4400	4500
4500	4600
4600	4700
4700	4800
4800	5000
4900	5300
5000	5500
5100	5900
5200	6600
5300	6900
5400	6930



Ecran n° 19.

Rates limites (6830 Å, Epaisseur : 1,8 mm.
3735 Å)

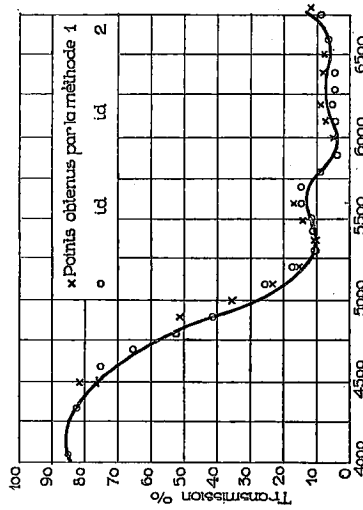


Fig. 21.

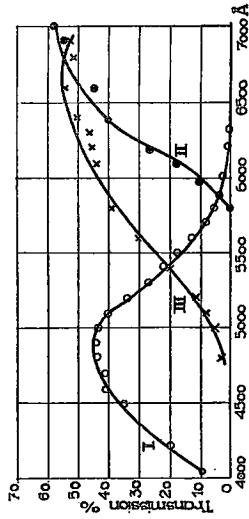
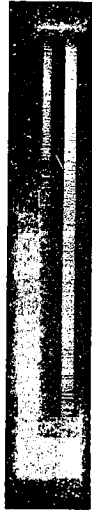
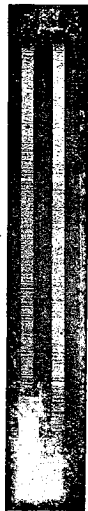


Fig. 22.



24 (I)

3735	3900
3800	3900
3900	3915
3969	3969
4000	4000
4100	4200
4200	4300
4300	4400
4400	4500
4500	4600
4600	4700
4700	4800
4800	4900
4900	5000
5000	5300
5100	5500
5200	5900
5300	6600
5400	6900
5500	6900
5600	6900
5700	6900
5800	6900
5900	6900



23 (II)

Ecrans n°s 23 et 24.

Rates limites (6900 Å, Epaisseur : 2,5 mm.
23 (3915 Å, Epaisseurs)
24 (3969 Å, Epaisseurs)

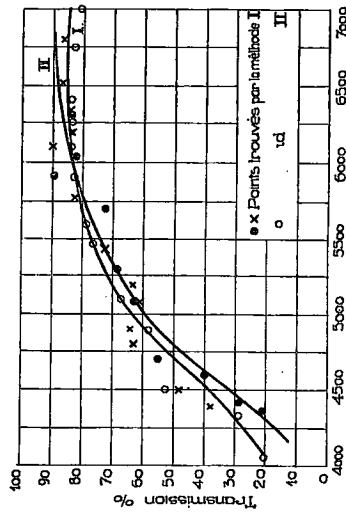


Fig. 23.

3735
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4600
4700
4800
5000
5300
5700
5900
6100
6600
6900



25 (I)



26 (II)



27 (III)

Ecrans n°s 25-26-27.

25 / 6900 Å. 2,05 mm.
 26 / 3821 Å. 2,5 mm.
 Rates limites } 26 / 6900 Å. Epaisseur } 2,5 mm.
 27 / 3750 Å. 2 mm.
 27 / 6900 Å. 2 mm.
 27 / 3905 Å.

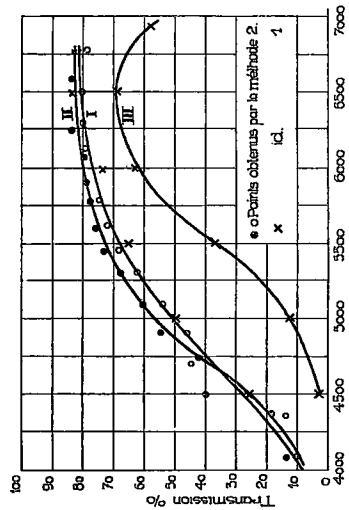


Fig. 24.

3735
3900
4000
4100
4200
4300
4400
4500
4600
4800
5000
5300
5700
5900
6600
6900



28



29



30

Ecrans n°s 28-29-30.

28 / 6900 Å. 28 : 2,15 mm.
 29 / 3920 Å. 29 : 1,9 mm.
 Rates limites } 29 / 6900 Å. Epaisseur } 1,9 mm.
 30 / 3905 Å. 30 : 2,3 mm.
 30 / 6900 Å. 30 : 2,3 mm.

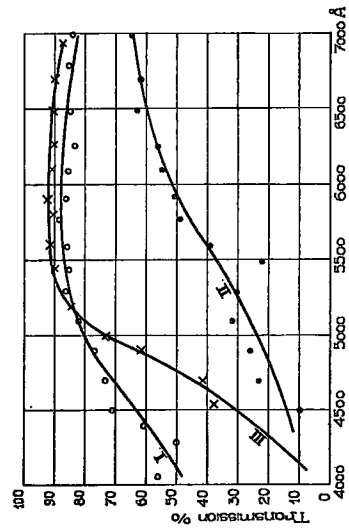


Fig. 25.