Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 28 (1937)

Heft: 6

Artikel: Le prix de revient du transport d'énergie électrique et la valeur du service de transit

Autor: Aeschimann, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059833

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXVIII. Jahrgang | N° 6 | Mittwoch, 17. März 1937

Le prix de revient du transport d'énergie électrique et la valeur du service de transit.

Par *Ch. Aeschimann*, Baden.

621.315.003

Après avoir rappelé que la valeur du transit d'énergie n'est pas une notion parfaitement déterminée, mais qu'elle peut au contraire être définie de plusieurs manières, suivant les circonstances, cette étude traite par des calculs simples différentes questions relatives au coût du transport d'énergie électrique. A la base de ces calculs figure une expression approchée du prix des lignes en fonction de la tension et de la section des conducteurs. Les formules obtenues montrent qu'à une puissance à transporter donnée (puissance nominale), correspond une tension économique déterminée et qu'à cette même tension correspond, par ailleurs, une autre puissance caractéristique, supérieure à la puissance nominale, la puissance économique, jusqu'à laquelle il est avantageux de surcharger la ligne, si l'occasion s'en présente. Ces résultats sont mis en évidence par un tableau d'exemples numériques et par des représentations graphiques qui fournissent en même temps le moyen de déterminer rapidement, pour des cas pratiques, le coût d'un transport d'énergie ou la valeur d'un service de transit.

Nach einem Hinweis auf die Tatsache, das der Wert des Energietransits im allgemeinen nicht eindeutig, sondern je nach den speziellen Verhältnissen auf verschiedene Weise bestimmt werden kann, wird in dieser Studie der Versuch gemacht, einige Fragen betreffend die Kosten der elektrischen Energieübertragung durch einfache Berechnungen zu lösen. Diese Berechnungen stützen sich auf einen angenäherten Ausdruck für den Preis der elektrischen Leitungen in Funktion der Betriebsspannung und des Leiterquerschnittes. Die auf diese Weise gefundenen Formeln zeigen, dass einer gegebenen Uebertragungsleistung (Nennleistung) eine bestimmte wirtschaftliche Spannung entspricht und dass anderseits dieser bestimmten Spannung eine andere charakteristische Leistung, die «Wirtschaftliche Leistung», entspricht, die immer grösser ist als die Nennleistung und bis zu welcher die Belastung vorteilhafterweise erhöht werden kann, wenn sich dafür Gelegenheit bietet. Diese Ergebnisse kommen noch klarer zum Ausdruck durch eine Tabelle mit Zahlenbeispielen und durch graphische Darstellungen, die zugleich ein Mittel sind, um in praktischen Fällen die Kosten einer Energieübertragung oder den Wert eines Energietransits rasch feststellen zu können.

I. Considérations générales.

Le calcul du prix de revient du tranport d'énergie électrique ne présente pas de difficulté particulière, mais il est pourtant difficile d'assigner une valeur déterminée au service que constitue la transmission d'une certaine puissance pour le compte d'un tiers, dans des conditions supposées pourtant parfaitement définies. On peut s'en rendre compte, du reste, en comparant entre eux quelques tarifs de transit d'énergie électrique. Les formules appliquées en Suisse, compte tenu des différences de distance, de puissance et de tension qui se présentent d'un cas à l'autre, fournissent des résultats souvent fort divergents et ne donnent pas l'impression de reposer sur un principe constant. En France, dans ce domaine, on se sert assez fréquemment de formules dont le caractère empirique apparaît avec évidence [1]). C'est qu'effectivement le problème dont il est question peut être envisagé de points de vue très différents et si, pour chacun de ceux-ci, la théorie fournit sans grande difficulté une solution précise, elle ne donne par contre aucun moyen de concilier les divers résultats ou de donner logiquement la préférence à l'un plutôt qu'à l'autre.

Pour fixer les idées, on peut imaginer le cas d'une entreprise A qui voudrait transmettre 1000 kW par la ligne existante d'une autre entreprise B, la tension et la section de cette ligne ayant été choisies de façon à permettre le transport le plus économique d'une puissance prévue de 10 000 kW.

Est-il équitable que A bénéficie pleinement du faible prix de revient unitaire qui résulte du fait que la ligne est construite pour une puissance 10 fois plus élevée que celle qu'il a à transmettre? Faut-il admettre, au contraire, que A doit payer à peu près ce que lui coûterait le transport de 1000 kW par une propre ligne construite spécialement à cet effet et qu'il jouit d'un avantage suffisant par le simple fait d'être dégagé du risque d'immobiliser lui-même des capitaux dans une telle installation?

Autrement dit, on se trouve comme dans beaucoup de problèmes économiques analogues devant l'alternative de fixer le tarif sur la base du prix de revient du producteur (ici l'entreprise qui assume le transport de l'énergie) ou sur la base de la valeur du service rendu au consommateur (auquel est assi-

[1]) Par exemple: pour les très hautes tensions, par km, $^1/_{1000}$ de la valeur de l'énergie prise au départ.

milée l'entreprise qui veut faire passer son énergie en transit).

On peut remarquer, en passant, que ce dilemne, s'il est difficile à trancher en principe, ne soulève bien souvent pas de difficultés pratiques, car, par le jeu de la concurrence entre les producteurs, la valeur du service rendu s'établit automatiquement au voisinage du prix de revient, compte tenu d'une marge de bénéfice raisonnable. Mais dans l'industrie de l'énergie électrique, la concurrence n'intervient pas toujours pour jouer ce rôle de régulateur. C'est le cas tout spécialement dans le problème qui nous intéresse, puisqu'en général le propriétaire d'une ligne électrique, auquel s'adresse une entreprise qui veut faire transporter de l'énergie entre deux points déterminés, jouit par la nature des choses d'une sorte de monopole de fait, sinon légal.

Au surplus, le prix de revient est ici une notion assez mal définie. Faut-il tenir compte du prix de revient moyen effectif de B, c'est-à-dire rapporté à la charge effective de sa ligne; s'agit-il du prix de revient théorique, c'est-à-dire rapporté à la puissance pour laquelle la ligne a été prévue; ou enfin, faut-il considérer un prix de revient qu'on pourrait appeler différentiel, tenant compte seulement de la dépense supplémentaire (accroissement des pertes, éventuellement renforcement de la ligne) provoquée par l'augmentation de charge envisagée?

Il vient d'être fait allusion aux pertes. Dans la dernière manière indiquée pour le calcul du prix de revient, il est clair qu'il faut mettre à la charge de A toute l'augmentation des pertes totales de la ligne. Par contre, si l'on adopte l'une des deux premières définitions du prix de revient qui viennent d'être mentionnées, on peut aussi admettre que A, qui rend service à B en contribuant à une meilleure utilisation de la ligne, c'est-à-dire en assumant une part correspondante des frais fixes, ne doit supporter des pertes totales qu'une part proportionnelle à la puissance transitée.

On pourrait imaginer encore d'autres manières de raisonner plus subtiles, mais ces considérations théoriques n'ont pas une très grande importance. Pratiquement, malgré l'absence de concurrence, ce sera encore, dans une certaine mesure, la loi de l'offre et de la demande qui déterminera les conditions auxquelles un accord pourra être conclu; c'est-à-dire que, selon que la nécessité est plus impérieuse pour A de transporter son énergie ou pour B de mieux utiliser sa ligne, le prix du transit s'établira plus ou moins haut.

II. Questions proposées.

On vient de voir rapidement qu'il n'est guère possible de trouver une expression générale de la valeur du service de transit, parce qu'il faut tenir compte dans chaque cas particulier d'un ensemble de conditions trop complexes pour tenir dans une formule.

Toutefois, on peut se proposer de calculer approximativement les prix de transit en faisant certaines hypothèses caractéristiques. Pour un cas concret, il sera possible de tirer parti des formules ainsi établies en choisissant l'un ou l'autre des résultats qu'elles fournissent ou une valeur intermédiaire, suivant les circonstances propres au cas donné.

D'après ce qui a été dit plus haut, on peut envisager entre autres les quatre cas suivants:

(A désigne l'entreprise qui a à faire transporter de l'énergie, B est l'entreprise qui assume le transit par une ligne qui lui appartient.)

1er cas: Le tarif de transit est établi sur la base de ce que coûterait à A le transport d'énergie, si une ligne devait être construite à ce seul effet.

2e cas: Le tarif de transit est établi sur la base du prix de revient unitaire du transport, calculé d'après la puissance pour laquelle B a prévu sa ligne.

3e cas: Le tarif de transit est établi sur la base du prix de revient unitaire du transport, calculé d'après la charge effective de la ligne de B après que ce dernier aura assumé le transit en question.

4e cas: Le tarif de transit ne tient compte que des frais supplémentaires occasionnés à B par le transit qu'il se charge d'effectuer.

Le premier cas fournit évidemment une limite supérieure du prix de transit et le quatrième cas, une valeur au-dessous de laquelle B n'a plus, en aucune circonstance, intérêt à l'affaire. Entre ces deux cas extrêmes prennent place deux autres possibilités:

B se place au point de vue d'un industriel qui a calculé une fois pour toutes son prix de revient; il a projeté sa ligne en vue d'une puissance déterminée et calculé le prix du transport par kVA correspondant. Que sa ligne soit moins chargée qu'il ne l'avait escompté tout d'abord ou que survienne, au contraire, l'occasion de l'utiliser d'une manière plus intense qu'il n'était prévu dans les calculs, il prend à son compte les risques et les chances et s'en tient au prix établi primitivement. C'est le second des cas énumérés plus haut.

Ou bien B considère en quelque sorte que A vient s'associer à lui en apportant le moyen d'exploiter la ligne d'une façon plus économique et avec cette manière de voir, il est normal que les deux associés profitent, chacun dans la mesure ou il participe à l'affaire, du prix moyen de transport ainsi réduit. C'est l'hypothèse à laquelle correspond le troisième cas.

Le 1er et le 2e cas se ramènent évidemment à la même question:

a) Etant donnée une certaine puissance moyenne à transporter, quel est le coût minimum de transport qui peut être obtenu, la section des conducteurs et la tension pouvant être choisies librement?

Dans le 3e et le 4e cas se pose la question suivante:

b) Pour une ligne donnée (section et tension déterminées) quel est le coût du transport d'une puissance donnée?

En outre, comme on le verra plus loin, on sera amené à résoudre une autre question:

c) Pour une ligne donnée, quelle est la charge optimum, c'est-à-dire la charge pour laquelle le coût du transport par unité de puissance est minimum et quel est ce coût minimum?

Toutes ces considérations peuvent paraître un peu élémentaires, mais il ne semblait pas inutile de les faire pour éviter toute confusion dans l'interprétation des calculs qui vont suivre.

III. Coût du transport d'énergie par une ligne donnée et pour une puissance donnée.

On commence ainsi par examiner tout d'abord la seconde des questions (b) formulées ci-dessus.

1° Prix d'établissement et coût annuel de la ligne.

En première approximation, on peut essayer de décomposer le prix d'établissement par km en trois termes:

un terme constant, représentant les dépenses pour l'établissement du projet, les indemnités pour l'acquisition de terrains et de forêts, les expropriations et les droits de passage, la préparation du tracé, le prix des poteaux, ou s'il s'agit de pylônes, une partie du prix de ceux-ci, une part des frais de montage;

un terme proportionnel à la tension, représentant le prix des isolateurs, des armatures et, pour les lignes à haute tension, le prix des traverses et une partie du prix des pylônes dont le poids dépend de la longueur des traverses;

un terme proportionnel à la section des conducteurs correspondant au prix des conducteurs et à celui de leur transport, à une partie des frais de montage et comprenant enfin, s'il s'agit d'une ligne sur pylônes, une dernière fraction du prix des pylônes.

Bien entendu, cette répartition des différents postes du devis d'une ligne est schématique. En réalité, l'influence réciproque des divers éléments est plus complexe, mais pratiquement cette décomposition en trois termes donne des résultats satisfaisants. En comparant quelques lignes du même type (par exemple, lignes sur poteaux de bois ou lignes à un circuit sur pylônes métalliques) de tension et de section différentes et de prix connu, on détermine très rapidement la valeur du terme constant, K_1, et des facteurs de proportionnalité des deux autres termes, K_2 et K_3.

On peut supposer tout d'abord, pour simplifier, que la puissance transmise est constante. On verra plus loin la manière de tenir compte d'une charge variable.

Soit:

P la puissance transmise, en kW,
U la tension au départ, en kV,
Q la section par phase, en mm²,
F le prix d'établissement de la ligne, par km,
α le coefficient exprimant le coût annuel de la ligne (surveillance, entretien, intérêts et amortissements), en % du prix d'établissement,
a le coût annuel de la ligne, par km et par kW.

$$F = K_1 + K_2 U + K_3 Q \tag{1}$$

$$a = \frac{\alpha}{100 \cdot P} (K_1 + K_2 U + K_3 Q) \tag{2}$$

2° Pertes et valeur de l'énergie perdue.

Sauf pour le cas de longues lignes à très haute tension, on ne commet en général pas d'erreur importante en admettant que le cos φ de la ligne est égal au facteur de puissance de la charge transmise. Autrement dit, pour autant que le cos φ n'est pas très différent de 0,8, ce qui est le plus souvent le cas, on admet qu'il est le même au départ qu'à l'arrivée de la ligne, ce qui permet d'exprimer les pertes par une formule simple.

P étant la puissance au départ, en kW,
ϱ la résistance spécifique,
p_v les pertes moyennes, par km, et par kW,
β la valeur par kW-an de l'énergie perdue,
b la valeur annuelle de l'énergie perdue, par km et par kW de puissance transmise.

$$p_v = \frac{\varrho \cdot P}{U^2 \cdot Q \cdot \cos^2 \varphi} \tag{3}$$

$$b = \frac{\varrho \cdot \beta \cdot P}{U^2 \cdot Q \cdot \cos^2 \varphi} \tag{4}$$

3° Coût annuel du transport d'énergie.

$x = a + b =$ coût annuel du transport, par km et par kW.

$$x = \frac{\alpha}{100} (K_1 + K_2 U + K_3 Q) \cdot \frac{1}{P} + \frac{\varrho \cdot \beta}{U^2 \cdot Q \cdot \cos^2 \varphi} \cdot P \tag{5}$$

IV. Coût minimum du transport pour une puissance donnée.

C'est la première (a) des trois questions formulées ci-dessus.

La puissance P, cos φ, les facteurs α et β sont constants et connus. U et Q sont les variables dont il faut chercher les valeurs qui rendent x minimum dans la formule générale (5).

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial U} &= 0 \\ \frac{\partial x}{\partial Q} &= 0 \end{aligned}\right\} \text{soit:} \left\{\begin{aligned} \frac{\alpha \cdot K_2}{100\,P} - \frac{2 \cdot \varrho \cdot \beta \cdot P}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{1}{Q\,U^3} &= 0 \\ \frac{\alpha \cdot K_3}{100\,P} - \frac{\varrho \cdot \beta \cdot P}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{1}{Q^2\,U^2} &= 0 \end{aligned}\right.$$

d'où

$$U = \sqrt[4]{400 \left\{ \frac{\varrho \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{K_3}{K_2^2} \right\}} \tag{6}$$

$$Q = \sqrt[4]{25 \left\{ \frac{\varrho \cdot \beta}{\alpha} \cdot \frac{P^2}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{K_2^2}{K_3^3} \right\}} \tag{7}$$

Les formules (6) et (7) donnent donc respectivement *la tension et la section les plus économiques pour le transport de la puissance donnée* et, ces caractéristiques une fois connues, la formule (5) permet de calculer le coût annuel cherché, par kW et par km.

On remarque, ce qui ne doit d'ailleurs par surprendre, que la longueur de la ligne n'entre pas dans la formule (6). Cela signifie que si l'on ne considère le problème de la transmission que sous

un aspect économique restreint, c'est-à-dire si l'on ne tient pas compte des raisons techniques qui obligent à limiter la chute de tension, ni des questions de stabilité, la longueur de la ligne n'a, en principe, pas d'influence sur le choix de la tension. Il vaut mieux dire aspect économique «restreint» car, en dernière analyse, ce qu'on appelle raisons techniques, n'est pas sans liens avec d'autres problèmes économiques (tels que le coût de l'équipement des stations).

V. Charge optimum d'une ligne donnée et coût correspondant du transport d'énergie.

On peut examiner maintenant la troisième question (c): Pour une ligne de caractéristiques données, quelle est la charge optimum, c'est-à-dire celle pour laquelle le coût du transport par unité de puissance a la valeur minimum?

Contrairement à ce qu'on pourrait penser en n'étudiant que superficiellement cette question, elle n'est pas résolue par les formules (6) et (7) qui viennent d'être établies.

Tout d'abord, il se peut que pour des raisons pratiques la section et la tension de la ligne donnée ne se trouvent pas dans le rapport prescrit théoriquement par l'ensemble des deux formules. Si on effectue le calcul, on trouve que ce rapport devrait être, en principe:

$$\frac{Q}{U} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_2}{K_3} \qquad (8)$$

Il est évident que pour le cas où la section et la tension sont arbitrairement choisies, il y a lieu de chercher une nouvelle formule qui donnera la charge la plus économique correspondante.

Mais, ce qui est moins évident, c'est que même si Q et U sont dans le rapport (8), la charge la plus économique n'a pas la valeur de P qu'on pourrait tirer en fonction de U ou de Q de l'une des formules (6) et (7). Autrement dit, à une puissance donnée correspondent une section et une tension bien déterminées mais, comme on va le voir, la puissance donnée n'est pas la charge la plus favorable pour cette section et cette tension.

On suppose que les facteurs α, β, $\cos\varphi$ sont constants et connus de même que U et Q, qui peuvent être donnés indifféremment, soit dans un rapport arbitraire, soit dans le rapport fixé par la formule (8). La puissance P est supposée variable. On cherche la valeur P_e pour laquelle x est minimum dans la relation générale de la formule (5)

$$\frac{dx}{dP} = 0$$

ou

$$\frac{\varrho \cdot \beta}{U^2 \cdot Q \cdot \cos^2\varphi} - \frac{\alpha\,(K_1 + K_2 U + K_3 Q)}{100\ P^2} = 0$$

$$P_e = \frac{1}{10} \cdot U \cdot \cos\varphi \sqrt{\frac{\alpha}{\varrho \cdot \beta} \cdot Q\,(K_1 + K_2 U + K_3 Q)} \qquad (9)$$

C'est pour la ligne de section Q et de tension U données, la puissance la plus économique cherchée.

Si l'on admet maintenant que Q et U ont été choisis non pas arbitrairement mais à partir des formules (6) et (7), comme section et comme tension les plus économiques pour le transport d'une certaine puissance P, on peut calculer, d'après les formules (6), (7) et (9), le rapport $P_e : P$. On obtient

$$\frac{P_e}{P} = \sqrt{\frac{2}{U} \cdot \frac{K_1}{K_2} + 3}$$

Ce rapport est évidemment toujours supérieur à 1.

On verra plus clairement la signification de ce résultat très caractéristique en considérant plus loin quelques exemples numériques.

VI. Cas d'une charge variable.

Il a été admis jusqu'ici que la puissance transmise était constante, ce qui pratiquement n'est pas souvent le cas. Si la charge est variable, il faut introduire dans les calculs ci-dessus soit la puissance maximum, soit la puissance moyenne. Comme le prix de l'énergie, quand il est exprimé par kW, se rapporte généralement à la puissance maximum, il paraît indiqué de faire intervenir également la puissance maximum dans les calculs effectués ici. Par puissance maximum on entend naturellement la plus forte puissance moyenne enregistrée pendant une certaine durée (¼ d'heure ou 1 heure, par exemple), afin de ne pas faire rentrer sous cette définition des surcharges accidentelles et passagères.

La valeur de l'énergie électrique, par kW de puisance maximum, dépend naturellement de la «durée d'utilisation annuelle» de cette puissance (quotient de la quantité annuelle d'énergie par la dite puissance).

Or, si la puissance transmise est variable, la durée d'utilisation de la puissance maximum perdue est inférieure à la durée d'utilisation de la puissance maximum transmise, du fait que la puissance perdue est proportionnelle non pas à la puissance transmise mais au carré de celle-ci.

Si P est la puissance variable transmise,
P_{max} la puissance maximum transmise,
t le temps,
$T_{P_{max}}$ la durée d'utilisation de la puissance maximum transmise,
$T_{P_v max}$ la durée d'utilisation de la puissance maximum perdue,

$$\frac{T_{P_v max}}{T_{P_{max}}} = \frac{\int P^2\,dt}{P_{max} \int P\,dt} < 1.$$

Toutefois, s'il s'agit d'énergie d'origine hydraulique, la durée d'utilisation ne joue pas un rôle très important dans le prix du kW-an, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de faire un calcul très précis mais qu'il suffit de considérer que *la valeur des*

pertes, exprimée par kW-an est un peu plus faible que celle de l'énergie transmise.

D'autre part, si la charge est variable, le facteur de puissance ne sera généralement pas constant. *Le cos φ à introduire dans les formules précédentes est, en principe, celui qui correspond à la puissance maximum transmise.*

Compte tenu de ces deux remarques au sujet des facteurs β et cos φ, les formules (1) à (10), développées dans l'hypothèse d'une charge constante s'appliquent sans changement au cas d'une puissance transmise variable.

VII. Applications.

Etant donné qu'il ne s'agit pas d'un calcul rigoureusement précis, on peut remplacer un certain nombre de facteurs par des valeurs numériques approximatives et obtenir des résultats encore assez généraux. On peut admettre par exemple:

$a = 10\ \%$

$\beta = 80$ frs/kW-an (énergie hydro-électrique de 6000 h; durée d'utilisation de la puissance max. perdue: 4500 h)

cos $\varphi = 0{,}85$.

En ce qui concerne β, il vaut mieux prendre une valeur plutôt faible, non seulement pour tenir compte de la remarque du paragraphe précédent au sujet de la durée d'utilisation de la puissance perdue, mais parce que dans des calculs de ce genre, il est prudent, en principe, de ne pas estimer les pertes à un prix trop élevé.

Quant aux coefficients K_1, K_2 et K_3 qui donnent le prix d'établissement de la ligne, on considérera trois types de lignes intéressants:

I. Lignes à moyenne tension, de 5 à 50 kV, sur poteaux de bois, 3 fils.
II. Lignes à haute tension sur pylônes, de 45 à 150 kV, 3 conducteurs.
III. Lignes à haute tension sur pylônes, de 45 à 150 kV, 6 conducteurs.

Il est naturellement plus difficile d'exprimer un prix normal pour les lignes sur pylônes que pour les lignes sur poteaux. Aussi les résultats indiquées ci-après pour les hautes tensions ne figurent qu'à titre d'exemple, pour des conditions moyennes, dont certains cas pratiques peuvent s'écarter notablement. En outre, pour les très hautes tensions l'effet corona, dont il n'a pas été tenu compte, devrait être pris en considération.

Formules relatives au transport d'énergie électriques dans les hypothèses suivantes:
Suisse — 1936, avant la dévaluation — lignes de cuivre — cos φ 0,85 — coût annuel de la ligne: 10 % du prix d'établissement — valeur de l'énergie perdue: 80 frs./kW-an.

Tableau I.

	Lignes sur poteaux 5 ... 50 kV	Lignes sur pylônes 45 ... 150 kV; 1 terne	Lignes sur pylône 45 ... 150 kV; 2 ternes
a) Coût minimum du transport d'une puissance donnée:			
Puissance, en kW	P	P	P
Tension, en kV	$U = 0{,}64\sqrt{P}$	$U = 0{,}72\sqrt{P}$	$U = 0{,}64\sqrt{P}$
Section totale, p. phase, en mm²	$Q = 2\,U = 1{,}3\sqrt{P}$	$Q = 1{,}25\,U = 0{,}9\sqrt{P}$	$Q = 1{,}6\,U = \sqrt{P}$
Prix d'établissement, en frs./km	$F = 6000 + 115\sqrt{P}$	$F = 12\,000 + 130\sqrt{P}$	$F = 12\,000 + 140\sqrt{P}$
Pertes, en % par km	$p_v = \frac{4{,}7}{\sqrt{P}}$	$p_v = \frac{5{,}4}{\sqrt{P}}$	$p_v = \frac{6{,}1}{\sqrt{P}}$
Coût annuel du transport, frs./km · kW	$x = \frac{600 + 15{,}3\sqrt{P}}{P}$	$x = \frac{1200 + 17{,}3\sqrt{P}}{P}$	$x = \frac{1200 + 19\sqrt{P}}{P}$
b) Coût du transport par une ligne donnée, pour une puissance donnée:			
Tension, en kV	U	U	U
Section totale, p. phase, en mm²	Q	Q	Q
Prix d'établissement, en frs./km	$F = 6000 + 120\,U + 30\,Q$	$F = 12\,000 + 120\,U + 48\,Q$	$F = 12\,000 + 145\,U + 45\,Q$
Puissance donnée, en kW	P		
Pertes en % par km	$p_v = \frac{2{,}5\,P}{U^2\,Q}$		
Coût annuel du transport, frs./km · kW	$x = \frac{F}{10\,P} + \frac{2\,P}{U^2\,Q}$		
c) Coût minimum du transport par une ligne donnée:			
Tension, section données, prix d'établissement	$U,\ Q,\ F$		
Puissance optimum, en kW	$P_e = 0{,}225\,U\sqrt{F \cdot Q}$		
Pertes, en % par km	$p_{v_e} = \frac{0{,}56}{U}\sqrt{\frac{F}{Q}}$		
Coût annuel du transport, frs./km · kW	$x_e = \frac{0{,}9}{U}\sqrt{\frac{F}{Q}}$		

Pour les lignes à moyenne tension, les résultats trouvés sont valables avec une approximation satisfaisante pour le plus grand nombre des cas pratiques.

Pour ne pas multiplier les exemples, on se limitera ici aux lignes de cuivre; il est facile de refaire les calculs pour l'aluminium ou l'aldrey.

Sur la base des prix en vigueur en Suisse pendant le 1er semestre de 1936, donc avant la dévaluation, (soit en particulier 75 cts/kg pour les tresses de cuivre, 55 cts/kg pour le fer usiné et zingué) on peut admettre les chiffres suivants [2]):

Coefficient	Lignes sur poteaux	Lignes sur pylônes	
		1 terne	2 ternes
K_1	6 000	12 000	12 000
K_2	120	120	145
K_3	30	48	45

[2]) Il s'agit de lignes soigneusement exécutées, avec un tracé de difficulté moyenne, pour la Suisse. Dans les conditions favorables et avec une exécution plus sommaire, on peut arriver à des prix notablement plus réduits.

La forte augmentation de K_3 au passage des lignes sur poteaux aux lignes sur pylônes provient du fait que pour les fortes sections des lignes à haute tension, le poids du cuivre renchérit le montage et surtout entre en ligne de compte dans le poids des pylônes.

Enfin, puisqu'il s'agit de lignes de cuivre,

$$\varrho = 0{,}018.$$

En introduisant ces valeurs numériques dans les expressions (1) à (10), on obtient pour chaque type de ligne les séries de formules plus simples du tableau I. L'application de ces dernières à quelques cas typiques donnent les résultats du tableau II.

VIII. Représentations graphiques et conclusions.

Il est plus facile de tirer quelques conclusions pratiques des formules du tableau I et des exemples du tableau II que des formules tout à fait générales établies au début de cette étude.

Transport d'énergie. Applications numériques.

(Valables dans les hypothèses suivantes: Suisse — 1936, avant la dévaluation — lignes de cuivre — cos φ 0,85 — coût annuel de la ligne: 10 % du prix d'établissement — valeur de l'énergie perdue: 80 frs./kW-an.)

a) Transport d'une puissance donnée [1]). *Calcul de la tension et de la section les plus économiques et coût correspondant du transport, par km et par unité de puissance.*

Tableau IIa.

	Lignes sur poteaux 5—50 kV					Lignes sur pylônes 50 – 150 kV; 1 terne				Lignes sur pylônes 50–150 kV; 2 ternes		
Puissance donnée P . . . . kW	200	500	1 000	2 500	5 000	5 000	10 000	25 000	45 000	5 000	30 000	55 000
Tension (départ) U . . . . kV	9	15	20	32	45	50	72	115	150	45	110	150
Section d'un conducteur Q mm²	20	28	35,5	70	85	63	85	150	200	38,5	85	120
Prix d'établissement F . frs./km	7 600	8 700	9 600	11 800	14 000	21 000	25 000	32 000	39 000	22 000	36 000	45 000
Pertes, p_v . . . . . % par km	0,3	0,2	0,15	0,1	0,07	0,075	0,052	0,033	0,025	0,085	0,035	0,025
Coût du transport:												
ligne a . . . frs./an·km·kW	3,85	1,63	1,00	0,48	0,29	0,44	0,25	0,13	0,09	0,45	0,12	0,08
pertes b . . . „ „ „	0,35	0,17	0,12	0,08	0,06	0.06	0,04	0,03	0,02	0,07	0,03	0,02
total x . . . . „ „ „	4,20	1,80	1,12	0,56	0,35	0,50	0,29	0,16	0,11	0,52	0,15	0,10

[1]) ou puissance nominale; voir à propos de ce terme la remarque paragraphe VIII.

b) et *c) Transport par une ligne donnée. Calcul du prix d'établissement et de la puissance transmissible optimum* [2]) *et coût correspondant du transport par km et par unité de puissance.*

Tableau IIb.

	Lignes sur poteaux 5—50 kV					Lignes sur pylones 50—150 kV; 1 terne				Lignes sur pylônes 50—159 kV; 2 ternes		
Tension donnée U . . . . kV	9	15	20	32	50	50	80	110	150	50	110	150
Section donnée d'un conducteur Q . . . . . mm²	28	28—38	28—38	50—70	70—95	50—70	85	120—150	150—200	50—70	95-120	120—150
Prix d'établissem. F 1000 frs./km	7,9	8,6-8,9	9,2-9,5	11,3—11,9	14,1—14,8	20,4 - 21,4	25,7	31,0—32,4	37,2—39.6	23,7—25,5	36,5—38,7	44,5—47,2
Puissance optimum P_e . . MW	1,0	1,7-2,0	2,3-2,7	5,4-6,6	11,2—13,3	11,5—14,0	26,5	47,5—55	80—95	17,5—21,5	65—76	111—128
Pertes p_{vc} . . . . . % par km	1,05	0,65—0,57	0,51—0,44	0,26—0,23	0,16—0,14	0,23—0,20	0,12	0,08—0,075	0,06—0,05	0,17—0,15	0,07—0,065	0,05—0,05
Coût du transport [3]) x frs/an·km·kW	1,70	1,05—0,92	0,82—0,71	0,42—0,37	0,26—0,22	0,37—0,32	0,20	0,13—0,12	0,095—0,085	0,28—0,25	0,115—0,105	0,08—0,075

[1]) ou puissance économique; voir remarque paragraphe VIII.
[3]) dont une moitié pour la ligne, une moitié pour les pertes.

Dans les hypothèses formulées au paragraphe VII, l'expression générale du coût du transport d'énergie est, comme on l'a vu, au tableau I

$$x = \frac{F}{10} \cdot \frac{1}{P} + \frac{2}{U^2 Q} \cdot P.$$

On peut représenter graphiquement x en fonction de P, en donnant à U et à Q des valeurs déterminées. La fig. 1, par exemple, se rapporte à

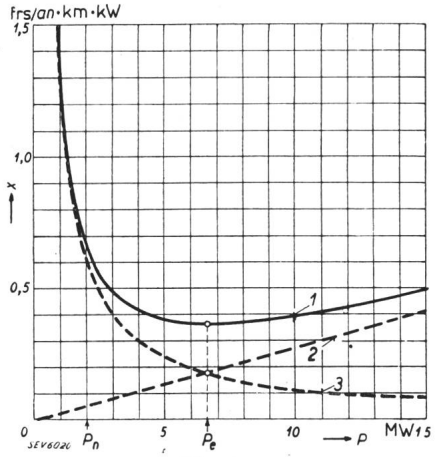

Fig. 1.

Coût unitaire x du transport d'énergie, par une ligne à 32 kV, 3×70 mm², en fonction de la puissance maximum au départ P.
1 Coût total du transport $x = a + b$.
2 Coût des pertes b.
3 Coût annuel de la ligne a.
P_n puissance nominale.
P_e puissance économique.

une tension de 32 kV, 3 conducteurs de 70 mm². En donnant successivement à U et à Q différentes valeurs constantes quelconques, on obtient une famille de courbes, chaque courbe correspondant à une valeur bien déterminé de U et de Q. Dans la fig. 2 sont tracées quelques courbes pour le cas des lignes à 3 conducteurs, sur poteaux.

Cette figure montre que, pour une puissance donnée, par exemple 2000 kW, c'est, parmi les courbes tracées, celle qui correspond à une tension de 32 kV et à une section de 70 mm² qui donne le prix unitaire le plus bas, soit 65 cts/an-km-kW. Mais cette courbe montre encore que, pour la même tension de 32 kV, il est possible d'abaisser encore ce prix unitaire jusqu'à près de 35 cts, en augmentant progressivement la charge jusqu'à une puissance de 6600 kW. Au-delà de cette valeur, les pertes prennent une part prépondérante dans le coût du transport qui, pour cette raison, commence à croître (fig. 1). Toutefois, s'il est avantageux de surcharger la ligne de 2000 à 6600 kW, on voit d'après la fig. 2 qu'à partir d'une puissance de 4000 kW, s'il ne s'agit pas d'une surcharge temporaire et si les conditions techniques le permettent, il serait encore plus avantageux, en principe, de transformer la ligne pour une tension de 50 kV, avec 3 conducteurs de 95 mm² par exemple.

On peut donc conclure que, pour une puissance donnée à transmettre, il faut construire une ligne de tension plutôt élevée et d'assez forte section. Elle ne coûte pas beaucoup plus cher qu'une ligne plus faible et, en échange, les pertes sont très réduites. Mais cette ligne une fois établie, il est avantageux de la charger bien davantage si l'occasion s'en présente, malgré l'augmentation de pertes qui en résulte.

Au sujet des termes employés, on remarquera que l'expression courante de «puissance économique» n'a pas été utilisée jusqu'ici dans cette étude. Il s'agissait, en effet, d'éviter toute confusion. Avant d'avoir vu ce qui vient d'être exposé, on pourrait être enclin à penser que la puissance économique d'une ligne est celle sur laquelle on se base pour choisir la section et, si on en a la liberté, la tension. Cette dernière puissance, qu'il n'a pas été nécessaire de désigner autrement dans ce qui précède que par les termes de «puissance donnée» et qui est donc la puissance initialement prévue, pourrait s'appeler, si l'on veux, *puissance nominale*. A cette puissance nominale correspond une tension optimum ou «*tension économique*», ainsi qu'une «*section économique*». Mais à cette même tension et à cette même section correspond d'autre part une autre puissance appelée jusqu'ici «puissance optimum» à laquelle doit s'appliquer, semble-t-il l'expression de *puissance économique*[3]).

En résumé et pour ne parler que de la tension (la section étant en principe proportionnelle à cette dernière), *à une tension donnée correspondent deux puissances caractéristiques: la puissance nominale, pour laquelle la tension donnée est la tension la plus économique et la puissance économique qui est la charge la plus économique pour la ten-*

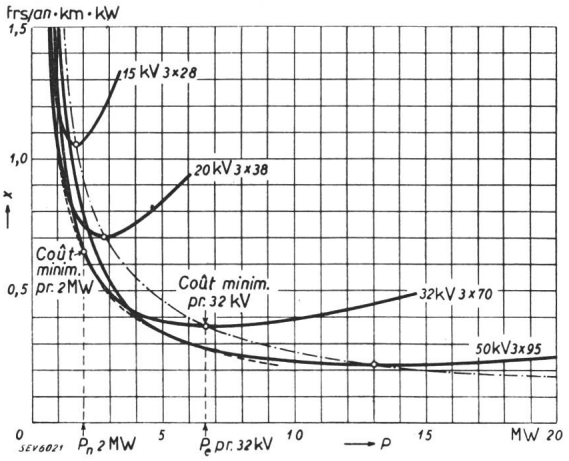

Fig. 2.

Coût unitaire x du transport d'énergie, compte tenu des pertes, en fonction de la puissance maximum P transmise au départ.
P_n puissance nominale (2 MW).
P_e puissance économique pour 32 kV (6,6 MW).

sion donnée. La puissance économique est toujours supérieure à la puissance nominale (voir formule 10).

Aux deux puissances caractéristiques mentionnées correspondent naturellement deux valeurs

[3]) Les termes proposés ici ne sont que de simples suggestions, faites dans l'ignorance de désignations courantes plus précises, s'il en existe déjà.

caractéristiques du coût du transport d'énergie: La première, *le coût minimum du transport d'une puissance donnée* (coût du transport de la puissance nominale) serait représenté dans la fig. 2 par l'enveloppe des différentes courbes; la seconde, *le coût minimum du transport pour une tension donnée* (ou coût du transport pour la puissance économique) est représenté dans la fig. 2 par la ligne joignant les minima des différentes courbes.

On peut naturellement représenter aussi ces deux grandeurs, le coût du transport de la puissance nominale et le coût du transport de la puissance économique en fonction de la tension de la ligne (fig. 3).

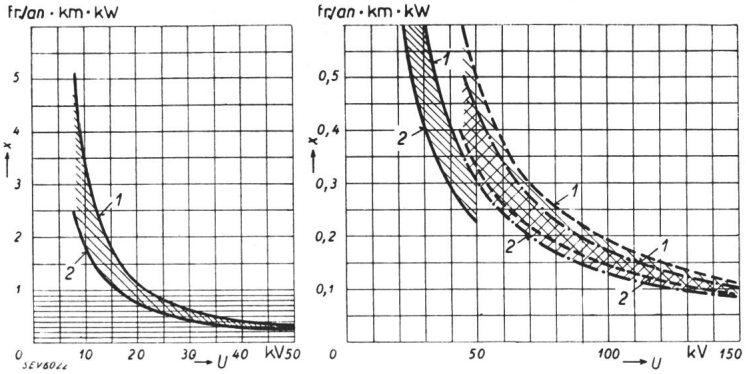

Fig. 3.
Coût unitaire x du transport d'énergie pour la puissance nominale (courbes *1*) et pour la puissance économique (courbes *2*), en fonction de la tension au départ U.

a Ligne sur poteaux.

b Ligne sur poteaux. Ligne sur pylônes, 1 terne. Ligne sur pylônes, 2 ternes.

La courbe du coût du transport de la puissance nominale a pour équation (d'après les formules 5, 6 et 7 et toujours dans les hypothèses énoncées au § VII):

	Ligne sur poteaux:	Lignes sur pylônes: 1 terne	Lignes sur pylônes: 2 ternes
$x =$	$\frac{250 + 10\,U}{U^2}$	$\frac{625 + 12{,}5\,U}{U^2}$	$\frac{500 + 12\,U}{U^2}$

La courbe du coût du transport de la puissance économique a pour équation (d'après les formules 5, 8 et 9):

	Ligne sur poteaux:	Lignes sur pylônes: 1 terne	Lignes sur pylônes: 2 ternes
$x_e =$	$\sqrt{\frac{2400+72\,U}{U^3}}$	$\sqrt{\frac{7800+117\,U}{U^3}}$	$\sqrt{\frac{6100+110\,U}{U^3}}$

La première série de formules ou la courbe supérieure de la fig. 3 serviront de base au tarif de transit dans le second des cas du § II (tarif de transit établi sur la base du prix de revient unitaire, calculé d'après la puissance initialement prévue, c'est-à-dire d'après la puissance nominale). La deuxième série de formules et la courbe inférieure indiquent les valeurs les plus basses auxquelles on peut être conduit en se plaçant au point de vue qui constitue le troisième cas (tarif de transit établi sur la base du prix de revient unitaire, calculé d'après la charge effective de la ligne, compte tenu du transit en question). D'après ce qui a été dit au sujet de ces différents cas, on peut admettre que, sauf circonstances particulières, le prix du transit, pertes incluses, doit être compris d'une manière générale entre les deux limites exprimées par les formules ci-dessus et représentées par les 2 courbes de la fig. 3.

Ces résultats répondent à une question que nous nous étions posée en abordant cette étude: *Le coût du transport d'énergie n'est-il pas essentiellement fonction de la tension? On voit que, théoriquement, il est exclusivement fonction de la tension.*

S'il a été facile de résoudre un problème dont il a été dit au début qu'il était fort complexe, c'est grâce à certaines hypothèses que ne sont peut-être pas satisfaites dans tous les cas et grâce à certaines approximations dont il a fallu se contenter pour simplifier les calculs. Il a aussi été admis que la tension pouvait être choisie librement, c'est-à-dire qu'il n'a pas été tenu compte du coût des stations de transformateurs, qui pourrait d'ailleurs être pris en considération avec des formules tout à fait analogues.

D'autre part, le problème de la fréquence n'a pas été considéré. Suivant les conditions d'exploitation des deux entreprises, celle qui produit l'énergie transitée et celle qui effectue le transit par une ligne qu'elle utilise déjà pour son propre compte, il peut se présenter des difficultés importantes au sujet de la fréquence. Il n'y aura peut-être pas d'inconvénient pour l'une des deux entreprises à effectuer un service séparé sur la ligne en question; dans ce cas, le problème du synchronisme des deux charges ne soulève pas de difficulté. Mais il peut arriver aussi que la liaison des fréquences représente pour l'un ou l'autre des intéressés une sujétion qui, suivant le cas, réduira considérablement la valeur du service rendu ou augmentera le prix de revient du transport pour l'entreprise qui assume le transit. Les conditions de service pourront être même, dans certains cas, absolument incompatibles et il sera nécessaire d'établir sur la ligne deux circuits distincts. Il s'agit ici de circonstances particulières qui ne peuvent guère être prises en considération dans une étude générale et dont l'influence ne se laisse pas facilement exprimer par des formules précises. Ce point important devait cependant être signalé; il devra être examiné dans chaque cas d'espèce.

Enfin, il n'a été fait qu'une allusion aux raisons techniques qui fixent une limite à la chute de tension et font entrer dans certains cas la longueur de la ligne dans les calculs, bien qu'au point de vue purement économique, il n'y a pas à en tenir compte.

Malgré le caractère un peu sommaire de la méthode employée, nous avons constaté une très bonne concordance entre les résultats trouvés et les prix effectivement appliqués dans le cas de transit que nous connaissons. Il semble donc que ces résultats peuvent être utilisés dans des études générales d'économie électrique ou pour des avant-projets de transport d'énergie, aussi longtemps que manquent les éléments nécessaires à un calcul tout à fait précis.

En dehors de cet intérêt pratique, l'étude du coût du transport de l'énergie électrique est instructive en elle-même, parce qu'elle illustre bien des considérations d'une portée beaucoup plus générale. Il est clair qu'un problème analogue se présente dans la technique chaque fois qu'on étudie les relations réciproques qui existent, dans le cas d'une installation ou d'une machine, entre le prix d'établissement, la charge et le rendement. Le prix d'établissement peut presque toujours être décomposé en un certain nombre de termes, chacun fonction d'une variable et peut s'exprimer par une formule semblable à celle qui a été adoptée ici pour le prix d'une ligne électrique [formule (1)]. En général, les pertes dépendent aussi de ces variables. En appliquant le même procédé, on doit donc arriver le plus souvent à des formules et à des courbes qui ont sensiblement la même allure que pour le cas du transport d'énergie.

L'oscillographe à cathode incandescente des Câbleries de Cossonay.

Par *E. Foretay*, Cossonay-Gare.

621.317.755

Après une brève description du tube employé et de ses accessoires, l'auteur décrit les diviseurs de tension et de courant utilisés, ainsi que le tableau des lignes permettant d'observer rapidement les courbes de courant et de tension dans divers circuits du laboratoire. Il donne ensuite quelques indications sur les appareils d'enregistrement utilisés avec des exemples d'oscillogrammes montrant les résultats obtenus.

Nach einer kurzen Beschreibung der verwendeten Glühkathodenröhre und der Zubehör wird der Spannungs- und Stromteiler erklärt, ferner die Verteiltafel für die Leitungen, welche erlaubt, Strom und Spannung verschiedener Stromkreise des Laboratoriums rasch zu beobachten. Ferner werden Angaben gemacht über die Registrierapparate, die in dieser Oszillographenanlage verwendet werden. Zum Schluss wird anhand von einigen Oszillogramm-Beispielen auf die Nützlichkeit der Apparatur hingewiesen.

Introduction.

Notre laboratoire d'essais à haute tension est pourvu d'un oscillographe à cathode incandescente.[1]) L'article qui suit, sans entrer dans des considérations théoriques considérées comme connues, donne quelques renseignements pratiques sur cet appareil.

Oscillographe.

L'oscillographe à cathode incandescente est dérivé du tube de Braun (1897). Il comprend (Fig. 1): une cathode C chauffée par du courant continu ou alternatif, une anode A reliée à une source de courant continu de quelques centaines à quelques milliers de volts, un cylindre W entourant la cathode, dit cylindre de Wehnelt, un écran fluorescent E et deux paires de plaques déviatrices P_1 P_2 perpendiculaires entre elles.

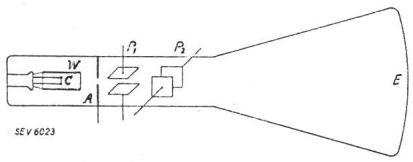

Fig. 1. Principe de l'oscillographe.

La cathode incandescente émet un faisceau rectiligne d'électrons d'autant plus intense que la tension entre anode et cathode est plus élevée. Le tube est rempli d'un gaz inerte sous une pression d'environ 5 millièmes de millimètre de mercure. L'effet combiné de l'ionisation des molécules du gaz et d'une tension négative auxiliaire appliquée au cylindre de Wehnelt produit une concentration du faisceau cathodique qui vient frapper l'écran fluorescent en formant un point lumineux de petit diamètre dont la netteté se règle à volonté en faisant varier la tension négative du cylindre. Le faisceau étant formé de particules chargées d'électricité négative sera dévié par un champ électrique. C'est ce qu'on obtient en appliquant à l'une des paires de plaques, P_1 par exemple, une différence de potentiel. S'il s'agit de courant continu, le point lumineux, qui était tout d'abord au centre de l'écran, se déplacera latéralement dans une direction à angle droit avec le plan des plaques, cette déviation étant proportionnelle à la tension appliquée et inversément proportionnelle à la tension anodique. Si l'on a du courant alternatif, le point lumineux décrit sur l'écran une droite perpendiculaire au plan des plaques. En appliquant à une des paires de plaques une tension qui varie en forme de dents de scie en fonction du temps (voir fig. 12) et à l'autre la tension alternative à observer, la combinaison des deux déplacements perpendiculaires donnera la courbe de la tension en fonction du temps.

Le faisceau cathodique étant formé de particules électrisées en mouvement constitue un courant électrique qui sera dévié par un champ magnétique. En particulier, on pourra obtenir la courbe d'un courant alternatif en le faisant passer dans deux solénoïdes placés de part et d'autre du tube au droit des plaques déviatrices, leur axe étant perpendiculaire à celui du tube. Le faisceau cathodique sera dévié perpendiculairement à l'axe des solénoïdes. La masse des particules constituant le

[1]) Voir description au Bull. ASE 1936, No. 3, p. 74.