

NOTE

SUR LA QUESTION DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE DES GARES (ART. XI,
LITT. A, DU QUESTIONNAIRE DE LA TROISIÈME SESSION DU CONGRÈS)

Par L. WEISSENBRUCH

INGÉNIEUR AU MINISTÈRE DES CHEMINS DE FER, POSTES ET TÉLÉGRAPHES DE BELGIQUE

COMPARAISON DE PROJETS DIFFÉRENTS POUR L'ÉCLAIRAGE D'UNE GARE ⁽¹⁾.

La question de la comparaison de projets différents d'éclairage d'une gare a été soulevée récemment devant la Société belge d'électriciens par M. l'ingénieur Ernest Gérard, chef du cabinet du ministre des chemins de fer ⁽²⁾.

Cette question paraît a priori d'autant plus difficile à résoudre qu'il est presque impossible d'établir un parallèle complet entre le mode d'éclairage existant dans une gare et celui qui s'y trouvait auparavant. Il faut, en effet, tenir compte d'un si grand nombre d'éléments de nature différente, qu'il est impossible de les résumer tous en une formule simple.

C'est d'abord l'intensité, la fixité et la couleur de la lumière, la préexistence d'une usine à gaz ou d'une station centrale d'électricité, le prix du gaz ou de la force motrice, le nombre d'heures d'allumage, la possibilité de surélever les foyers et de les utiliser à feu nu, etc., etc.

Il est à remarquer que non seulement les calculs comparatifs, tels qu'on les établit dans chaque cas particulier, ne peuvent être généralisés, mais qu'ils ne donnent le plus souvent aucune évaluation de la quantité de lumière obtenue au moyen de chacun des modes d'éclairage considérés.

Le motif en est que l'éclairement des divers objets soumis à l'effet d'une

⁽¹⁾ Voir le numéro de juin 1889 du *Bulletin de la Société belge d'électriciens*.

⁽²⁾ *Ibid.*, mars 1889.

source de lumière varie tant d'un point à un autre qu'il ne suffirait pas de quelques opérations de mesure directe pour s'en faire une idée. L'œil lui-même s'y trompe, il s'habitue si bien à une augmentation de la lumière artificielle, que l'on a remplacé en beaucoup d'endroits, dans les rues et les places publiques, les anciens brûleurs par des becs intensifs cinq ou six fois plus forts sans que bien des gens aient songé à s'en apercevoir.

L'administration des chemins de fer de l'État belge a la première, croyons-nous, en Europe, songé à faire faire, par le libre jeu de la concurrence elle-même, le choix du système d'éclairage à adopter.

Ainsi que l'a exposé l'un de ses chefs éminents, M. l'administrateur Belpaire, dans la discussion de la question de l'éclairage des gares à la session de Milan du Congrès des chemins de fer (septembre 1887), elle met en adjudication la fourniture de la lumière, *soit par le gaz, soit par l'électricité*, en indiquant simplement l'éclairage minimum à atteindre en un point quelconque.

La base du système est indiquée dans ses cahiers des charges de la façon suivante :

« La quantité minima de lumière à fournir sera de $\frac{1}{n}$ (généralement $\frac{1}{50}$ dans les espaces découverts) de carcel en un point quelconque. »

Les entrepreneurs présentent des projets qu'ils ont faits eux-mêmes en indiquant le nombre des foyers lumineux, leur pouvoir éclairant, leur nature et leur emplacement.

Voici les conventions admises par l'État belge pour apprécier si la base du cahier des charges est respectée ⁽¹⁾.

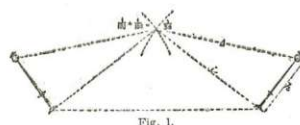


Fig. 1.

1° L'éclairage n'est pas mesuré directement, mais calculé en admettant — les foyers étant généralement d'égale intensité — que le minimum corresponde à un

⁽¹⁾ Voir la communication précitée de M. Ernest Gérard ingénieur au chemin de fer de l'État belge, à la Société belge d'électriciens (*Bulletin* de mars 1889).

point situé à égale distance de deux foyers consécutifs. Il suffit alors que l'un des foyers donne en ce point $\frac{1}{100}$ pour qu'il y ait en tout $\frac{2}{100} = \frac{1}{50}$.

L'éclairement e , en un point situé à une distance Δ d'un foyer d'intensité I (voir fig. 4), s'obtient par la formule :

$$\frac{e}{I} = \frac{1}{\Delta^2} \text{ d'où } e = \frac{I}{h^2 + l^2}.$$

2° L'intensité I , qui figure dans la formule précédente, est l'intensité moyenne sphérique.

Dans le cas le plus général pour les espaces découverts, celui de foyers à arc alimentés par des courants continus, elle équivaut à « la moitié de l'intensité horizontale augmentée du quart de l'intensité prise sous un angle de 45° et considérée comme maximum d'après la formule $I = 1/2 H + 1/4 M$ ».

Les résultats obtenus ont été assez variables, mais les gaziers ont été presque partout vainqueurs : à Anvers (Sud, Bassin et Entrepôt local), à Arlon et à Schaerbeek (Sud).

L'adjudication n'a été favorable à l'électricité qu'à Montigny. Cependant on constate que cette dernière gare et celle de Schaerbeek (Nord), éclairée aussi à l'électricité à peu près d'après les mêmes bases, ont, sans contredit, beaucoup plus de lumière que celles où le gaz l'a emporté.

Aussi M. l'ingénieur Dery a-t-il déclaré, à Milan, que le motif principal de l'emploi du système essayé par l'État belge était l'économie :

« Si nous n'avions fait appel qu'à l'électricité, a-t-il dit, un syndicat se serait formé pour élever les prix et se partager l'éclairage de nos gares. Voilà pourquoi nous avons mis en concurrence le gaz et l'électricité. Il est probable que quand on aura une expérience suffisante de la chose, on pourra renoncer à ce système, qui est un palliatif, et employer pour nos gares le mode d'éclairage reconnu le meilleur. Je pense que l'électricité l'emportera définitivement sur le gaz. Mais c'est avant tout une question de prix. »

En attendant qu'il lui soit possible de renoncer au système actuel, l'État belge s'est attaché à l'améliorer.

Il a admis que le meilleur éclairage obtenu à Schaerbeek (Nord) et à Montigny pouvait compenser dans une certaine mesure une augmentation de la

dépense annuelle, et il a introduit dans le cahier des charges d'une des dernières adjudications, celle de Schaerbeek (Sud), un article nouveau ainsi conçu :

« ART. 17. — Les différentes offres seront soumises à une commission d'ingénieurs de l'administration.

« Cette commission jugera, sous réserve de l'approbation du ministre, celle qui est la plus avantageuse pour les intérêts de l'État, en tenant compte et des prix de l'éclairage et des quantités relatives de lumière garanties. »

Cette nouvelle clause s'est trouvée sans application, la commission d'ingénieurs chargée d'examiner les offres ayant dû se prononcer pour l'éclairage au gaz, à cause du manque de données précises pour évaluer les quantités de lumière garanties et à cause de la disproportion très grande du coût annuel de l'éclairage électrique.

Les offres pouvaient se résumer comme suit :

	GAZ. 37 foyers de 12 carrels.	ÉLECTRICITÉ. Soumission la plus basse, 11 foyers de 110 carrels.
Montant du devis.	21,900 ⁽¹⁾	44,300
Prix de la reprise à l'expiration de l'entreprise (durée : 10 ans)	6,600 ⁽¹⁾	18,500
Dépense annuelle sur la base des 3,000 heures garanties	12,000	21,800

Maintenant que l'installation de Schaerbeek (Sud) est en service, on constate qu'elle se montre inférieure à celle de Schaerbeek (Nord), et que l'on n'a pas obtenu en somme l'intensité de lumière qu'on espérait.

La nouvelle clause n'a donc pas atteint son but. Est-il possible, en conservant le principe du cahier des charges, d'y introduire d'autres améliorations?

Nous avons traité cette question en détail dans une communication à la *Société belge d'électriciens* ⁽²⁾, dont nous résumerons ici les points principaux.

Avant toute chose, nous avons cherché à établir que, d'après la façon même dont elle est appliquée, la clause du minimum des cahiers des charges de l'État belge devrait être ainsi rédigée :

« La quantité minima de lumière à fournir par mètre carré de surface, c'est-

⁽¹⁾ Ces chiffres ne comprennent que les conduites à gaz situées dans le périmètre de la station. Au bout de dix ans, le chemin de fer payerait 6,600 francs pour la tuyauterie, mais s'il voulait alors s'éclairer lui-même, il devrait construire une usine à gaz. Au contraire, pour l'électricité, le prix de 18,500 comprend la reprise de toute l'installation à lumière.

⁽²⁾ Voir le numéro de juin 1889.

à-dire l'éclairement minimum, sera de $\frac{1}{n}$ de carcelmètre en un point quelconque du sol. »

En effet, l'État belge se sert de la formule $e = \frac{I}{h^2 + l^2}$ dans laquelle e représente la quantité de lumière par unité de surface (en supposant la surface éclairée perpendiculaire au rayon lumineux), c'est-à-dire ce que l'on est convenu d'appeler l'éclairement (normal).

Cet éclairement s'exprime non en carcel, mais en lux ou en carcelmètres, car l'unité d'éclairement est l'éclairement produit normalement par l'unité de lumière à l'unité de distance. L'appellation de lux a été proposée par M. Preece, dans son rapport sur l'éclairage électrique des rues de Londres. M. Wybauw, ingénieur de la ville de Bruxelles, a, vers la même époque, dans une note à la Société belge d'électriciens, donné le même nom à une unité dix fois plus petite (bougiemètre). Nous avons nous-même suggéré à la dernière session du Congrès la dénomination de carcelmètre qui s'est beaucoup répandue depuis.

Enfin, c'est bien en un point quelconque du sol horizontal que l'éclairement doit être cherché. L'État belge appliquant la formule $e = \frac{I}{h^2 + l^2}$ qui ne tient pas compte de l'obliquité des rayons lumineux, on pourrait croire qu'il s'agit chaque fois de l'éclairement sur un plan normal à la direction du rayon lumineux considéré. Mais dans ce cas, il serait impossible, là où deux rayons différents concourent à l'éclairage, d'additionner, comme on le fait, l'éclairement produit par chaque foyer, afin de trouver l'éclairement total, et d'admettre qu'il y a un éclairement d' $\frac{1}{50}$ là où il y deux fois un éclairement de $\frac{1}{100}$ (voir fig. 4).

C'est d'ailleurs toujours sur le sol que dans des cas semblables on cherche l'influence des divers foyers. Ainsi, dans les descriptions de l'éclairage du palais des machines de l'Exposition de Paris, pour donner une idée de la clarté obtenue, on a dit quel était le nombre de carcelmètres reçus par mètre carré sur une feuille de papier placée horizontalement.

Et l'on ne pourrait d'ailleurs pas remplacer cette feuille horizontale par une autre verticale ou inclinée se déplaçant parallèlement à elle-même, car il y aurait toujours des positions où celle-ci ne serait éclairée que par un seul foyer, et même où elle ne serait plus éclairée du tout.

M. Wybauw, dans son travail déjà cité, a cependant plaidé le contraire. Il a dit :

« Ce serait à tort que pour évaluer l'effet d'un éclairage on calculerait simplement la lumière reçue par le plan horizontal éclairé. Ce n'est pas en général

le plan géométrique horizontal proprement dit qui doit être éclairé, mais les objets qui se trouvent sur ce plan. Sur la voie publique, ce sont les passants et les voitures, les bosses et les fosses du pavage. Quoique nous trouvons sur un plan matériel horizontal, nous n'avons aucun motif pour considérer un élément horizontal plutôt qu'un autre, et ce qui nous intéresse bien plus et avec beaucoup plus de raison, c'est l'éclairement maximum que peut donner le foyer, au point où nous sommes, sur une face normale à la direction des rayons ⁽¹⁾. »

Cette théorie est inexacte, et il serait dangereux de la voir s'accréditer davantage. Certes, dans un panorama artificiel, l'éclairage du sol n'a aucune importance et celui des parois verticales est tout; mais dans les rues, celui du sol commence à jouer un rôle prépondérant, bien que celui de la façade des maisons ne soit pas indifférent. Enfin, dans une grande gare découverte, le sol horizontal a une influence prépondérante parce que les principaux objets qu'il faut éclairer s'y trouvent placés ou circulent sur son étendue. Il règle donc la distance de ces divers objets au foyer en même temps que l'inclinaison du rayon lumineux relativement à une surface quelconque qui se déplacerait parallèlement à elle-même d'un point à un autre du sol.

Chose curieuse! Lorsque, passant de la théorie à la pratique, M. Wybauw veut apprécier ce qu'il appelle « l'effet utile fourni par l'éclairage d'un foyer », il propose la formule ⁽²⁾ :

$$E = \int_{l_1}^{l_2} \frac{i}{(h^2 + l^2)} \cdot 2\pi l \, dl \dots \dots \dots [1]$$

Comparons cette expression avec celle de la quantité de lumière reçue sur le plan horizontal, laquelle est exprimée par l'intégrale de l'éclairement de l'élément horizontal $MP = dl$ (fig. 2), multiplié par la zone élémentaire comprise entre les deux circonférences l et $l + dl$, c'est-à-dire par :

$$Q = \int_{l_1}^{l_2} \frac{i h}{(h^2 + l^2)^{3/2}} \cdot 2\pi l \, dl \dots \dots [2]$$

On voit que la formule [1] ne peut

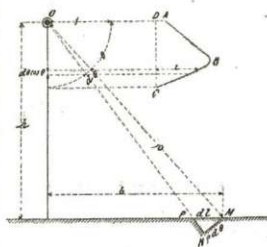


Fig. 2.

⁽¹⁾ La mesure et la répartition de l'éclairement par M. Wybauw, *Bulletin de la Société belge d'électriciens*, avril 1885.
⁽²⁾ *Bulletin de la Société belge d'électriciens*, avril 1885, p. 85.

exprimer en réalité que la quantité de lumière reçue par le sol horizontal, mais calculée d'une manière inexacte.

En effet, si d'après la théorie de M. Wybauw on doit considérer au point M non le sol horizontal mais l'élément normal au rayon lumineux, ce n'est point $MP = dl$ qu'il faut introduire dans la formule [1], mais $MN = dl \sin \theta$ (voir fig. 2).

[1] devient alors :

$$E = \int_{l_1}^{l_2} \frac{i}{h^2 + l^2} 2\pi l \sin \theta \, dl$$

expression qui — on s'en aperçoit facilement — n'est autre chose que [2]. On voit donc que si l'on effectue exactement les calculs, on retombe précisément sur la quantité de lumière reçue par le sol horizontal pour l'expression de ce que M. Wybauw lui-même appelle « l'effet utile fourni par l'éclairage d'un foyer ».

Si l'on supposait le sol formé d'anneaux concentriques perpendiculaires aux rayons émanant du foyer et recevant chacun un maximum d'éclairement, il est évident que les surfaces de raccordement seraient dans l'ombre (voir fig. 3). Le foyer F supposé déterminé d'intensité et de position envoie toujours vers le sol la même quantité de lumière, et tous les efforts ne peuvent l'augmenter, mais simplement en changer la répartition. Or, c'est cet éclairement moyen qui nous intéresse seul, car il ne suffirait pas pour éclairer une gare que l'on y projetât en quelques points des taches de lumière intense.

La nouvelle rédaction de la base des cahiers des charges étant admise, nous pensons qu'il serait préférable d'apporter quelques modifications aux règles conventionnelles admises par l'État belge pour son application.

1° Puisque l'éclairement est cherché sur le sol, il faut, au lieu de la formule $e = \frac{1}{h^2 + l^2}$, employer celle

$$e = \frac{I \sin \theta}{h^2 + l^2} = \frac{I h}{(h^2 + l^2)^{3/2}}$$

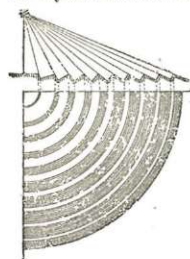


Fig. 3.

qui tient compte de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport à la surface éclairée (voir fig. 4) ⁽¹⁾.

L'erreur provenant de ce que l'on fait abstraction de l'inclinaison n'est nullement négligeable comme on pourrait le croire : avec des foyers de 12 carrels placés à 5 mètres de hauteur, on obtient, pour la distance à laquelle existe un éclairage de $\frac{1}{50}$ carcelmètre, 24 mètres sans tenir compte de l'obliquité, et 13^m50 d'après la formule correcte. L'erreur est donc de 56 p. c. !

2° Il faut, dans la formule $e = \frac{I h}{(h^2 + l^2)^{3/2}}$ tenir compte de la variation de la valeur de I avec l'inclinaison du rayon lumineux.

On ne peut, pensons-nous, comme le fait l'Etat belge, supposer l'intensité constante dans les différentes directions et égale pour l'électricité à l'intensité moyenne sphérique, pour le gaz, à l'intensité horizontale.

Cette hypothèse s'approche beaucoup de la vérité pour la plupart des brûleurs à gaz, mais il n'en est guère de même pour les foyers électriques à arc et à courants continus.

Si, dans ce dernier cas, sur chaque rayon et à partir du centre du foyer, on porte l'intensité correspondante, on obtient une surface de révolution autour de l'axe des charbons dont la génératrice affecte la forme générale de la figure 5.

Cette circonstance est particulièrement favorable à l'éclairage des points éloignés, car la plus grande intensité correspond précisément aux rayons projetés sur le sol à une certaine distance du candélabre au pied duquel il y a toujours assez de lumière.

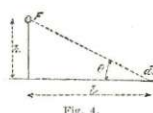


Fig. 4.

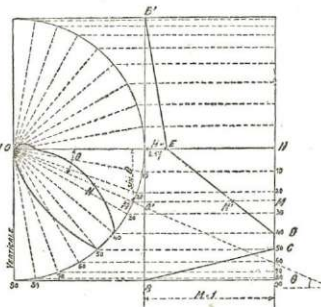


Fig. 5.

⁽¹⁾ Voir le rapport de M. L. Weissenbruch à la session de Milan sur l'éclairage des gares.

On peut se dire qu'il doit être aisé, au moyen de réflecteurs, de rabattre aussi sur le sol toute la lumière d'un bec ayant la même intensité dans toutes les directions.

Mais l'expérience prouve qu'il est difficile de trouver de bons appareils pour étaler la lumière, c'est-à-dire pour la réfléchir et la disperser à la fois. La difficulté est encore augmentée pour les brûleurs à gaz, qui doivent nécessairement être renfermés dans des lanternes qui empêchent les courants d'air, tout en fournissant assez d'oxygène à la combustion.

On se borne, en général, à employer des surfaces blanches ou brillantes qui font encore perdre beaucoup de lumière, qu'il est difficile d'entretenir dans un état de propreté satisfaisant et dont le prix est assez élevé, surtout quand il se multiplie par un grand nombre de becs.

Dans la plupart des installations d'éclairage électrique, on a presque entièrement renoncé aux réflecteurs, excepté dans des cas particuliers. Au chemin de fer du Nord français, de nombreux essais ont démontré notamment qu'avec des foyers à arc à courants continus, il était préférable, en général, de réduire ces appareils à de très faibles dimensions et de les employer uniquement pour renforcer un peu l'éclairement au pied du candélabre, parce que la lumière produite au-dessus de l'horizontale n'est pas assez importante pour mériter d'être recueillie par des appareils coûteux.

Dans les gares découvertes, avec des foyers assez éloignés les uns des autres, les réflecteurs diminuent trop la lumière projetée au loin et sous les halles couvertes la clarté émise vers le haut n'est pas sans utilité si l'on a eu soin de peindre en blanc les murs et les plafonds.

Le véritable réflecteur des foyers à arc à courants continus est constitué par le charbon supérieur, auquel on donne dans ce but un diamètre plus fort qu'au charbon inférieur. Ils possèdent donc un avantage naturel indiscutable surtout pour l'éclairage des grands espaces découverts, et l'on aboutirait à des résultats complètement erronés si l'on refusait d'en tenir compte dans le calcul de l'éclairement.

En effet, l'intensité des foyers dont il s'agit variant avec la valeur de θ , on aura pour l'exprimer une équation $i = f(\theta)$ dont la forme est assez simple.

Car, si dans le diagramme de la figure 5, par l'extrémité de chaque rayon OM, on mène l'horizontale MM' et que l'on porte à partir de la verticale BB' une longueur O'N' égale à l'intensité ON, la courbe B'E D C B ainsi formée est très

approximativement une ligne brisée ayant pour équation, si H == l'intensité horizontale et M == l'intensité maxima :

$$\begin{aligned} \text{Entre } \theta = 0^\circ \text{ et } \theta = 40^\circ. & \quad i = \frac{M-H}{\sin 40^\circ} \sin \theta + H. \\ - \quad \theta = 40^\circ \text{ et } \theta = 50^\circ. & \quad i = M. \\ - \quad \theta = 50^\circ \text{ et } \theta = 90^\circ. & \quad i = \frac{M}{1 - \sin 50^\circ} (1 - \sin \theta). \end{aligned}$$

Si l'on prend comme exemple un des foyers de 110 carrels proposés à Anvers (Sud) et que l'on cherche dans le rapport du comité des mesures électriques de l'Exposition d'Anvers les valeurs les plus probables de H et de M , on trouve $M = 328$ et $H = 55.76$. On en déduit la valeur des éclairagements correspondants par la formule, et si l'on représente graphiquement les résultats à côté de ceux que l'on obtiendrait pour l'intensité supposée constante, on obtient deux courbes très différentes indiquées par la figure 5.

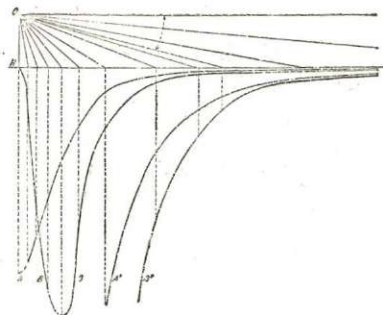


Fig. 6.
N. B. — A' et B' sont les reproductions des courbes A et B à une échelle verticale dix fois plus grande.

La courbe A correspondant à l'intensité constante donne l'éclairage maximum au pied du candélabre, tandis qu'en réalité il n'est atteint qu'à une certaine distance. A partir de ce maximum, l'allure des deux courbes est la même, mais la courbe d'intensité variable reste constamment au-dessus de l'autre.

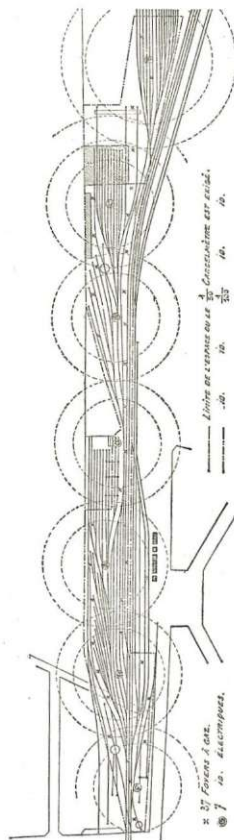


Fig. 7.

Dans un cas, si l'on suppose le foyer isolé, l'éclairement de $\frac{1}{50}$ de carcelmètre, par exemple, est atteint à 42^m70 du pied du candélabre, dans l'autre, il l'est déjà à 53 mètres. L'erreur est donc de 24.5 p. c.

L'emploi d'un réflecteur peut changer un peu le tracé de la courbe B, mais il ne fera qu'augmenter chacune de ses ordonnées et, par suite, accentuer à partir de son maximum sa distance à la courbe A.

3° Il faut que l'Administration se réserve le droit de réduire, si elle le désire, le nombre de foyers proposé, de manière que la clause du minimum soit observée à sa limite inférieure.

Dans le cas particulier de Schaerbeek (Sud), la disproportion entre le loyer de 12,000 francs demandé pour le gaz (3,000 heures d'éclairage garanties par l'Administration) et celui de 21,800 francs pour l'électricité, provenait surtout de ce que le soumissionnaire du gaz avait espacé ses brûleurs à l'extrême, tandis qu'il aurait suffi de 7 foyers électriques au lieu de 11 (voir fig. 7) pour satisfaire encore au minimum d'éclairement stipulé.

La dépense annuelle pour ces 7 foyers à arc n'aurait plus été alors que de 14,000 francs environ vis-à-vis des 12,000 francs du gaz.

4° Le cahier des charges imposant uniquement un minimum d'éclairement, très faible d'ailleurs, sans stipuler d'éclairement moyen, il faut limiter la hauteur des foyers, afin d'éviter que les entrepreneurs ne l'exagèrent dans le but d'augmenter l'écartement.

En effet, le rayon de la circonférence $\left(\frac{R}{1/n}\right)$ qui reçoit un éclairement déterminé $e = 1/n$,

d'un foyer d'intensité donnée, i , situé à une hauteur h , se déduit de la formule :

$$e = \frac{i h}{(h^2 + l^2)^{3/2}}$$

d'où

$$\left(R_{1/n}\right)^2 = \left(\frac{i}{e}\right)^{2/3} h^{2/3} - h^2$$

Si l'on suppose i constant et h variable, cette expression peut se représenter par une courbe semblable à celle de la figure 8, où M représente un point recevant un éclairage fixe de $1/n$ de carcelmètre d'un foyer F d'intensité donnée, mais placé à des hauteurs variables. La distance OM = $R_{1/n}$ est nulle pour $h = 0$ et nulle encore pour $h = \infty$. Entre ces deux limites, elle passe par un maximum donné par $\frac{d l}{d h} = 0$ d'où l'on tire

$$h = \frac{l}{\sqrt{2}} \text{ ou } \theta = 35^\circ 20'$$

Si i est variable et représenté d'une manière générale par $i = a \sin \theta + b$ (voir fig. 5), on peut pour plus de facilité faire usage de la formule

$$e = \frac{i \cos^2 \theta \sin \theta}{l^2} = \frac{a \sin \theta + b}{l^2} \cos^2 \theta \sin \theta$$

D'où l'on tire pour le maximum de l par $\frac{d l}{d \theta} = 0$

$$4a \sin^2 \theta + 3b \sin^2 \theta - 2a \sin \theta - b = 0$$

équation du 3^e degré n'ayant qu'une racine réelle.

Si l'on remplace a et b par leurs valeurs correspondant à la partie de la courbe des intensités comprise entre $\theta = 0$ et $\theta = 40^\circ$, on voit que le maximum cherché est au delà de 40° . Si, au contraire, on choisit les valeurs relatives à $\theta = 40^\circ$ et $\theta = 50^\circ$, on s'aperçoit que le maximum est en deçà de 40° . Il s'ensuit qu'il est en réalité donné par $\theta = 40^\circ$.

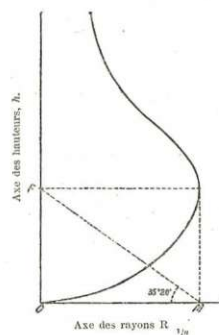
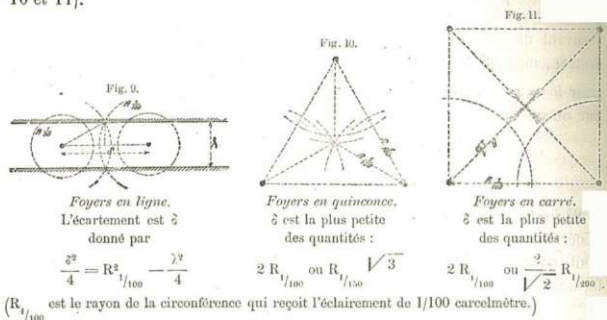


Fig. 8.

Si le cahier des charges ne limite d'aucune façon la hauteur des foyers, les entrepreneurs, ayant intérêt à augmenter la distance des candélabres, peuvent donner à cette hauteur la valeur qui rendra maxima celle des quantités :

$$R_{1/50}, \quad R_{1/100}, \quad R_{1/150} \quad \text{ou même} \quad R_{1/200}$$

qui aura le plus d'influence sur la détermination de l'écartement (voir fig. 9, 10 et 11).



On trouve ainsi que pour un foyer électrique de 110 carrels d'intensité moyenne sphérique proposé pour Schaerbeek (Sud), le rayon d'éclairement correspondant à l'éclairement de $\frac{1}{50}$ de carcelmètre, qui est $R_{1/50} = 53$ mètres pour $h = 18$, pourrait être porté à 79^m50 en employant des mâts de 56^m37!

Il ne faut pas craindre que les entrepreneurs proposent de pareils mâts à cause de la difficulté de les ériger, mais ils pourraient cependant chercher à s'en rapprocher trop, puisque ceux de 30 ou de 33 mètres qui existent à Schaerbeek (Nord) sont considérés comme exagérés pour l'intensité des foyers (110 carrels de moyenne sphérique) et que l'on a reconnu qu'il y aurait avantage à les abaisser.

Il ne faut pas perdre de vue qu'en augmentant la hauteur des foyers on éclaire un peu mieux les parties du plan horizontal situées à une certaine distance, parce qu'on diminue l'obliquité très grande des rayons qui les atteignent, mais qu'en même temps, le foyer s'éloignant aussi des points qui sont rapprochés du

piéd du pylone et qui reçoivent des rayons presque normaux, l'éclairement de ceux-ci diminue sensiblement en raison inverse du carré de l'élévation.

En somme, le foyer envoie vers le plan horizontal jusqu'à l'infini une quantité de lumière fixe qui est invariable, et dont l'on ne peut que changer la répartition. Cette quantité est celle fournie par les rayons situés dans l'hémisphère inférieur. Si l'on élève le foyer pour mieux éclairer certains points du sol, il en est d'autres auxquels on envoie une quantité de lumière moindre.

5° Il faut, dans le cas d'une seule file de foyers, défendre au soumissionnaire de trop écarter leur emplacement de l'axe de l'espace à éclairer.

En effet, si la clause du minimum d'éclairement est appliquée sans restriction et laisse à l'entrepreneur le soin de placer les foyers aux endroits qu'il préfère, il peut être amené dans certains cas particuliers, afin de diminuer un peu la distance des foyers, à trop rapprocher l'un deux des limites du terrain à éclairer (voir fig. 12).

Cette disposition peut être très vicieuse au point de vue de la répartition de la lumière.

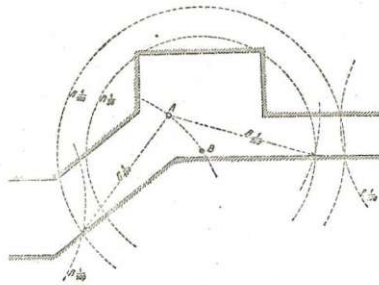


Fig. 12.

N. B. — Les emplacements A et B peuvent tous deux être admis au point de vue de l'observation de la clause de l'éclairement minimum. L'emplacement B, plus défavorable au point de vue du service, permet d'espacer davantage les foyers.

Les modifications que nous proposons dans l'application du principe de l'adjudication basée sur l'éclairement minimum auraient déjà pour effet de changer

la situation respective du gaz et de l'électricité. Ainsi, à Schaerbeck-sud, par exemple, le résultat eût été le suivant :

CONDITIONS.	GAZ.	ÉLECTRICITÉ.
Nombre des foyers	109	13
Intensité moyenne de chaque foyer	12 carrels	110 carrels
Hauteur des foyers	5 mètres	18 mètres
Rayon d'éclairement pour obtenir $\frac{1}{50}$ carcel	13 ^m 50	53 —
— — — $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{50}$ ou $\frac{1}{100}$	17 50	65 —
— — — $\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{50}$	20 20	—
— — — $\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{50}$ ou $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{100}$	22 30	79 —
Prix d'installation	64,500 francs	52,000 francs
Prix de la reprise à l'expiration de l'entreprise	19,400 —	21,900 —
Coût annuel d'exploitation	35,400 —	26,000 —

Il est permis de croire que 109 becs à gaz de 109 carrels ou 13 foyers électriques de 110 carrels produiraient un meilleur éclairage que les 37 becs à gaz actuels.

Le système, basé uniquement sur l'éclairement minimum, aurait donc moins d'inconvénients dans la plupart des cas de la pratique s'il était mieux appliqué.

Nous pensons cependant que pour le rendre rationnel et pour supprimer radicalement ces inconvénients, il est essentiel de stipuler un éclairage moyen à côté de l'éclairement minimum.

Il serait très difficile de calculer rigoureusement l'éclairement moyen total de chacun des projets présentés. Il faudrait, à cette fin, tracer pour chaque foyer

un cercle d'un rayon égal à la distance limite à laquelle l'éclairement qu'il produit devient insensible dans le projet le moins favorablement partagé. L'éclairement moyen serait représenté par une expression dont le numérateur serait l'intégrale des quantités de lumière reçues par la partie utile du terrain comprise à l'intérieur des cercles et dont le dénominateur serait l'aire de la gare.

Cette intégration serait extrêmement longue surtout avec des foyers d'intensité variable et un terrain de forme irrégulière. Elle serait d'une utilité d'autant plus douteuse que les résultats ne donneraient le plus souvent qu'une approximation assez grossière.

Il est tout à fait impossible de réussir par des observations sur le terrain, puisqu'il s'agit de comparer des projets avant leur exécution.

La mesure directe de l'éclairement est d'ailleurs une opération très difficile. Elle se fait d'ordinaire dans les laboratoires au moyen du photomètre de M. Mascart.

M. Preece a combiné pour des mesures sur le terrain un appareil formé d'une petite boîte, contenant une lampe à incandescence alimentée par un courant facile à régler. Cette boîte est fermée par un écran en papier portant une tache de stéarine. On fait varier le courant jusqu'à ce que la tache disparaisse et la mesure du courant devient celle de l'éclairement.

Cet appareil peut servir lorsqu'il s'agit d'un éclairement assez intense, mais il est tout à fait impuissant pour mesurer $\frac{1}{50}$ de carcelmètre, par exemple, qui est l'éclairement produit normalement par un carcel à sept mètres de distance. Un des expérimentateurs les plus habiles, M. le professeur Rousseau, de l'université de Bruxelles, qui a dirigé tous les travaux photométriques du comité de mesures de l'Exposition d'Anvers, nous a affirmé qu'il n'existe aucun appareil pouvant servir à évaluer exactement une aussi faible quantité de lumière.

Il serait peut-être possible de tourner la difficulté de la façon suivante :

L'éclairement moyen serait déterminé si l'on connaissait l'intégrale des quantités de lumière reçues en tous les points de la superficie à éclairer. Or, si en chaque point on élève une perpendiculaire égale à la valeur de l'éclairement en ce point ⁽¹⁾, le volume compris entre les extrémités des perpendiculaires et la surface horizontale du terrain sera précisément l'intégrale cherchée.

(¹) On suppose cet éclairement calculé en tenant compte des réflecteurs s'il y a lieu.

Pour connaître ce volume, il suffit de pouvoir déterminer sa surface supérieure, laquelle est nettement caractérisée au moyen de sa courbe d'intersection, par un plan vertical passant par deux foyers lumineux consécutifs. On peut en conclure que, pour déterminer l'éclairement moyen d'un terrain, il suffit de déterminer la courbe dont il s'agit ou bien la hauteur moyenne de cette courbe, car sa forme importe moins. Cette hauteur moyenne est d'ailleurs précisément l'éclairement moyen dans le plan vertical considéré. Il se calcule par une formule assez simple dont la forme générale est (voir fig. 43) :

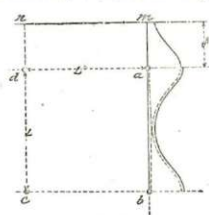


Fig. 17.

pour la partie ab

$$E_{ab} = \frac{2 \int_0^L \cos t \, dt}{L}$$

pour la partie am

$$E_{am} = \frac{\int_0^{\frac{\delta}{2}} \cos t \, dt}{\frac{\delta}{2}}$$

(on suppose que dans le plan am le foyer a agisse seul).

L étant l'écartement de 2 foyers (fig. 43), pour $i = I = \text{constante}$, on obtient

$$E_{ab} = \frac{2 I}{h \sqrt{L^2 + h^2}} \quad \text{et} \quad E_{am} = \frac{I}{h \sqrt{L^2 + \frac{\delta^2}{4}}}$$

pour i variant d'après la loi :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{0^\circ}^{40^\circ} = M (1.29 \sin^2 \theta + 0.17) \\ i_{40^\circ}^{50^\circ} = M \\ i_{50^\circ}^{90^\circ} = \frac{M}{1 - \sin 50^\circ} (1 - \sin \theta) \end{array} \right.$$

$$\text{on a } E_{ab} = \frac{M [\sin \theta_1 \cos \theta_1 (0.645 - \pi \frac{\theta_1}{180} (0.645) + \cos \theta_1 (0.17) - 3.0276]}{(0.5) L} \quad \text{et} \quad \text{tg } \theta_1 = \frac{h}{L}$$

$$E_{am} = \frac{M [\sin \theta_2 \cos \theta_2 (0.645) - \pi \frac{\theta_2}{180} (0.645) + \cos \theta_2 (0.17) - 3.0276]}{\frac{\delta}{2}} \quad \text{et} \quad \text{tg } \theta_2 = \frac{h}{\frac{\delta}{2}}$$

On voit que ces formules sont simples⁽¹⁾.

Ainsi donc, il suffirait d'ajouter dans les cahiers des charges une clause nouvelle ainsi conçue :

« L'éclairement moyen calculé soit dans un plan vertical passant par les foyers, soit dans un plan perpendiculaire, ne sera nulle part inférieur aux taux indiqués pour chaque grandeur de foyer. »

Si l'on croit que l'éclairement moyen imposé aux grands foyers soit de nature à empêcher les petits de concourir et que la surabondance de lumière produite par les premiers puisse être compensée, dans une certaine mesure, par la répartition plus égale de la lumière fournie par les seconds, la rédaction proposée permettra d'imposer des règles inégales à des foyers d'intensités différentes.

Nous pensons même qu'on pourrait alors établir cette règle simple, que l'éclairement moyen, calculé comme nous venons de le dire, ne peut être nulle part inférieur à l'éclairement minimum multiplié par le pouvoir éclairant du foyer.

Si l'on admettait cette formule, l'éclairement moyen minimum dans les plans verticaux indiqués serait, avec des foyers de 12 carcelles :

$$\text{de } \frac{1}{150} \times 12 = 0.24 \text{ carcelmètre,}$$

et avec des foyers de 110 carcelles :

$$\text{de } \frac{1}{150} \times 110 = 2.20 \text{ carcelmètre.}$$

Il va de soi que cette règle n'est donnée que sous toutes réserves et qu'il faudrait des déterminations nombreuses pour vérifier si elle est applicable dans des limites étendues.

Nous pensons que l'on peut baser rationnellement une entreprise d'établisse-

⁽¹⁾ On peut se demander s'il ne faut pas retrancher des intégrales dont il s'agit les quantités de lumière correspondant à l'éclairement surabondant, ainsi que l'a fait M. Wybauw dans des calculs analogues. Nous ne le pensons pas.

La question de l'éclairement surabondant a été inventée pour la première fois par M. Ernest Marché, dans un mémoire présenté en 1882 à la Société technique du gaz, et M. P. Clémenceau, en analysant ce mémoire dans la *Lumière électrique*, en 1884, a déjà démontré l'erreur de M. Marché.

Les parties surabondamment éclairées ne présentent en général que des avantages, puisqu'elles transforment les objets qu'elles rencontrent en véritables foyers secondaires rayonnant à leur tour de la lumière. Si réellement elles avaient des inconvénients au point de vue de l'inégale distribution de la lumière ou de l'éblouissement, il suffirait d'élever les foyers pour les faire disparaître. En tout cas, cela ne changerait rien à la défectuosité de l'éclairage si l'on se bornait à supprimer la surabondance de lumière dans l'intégrale de la quantité de lumière totale.

ment et d'exploitation d'éclairage sur la stipulation d'un éclairage minimum, à la condition d'imposer en même temps un éclairage moyen minimum.

Mais cela est-il à conseiller dans la pratique?

Tous les calculs que l'on est obligé de faire pour examiner si la base du contrat est réservée, sont fondés sur la connaissance de l'intensité de chaque foyer dans les différentes directions. Ils supposent que cette intensité ne varie jamais, l'Administration pouvant la vérifier à un moment quelconque.

Or, on sait combien les mesures photométriques sont incertaines et difficiles. Deux foyers du même système, sortant des mêmes ateliers de fabrication, et placés dans des conditions semblables en apparence, ne donnent pas les mêmes intensités. Il y a plus, les intensités d'un même foyer ne sont jamais identiques dans différents plans verticaux; pour des foyers à arc, elles varient beaucoup avec la nature des charbons, avec leur degré d'usure et surtout avec l'intensité du courant.

Enfin, pour vérifier qu'un foyer a l'intensité voulue, il faut le déplacer pour l'isoler et changer, par conséquent, les conditions où il se trouve. Et comme on ne peut chaque fois dresser la courbe complète des intensités dans un ou plusieurs plans verticaux, on se contente généralement de faire une mesure unique dans une ou deux directions déterminées.

A notre avis, au lieu de s'astreindre à des calculs laborieux ou à des mesures photométriques difficiles, il est préférable de ne prendre comme base d'un projet d'éclairage électrique que les données de la pratique basées sur la consommation des lampes en volts-ampères, celle-ci étant contrôlée à un moment quelconque au moyen d'appareils appropriés.

Il sera dès lors impossible à l'entrepreneur de ne pas maintenir les foyers à l'intensité stipulée.

Dans ce système, il est parfaitement possible d'appeler le gaz à la concurrence, ainsi que le fait aujourd'hui l'État belge. Il suffirait de demander aux gaziers, en même temps qu'aux électriciens, leurs prix par unité de consommation relativement au nombre d'heures d'éclairage garanti. L'Administration dresserait ensuite, sans l'intervention des entrepreneurs, les plans nécessaires pour comparer les divers foyers proposés sous le rapport de l'économie.

Il va de soi que les systèmes non connus de l'Administration devraient être préalablement soumis à des expériences, et que des mesures photométriques seraient imposées lors de la réception des appareils.