

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 13 (1922)  
**Heft:** 2

**Rubrik:** Assemblée de discussion de l'A.S.E. : le lundi 26 septembre 1921, à Zurich

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 25.12.2024

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

7. Dass in den Vorschriften über elektrische Bahnen wie von der Subkommission für elektrische Bahnen verlangt wurde, ein Abschnitt „Bahnkraftwerke und Unterstationen“ eingefügt werde, scheint mir nicht ganz richtig. Verschiedenheiten zwischen industriellen Kraftwerken und Bahnkraftwerken können sich höchstens in der Schaltanlage ergeben. Aus diesem Grunde habe ich einen Absatz „Schaltanlage“ vorgehen und ihn eingereiht wie im ersten Satz unter 4. begründet.

8. Die Unterteilung des Absatzes „Leitungsanlagen“ in den Vorschriften über elektrische Bahnen wurde durch die Einfügung eines Absatzes „Schaltanlagen“ überflüssig.

9. Die neue Unterteilung des Absatzes „Rollmaterial“ der Vorschriften über elektrische Bahnen entspricht lediglich einer genaueren Bezeichnung des Inhaltes der Vorschriften als bei der alten Fassung.

10. Der Absatz „Betriebsvorschriften“ der Vorschriften über elektrische Bahnen wurde fallen gelassen, da die betreffenden zwei Artikel, wenn sie wirklich nötig sind, unter „Allgemeines“ genommen werden können.

Der Vorschlag die einzelnen Artikel der verschiedenen Absätze nach der Regel Erstellung — Betrieb — Instandhaltung, einzuordnen, soll in den neuen Vorschriften einfach eine raschere Orientierung ermöglichen.

---

### Assemblée de discussion de l'A. S. E.

le lundi 26 septembre 1921, à Zurich.

---

*La conférence internationale* qui doit avoir lieu cet automne, à Paris, à une date encore indéterminée, en vue de discuter les questions qui ont trait à la „*construction et à l'exploitation des grandes lignes à haute tension*“ va certainement se trouver devant une tâche immense. Les sujets qui constituent le programme de ses travaux sont, en effet, aussi nombreux que vastes. *Nombreux*, parce que quel que soit le „bout“ par lequel on prenne le problème des distributions à très hauts potentiels, quel que soit l'angle sous lequel on les considère, on ne tarde pas à s'apercevoir que dans ce domaine plus que dans aucun autre, toutes choses sont liées et que l'on ne saurait envisager et chercher à solutionner l'une sans avoir envisagé et sans se souvenir de toutes les autres. *Vastes*, parce que, comme c'est toujours le cas en matière technique, tous les problèmes présentent de nombreuses faces et une foule de particularités qui appellent autant de solutions et qui font qu'aucun d'eux ne peut être traité et résolu aussi simplement et élégamment que lorsque l'on se meut dans le domaine de l'abstraction. C'est donc dire — et j'espère qu'il n'y a aucune irrévérence à le faire — qu'il ne faut pas s'attendre à voir sortir de cette première conférence une sorte de code des Règles à observer en matière de construction et d'exploitation des réseaux à très haute tension. Il faudra déjà être très heureux et en être reconnaissant envers les organisateurs de ces assises, si, malgré l'absence de rapports préalables que l'on aurait pu demander à un certain nombre de personnalités dont la science et l'expérience auraient été garantes de travaux de haute tenue venant encadrer les discussions, nous en voyons ressortir quelques lignes directrices et quelques principes féconds. Ce sera tout bénéfique pour nous qui sommes en train d'inaugurer et par conséquent de nous initier à la pratique des *réseaux et des installations à très haute tension* et qui n'aurons jamais trop de lumières pour amorcer et pour développer nos *superréseaux* comme ils devront l'être si nous voulons que tout ce que l'on est en droit d'en attendre devienne une réalité et qu'ils soient ainsi une source de prospérité.

Les sujets que le Comité de l'A. S. E. a mis à l'ordre du jour de cette séance pour en faire l'objet de rapports et de discussions, comprennent bon nombre de

ceux qui doivent être traités à Paris. Pour ma part, je regrette un peu qu'on n'y ait pas compris le No. C. I. du dit programme, qui a traité à une „relation à établir entre la tension, la longueur d'une ligne de transmission et la puissance à transporter“, et si je le regrette, ce n'est pas tant, croyez-le bien, parceque ce sujet aurait pu se prêter à d'intéressants développements analytiques, que parcequ'il nous aurait fourni l'occasion de discuter ouvertement et librement une question qui est sur toutes les lèvres, que l'on a déjà touchée, mais d'un point de vue un peu particulier, dans les publications que le Bulletin de l'A. S. E. a consacrées aux projets de normalisation des tensions que tout le monde connaît, et qui est celle *de la ou des tensions à adopter pour nos futures grandes lignes*. Vous voudrez donc bien me pardonner si, au cours de ce qui va suivre, il m'arrive de faire quelque allusion rentrant dans un ordre d'idées qu'il ne m'appartient pas de traiter aujourd'hui. Vous me le pardonnez peut-être d'autant plus facilement que je me propose de ne vous entretenir que de deux des quatre questions qui m'ont été dévolues: celles de la *compensation du déwatté* et du „*réglage de la tension en bout de ligne*“ car des deux autres, l'une, celle du „*réglage de la fréquence*“, quoique apparentée, est d'un autre ordre que les deux premières, tandis que la seconde, celle des „*changements brusques de débit*“, se ramène assez facilement à celle du réglage de la tension ou intéresse davantage tout ce qui rentre dans le chapitre: surintensités et par conséquent, surtensions et sécurité. Je dois d'ailleurs ajouter que les deux sujets que j'ai seuls retenus à cause de l'impossibilité dans laquelle je me serais trouvé d'embrasser le tout dans un temps si court, n'en forment au fond qu'un seul, du moins si l'on se place au point de vue qui nous occupe avant tout ici: celui des *grandes lignes de transmission*. Car — c'est du moins ainsi que je vois la chose — on ne saurait résoudre *convenablement* le problème de la régulation de la tension des grands transports sans faire intervenir soit en bouts de lignes, soit en des points intermédiaires qui se confondront pratiquement avec les centres de consommation échelonnés le long des grandes artères de distribution, des appareils ou des machines permettant de porter le facteur de puissance en ces points à telle valeur que l'on veut.

Il peut cependant ne pas être inutile de consacrer quelques mots à la question de la „*compensation du déwatté*“ en elle-même. C'est ce que je vais faire aussi succinctement que possible.

### Compensation du déwatté.

Je constate tout d'abord qu'après une longue période de quasi indifférence dont il est inutile de rechercher ici les causes, le monde des Electriciens se préoccupe de plus en plus des moyens propres à améliorer *le facteur de puissance* des réseaux de distribution et, partant, des sources qui alimentent ces derniers. Il faut espérer que ce mouvement s'accentuera toujours plus et qu'on arrivera peu à peu à un état de choses qui, sans peut-être l'atteindre tout à fait puisqu'il y a des cas où un léger décalage peut être favorable à la réalisation d'un bon rendement général, nous rapprochera suffisamment de l'idéal que représenteraient des réseaux équivalents à ces circuits non-inductifs, c'est-à-dire à *facteur de puissance égal à l'unité*. Pour cela — chacun s'en rend compte à cette époque de services combinés par la marche en parallèle de plusieurs centrales — il ne suffit pas dans tous les cas de chercher à *réduire* par le moyen des mesures administratives que l'on connaît (moteurs de qualités déterminées) ou de *compenser* totalement ou en partie les courants déwattés  $I \sin \varphi$  des récepteurs qui empruntent aux réseaux leurs courants d'excitation; il faut, pour que l'avantage ainsi obtenu s'étende à l'ensemble des organes constitutifs des installations électriques (lignes de transport, transformateurs élévateurs et générateurs), qu'une attention soutenue soit apportée aux conditions de réglage au départ, en particulier au partage des puissances réelles et apparentes entre usines et lignes participant à la même distribution. La question a

ainsi plusieurs faces, tant mécaniques qu'électriques, qu'il n'est pas possible d'aborder toutes ici.

Aucune compensation du déwatté ne serait nécessaire du fait des appareils d'utilisation si aux mesures administratives comme celle qui consiste à n'admettre sur les réseaux que les moteurs d'induction caractérisés par un „bon“ facteur de puissance, venaient s'ajouter celles qui pourraient consister à favoriser si ce n'est à imposer partout où faire se peut l'emploi de machines ou d'appareils à *facteur de puissance réglable* (moteurs synchrones au lieu de moteurs asynchrones dans le cas d'unités suffisamment puissantes; moteurs d'induction compensés par l'induit, soit par machines à collecteur, soit par vibrateurs Kapp; groupes transformateurs synchrones, commutatrices ou convertisseurs en cascade, au lieu de groupes transformateurs asynchrones ordinaires; moteurs synchrones démarrant en asynchrones, etc.), à n'employer comme appareils principaux ou auxiliaires que ceux qui *n'introduisent qu'un faible décalage* (moteurs travaillant en asynchrones aux fortes charges et en synchrones aux faibles charges et à vide; régulateurs d'induction doubles) ou même à *substituer le courant continu aux courants alternatifs* pour l'alimentation de réseaux de force motrice locaux comprenant de nombreux petits moteurs travaillant dans des conditions désavantageuses, le courant continu nécessaire étant obtenu sur place au moyen de groupes rotatifs appropriés ou des redresseurs genre Hewitt (grosses industries, ateliers importants, etc.). Un exemple intéressant et frappant de ce que l'on peut obtenir par ce dernier moyen est celui des Ateliers de Puteaux, en France, où le facteur de puissance de l'ensemble des appareils d'utilisation a pu être porté à 0,95 bien que le 75 % de la puissance nécessaire soit absorbée directement sous la forme de courants alternatifs triphasés.

Pour être réellement efficaces, des mesures de ce genre devraient pouvoir être appliquées systématiquement et uniformément. On ne peut guère y songer que pour des *réseaux nouveaux* et même dans ce cas, il y aurait sans doute beaucoup à lutter pour arriver à faire comprendre à l'acheteur du courant la distinction que le producteur fait entre la puissance réelle ou active et la puissance magnétisante ou réactive, distinction un peu subtile pour des personnes non initiées et qui, bien souvent, ont déjà beaucoup de peine à comprendre le rapport qui existe entre le kilowatt et la puissance dont ils ont besoin, comme il y aurait aussi beaucoup à lutter pour faire adopter un peu généralement l'emploi de machines synchrones ou de combinaisons équivalentes, soit à cause de la mauvaise réputation dont les premières souffrent encore, bien à tort, dans nombre de milieux, soit à cause du surcroît de frais d'installation ou des complications que les unes et les autres peuvent entraîner. Quant à les appliquer systématiquement aux *réseaux existants*, où le mal est parfois profond puisqu'il n'est pas rare d'en rencontrer qui sont affligés de facteurs de puissance de 0,60 et même moins, il ne saurait évidemment en être question, pas plus qu'il ne faut compter arriver à un rétablissement suffisant par la voie des tarifications complexes qui tendent à se répandre depuis un certain temps, cette solution ne paraissant pas en être une dans l'espèce, puisqu'elle ne saurait avoir pour effet de faire disparaître dans une mesure très appréciable le mal dont on se plaint et qu'elle nécessite des dépenses qui seraient mieux placées si elles étaient affectées à l'achat d'appareils qui, en compensant ou même en surcompensant le déwatté des réseaux de distribution, déchargeraient d'autant les lignes d'apport, les transformateurs et les générateurs, dont ils assureraient la pleine utilisation, ainsi que celle des moteurs primaires, tout en participant à la régulation de la tension.

Il me semble donc que dans un cas comme dans l'autre — réseaux nouveaux ou réseaux existants — le producteur devrait envisager, dans des cas donnés, l'installation de *moteurs synchrones tournant à vide* dans les principaux centres de distribution, où ils joueraient le rôle de *recailleurs* ou *compensateurs* et de *régulateurs de tension*. Je ne parle pas d'autres moyens de compensation connus, parce qu'ils ne sont guère susceptibles d'être appliqués pratiquement. Et j'ajoute



que ce qui me paraît être utile toutes les fois que le facteur de puissance des réseaux de distribution n'atteint pas une valeur déterminée, par exemple 0,90 à 0,95, *me paraît être d'une nécessité absolue lorsque les dits réseaux sont alimentés à moyenne ou à grande distance*. Il ne faut en effet pas oublier que tous les effets inductifs que subissent les lignes, les transformateurs et les générateurs, de même que les courants d'excitation qu'exigent ces derniers, sont d'autant plus marqués que *les courants produits et transmis sont plus intenses et plus retardés*, de telle sorte qu'en chargeant les dits éléments de la production et du transport des courants déwattés des centres de distribution à faible facteur de puissance, on est fatalement conduit, puisqu'aussi bien les chutes de tension totalisées doivent être limitées, à adopter des tensions de transport exagérées qui ne sont dans un rapport convenable ni avec les puissances à transmettre, ni avec les distances à franchir, et à dépenser beaucoup d'argent pour un ensemble d'organes inutilement volumineux et mal utilisés.

L'idée d'employer les moteurs synchrones comme compensateurs à l'extrémité réceptrice des lignes de transmission n'est certes pas nouvelle puisqu'elle avait été émise, en 1896 déjà, par Monsieur *A. Blondel*, dans un petit ouvrage consacré à l'étude de ces machines. Mais si l'on comprend que l'usage de ces dernières dans ce but ne se soit pas imposé à une époque où la plupart des réseaux ne comportaient guère que des lampes, on ne comprendrait pas, maintenant que la proportion entre récepteurs non inductifs et moteurs s'est complètement renversée et que beaucoup de réseaux sont arrivés à saturation, souvent parce que trop chargés inductivement, que l'on n'en fit pas l'emploi que permet l'une de leurs plus précieuses propriétés, et ceci d'autant plus que d'immenses progrès ont été réalisés dans leur construction et que l'on peut déjà entrevoir la possibilité de s'affranchir de leur seule tare, celle de ne pouvoir démarrer dans de bonnes conditions par leurs propres moyens (démarrage en asynchrones et commande automatique). Je sais bien qu'à défaut des objections que l'on pouvait tirer de certaines „faiblesses“ de ces machines à l'époque où le constructeur ne s'en était pas encore rendu maître, on ne manque pas d'opposer à leur emploi celles qui s'inspirent de considérations d'ordre économique: coût et rendement général. Mais je crois que si on se donnait plus de peine que l'on ne s'en donne généralement dans l'établissement de „bilans“ de ce genre, si on abordait cette question avec un esprit moins embarrassé de préventions de toute sortes, on aboutirait dans beaucoup de cas et pour peu que le problème ait été envisagé dans son ensemble, à des conclusions autres que celles que l'on adopte souvent en s'en remettant simplement à un flair qui peut être trompeur.

Quelles sont d'ailleurs ces objections ?

La production de la puissance compensatrice par un moteur synchrone spécial entraîne, d'une part, des dépenses d'installation supplémentaires, d'autre part, des pertes qui *tendent* à réduire le rendement global.

Considérons tout d'abord le côté: *rendement*. Pour que celui-ci ne soit pas affecté, il faut que la puissance absorbée par le ou les moteurs synchrones compensateurs tournant à vide n'excede pas la puissance économisée par réduction des pertes par effet Joule dans l'induit et l'inducteur (y compris rhéostats) des alternateurs, dans les transformateurs élévateurs et abaisseurs (car les moteurs synchrones se placeront généralement au secondaire des transformateurs d'arrivée), dans les lignes de transport et dans tous les appareils interposés entre le secondaire des transformateurs abaisseurs ou, à défaut de ceux-ci, entre l'arrivée des lignes et les bornes des alternateurs. Or, un calcul très simple montre que si l'on désigne par  $P$  la valeur de la puissance réelle transmise aux récepteurs et comptée aux barres d'attache des compensateurs, par  $\varphi$  l'angle de déphasage des récepteurs, par  $P_s = P \operatorname{tg} \varphi$  la valeur de la puissance apparente des moteurs synchrones qui compenseraient entièrement le déwatté, par  $p_s = a P_s = a P \operatorname{tg} \varphi$  la valeur de la

puissance réelle consommée par les dits moteurs, par  $p_i$  la valeur de la puissance perdue par effet Joule du courant déwatté  $I \sin \varphi$ , perte qui est égale à  $tg^2 \varphi$  fois celle due au courant watté et qu'en conséquence on peut écrire  $p_i = \beta P tg^2 \varphi$ , il y aura amélioration de rendement et par conséquent bénéfique à compenser le déwatté si  $p_s < p_i$ , c'est-à-dire si

$$\frac{\alpha}{\beta} < tg \varphi$$

ce qui montre qu'il y aura intérêt à compenser au moyen de moteurs synchrones la fraction de la puissance magnétisante du réseau qui sera en excédant de celle correspondant à un facteur de puissance défini par

$$tg \varphi_1 = \frac{\alpha}{\beta}$$

et ce facteur de puissance, ainsi que cela est naturel, sera d'autant plus élevé que  $\alpha$  sera plus petit et  $\beta$  plus grand.

Je crois que nombreux sont les cas dans lesquels  $\beta$  est de l'ordre de grandeur de 0,10 à 0,15, voire même 0,20, alors qu'en dimensionnant les moteurs synchrones de compensation comme ils pourraient l'être en vue de cet emploi, il ne doit pas être difficile de faire en sorte que leurs pertes (puissance consommée à vide) ne soient pas supérieures au 4 ou au 5% de leur puissance apparente. En admettant ces chiffres, on est conduit au tableau suivant:

$\beta$	$\alpha = 0,04$		$\alpha = 0,05$	
	$tg \varphi_1$	$cos \varphi_1$	$tg \varphi_1$	$cos \varphi_1$
0,10	0,40	0,927	0,50	0,895
0,15	0,267	0,967	0,33	0,950
0,20	0,20	0,980	0,25	0,970

lequel montre de toute évidence qu'au point de vue auquel nous nous sommes placé dans ce qui précède la compensation par moteur synchrone sera avantageuse dans la plupart des cas de la pratique. Ainsi sur un réseau dans lequel la perte par effet Joule due au courant watté dans l'ensemble des organes dont il a été question plus haut (transformateurs, lignes et générateurs) serait le 10% de la puissance réelle transmise, la compensation au moyen d'un moteur absorbant une puissance réelle égale au 5% de sa puissance apparente serait avantageuse jusqu'à concurrence d'un facteur de puissance de 0,90. C'est là une valeur que l'on ne rencontre certainement pas dans la plupart des réseaux force importants. Et il y aurait d'autant plus d'intérêt à envisager une compensation dans de tels cas, qu'en ne le faisant pas, c'est-à-dire en s'accommodant des facteurs de puissance que de tels réseaux ont souvent, on utilise mal non seulement toute la machinerie électrique et les lignes, mais encore les moteurs primaires, dont la marge reste ainsi parfaitement illusoire à moins que les alternateurs aient été prévus pour un facteur de puissance suffisamment bas.

On arrive sensiblement aux mêmes conclusions si l'on se place au point de vue des dépenses de premier établissement, car on peut montrer non moins facilement par le bilan obtenu en portant d'un côté l'économie que la compensation permet de réaliser sur le coût des lignes, transformateurs et générateurs, et de l'autre le coût des installations de compensation, qu'il y a avantage en faveur de ces dernières dans la plupart des cas et jusqu'à des valeurs de  $cos \varphi$  qui sont

pratiquement les mêmes que celles auxquelles on est conduit par la considération du rendement général. Et l'on n'arriverait certainement pas à d'autres résultats pour les réseaux existants en mettant en regard, d'une part, le coût des installations de compensation et les pertes qu'elles occasionnent, d'autre part, la marge et l'élasticité retrouvées, l'amélioration du rendement et des conditions de réglage réalisées grâce à leur emploi.

Il n'est donc pas téméraire de dire que cette mesure devrait être envisagée beaucoup plus souvent qu'elle ne l'est. Et je ne vous étonnerai pas si je dis, ou plutôt si je répète, que ce qui est utile dans tous les cas devient indispensable lorsque l'on est en présence de systèmes comprenant des lignes de transport à grande distance et des réseaux d'intercommunication à très haute tension. Dans ces cas — réserve faite du moment à partir duquel il convient d'y faire appel — l'emploi des moteurs synchrones compensateurs s'impose, et cela non seulement en vue de décharger générateurs, transformateurs et lignes des courants déwattés qui en affectent si profondément les conditions d'établissement et le fonctionnement, mais en vue aussi de résoudre convenablement le problème du réglage de la tension et celui des échanges d'énergie qui peuvent alors être assurés dans n'importe quel sens par un simple écart de phase des tensions plutôt qu'en faisant appel à une chute de tension variable en grandeur et en sens.

### Réglage de la tension.

Je ne saurais exposer ici, dans toute sa complexité, le problème du réglage de la tension des grands transports. Il y entre trop de considérations et de facteurs, il peut prendre trop d'aspects, pour que pareille tâche puisse être entreprise dans les quelques instants dont je dispose et que je vois déjà fuir trop rapidement, à mon gré du moins. Je m'en tiendrai donc à l'essentiel et je considérerai le cas très simple d'une ligne unique partant d'un centre générateur  $G$  et aboutissant à un centre récepteur  $R$ . D'ailleurs tout ce que j'en dirai pourra s'appliquer à tous les cas qui se rencontrent dans la pratique, moyennant quelques précautions et une interprétation correcte des figures correspondantes. Il faudra déjà pour ce cas que je fasse appel à certaines représentations pas très répandues et qu'en raison de ce fait, je veux tout d'abord brièvement rappeler en me servant autant que possible des mêmes notations que celles employées dans un travail précédent.<sup>1)</sup> Il s'agit du diagramme tripolaire de *A. Blondel*, qui s'établit comme suit.<sup>2)</sup>

Soit une ligne de longueur  $L$  et de constantes  $r, g, l, c, \beta, \gamma, Z_0$  et  $\vartheta$  par unité de longueur (kilomètre). Comptons les distances  $x$  à partir de l'extrémité réceptrice et proposons-nous de déterminer la tension  $V_0$ , l'intensité du courant  $I_0$  et le déphasage  $\varphi_0$  à l'extrémité génératrice ( $x=L$ ) pour un régime caractérisé par une tension  $\Delta V_1$ , un courant d'intensité  $I_1$  et un déphasage  $\varphi_1 = 0$  à l'extrémité réceptrice.

En tenant compte des conditions en  $x=0$  dans les solutions générales des équations différentielles de la ligne<sup>3)</sup>, qui sont:

$$V_x = V_1 \varepsilon^{\beta x} \varepsilon^{j(\gamma x - a_1)} + V_2 \varepsilon^{-\beta x} \varepsilon^{-j(\gamma x + a_2)} \quad (1)$$

$$I_x = \frac{V_1}{Z_0} \varepsilon^{\beta x} \varepsilon^{j(\gamma x - a_1 - \vartheta)} - \frac{V_2}{Z_0} \varepsilon^{-\beta x} \varepsilon^{-j(\gamma x + a_2 + \vartheta)} \quad (2)$$

<sup>1)</sup> Régimes permanents et changements de régime dans les circuits électriques, Bulletin de l'A. S. E. 1914.

<sup>2)</sup> L'auteur a pensé qu'une démonstration des éléments de ce diagramme pourrait intéresser les lecteurs du Bulletin. Il a donc complété dans ce sens le texte de sa conférence.

<sup>3)</sup> Les lettres grasses sont les expressions complexes des vecteurs représentatifs des courants et tensions en un point quelconque de la ligne.

on a immédiatement

$$V_1 = \frac{\Delta V_1}{2} e^{j a_1} + \frac{Z_0 I_1}{2} e^{j(\vartheta + a_1)}$$

$$V_2 = \frac{\Delta V_1}{2} e^{j a_2} - \frac{Z_0 I_1}{2} e^{j(\vartheta + a_2)}$$

d'où en remplaçant dans  $V_x$  et  $I_x$  tout en y faisant  $x = L$

$$V_0 = \frac{\Delta V_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j \gamma L} + \varepsilon^{-\beta L} e^{-j \gamma L} \right] + \frac{Z_0 I_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j(\gamma L + \vartheta)} - \varepsilon^{-\beta L} e^{-j(\gamma L - \vartheta)} \right] \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{\Delta V_1}{2 Z_0} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j(\gamma L - \vartheta)} - \varepsilon^{-\beta L} e^{-j(\gamma L + \vartheta)} \right] + \frac{I_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j \gamma L} + \varepsilon^{-\beta L} e^{-j \gamma L} \right] \quad (4)$$

Ces expressions complexes déterminent entièrement: par leurs modules, les valeurs efficaces de la tension  $V_0$  et du courant  $I_0$  au départ, et par la différence de leurs arguments la différence de phase entre tension et courant au départ, soit le décalage  $\varphi_0$ .

Or on démontre facilement qu'à ce régime ( $\cos \varphi_1 = 1$ )

$$V_o = V_{oo} + V_{oc} \quad (5)$$

$$I_o = I_{oo} + I_{oc} \quad (6)$$

relations dans lesquelles  $V_{oo}$  est l'expression complexe du vecteur représentatif de la tension au départ pour le régime  $\Delta V_1$  et  $I_1 = 0$  (ligne à vide en  $x = 0$ ),  $V_{oc}$  celle du vecteur représentatif de la tension au départ pour le régime  $\Delta V_1 = 0$  et  $I_1$  à l'extrémité réceptrice (ligne en court-circuit débitant le courant  $I_1$  en  $x = 0$ ), tandis que  $I_{oo}$  et  $I_{oc}$  sont les expressions complexes correspondantes du courant à vide et du courant de court-circuit au départ en  $x = L$ .

En effet, les conditions de la marche à vide en  $x = 0$  introduites dans (1) et (2) donnent:

$$V_1 = V_2 = \frac{\Delta V_1}{2}; \quad a_1 = a_2 = 0$$

d'où:

$$V_{oo} = \frac{\Delta V_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j \gamma L} + \varepsilon^{-\beta L} e^{-j \gamma L} \right] \quad (7)$$

et

$$I_{oo} = \frac{\Delta V_1}{2 Z_0} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j(\gamma L - \vartheta)} - \varepsilon^{-\beta L} e^{-j(\gamma L + \vartheta)} \right] \quad (8)$$

de même que les conditions de la marche en court-circuit en  $x = 0$  introduites dans (1) et (2) donnent de leur côté:

$$V_1 = V_2 = \frac{Z_0 I_1}{2}; \quad a_1 = -\vartheta; \quad a_2 = -\vartheta + \pi$$

d'où:

$$V_{oc} = \frac{Z_0 I_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j(\gamma L + \vartheta)} - \varepsilon^{-\beta L} e^{-j(\gamma L - \vartheta)} \right] \quad (9)$$

et

$$I_{oc} = \frac{I_1}{2} \left[ \varepsilon^{\beta L} e^{j \gamma L} + \varepsilon^{-\beta L} e^{-j \gamma L} \right] \quad (10)$$

Une simple comparaison montre l'exactitude des deux relations (5) et (6).

On démontrerait de même que pour un décalage  $\varphi_1$  différent de 0 à l'arrivée, en  $x = 0$ , donc pour  $\cos \varphi_1 < 1$  avec  $\varphi_1 \gtrless 0$ , on aurait:

$$V_o = V_{oo} + V_{oc} \varepsilon^{-j\varphi_1} \tag{11}$$

et

$$I_o = I_{oo} + I_{oc} \varepsilon^{-j\varphi_1} \tag{12}$$

relations dont l'interprétation est immédiate, car elles indiquent que les vecteurs  $V_o$  et  $I_o$  sont obtenus par composition des vecteurs  $V_{oo}$  et  $I_{oo}$  avec les vecteurs  $V_{oc}$  et  $I_{oc}$  après avoir fait tourner ces derniers d'un angle  $\varphi_1$  autour de leur origine commune. C'est ce que l'on voit sur la figure 1 où l'on remarque – les expressions de  $V_{oo}$ ,  $I_{oo}$ ,  $V_{oc}$  et  $I_{oc}$  le montrent d'ailleurs directement – que  $V_{oo}$  et  $I_{oc}$  ont même argument, c'est-à-dire même phase, alors que les vecteurs  $I_{oo}$  et  $V_{oc}$  ont entre eux un déphasage  $2\vartheta$ , c'est-à-dire de deux fois l'argument de l'impédance caractéristique de la ligne.

Dans la figure 1, le vecteur  $OA = \Delta V_1$  représente la tension à l'arrivée de la ligne en  $x = 0$ ,  $OB = I_1$  le courant à l'arrivée pour  $\varphi_1 = 0$ ,  $OC = I_1 \varepsilon^{-j\varphi_1}$  le

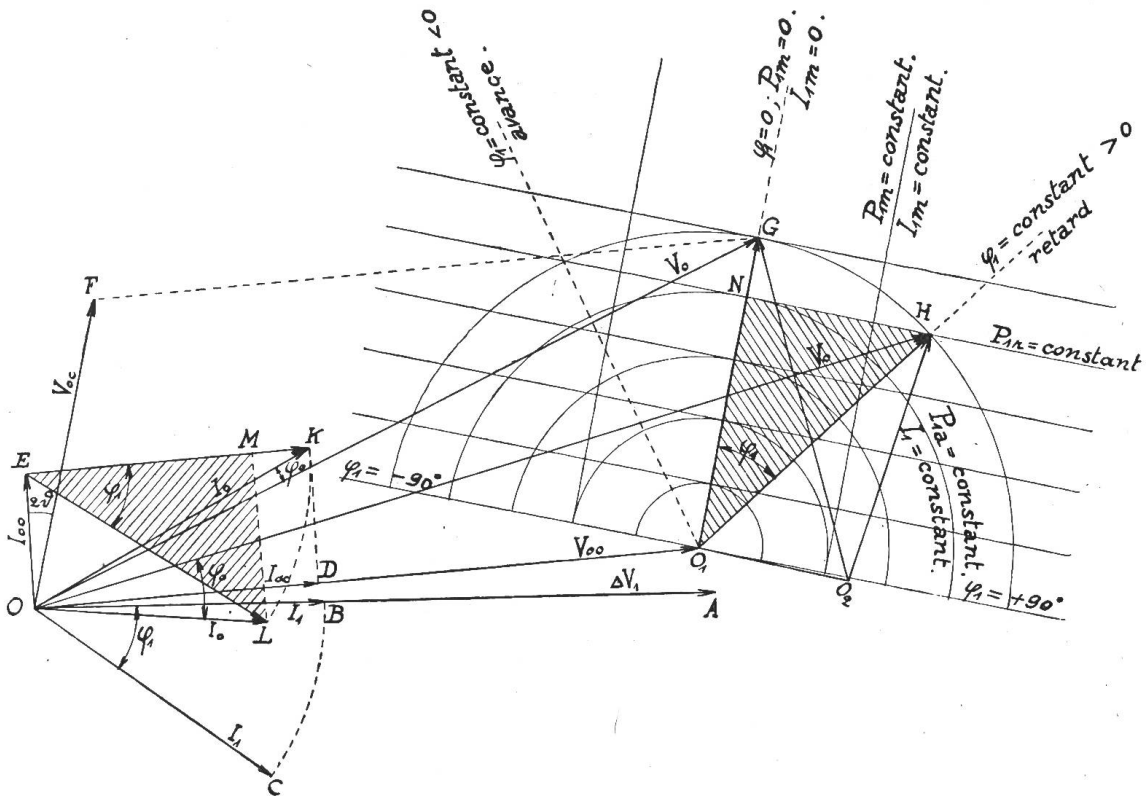


Fig. 1

courant à l'arrivée pour un déphasage donné  $\varphi_1 > 0$ ,  $OO_1 = FG = V_{oo}$  la tension à vide au départ,  $OF = O_1G = V_{oc}$  la tension de court-circuit au départ,  $OE = DK = I_{oo}$  le courant à vide au départ,  $OD = EK = I_{oc}$  le courant de court-circuit au départ,  $OG = OO_1 + O_1G = V_{oo} + V_{oc} = V_o$  la tension au départ pour  $\cos \varphi_1 = 1$  à l'arrivée,  $OK = OE + EK = I_{oo} + I_{oc} = I_o$  le courant correspondant au départ,  $OH = OO_1 + O_1H = V_{oo} + V_{oc} \varepsilon^{-j\varphi_1} = V_o$  la tension au départ pour un courant  $I_1$  décalé d'un angle  $\varphi_1 > 0$  à l'arrivée,  $OL = OE + EL = I_{oo} + I_{oc} \varepsilon^{-j\varphi_1} = I_o$  le courant correspondant au départ.

Pour une tension  $\Delta V_1$  constante à l'arrivée,  $OE = I_{oo}$  et  $OO_1 = V_{oo}$  sont tous deux constants en grandeur et en direction (phase) et comme  $OF = O_1G = V_{oc}$  est proportionnel à  $I_1$ , soit au courant débité par la ligne à son extrémité réceptrice,



l'extrémité  $G$  du vecteur  $OG = V_o$  décrira la droite  $O_1 G$  lorsque le courant absorbé par les récepteurs variera de  $o$  à  $I_1 = OB$  sous décalage  $\varphi_1 = o$ , de même que dans ces conditions de débit à l'arrivée l'extrémité  $K$  du vecteur  $OK = I_o$  décrira la droite  $EK$ . Pour un décalage  $\varphi_1 = \sphericalangle BOC$  et toujours pour une tension constante à l'arrivée, l'extrémité  $H$  du vecteur  $OH = V_o$  décrira la droite  $O_1 H$  et l'extrémité  $L$  du vecteur  $OL = I_o$  décrira la droite  $EL$  lorsque le courant absorbé par les récepteurs variera de  $o$  à  $OC = I_1$ . Et puisque  $OE = O_1 G$  est proportionnel à  $I_1$  et que de plus la puissance réelle à l'arrivée  $P_{1r}$  est proportionnelle à  $\Delta V_1 I_1 \cos \varphi_1$ , c'est-à-dire à  $O_1 G$ , il est clair que cette droite  $O_1 G$  pourra être graduée soit en ampères  $I_1$ , soit en kilowatts  $P_{1r}$ , à partir de  $O_1$  comme origine, ceci moyennant un choix d'échelles convenables, et que les droites issues de  $O_1$ , telles  $O_1 G$ ,  $O_1 H$ , etc., seront les lieux décrits par l'extrémité du vecteur représentatif de la tension  $V_o$  au départ à charge variable et à décalage constant à l'arrivée, tandis qu'à débit constant et décalage variable à l'arrivée, c'est-à-dire à puissance apparente  $P_{1\alpha}$  constante à l'arrivée, l'extrémité de ce vecteur  $V_o$  décrira des circonférences de centre  $O_1$ , alors qu'à débit et décalage variables mais à puissance réelle constante  $P_{1r}$  à l'arrivée, elle décrira des droites perpendiculaires à  $O_1 G$ , pour décrire enfin des droites parallèles à  $O_1 G$  lorsque la puissance magnétisante ou réactive absorbée par les récepteurs sera constante (débit déwatté constant  $HN$ ).

Mais ce diagramme bipolaire à pôles fixes  $O$  et  $O_1$  pour une tension constante à l'arrivée, peut facilement se transformer en un diagramme tripolaire à pôles fixes  $O$ ,  $O_1$  et  $O_2$ , où  $O$  sera le pôle ou l'origine des vecteurs  $V_o$  dans toutes les conditions qui viennent d'être dites,  $O_1$  l'origine des vecteurs courant  $I_1$  et puissances  $P_1$  à l'arrivée, et  $O_2$  l'origine des vecteurs courant au départ  $I_o$  dans ces mêmes conditions. Il suffira pour cela d'opérer une transformation par similitude (translation, rotation et homothétie) qui aura pour effet de faire passer en  $O_1 HN$  le triangle rectangle  $EML$ . Le vecteur  $OE = I_{oo}$  deviendra  $O_2 O_1$  et  $O_2$  sera le troisième pôle fixe à partir duquel pourront se mesurer, moyennant détermination des échelles résultant de cette transformation, les courants  $I_o$ . Ainsi pour une tension  $OA = \Delta V_1$  et un courant  $OB = I_1$  proportionnel à  $O_1 G$  à l'arrivée, on aura  $OG = V_o$ ,  $O_1 G = I_1$  et  $O_2 G = I_o$ , tandis que pour la même tension à l'arrivée mais pour un débit  $I_1 = OC$  décalé de  $\varphi_1$  en arrière de la tension, on aura  $OH = V_o$ ,  $O_1 H = I_1$  et  $O_2 H = I_o$ .

C'est le diagramme tripolaire de la ligne fonctionnant à tension  $\Delta V_1$  constante à l'arrivée, ou *diagramme tripolaire de Blondel*, au sujet duquel il y a lieu de noter que l'opération qui a permis de transformer le diagramme des courants ayant  $O$  comme origine en un diagramme de tensions ayant  $O_2$  comme pôle implique un rapport de similitude qui est homogène à une résistance et qui est une impédance  $Z = Z \varepsilon^{j\theta}$  (multiplication des longueurs représentatives des valeurs efficaces des courants par le module  $Z$  de l'impédance  $Z$  et rotation de l'angle  $\theta$  dans le sens des angles croissants).

Ce diagramme étant établi, nous avons tout ce qu'il nous faut pour aborder le problème de la régulation de la tension en bout de ligne.

J'admets que l'on veuille régler à tension  $\Delta V_1$  constante à l'arrivée.

Un simple examen de la fig. 1 permet de saisir à quel point le régime de la tension au départ peut être affecté suivant l'importance et la nature de la charge à l'arrivée, surtout si le facteur de puissance de cette dernière est relativement faible.

Voici, par exemple, une ligne triphasée à 3 conducteurs, de 200 km de longueur et formée de 3 cordes d'aluminium de 200 mm<sup>2</sup> de section chacune, devant travailler sous une tension simple de 63 500 volts à l'arrivée (110 000 volts composés). Pour une charge de 43 500 kW à  $\cos \varphi_1 = 1$  à l'arrivée, la tension simple au départ sera de 71 100 volts (123 300 volts composés), de telle sorte que la chute de tension relative rapportée à la tension à l'arrivée sera de 12% et le rendement de la ligne de 90,6%. Pour la même charge à l'arrivée, mais à  $\cos \varphi_1 = 0,80$  avec  $\varphi_1 > 0$ ,

la tension simple au départ serait de 83 130 volts (144 000 volts composés), la chute de tension de 30,9% et le rendement de 87,3%. Une telle ligne serait manifestement insuffisante pour ce dernier régime, car des chutes de tension de l'ordre de grandeur de 30% pour la ligne seule, chutes auxquelles viennent s'ajouter celles des transformateurs de départ, ainsi que celles des transformateurs d'arrivée pour peu que l'on ait en vue un service à tension constante au secondaire de ces derniers, et dont l'effet se fait d'autant plus sentir que le décalage est plus grand, ne sauraient être envisagées. Et comme un facteur de puissance de 0,80 n'est certainement pas des plus bas parmi ceux auxquels on doit être en mesure de pouvoir faire face du côté des récepteurs, on est conduit, du moins si l'on fait abstraction de la compensation du déwatté à l'arrivée, ou bien à limiter la capacité de transport des lignes en la ramenant à une valeur telle que la chute de tension n'excède pas l'étendue du réglage dont on peut disposer au départ, et par conséquent à les multiplier, ou bien à rechercher dans une élévation de la tension la capacité de transport totale désirée. Or avant de se résoudre à l'une ou à l'autre de ces mesures qui l'une et l'autre peuvent conduire à un gaspillage regrettable, on devrait, à mon sens du moins, en vue de tirer d'organes coûteux tout le parti possible, examiner de très près la question de la compensation du déwatté pour en faire à la fois un moyen de décharger les lignes des courants magnétisants qui en diminuent tant la capacité de transport, et un moyen de réglage de la tension qui seul paraît susceptible de donner une solution rationnelle au problème des grandes distributions à hauts potentiels, lesquelles, pour être en mesure de rendre les services que l'on peut en attendre, doivent être à même d'assurer des échanges d'énergie en tous sens tout en travaillant à tension pratiquement constante en tous nœuds, c'est-à-dire des échanges non assujettis à des chutes de tension. Dans de tels réseaux, il n'y aurait pas de limites aux distances franchissables, ni restriction quant à la situation des centres de production et de consommation. Et en envisageant les choses sous cet angle, on ne se croirait peut-être pas obligé de „pousser“ par trop les tensions, sans qu'il y ait nécessité et souvent pour le seul plaisir de „faire de la très haute tension“.

Dans tous les cas, le problème de la régulation ne doit pas seulement consister à assurer la constance de la tension en bout de ligne, côté récepteurs, mais il doit se proposer de limiter la chute de tension, c'est-à-dire de limiter la tension au départ, tout en assurant les meilleures conditions de fonctionnement possibles sous le rapport du rendement de la transmission et du coût des appareils de réglage.

Si l'on fait abstraction du cas des très longues lignes pour la régulation desquelles on pourrait, théoriquement du moins, envisager d'autres modes de réglage encore (réglage à courant constant sur ampèremètre direct ou sur ampèremètre compensé), les réglages *au départ* peuvent être de deux sortes, savoir: *réglage à tension constante* et *réglage à tension apparente constante* ou *à tension constante sur voltmètre compensé*.

#### a) Réglage à tension constante au départ.

Soit une ligne dont le diagramme tripolaire (figure 2) ait  $O$ ,  $O_1$  et  $O_2$  comme pôles et qui doive travailler à tension  $OA = \Delta V_1$  constante à l'arrivée pour tous débits  $OB = I_1$  croissant de telle manière que le vecteur qui les représente décrive le lieu  $OC$  ou son correspondant  $O_1 C_1$ .

Au régime  $OA = \Delta V_1$ ,  $OB = I_1$ ,  $P_{1r} = \Delta V_1 I_1 \cos \varphi_1 = O_1 D_1$  et  $P_{1m} = \Delta V_1 I_1 \sin \varphi_1 = D_1 B_1$  à l'arrivée correspond le régime  $V_0 = OB_1$  et  $I_0 = O_2 B_1$  au départ, et le décalage au départ est mesuré par l'angle  $\varphi_0$  compris entre le prolongement de  $OB_1$  et la droite passant par  $B_1$  et qui fait avec  $O_2 B_1$  l'angle  $\theta$  dans le sens des angles décroissants (voir ce qui a été dit ci-haut sur la transformation par similitude qui a permis de transporter en  $O_1 B_1 O_2$  le triangle des courants de la figure 1;  $\theta$  est l'argument de rapport de similitude  $Z$ ).

Mais ce même régime à l'arrivée peut être assuré par une tension  $V_0 = OE_1$  au départ; il suffira pour cela qu'à la charge réelle des récepteurs vienne s'ajouter à l'arrivée une charge réactive  $B_1 E_1$  fournie par un compensateur synchrone approprié et convenablement excité. On conçoit donc que le réglage pourra être opéré au départ au moyen d'un régulateur de potentiel qui maintiendra constante, par exemple égale à  $OE_1 = R_0$ , la tension  $V_0$  des générateurs, et à l'arrivée au moyen d'un régulateur de potentiel agissant sur la puissance apparente d'un ou de plusieurs moteurs synchrones de manière à maintenir constante la tension  $\Delta V_1$ , c'est-à-dire d'un régulateur agissant sur le circuit d'excitation des dits moteurs et leur faisant

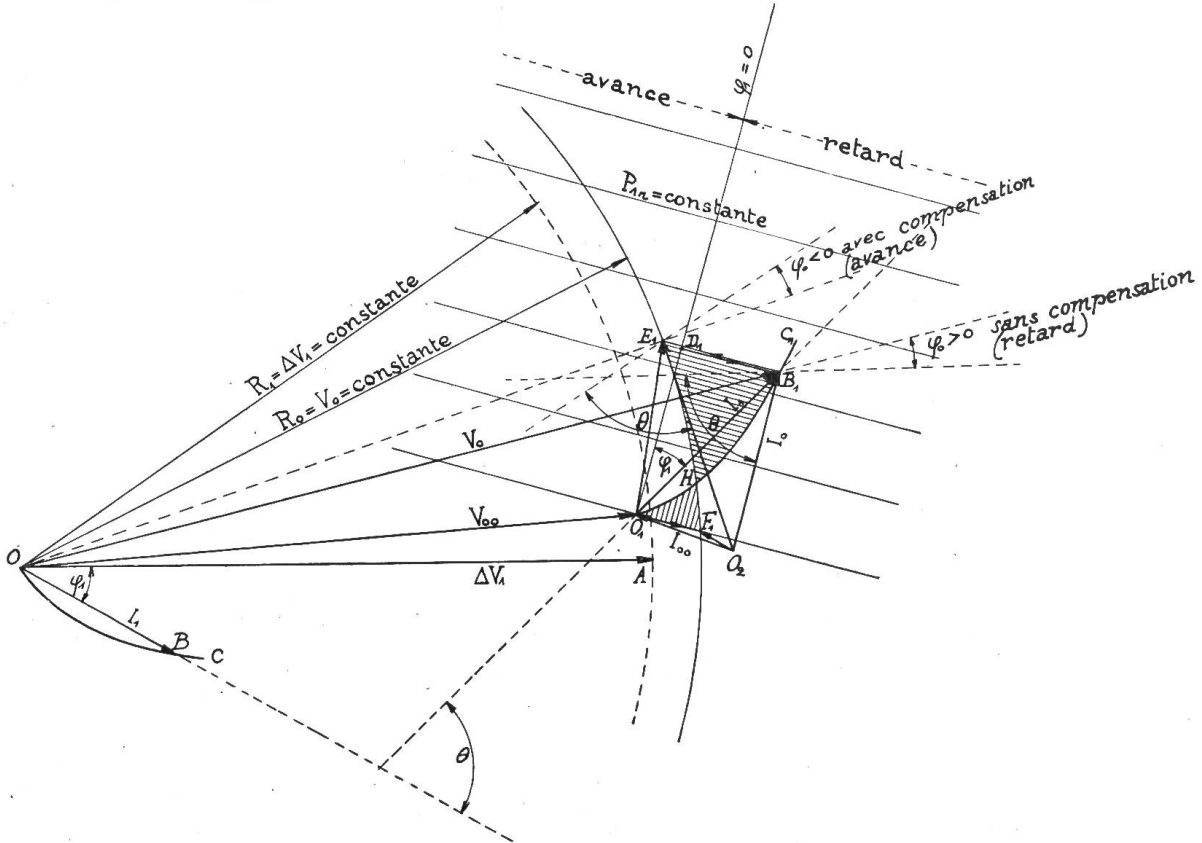


Fig. 2

prendre automatiquement la charge réactive propre à assurer à l'arrivée la tension  $\Delta V_1$  sous la charge réelle  $P_{1r} = \Delta V_1 I_1 \cos \varphi_1$  qui est celle des récepteurs. Au régime  $OB$  ou  $O_1 B_1$  considéré sur la fig. 2, la charge réactive prise par le ou les compensateurs synchrones serait une charge anti-inductive ou condensive mesurée à l'échelle des puissances par la longueur du segment  $B_1 E_1$  de la droite d'équation  $P_{1r} = \Delta V_1 I_1 \cos \varphi_1 = O_1 D_1 = \text{constante}$  (en réalité sur une droite parallèle à  $B_1 E_1$  et au-delà de  $B_1 E_1$  d'une quantité représentant la puissance réelle absorbée par le ou les moteurs synchrones consommant la puissance réactive  $B_1 E_1$ ). Ce qui est vrai pour la charge considérée  $O_1 D_1$  le sera naturellement pour toutes les autres, de telle sorte que si avec  $O$  comme centre, on trace une circonférence de rayon  $R_0 = V_0$ , où  $V_0$  est la tension de départ choisie, cette circonférence et le lieu  $O_1 C_1$  délimiteront deux zones, l'une située au-delà du point  $H$ , hachurée par des parallèles à  $B_1 E_1$ , qui est celle des charges pour lesquelles le ou les compensateurs synchrones agiront en condensateurs, l'autre, en-deçà de  $H$ , hachurée par des parallèles à  $O_1 D_1$ , qui est celle des charges pour lesquelles les dits appareils agiront comme des self-inductances.

La tension réglée  $V_0 = R_0$  n'étant pas fixée a priori, il y aura naturellement lieu de la choisir en tenant compte des capacités de fonctionnement du ou des compensateurs synchrones dans les deux sens et en tenant compte également des

surcharges possibles, sans oublier que les surcharges des compensateurs croissent beaucoup plus vite que celles du réseau. Il faudra aussi tenir compte du fait que la charge de ce dernier ne sera pas représentée par un lieu immuable tel que  $OC$  ou  $O_1 C_1$  et par conséquent, après avoir supputé les fluctuations possibles de part et d'autre de ce lieu, déterminer la tension réglée la plus convenable et la puissance apparente à attribuer aux compensateurs pour que ceux-ci soient en mesure de faire le service de réglage qu'il convient de leur demander.

Dans la fig. 2 donnée à titre de simple illustration de ce qui précède, la tension réglée est telle qu'à la charge  $OB$  ou  $O_1 B_1$  le ou les compensateurs synchrones travailleraient en condensateurs absorbant la puissance apparente  $B_1 E_1$  alors que les générateurs fourniraient le courant  $O_2 E_1$  sous la tension  $OE_1$  et avec un décalage en avant  $\varphi_0$ , tandis qu'à charge réelle nulle à l'arrivée ils travailleraient en self-inductances absorbant la puissance apparente  $O_1 F_1$  alors que la ligne absorberait au départ le courant  $O_2 F_1$  au lieu du courant à vide total  $I_{00} = O_2 O_1$ .

Ce mode de réglage à tension constante au départ, très simple en soi, présente un certain nombre de points faibles, entr'autres celui de conduire dans des cas donnés à des compensateurs de puissances relativement élevées et celui de ne pas prendre en considération le rendement de la transmission dans le choix de la tension  $V_0$ . Aussi, comme il peut importer davantage de limiter la surélévation de la tension au départ que de maintenir constante la chute de tension entre départ et arrivée, a-t-on pu imaginer un second mode de réglage qui consiste à régler à tension constante sur un voltmètre compensé par un circuit ampèremétrique au départ de la ligne, c'est-à-dire à tension apparente constante. Ce second mode de réglage a l'avantage de permettre d'utiliser la ligne dans les meilleures conditions de rendement.

b) Réglage à tension constante sur voltmètre compensé.

Le voltmètre placé au départ de la ligne est monté comme l'indique la fig. 3, soit sur le circuit secondaire d'un transformateur de tension dont le rapport de transformation est  $m_1$ , qui se ferme en passant au travers d'une impédance  $Z' = Z' e^{j\psi'}$  alimentée par le circuit secondaire d'un transformateur d'intensité dont le rapport de transformation est  $m'$ . Lorsque la ligne est sans courant au départ,  $I_0 = 0$ , le voltmètre mesure la tension  $V_0$

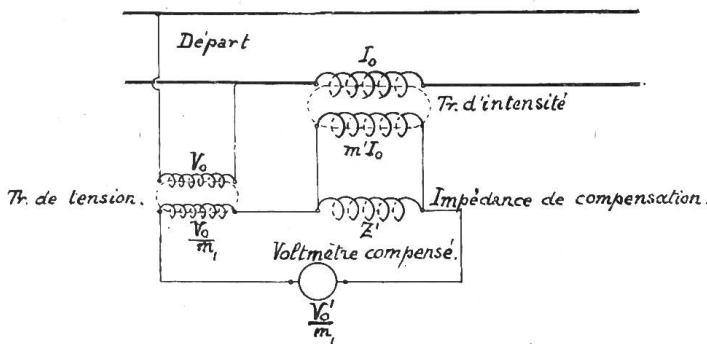


Fig. 3

réduite, soit  $\frac{V_0}{m_1}$ ; lorsqu'elle est

parcourue par le courant  $I_0$  au départ, le voltmètre mesure la tension réduite  $\frac{V_0}{m_1}$  diminuée ou

augmentée, suivant l'ordre des connexions, de la tension  $m' Z' I_0$  aux bornes de l'impédance  $Z'$ .

Dans ces conditions, si  $\frac{V_0'}{m_1}$  est la

tension réduite qui agit aux bornes du voltmètre et qui est indiquée par lui, on a:

$$\frac{V_0'}{m_1} = \frac{V_0}{m_1} \pm m' Z' I_0$$

c'est-à-dire

$$V_0' = V_0 \pm m_1 m' Z' I_0.$$

Soit alors une ligne travaillant à l'arrivée dans les conditions illustrées par la figure 4 où  $OA = \mathcal{A}V_1$ ;  $OB = I_1$ ;  $P_{1r} = O_1 D_1$  et admettons que le courant à l'arrivée, représenté par  $O_1 B_1$  dans le diagramme tripolaire, ait sa composante

déwattée  $D_1 B_1$  partiellement compensée en  $B_1 E_1$  de telle façon que le courant au départ soit représentée en grandeur par  $O_2 E_1 = I_0$  et en phase par la direction de  $E_1 H$  qui retarde de l'angle  $\theta$  sur  $O_2 E_1$ . La tension au départ sera  $O E_1 = V_0$ , mais celle indiquée par le voltmètre compensé par l'impédance  $Z'$  sera, suivant l'ordre des connections, ou bien la tension représentée par la longueur du vecteur  $O G_1$  somme du vecteur  $O E_1 = V_0$  et du vecteur  $E_1 G_1 = -m_1 m' Z' I_0$ , ou bien

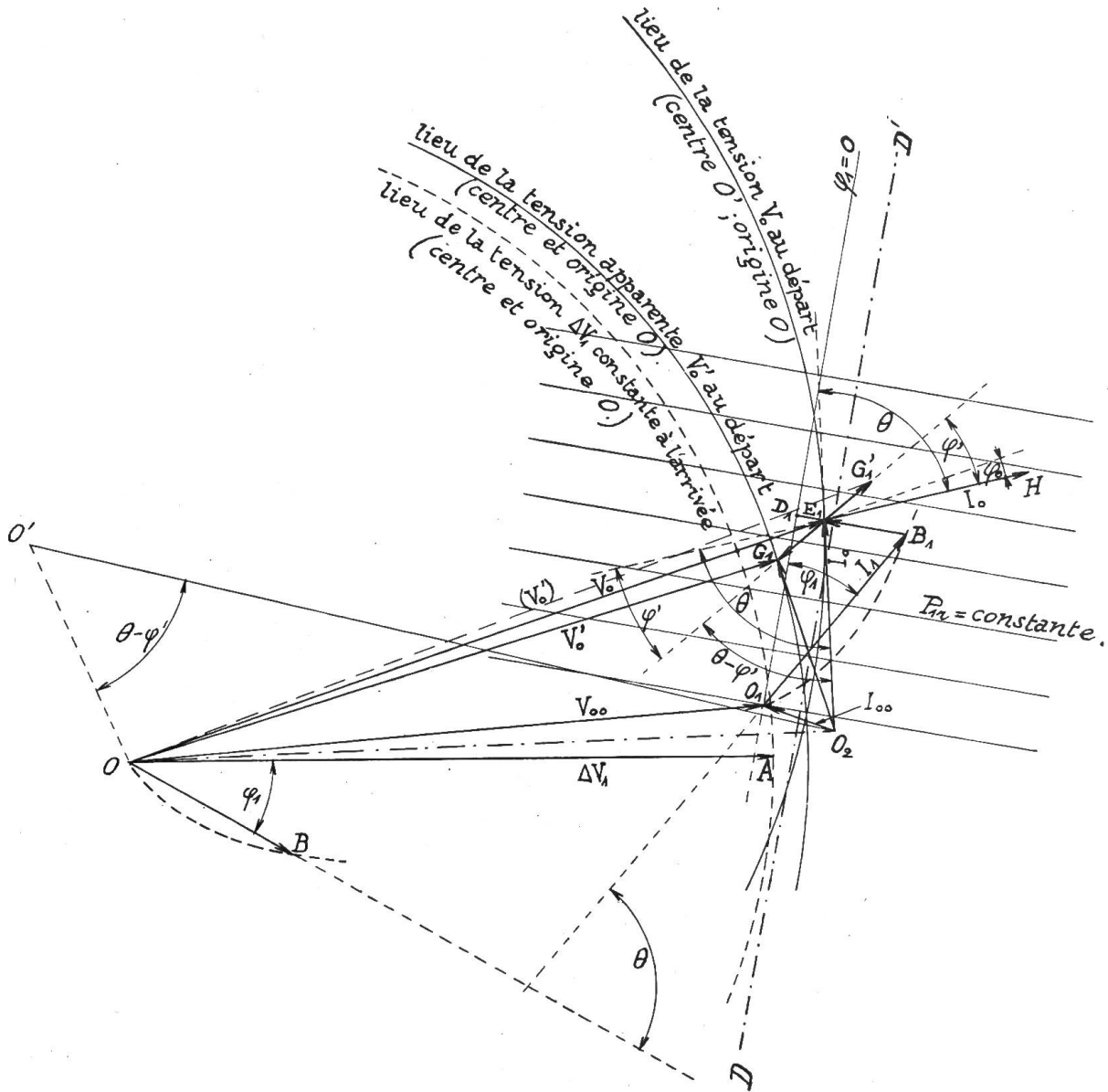


Fig. 4

celle représentée par la longueur du vecteur  $O G_1'$  somme de  $O E_1 = V_0$  et de  $E_1 G_1' = +m_1 m' Z' I_0$ . Si nous ne considérons que le premier de ces deux cas, qui seul est à retenir ici, et si nous considérons d'autre part que dans le triangle  $O_2 E_1 G_1$ , les côtés  $E_1 G_1$  et  $E_1 O_2$  sont tous deux proportionnels à  $I_0$  alors que l'angle qu'ils comprennent  $\theta - \varphi'$  est constant, nous voyons que si le point  $G_1$  décrit une certaine courbe le point  $E_1$  décrira la courbe transformée par similitude de la précédente par rapport au pôle  $O_2$  et, en particulier, que si le point  $G_1$  est assujéti à se mouvoir sur une circonférence de centre  $O$  — il suffira pour cela de régler à tension apparente  $V_0' = O G_1$  constante à tous régimes au départ — le point  $E_1$ , extrémité de  $O E_1 = V_0 =$  tension réelle au départ, sera assujéti à se déplacer sur



une circonférence de centre  $O'$ , lequel centre  $O'$  n'est pas autre chose que le transformé par similitude par rapport à  $O_2$  du centre  $O$  de la circonférence décrite par  $G_1$ .

Tel est le principe du *réglage à tension constante sur voltmètre compensé*. Il consiste donc en un réglage à tension constante  $\Delta V_1$  à l'arrivée au moyen d'un régulateur de potentiel agissant sur le circuit d'excitation des compensateurs synchrones et faisant prendre automatiquement à ceux-ci la charge déwattée  $B_1 E_1$  ayant pour effet de ramener le point de fonctionnement  $B_1$  de la charge du réseau en  $E_1$  sur le lieu décrit par la tension  $V_0$  au départ, laquelle tension est réglée par un deuxième régulateur de potentiel agissant sur l'excitation des générateurs de telle façon que le voltmètre convenablement compensé placé au départ indique une tension constante  $V_0' = OG_1$  à tous régimes.

Or on peut démontrer qu'à tous régimes de charge du réseau, le rendement de la transmission sera le meilleur si le lieu décrit par  $E_1$ , extrémité de  $OE_1 = V_0$ , est un cercle de rayon infiniment grand, c'est-à-dire une droite parallèle à  $O_1 D_1$  telle que  $DD'$ , qui, dans des cas comme ceux que nous envisageons ici, passe sensiblement par le milieu du tronçon  $O_2 O_1$  représentant la puissance réactive absorbée par la ligne à vide. En pratique le problème se posera et se résoudra donc comme suit:

Connaissant le diagramme tripolaire de la ligne  $OO_2 O_1 D_1$ , le lieu décrit par le courant  $OB$  ou par son correspondant  $O_1 B_1$  lorsque la charge varie à l'arrivée, connaissant aussi toutes les particularités du problème (surcharges à prévoir, variations possibles du décalage des récepteurs, capacité de surcharge des compensateurs, etc.) et s'étant fixé la tension  $V_0$  à ne pas dépasser au départ, on choisira trois points par lesquels devra passer la circonférence décrite par l'extrémité du vecteur représentatif de  $V_0$ . Ces trois points devront être aussi rapprochés que possible de la droite de rendement le meilleur  $DD'$ . L'un pourra être le point d'intersection d'une circonférence de centre  $O$  et de rayon égal à la tension  $V_0$  à ne pas dépasser, avec la droite représentative de la puissance de surcharge ou de pleine charge à l'arrivée; un deuxième pourra être un point très voisin de  $DD'$  ou sur  $DD'$  dans la région correspondant par exemple au régime auquel la ligne sera ordinairement soumise; le troisième enfin sera choisi en prenant en particulière considération le régime qu'il pourra convenir d'assurer au départ lorsque la ligne sera à vide à l'arrivée. Ce choix s'inspirera également de la répercussion qu'il aura sur la puissance des compensateurs. Ce sera donc une affaire d'espèce. Les trois points choisis, on pourra facilement déterminer le centre de la circonférence à laquelle ils appartiendront et ceci fait, on construira pour un point quelconque de cette circonférence, par exemple  $E_1$  dans la fig. 4, le triangle  $O_2 E_1 G_1$  semblable au triangle  $O_2 O' O$ , ce qui donnera  $E_1 G_1 = m_1 m' Z' I_0$  et par conséquent  $Z'$ , l'impédance de compensation, puisque le diagramme donne directement  $I_0 = O_2 E_1$  alors que les rapports de transformation des transformateurs de mesure sont à considérer comme des quantités données.

Voilà, Messieurs, les deux modes de réglage sur lesquels je désirais attirer votre attention en raison de la portée qu'ils peuvent avoir pour le cas des grandes lignes de transmission. Comme je l'ai déjà dit, j'ai laissé de côté d'autres moyens de réglage, parcequ'ils n'ont guère qu'un intérêt théorique. Je ne me dissimule d'ailleurs pas que tout ce qui précède ne constitue qu'une base à l'aide de laquelle tous les problèmes qui se posent dans la pratique peuvent, moyennant une interprétation correcte, être étudiés dans le cadre qui leur est propre. Le premier pas à faire consisterait à considérer une ligne avec transformateurs-élévateurs au départ et transformateurs-abaisseurs à l'arrivée. En remplaçant les dits transformateurs par leurs circuits équivalents rapportés aux tensions de la ligne à l'arrivée et au départ, on serait ramené au cas précédent et à un diagramme tripolaire de l'ensemble ligne-transformateurs un peu différent de celui de la ligne seule et au moyen duquel le problème du réglage de la tension à l'arrivée, soit au secondaire des transformateurs-abaisseurs, pourrait être traité comme ci-haut. On passerait ensuite

au cas des lignes hétérogènes formées de plusieurs tronçons homogènes, à celui des lignes en parallèle où apparaît le problème du partage des puissances réelles et réactives, à celui des lignes simples, doubles ou multiples alimentées par une ou plusieurs sources, enfin à celui des réseaux bouclés. On serait ainsi conduit à des *diagrammes multipolaires* dont on pourrait se servir pour l'étude du problème de la régulation comme cela a été le cas du diagramme tripolaire pour la ligne simple seule.

Il ne saurait me venir à l'esprit d'aborder ici, même de loin, ces problèmes qui sont parmi les plus complexes en raison de la diversité des cas qui peuvent se présenter. Il existe d'ailleurs une abondante littérature qui traite de problèmes analogues (Blondel, Bunet, Brylinski, Thielemans, etc., dans la R. G. E. 1920—1921). Je m'arrête donc ici non sans émettre le vœu que les études auxquelles l'on s'adonne chez nous en vue de doter le pays de réseaux à très haute tension, se préoccupent peut-être un peu plus qu'elles ne l'ont fait jusqu'ici des questions de réglage par le moyen d'appareils compensateurs grâce auxquels il me semble qu'il sera possible de réaliser un programme de large développement sans sortir, en fait de tensions, de celles qui me paraissent devoir être suffisantes si je considère les distances à franchir et les puissances à transmettre. C'est ce dont j'ai cherché à m'inspirer dans les projets et réalisations dont il m'a été donné de m'occuper.

Der *Vorsitzende* verdankt Professor Landry seinen formvollendeten Vortrag und konstatiert mit Freuden, dass die Schweiz nicht nur gute Ingenieure, sondern auch vorzügliche Professoren besitzt, im besten Sinne des Wortes.

*Bauer*: Auf dem Gebiete der Kompensation des Spannungsabfalles sind wir alle Anfänger. Bei der Wahl der Höchstspannungen in der Schweiz stunden sich zwei verschiedene Auffassungen gegenüber. Prof. Landry hat bei denselben, wie ich seinem Referate entnehme, in erster Linie die Kompensation des Spannungsabfalles im Auge gehabt, bei der Schweizerischen Kraftübertragung suchten wir die Lösung durch Spannungserhöhung am Ausgangspunkt der Leitungen. Die erstere Lösung bringt aber auch gewisse Schwierigkeiten praktischer Art mit sich. Wer soll beispielsweise bei Energielieferung ins Ausland die Anlagen zur Verbesserung des Leitungsfaktors erstellen und betreiben, wer soll die dafür notwendigen oft beträchtlichen Mittel aufbringen. Diese Frage ist um so schwieriger zu lösen je kurzfristiger die Verträge sind, die eingegangen werden müssen.

*Vaterlaus*: Wir haben schon seit Jahren gegen einen schlechten  $\cos \varphi$  gekämpft und haben die Lösung in der Aufstellung von Phasenkompensatoren, Synchronmotoren oder Kondensatoren studiert, bei allen diesen Anwendungsarten sind wir aber zum Ergebnis gelangt, dass die Sache sich nicht lohnt. Ich kann aus diesem Grunde rein tarifarische Massnahmen nicht ohne weiteres von der Hand weisen. Vielleicht liegt die Lösung der Frage in der Anwendung beider Mittel. Der kleine Leistungsfaktor ist grösstenteils bedingt durch schlecht belastete Transformatoren und Motoren. Auch hier sollte von den Werken der Hebel angesetzt werden, indem unnötig grosse Transformatoren und Motoren nicht zugelassen werden.

*Filliol-Genève*: In den wichtigsten Verbrauchszentren liegen in der Regel Reservestationen, wäre es nicht denkbar, dass die Generatoren als Synchronmaschinen laufend, den Leistungsfaktor des Netzes verbessern helfen, ohne ihrem Zweck als Reservemaschinen zu dienen, entzogen zu werden?

*Calame-Baden*: Tarifarische Massnahmen sind nicht ohne weiteres von der Hand zu weisen. Die Verbraucher sollten aber nicht nur bei kleinem  $\cos \varphi$  einen Zuschlag zahlen müssen, sondern auch an der Erreichung eines hohen Leistungsfaktors durch Gewährung von Rabatten direkt interessiert werden.

*Vaterlaus-Baden*: Bei den Nordostschweizerischen Kraftwerken ist dieser Weg bereits beschrieben worden.

*Weber-Zürich* redet einer Verständigung zwischen den Werken bei Parallelarbeiten auch bezüglich der Verteilung der wattlosen Energie das Wort.