

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 49 (1958)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent : Résultats des essais effectués à ce sujet sur le réseau de Lausanne par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le r...

**Autor:** Gaden, D.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058523>

### **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:** 20.01.2026

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

# BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET  
DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

## Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent

Résultats des essais effectués à ce sujet sur le réseau de Lausanne  
par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux

par D. Gaden, Genève

621.311.153.2

L'auteur rappelle succinctement la façon dont il propose de caractériser la variabilité de la consommation de la clientèle d'un réseau, ceci selon un procédé qu'il a antérieurement exposé dans le Bulletin [5]<sup>1)</sup>. Il utilise ce procédé pour interpréter les essais effectués en mars 1957 sur le réseau de Lausanne, par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux. Il en dégage la notion d'imprécision dynamique du réglage, rapport entre les écarts quadratiques moyens des variations de fréquence et des variations de charge consommée. Il montre l'intérêt pratique que revêt la connaissance de cette imprécision dont la valeur dépend de l'inertie  $PD^2$  des masses tournantes, de la rapidité de réponse du réglage (promptitude) et de son amortissement.

Der Verfasser gibt eine kurze Zusammenfassung der von ihm vorgeschlagenen Art, die durch die Energie-Konsumenten verursachten Schwankungen des Energiebedarfs eines elektrischen Netzes zu kennzeichnen. Das Verfahren wurde von ihm im Bulletin schon früher beschrieben [5]<sup>1)</sup>. Er wendet es an, um die Ergebnisse der Messungen zu interpretieren, die im März 1957 durch die Studienkommission des SEV für die Regelung grosser Netzverbände im Netz der Stadt Lausanne durchgeführt wurden. Er entwickelt den Begriff der dynamischen Ungenauigkeit der Regelung, d. h. des Verhältnisses zwischen der mittleren quadratischen Abweichung der Schwankungen der Frequenz und der aufgenommenen Leistung. Er verweist auf den praktischen Wert der Kenntnis dieser Ungenauigkeit, die von der Schwungmasse  $GD^2$  der rotierenden Teile, der Reaktionsgeschwindigkeit der Regelung und deren Dämpfung abhängt.

### I. Introduction

Le réglage automatique de vitesse des groupes générateurs de puissance a pour but de maintenir la fréquence de la tension alternative du réseau à sa valeur de consigne, quelle que soit la charge consommée par la clientèle. Toutefois, si ce but peut être atteint (à l'insensibilité près du réglage) en régime permanent, c'est-à-dire une fois la charge stabilisée à une valeur quelconque mais constante, ceci n'est plus le cas en régime transitoire, au cours des variations continues de la charge consommée, telles qu'elles se révèlent en pratique. Ces variations sont en réalité relativement faibles, par rapport à la charge de base; mais elles n'en provoquent pas moins des variations de fréquence parce que, du fait de la valeur limitée de sa rapidité de réponse (promptitude), le réglage ne peut pas adapter à tout instant la puissance motrice à la puissance résistante. La différence entre ces puissances doit dès lors être fournie ou absorbée par l'énergie cinétique des masses tournantes, aux dépens de la constance de la fréquence.

Ces variations de fréquence que le réglage laisse subsister, constituent sa marge d'imprécision et le problème se pose de savoir quelle est la largeur à laquelle il est nécessaire de la limiter et quels sont les moyens d'y parvenir.

Il sortirait du cadre de cet exposé de discuter de la première de ces deux questions. Notons seulement que si lorsqu'un réseau fonctionne isolément, la marge d'imprécision de la tenue de sa fréquence n'est dictée que par le désir de satisfaire sa clientèle, il n'en est plus de même quand le réseau considéré est interconnecté avec d'autres. L'importance des fluctuations qui apparaissent dans la puissance transmise par une ligne reliant deux réseaux, est en effet directement fonction de la largeur des marges d'imprécision que témoignent ces deux réseaux, dans la tenue de leurs fréquences, lorsqu'ils fonctionnent indépendamment l'un de l'autre [1]<sup>1)</sup>. En vue de limiter les fluctuations précitées, les exigences relatives à la marge d'imprécision deviennent alors beaucoup plus sévères et cela d'autant plus qu'augmentent les puissances mises en jeu dans chacun des réseaux.

La marge d'imprécision du réglage d'un réseau dépend évidemment de l'importance des variations de la charge consommée par sa clientèle; mais celle-ci étant supposée connue, les moyens propres à limiter la largeur de cette marge résident dans les caractéristiques du réglage, lesquelles comportent essentiellement les trois facteurs suivants:

1° l'inertie  $PD^2$  des masses tournantes des machines du réseau, principalement de ses groupes générateurs qui en constituent la majeure partie. Elle est définie par le temps de lancer  $T_a$ ;

<sup>1)</sup> Voir la bibliographie à la fin de l'article.

2° la rapidité de réponse des régulateurs, c'est-à-dire leur aptitude à corriger un écart de fréquence par une variation de puissance motrice s'effectuant à une vitesse plus ou moins grande. Elle est définie par le temps  $\tau'$  caractéristique de la promptitude<sup>2)</sup>;

3° l'amortissement du réglage lors d'un retour au régime, en présence des effets du coup de bélier. Cette considération touche de près celle de la stabilité du réglage, dont l'amortissement donne en quelque sorte la mesure. Or, on sait que pour telles conditions hydrauliques de l'installation, la stabilité de réglage exige une rapidité de réponse d'autant plus faible ( $\tau'$  grand) que l'inertie des masses tournantes est réduite ( $T_a$  petit). Réciproquement, la stabilité du réglage peut être obtenue avec une rapidité de réponse d'autant plus prononcée ( $\tau'$  petit) que l'inertie des masses tournantes est élevée ( $T_a$  grand).

Par ailleurs, au point de vue de la précision du réglage, celle-ci sera d'autant meilleure que la rapidité de réponse sera prononcée ( $\tau'$  petit) et que l'inertie des masses tournantes sera élevée ( $T_a$  grand). Il s'agit finalement de trouver un compromis économiquement acceptable dans le choix des  $PD^2$  des groupes générateurs, choix qui commande à la fois d'une part, pour des raisons de stabilité, la rapidité de réponse du réglage et d'autre part, par voie de conséquence, la marge d'imprécision qui sera tolérée, naturellement en tenant compte de l'importance des variations de la charge consommée par la clientèle.

On conçoit dès lors l'intérêt qu'il y a à pouvoir s'appuyer, en vue de ce choix du  $PD^2$  des groupes générateurs, sur des résultats d'expérience de nature à éclairer la question, tant au point de vue de la variabilité de la charge, qu'à celui de la qualité qu'il est nécessaire de donner au réglage. C'est le but de ce mémoire que d'apporter des premiers résultats de ce genre.

Revenant maintenant aux variations que nous prendrons en considération, nous préciserons qu'elles sont du domaine des petits écarts relatifs, lequel correspond à la règle générale du fonctionnement du réglage, les variations plus grandes résultant par exemple de déclenchements de ligne, ne constituant dans l'exploitation que des cas exceptionnels pour lesquels il est possible de tolérer des écarts momentanés de fréquence plus élevés.

Les variations en question sont par ailleurs caractérisées par la vitesse avec laquelle elles évoluent autour d'une valeur moyenne de base, à partir de laquelle nous conviendrons de les compter, en les rapportant en outre à la dite valeur. Dès lors, afin de donner à cette notion de vitesse d'évolution une valeur quantitative, de la manière que nous préciserons plus loin, nous parlerons dorénavant de variations à fréquences basses et de variations à fréquences hautes, en nous réservant encore de chiffrer ces gammes de fréquence. Il est évident qu'à amplitude égale, plus les variations sont de fréquences élevées, plus grande sera la valeur maximum que leur vitesse d'évolution atteindra.

Ayant donc décidé d'utiliser dans le sens précité le terme «fréquences» auquel nous affecterons

<sup>2)</sup> Pour un régime déterminé  $\tau'$  est le temps qu'il faut pour qu'en présence d'un écart de vitesse  $\Delta\omega$  de valeur constante  $\epsilon$  %, le réglage modifie la puissance motrice de  $\epsilon$  % de sa valeur de régime. Voir «Recommandations au sujet du réglage de vitesse des groupes turbine hydraulique—alternateur», Publication n° 0205.1956 de l'ASE, fig. 4.

le symbole  $\nu$ , nous éviterons par la suite de parler de variations de fréquence  $\Delta f$  de la tension alternative du réseau, ceci pour éliminer toute source de confusion possible. Nous remplacerons dans la terminologie du présent mémoire les variations de fréquence  $\Delta f$  par les variations de vitesse  $\Delta\omega$  étant entendu qu'il s'agit de celles des groupes générateurs, lesquelles sont, en valeur relative, toutes égales à  $\Delta f$ .

En ce qui concerne la question de la fréquence des variations de charge et de vitesse, nous remarquerons que puisqu'il s'agit de juger des qualités du réglage, les variations à considérer sont celles qui l'amènent à fonctionner en régime transitoire. Or, on conçoit aisément qu'au cours de variations de fréquences très basses, le réglage demeure pour ainsi dire constamment en équilibre; en d'autres termes, il passe pratiquement par une succession de régimes permanents. L'examen du résultat de telles variations peut renseigner sur l'insensibilité du réglage ou sur son statisme s'il en existe un, car dans le cas contraire les variations de vitesse sont nulles (toujours à l'insensibilité près). Cet examen ne peut par contre pas renseigner sur le comportement dynamique du réglage, d'où ressortent ses véritables qualités. Nous pourrions donc laisser de côté les variations de fréquences très basses et ne tenir compte dans notre étude que de celles à fréquences plus élevées que l'on peut déjà lire sur des enregistrements de quelques minutes. Nous reviendrons d'ailleurs plus loin sur cette question de limite de fréquences.

Dans le problème du réglage, tel que nous le considérerons ici, le circuit de réglage fermé au complet — à savoir d'une part l'installation réglée: le réseau avec ses groupes générateurs, et d'autre part l'équipement de réglage — doit être pris comme un tout. Cet ensemble est sollicité par les variations  $\Delta p_r$  de charge, constituant la raison d'être du réglage et jouant le rôle de grandeur d'entrée du système. Nous mesurerons également ces variations  $\Delta p_r$  à partir de la moyenne temporelle de la charge et les rapporterons en outre à ladite moyenne. Quant à la grandeur de sortie, ce sera évidemment la vitesse, plus exactement ses variations  $\Delta\omega$  qui correspondent au résultat du réglage.

Il y a donc lieu de chercher à caractériser sous une forme adéquate:

a) les données du réglage, soit pour un réseau déterminé, les variations  $\Delta p_r$  de charge, en d'autres termes le comportement de sa clientèle en ce qui concerne la variabilité de sa consommation,

b) le résultat du réglage: les variations de vitesse  $\Delta\omega$ .

La comparaison de ce résultat avec les données précédentes permettra de déterminer:

c) le comportement au transfert du circuit de réglage, en un mot sa transmittance, qui définit ses qualités du point de vue où nous nous sommes placés.

Dans le cadre limité que nous nous sommes fixés et qui doit surtout avoir trait aux résultats obtenus sur le réseau de Lausanne, nous n'avons pas la possibilité de revenir en détail sur la façon

dont sont conçus et établis les documents *a*), *b*) et *c*). Nous en ferons seulement un rappel succinct et intentionnellement simplifié, dépouillé de la rigueur mathématique dont elle peut en réalité être accompagnée. Nous prions les intéressés de bien vouloir se reporter aux exposés que nous avons déjà présentés, au sujet de l'analyse spectrale, à l'Association Suisse des Electriciens [5] et à la Société Française des Electriciens [2] en 1952 et 1955, puis à leur bibliographie.

## II. Transmittance du circuit de réglage [document *c*)]

Dans le domaine des petits écarts qui est celui du problème auquel nous nous intéressons, le fonctionnement des différents éléments du circuit de réglage peut être considéré comme linéaire. Dès lors, pour tel genre d'évolution de la grandeur d'entrée: la variation  $\Delta p_r$  de charge, celle de la grandeur de sortie: la variation  $\Delta \omega$  de vitesse, reste toujours de la même forme et il suffit, pour caractériser le comportement du circuit, de considérer le rapport des deux grandeurs.

Il est évidemment possible de faire choix entre plusieurs genres de variations  $\Delta p_r$  de charge, par exemple le saut brusque entre deux valeurs constantes ou la variation linéaire en fonction du temps, etc. Pour les raisons qui ressortiront de la suite de cet exposé, nous porterons le nôtre sur la variation sinusoïdale en régime stationnaire; du fait de la linéarité du comportement du circuit, la variation  $\Delta \omega$  de vitesse se révélera sous une forme également sinusoïdale. Dans ces conditions, le rapport complexe entre la grandeur de sortie  $\Delta \omega$  et la grandeur d'entrée  $\Delta p_r$ , est simplement défini par le rapport des amplitudes de leurs variations et le déphasage qu'elles présentent entre elles.

Eu égard au but que nous poursuivons, nous ne retiendrons que la première caractéristique, le module de la transmittance<sup>3)</sup>:

$$\left| \frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right| = g(\nu) \quad (1)$$

qui est une fonction de la fréquence  $\nu$  des variations sinusoïdales.

Cette fonction  $g(\nu)$  présente les deux particularités suivantes dont il est facile de comprendre les raisons.

Tout d'abord, lorsque l'on descend vers des fréquences  $\nu$  de plus en plus basses, c'est-à-dire au fur et à mesure que les mouvements de vannage et les variations de vitesse deviennent de plus en plus lents, les effets sur le réglage du coup de bélier et de l'accélération des masses tournantes, diminuent progressivement d'importance jusqu'à disparaître complètement. La transmittance (module) ne dépend alors plus que du temps  $\tau'$  caractéristique de la promptitude du réglage et l'on démontre [2]

(en faisant abstraction de tout statisme) que la fonction  $g(\nu)$  tend vers la forme:

$$\left| \frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right| = g(\nu) = 2\pi\nu\tau' \quad (2)$$

En d'autres termes, sur un diagramme à échelles logarithmiques, la courbe représentative de la fonction  $g(\nu)$  admet pour asymptote dans le domaine des basses fréquences, une droite de pente  $+1$ .

Si l'on avance au contraire vers des fréquences  $\nu$  de plus en plus hautes, l'action du réglage, du fait de sa promptitude limitée, diminue progressivement d'importance jusqu'à disparaître complètement et tout se passe finalement comme si l'ouverture du vannage demeurait invariable. Dans ces conditions, la transmittance ne dépend plus que du temps  $T_a$  caractéristique de l'inertie spécifique des masses tournantes (ou temps de lancer) et l'on démontre [2], que la fonction  $g(\nu)$  prend la forme:

$$\left| \frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right| = g(\nu) = \frac{1}{2\pi\nu T_a} \quad (3)$$

En d'autres termes, sur un diagramme à échelles logarithmiques, la courbe représentative de la fonction  $g(\nu)$  admet pour asymptote, dans le domaine des hautes fréquences, une droite de pente  $-1$ .

Les diagrammes des fig. 5 (à échelles logarithmiques) et 6 (à échelles linéaires) sont un exemple de l'allure de la courbe de transmittance  $g(\nu)$ . Entre les deux asymptotes précitées, cette courbe présente un maximum qui dépend du degré de stabilité du réglage, c'est-à-dire de son amortissement en présence des effets du coup de bélier.

Nous considérerons finalement cette fonction  $g(\nu)$ , plus exactement sa courbe représentative, comme constituant le document *c*) caractérisant la transmittance du circuit de réglage et d'où ressortent ses véritables qualités.

## III. Caractéristique de la variabilité de la consommation de la clientèle du réseau [document *a*)]

La charge consommée par la clientèle d'un réseau et par conséquent ses écarts  $\Delta p_r$ , sont une fonction aléatoire du temps dont les variations découlent de concours de circonstances relevant du hasard. Ceci ne veut toutefois pas dire qu'étant donné ce caractère aléatoire, il ne soit pas possible de fixer l'importance et certains caractères de ces variations.

Sur la base d'un échantillon de relevé de la charge consommée, on peut déjà calculer la valeur quadratique moyenne des écarts (leur valeur efficace ou déviation type) ou, ce qui revient au même, son carré: le carré moyen des écarts (dispersion)  $[\overline{\Delta p_r(t)}]^2$ . Toutefois, cette notion, depuis longtemps bien connue, ne suffit ici plus car, d'après l'exposé du chapitre précédent, on conçoit que l'effet sur le réglage des variations de charge dépend, non seulement de leur importance, mais également de la fréquence  $\nu$  avec laquelle elles se produisent. Il s'agit

<sup>3)</sup> Dans le langage des spécialistes de courants faibles, ce module est souvent désigné par le terme de «gain»; mais surtout dans le cas qui nous occupe, ce terme ne nous paraît pas particulièrement indiqué.

donc d'établir la répartition du carré moyen des écarts dans la gamme des fréquences.

Si la fonction  $\Delta p_r(t)$  était périodique, il serait possible d'y distinguer divers harmoniques, caractérisés chacun par sa fréquence  $\nu$  et le carré moyen  $[\Delta p_r(t)]^2$  de ses valeurs instantanées, c'est-à-dire son énergie<sup>4</sup>). On serait ainsi en mesure de dresser son spectre, qui se présenterait sous une forme discontinue: une valeur finie de l'énergie, pour diverses fréquences  $\nu$ , en nombre fini.

Toutefois, la fonction aléatoire  $\Delta p_r(t)$  n'est en réalité nullement périodique; mais on peut néanmoins y considérer un nombre infini de fréquences  $\nu$  et faire correspondre à chaque bande infiniment étroite d'entre elles ( $\nu, \nu + d\nu$ ), une composante  $d[\Delta p_r(t)]^2$  infiniment petite de l'énergie. Il est ainsi possible d'établir encore un spectre, qui n'est plus de forme discontinue, mais continue, et dont les ordonnées ne sont plus des énergies, mais des densités énergétiques<sup>4</sup>) spectrales  $A_p(\nu)$ .

Le carré moyen des écarts s'obtient par intégration de cette fonction spectrale  $A_p(\nu)$  de la densité:

soit, au total, entre la fréquence nulle et la fréquence infinie:

$$[\Delta p_r(t)]^2 = \int_0^{\infty} A_p(\nu) d\nu \quad (4)$$

soit entre deux fréquences limites constituant les frontières du domaine de fréquences à considérer:

$$\left| [\Delta p_r(t)]^2 \right|_{\nu_1}^{\nu_2} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_p(\nu) d\nu \quad (5)$$

On constate que par ce moyen du spectre continu, le but recherché a bien été atteint: la fonction spectrale  $A_p(\nu)$  fixe la répartition du carré moyen des écarts selon les fréquences.

Lorsque la fonction aléatoire  $\Delta p_r(t)$  présente un caractère de stationnarité, lequel s'exprime mathématiquement d'une façon rigoureuse, la fonction spectrale  $A_p(\nu)$  est parfaitement déterminée. A l'encontre de la fonction  $\Delta p_r(t)$  aléatoire, la densité spectrale  $A_p(\nu)$  est alors une fonction certaine. Un grand nombre de phénomènes physiques aléatoires révèlent précisément ce caractère de stationnarité et c'est le cas de la charge consommée par la clientèle d'un réseau [3, 4].

Naturellement, afin de déterminer cette fonction spectrale  $A_p(\nu)$ , il faudrait théoriquement considérer la fonction aléatoire  $\Delta p_r(t)$  pendant un temps infini, ce qui n'est pratiquement pas possible. Opérer sur plusieurs échantillons, de durée limitée, de la fonction  $\Delta p_r(t)$ , c'est effectuer plusieurs expériences, au sens probabiliste du mot, et l'on se trouve dès lors ramené à un problème de statistique. Il ne faut donc pas s'étonner que les résultats de ces expériences: la forme de la fonction

spectrale  $A_p(\nu)$  ou l'allure de sa courbe représentative, présentent une certaine dispersion. Ceci est dans la nature même des choses et ne doit pas faire douter du caractère général de phénomène, correspondant à une unique fonction spectrale  $A_p(\nu)$ .

On peut par ailleurs dire plus encore de cette fonction spectrale. L'étude théorique de modèles, dont le comportement aléatoire est régi par des

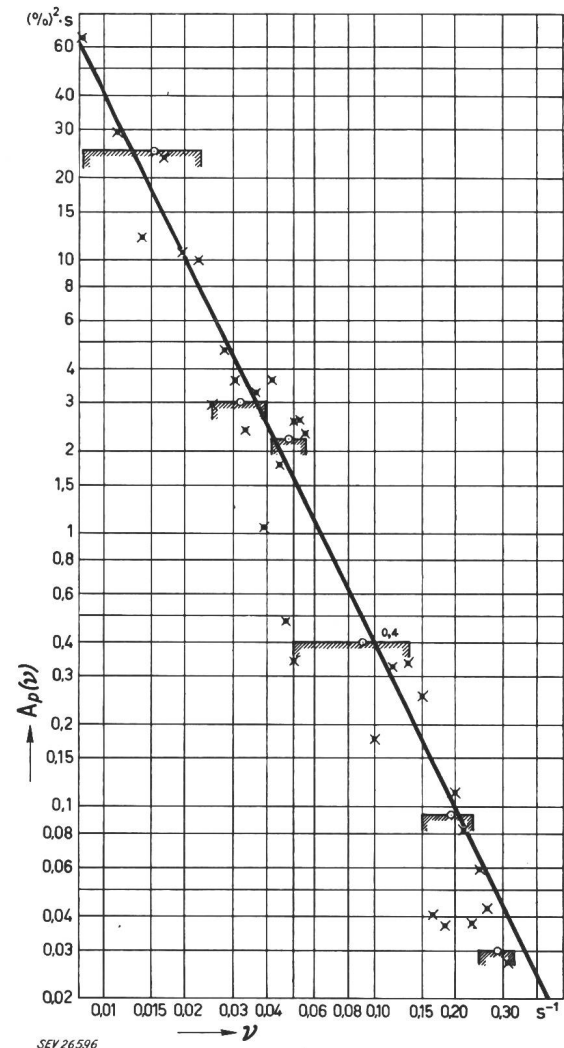


Fig. 1  
Spectre des variations de charge  $\Delta p_r$   
Densité énergétique  $A_p(\nu)$  des variations de charge en fonction de leur fréquence  
Echelles logarithmiques

fonctions dérivées d'un processus de Poisson<sup>5</sup>), montre [3, 4] que dans le domaine des fréquences  $\nu$  relativement élevées, la fonction  $A_p(\nu)$  peut être assimilée à une fonction en  $\nu^{-2}$ . En d'autres termes, sur un diagramme à échelles logarithmiques, la courbe représentative de la fonction spectrale

<sup>4</sup>) Les termes *énergie* et *énergétique* sont employés ici dans un sens particulier auquel les physiciens sont plus accoutumés que les électriciens. Dans le langage de ces derniers, la notion d'énergie de la variation d'une grandeur, évoluant selon une loi sinusoïdale du temps, correspond à celle du carré de sa valeur efficace.

<sup>5</sup>) La fonction aléatoire considérée (la charge consommée par la clientèle par exemple) évolue par l'intervention de perturbations survenant à des instants consécutifs  $\dots, \tau_{j-1}, \tau_j, \tau_{j+1}, \dots$  qui se répartissent au hasard au cours du temps. Si les nombres  $n_1, n_2, \dots, n_k$  de ces instants  $\tau_j$  appartenant respectivement aux intervalles de temps non empiétant  $(t_1, t_1'), (t_2, t_2'), \dots, (t_k, t_k')$ , sont indépendants (au sens du calcul des probabilités), on dit que les instants  $\tau_j$  sont répartis en processus de Poisson.

$A_p(\nu)$  est une droite de pente  $-2$ , dans la gamme des fréquences assez élevées.

Nous avons effectué un premier contrôle expérimental de cette proposition, d'après un relevé de la charge consommée par la clientèle du réseau de Lausanne, le 18 décembre 1952, entre 11 h 53 et 12 h 27 [5]. Les résultats en ont été satisfaisants au-delà d'une fréquence de l'ordre de  $\nu = 0,015$  Hz. Les résultats de l'analyse de la charge consommée par ce même réseau le 28 mars 1957 de 11 h 37 à 11 h 49 et qui font l'objet du spectre de la fig. 1 ont apporté la confirmation des premiers, au-delà d'une fréquence de l'ordre  $\nu = 0,01$  Hz. Nous y reviendrons plus loin.

Nous considérerons finalement le spectre  $A_p(\nu)$  des variations  $\Delta p_r$  de charge, plus exactement sa courbe représentative, comme constituant le document a) caractérisant la variabilité de la consommation de la clientèle du réseau.

#### IV. Caractéristiques des variations de vitesse [document b)]

Le document b) caractérisant les variations  $\Delta\omega$  de vitesse est constitué, de la même façon que le document a) caractérisant les variations  $\Delta p_r$  de charge, par un spectre  $A_\omega(\nu)$ . On démontre, ce que le bon sens permet d'ailleurs aisément de saisir, que pour chacune des fréquences  $\nu$  il existe entre les valeurs de la fonction spectrale  $A_\omega(\nu)$ , de celle  $A_p(\nu)$  et de la transmittance  $g(\nu)$ , la relation suivante:

$$A_\omega(\nu) = A_p(\nu) \cdot [g(\nu)]^2 \quad (6)$$

Ainsi, si l'on connaît le spectre  $A_p(\nu)$  des variations  $\Delta p_r$  de charge et la transmittance  $g(\nu)$  du circuit de réglage, il est possible de prédéterminer le spectre  $A_\omega(\nu)$  des variations  $\Delta\omega$  de vitesse. Ceci fait, on peut calculer sur une certaine bande de fréquences le carré moyen des écarts de vitesse ou l'écart quadratique moyen de vitesse, qui peut être utilement comparé à l'écart quadratique moyen des variations de charge.

Réciproquement, si l'on connaît les spectres  $A_p(\nu)$  des variations  $\Delta p_r$  de charge et  $A_\omega(\nu)$  des variations  $\Delta\omega$  de vitesse, il est possible d'en déduire la transmittance  $g(\nu)$  du circuit de réglage et de juger ainsi de ses qualités.

Remarquons encore que si la courbe représentative de la fonction spectrale  $A_p(\nu)$  des variations de charge se présente, comme indiqué au chapitre précédent, sous la forme d'une droite de pente  $-2$  dans un diagramme à échelles logarithmiques, la courbe représentative de la fonction spectrale  $A_\omega(\nu)$  des variations de vitesse tracée dans un diagramme du même genre, doit tendre:

1° dans le domaine des fréquences basses, vers une droite de pente zéro, puisque dans ce domaine la courbe  $g(\nu)$  de la transmittance admet pour asymptote une droite de pente  $+1$ ;

2° dans le domaine des fréquences hautes, vers une droite de pente  $-4$ , puisque dans ce domaine la courbe  $g(\nu)$  de la transmittance admet pour asymptote une droite de pente  $-1$ .

#### V. Conditions des essais entrepris sur le réseau de Lausanne, le 28 mars 1957

Ces essais ont été effectués entre 11 h 37 et 11 h 49 à un moment de la journée où l'on pouvait s'attendre aux plus importantes variations de charge de la clientèle. Cette charge a, en effet, progressivement passé pendant ces 12 minutes d'environ 42 à 46 MW.

Le réseau de Lausanne était alors alimenté au moyen d'une ligne séparée par deux groupes de 32 MW de la Centrale de Chandoline de l'Énergie de l'Ouest-Suisse. L'un d'entre eux, N° 5, fonctionnait à ouverture bloquée en fournissant 27 MW; l'autre, N° 4, était en réglage avec un statisme de l'ordre de 1 %<sup>6)</sup>.

Les groupes N°s 1, 2 et 3 de la Centrale, raccordés aux mêmes conduites, débitaient au total 60 MW environ sur un autre réseau que celui de Lausanne.

La charge consommée par la clientèle du réseau de Lausanne a été mesurée au Centre de Pierre-de-Plan à l'aide du wattmètre enregistreur de la Commission d'Études pour le Réglage des Grands Réseaux de l'Association Suisse des Electriciens [6]. La puissance fournie par les turbines n'en différait que par la valeur des pertes en ligne et des pertes dans les alternateurs. Cette puissance a donc varié en chiffre rond de 44 à 48 MW. La fréquence (vitesse) a été simultanément mesurée par le fréquencesmètre enregistreur de ladite Commission.

La vitesse de déroulement des deux appareils était de 4 mm/s et leurs échelles:

pour le wattmètre de 4,15 mm par %  
pour le fréquencesmètre de 15 mm par %

Ces échelles se sont malheureusement révélées trop faibles, spécialement celles du fréquencesmètre. En effet, malgré sa prise de charge pourtant importante pendant la durée de l'essai — prise de charge relativement très lente par rapport aux possibilités du réglage — la clientèle lausannoise n'a témoigné que de variations peu marquées dans la gamme des fréquences susceptibles de provoquer le fonctionnement du réglage en régime transitoire. En d'autres termes, la dentelle du relevé de la charge est d'allure assez estompée, ainsi que l'on peut s'en rendre compte par l'examen de la fig. 2 qui reproduit, en dimensions réduites, une fraction des enregistrements. De ce fait, les variations de vitesse sont restées dans un ordre de grandeur bien faible et la lecture du relevé a été rendue difficile.

Pour les deux raisons que nous venons d'évoquer, il faut reconnaître que les résultats des essais du 28 mars 1957 de Lausanne sont probablement entachés d'une certaine incertitude du point de vue quantitatif. Toutefois, ces résultats comportent, ne fût-ce que du côté qualitatif, des enseignements si intéressants qu'ils nous ont paru dignes d'une publication, car ils doivent, à nos yeux, constituer un encouragement à persévérer dans la voie de

<sup>6)</sup> Ce statisme de 1 % rapporté à la puissance de 32 MW du groupe en réglage, correspond à un statisme de 1,4 % rapporté à la charge consommée de 46 MW, le second groupe étant à ouverture bloquée.

l'analyse spectrale, en en perfectionnant les moyens d'application.

Cinq échantillons des relevés simultanés de charge et de vitesse ont été retenus, trois d'une minute de durée:

11 h 38 m 30 s ... 11 h 39 m 30 s  
11 h 43 m 30 s ... 11 h 44 m 30 s  
11 h 46 m 30 s ... 11 h 47 m 30 s

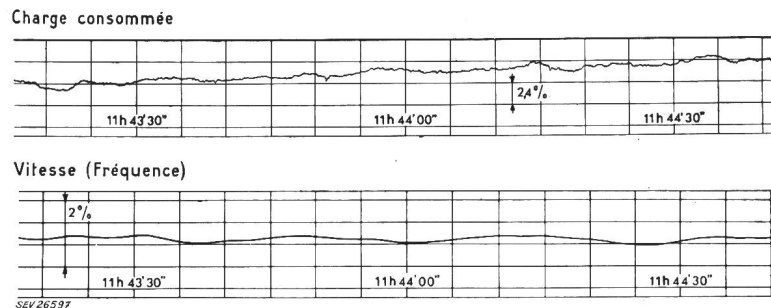
et deux de six minutes de durée:

11 h 37 m 30 s ... 11 h 43 m 30 s  
11 h 43 m 0 s ... 11 h 49 m 0 s

Les ordonnées de ces échantillons ont été lues avec les plus grandes précautions et le meilleur soin, à des intervalles d'abscisse de 0,5 s pour les échantillons d'une minute et de 3 s pour les échantillons de six minutes. Les premiers ont permis d'explorer le domaine des fréquences de  $\nu = 0,05$  Hz à  $\nu = 0,3$  Hz et les seconds celui de  $\nu = 0,01$  Hz à  $\nu = 0,05$  Hz en chiffre rond.

Ces lectures et la détermination des valeurs de la densité énergétique spectrale<sup>7)</sup>,  $A_p(\nu)$  pour les variations de charge et  $A_\omega(\nu)$  pour les variations de vitesse, ont été effectuées par les soins de l'Institut de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Polytechnique

Fig. 2  
Echantillons de relevés de puissance et de vitesse



de l'Université de Lausanne. Les opérations ont été exécutées à l'aide de la calculatrice électronique de l'Ecole Polytechnique Fédérale, obligeamment mise à disposition par son Institut de Mathématiques Appliquées<sup>8)</sup>.

Les résultats qui vont suivre sont rigoureusement ceux déduits des calculs, sans aucune retouche, ni essais de correction pour les mieux faire correspondre aux valeurs auxquelles on pouvait s'attendre pour les constantes du réglage.

## VI. Résultats des essais

### 1° Le spectre $A_p(\nu)$ des variations $\Delta p_r$ de charge

Nous traiterons en premier lieu du spectre  $A_p(\nu)$  des variations  $\Delta p_r$  de charge, constituant le document *a)* caractérisant la variabilité de la consommation de la clientèle. Il fait l'objet du diagramme à échelles logarithmiques de la fig. 1 comportant en abscisse les fréquences  $\nu$  en Hz ( $s^{-1}$ ) et en ordonnée les densités énergétiques spectrales  $A_p(\nu)$  en  $(\%)^2 \cdot s$ .

Les points marqués d'une croix correspondent chacun à la valeur de la densité obtenue, pour telle fréquence  $\nu$ , en prenant la moyenne des résultats

<sup>7)</sup> Cette détermination a été conduite selon la troisième méthode exposée dans le mémoire publié par le Bulletin de l'ASE [5]. Voir également l'étude publiée par M. le Professeur Ch. Blanc [7].

<sup>8)</sup> Nous saisissons l'occasion qui nous est offerte pour adresser nos bien sincères remerciements aux Directeurs de ces deux Instituts: MM. les Professeurs Ch. Blanc et E. Stiefel.

des trois échantillons d'une minute (pour  $\nu > 0,05$  Hz) ou des deux échantillons de six minutes (pour  $\nu < 0,05$  Hz). Comme il fallait s'y attendre (voir chapitre III), ils témoignent d'une certaine dispersion qui est dans la nature même des choses.

Pour nous aider dans le tracé de la courbe figurative de la fonction spectrale  $A_p(\nu)$ , nous avons encore effectué des moyennes par bandes successives de fréquences. Ces bandes sont indiquées, sur le diagramme, au moyen de traits cotoyés par des hachures et les valeurs moyennes ainsi trouvées par des points marqués d'un cercle; on constate qu'ils s'alignent convenablement sur une droite de pente  $-2$ , comme la théorie le faisait prévoir. Cette droite correspond à la fonction spectrale:

$$A_p(\nu) = \frac{0,4 \cdot 10^{-2}}{\nu^2} (\%)^2 \cdot s \quad (7)$$

En intégrant cette fonction entre  $\nu_1 = 0,015$  Hz et  $\nu_2 = 0,2$  Hz, on obtient comme valeur du carré moyen des écarts de charge:

$$[\Delta p_r(t)]^2 = 0,4 \cdot 10^{-2} \left( \frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} \right) = 0,246 (\%)^2 \quad (8)$$

d'où un écart quadratique moyen de 0,495 %. Cet écart est sensiblement plus faible que celui de 0,86 % calculé, dans le même domaine de fréquences, sur la base des enregistrements exécutés le 18 décembre 1952 entre 11 h 53 et 12 h 27 [5], alors que la clientèle lausannoise consommait environ 25 MW, au lieu de 42...46 MW le 28 mars 1957.

Dans le domaine de fréquences  $\nu_1 = 0,01$  Hz à  $\nu_2 = 0,2$  Hz, le carré moyen des écarts de charge passe à 0,38  $(\%)^2$  et l'écart quadratique moyen à 0,615 %.

### 2° Le spectre $A_\omega(\nu)$ des variations $\Delta \omega$ de vitesse

Le spectre  $A_\omega(\nu)$  des variations  $\Delta \omega$  de vitesse [document *b)*], fait l'objet du diagramme à échelles logarithmiques de la fig. 3. Pour ne pas la surcharger, nous n'y avons indiqué que les moyennes trouvées par bandes successives de fréquences.

Le tracé de la courbe figurative de la fonction spectrale  $A_\omega(\nu)$  peut, à première vue, paraître présenter plus d'aléas que celui de la droite figurative de la fonction  $A_p(\nu)$  (fig. 1). Cependant, il n'est guère possible d'hésiter, si l'on se souvient (voir chapitre IV) que cette courbe  $A_\omega(\nu)$  doit admettre, comme asymptotes:

dans le domaine des fréquences basses, une droite de pente zéro; elle correspond dans notre cas à la fonction limite:

$$A_{\omega}(\nu) = 0,068 \quad (\%)^2 \cdot s \quad (9)$$

dans le domaine des fréquences hautes, une droite de pente  $-4$ ; elle correspond dans notre cas à la fonction limite:

$$A_{\omega}(\nu) = 0,014 \cdot 10^{-4} \nu^{-4} \quad (\%)^2 \cdot s \quad (10)$$

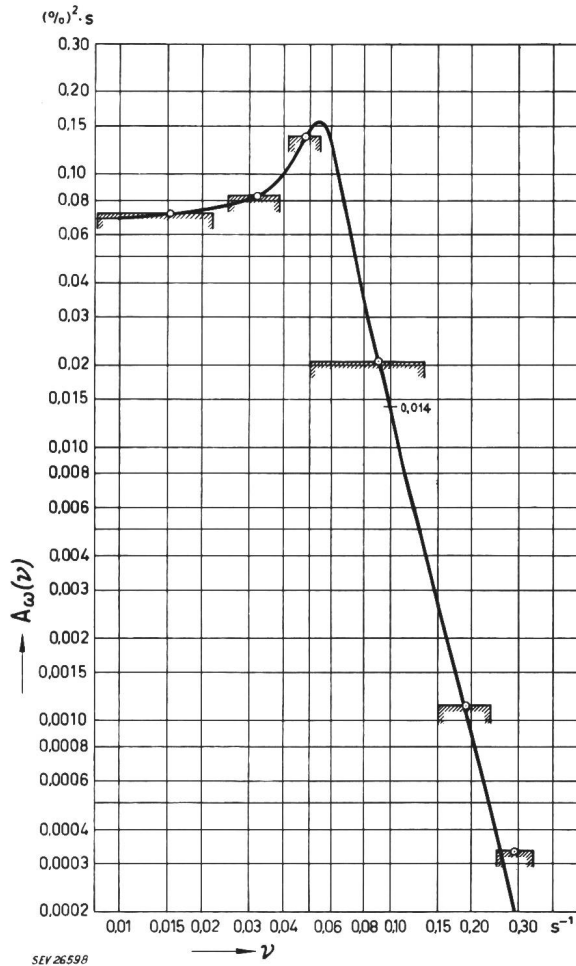


Fig. 3  
Spectre des variations de vitesse  $\Delta\omega$   
Densité énergétique  $A_{\omega}(\nu)$  des variations de vitesse  
en fonction de leur fréquence  
Echelles logarithmiques

Or, les points indiqués se prêtent convenablement à un tracé satisfaisant à ces deux conditions. Tout au plus pourrait-on avoir des doutes sur la forme du sommet de cette courbe; mais ici encore ces doutes peuvent pratiquement être levés par le contrôle qu'il est possible de faire, comme nous l'exposerons plus loin, de l'abscisse du maximum de la courbe en question.

A partir de la courbe  $A_{\omega}(\nu)$  du diagramme à échelles logarithmiques de la fig. 3, il est facile de tracer la courbe  $A_{\omega}(\nu)$  du diagramme à échelles linéaires de la fig. 4. Par intégration graphique de cette dernière courbe entre  $\nu_1 = 0,01$  Hz et  $\nu_2 = 0,2$  Hz, on calcule pour le carré moyen des écarts de vitesse  $[\Delta\omega(t)]^2 = 0,0073 (\%)^2$  et pour l'écart quadratique moyen 0,085 %.

Ainsi, d'après les essais de Lausanne, dans le domaine de fréquences de 0,01 Hz à 0,2 Hz, on peut dire qu'en chiffre rond, à un écart quadratique moyen de charge de 1 % correspond un écart quadratique moyen de vitesse de 0,14 %. Mais pourquoi, pourrait-on se demander, se limiter à ce domaine de fréquences? La réponse à cette question est la suivante:

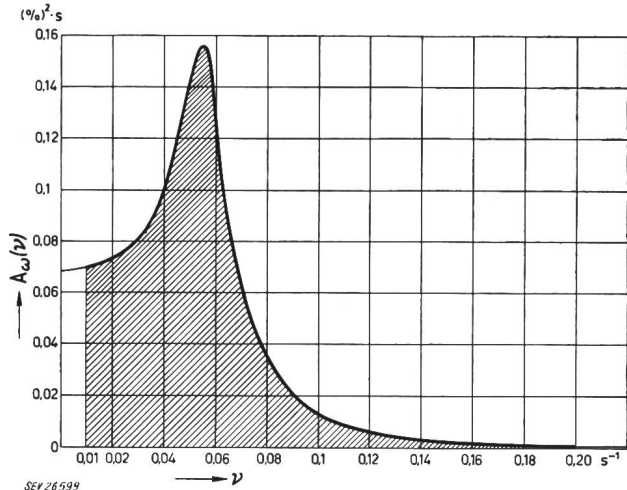


Fig. 4  
Spectre des variations de vitesse  $\Delta\omega$   
Densité énergétique  $A_{\omega}(\nu)$  des variations de vitesse  
en fonction de leur fréquence  
Echelles linéaires

a) Au-delà de la fréquence de 0,2 Hz, la densité énergétique spectrale  $A_p(\nu)$  des variations de charge diminue considérablement et celle  $A_{\omega}(\nu)$  des variations de vitesse devient absolument négligeable. En d'autres termes, la contribution à la valeur de l'écart quadratique moyen de vitesse, des variations de fréquences supérieures à 0,2 Hz est pratiquement nulle.

b) Afin de comparer logiquement un écart quadratique moyen de vitesse à un écart quadratique moyen de charge, il est indispensable que ces écarts soient calculés dans les mêmes domaines de fréquences. Or, en dessous de la fréquence  $\nu = 0,01$  Hz, des enregistrements de quelques minutes ne permettent pas de juger du comportement de la clientèle, plus exactement de la densité énergétique  $A_p(\nu)$  de ses variations  $\Delta p_r$  de charge. Dans ces conditions, toute extrapolation dans le domaine des fréquences inférieures à 0,01 Hz ne peut conduire qu'à un leurre. En outre, l'exploration de ce domaine n'offre pas d'intérêt, parce que le réglage ne s'y comporte plus en régime transitoire (voir chapitre I) et que son fonctionnement ne l'amène plus qu'à passer par une succession de régimes permanents.

### 3° La transmittance $g(\nu)$ du circuit de réglage

Les ordonnées de la courbe figurative de la transmittance  $g(\nu)$  du circuit de réglage [document c)], s'obtiennent [voir chapitre IV, équation (6)] en prenant pour chaque fréquence  $\nu$  la racine carrée du rapport de l'ordonnée de la courbe  $A_{\omega}(\nu)$  (fig. 3) à celle de la courbe  $A_p(\nu)$  (fig. 1).

C'est ainsi qu'a été tracée la courbe  $g(\nu)$  dans le diagramme à échelles logarithmiques de la fig. 5 et dans le diagramme à échelles linéaires de la fig. 6. Dans le premier d'entre eux la courbe  $g(\nu)$  admet comme asymptotes:

a) dans le domaine des fréquences basses, la droite [voir équation (2)]:

$$g(\nu) = 2\pi\nu\tau' = 4,12\nu \quad (11)$$

d'où l'on déduit, comme valeur du temps  $\tau'$  caractéristique de la promptitude:

$$\tau' = 0,66 \text{ s}$$

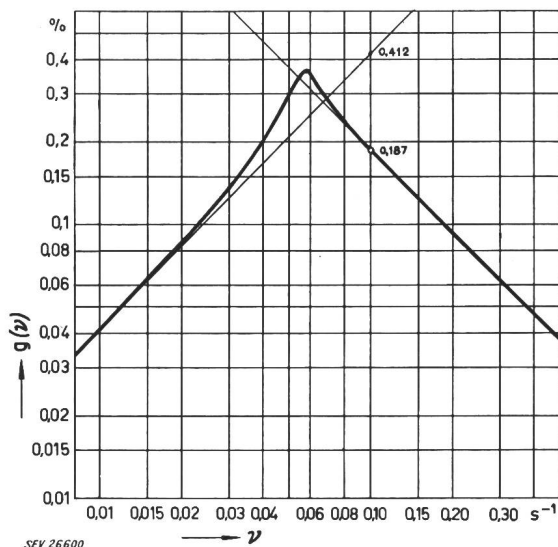


Fig. 5

Transmittance du circuit de réglage  $g(\nu)$

Rapport entre l'amplitude des variations de vitesse et l'amplitude des variations de charge, en régime sinusoïdal, en fonction de leur fréquence  
Echelles logarithmiques

b) dans le domaine des fréquences hautes, la droite [voir équation (3)]:

$$g(\nu) = \frac{1}{2\pi\nu T_a} = \frac{0,0187}{\nu} \quad (12)$$

d'où l'on déduit, comme valeur du temps  $T_a$  caractéristique de l'inertie spécifique des masses tournantes (temps de lancer):

$$T_a = 8,5 \text{ s}$$

Or, si comme nous venons de le montrer, les asymptotes de la courbe figurative de la transmittance  $g(\nu)$  permettent de calculer très commodément les valeurs de ces deux temps caractéristiques essentiels du réglage, dans le cas qui nous occupe ces valeurs nous paraissent en réalité trop faibles.

Eu égard au  $PD^2$  des masses tournantes des deux groupes générateurs utilisés pour les essais, le temps  $T_a$  devrait plutôt être de l'ordre de dix secondes. Quant au temps  $\tau'$  nous avons renoncé à en vérifier la valeur par une autre méthode, nous rendant compte de l'incertitude qui, pour les raisons évoquées au chapitre V, pèse sur les résultats de nos mesures du point de vue quantitatif.

Dans le diagramme à échelles linéaires de la fig. 6, la courbe figurative de la transmittance  $g(\nu)$  a été prolongée en pointillé, en deçà de la fréquence  $\nu = 0,01 \text{ Hz}$ , jusqu'à la fréquence nulle. Si l'on ne tient pas compte du statisme, cette courbe prolongée doit passer par l'origine. Dans le cas contraire, elle doit progressivement s'infléchir pour rejoindre une ordonnée à l'origine correspondant au statisme. Nous avons déjà indiqué pourquoi l'exploration de ce domaine des très basses fréquences ne nous paraissait pas digne d'intérêt.

Enfin, nous constatons que la transmittance  $g(\nu)$  passe par un maximum pour une fréquence  $\nu = 0,058 \text{ Hz}$  correspondant à la période propre  $T_r = 17,2 \text{ s}$  du réglage. Or, on sait que dans le cas d'une installation de très haute chute, comme celle de Chandoline (env. 1700 m), la période propre du réglage est pratiquement égale à la période de résonance de la conduite forcée.

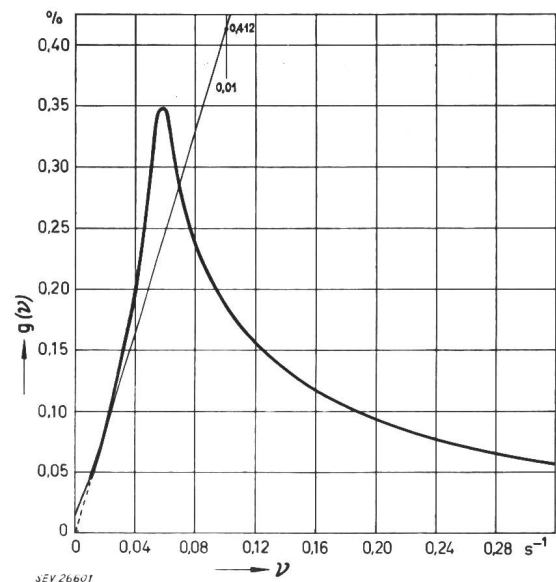


Fig. 6

Transmittance du circuit de réglage  $g(\nu)$

Rapport entre l'amplitude des variations de vitesse et l'amplitude des variations de charge, en régime sinusoïdal, en fonction de leur fréquence  
Echelles linéaires

Si cette conduite était à caractéristique<sup>9)</sup> unique, la période de résonance aurait pour expression  $4l/c$  ( $l$  longueur,  $c$  célérité). Toutefois, quand il s'agit d'une conduite à caractéristiques multiples (plusieurs tronçons d'épaisseurs et de diamètres différents) la période de résonance, pour une variation continue de l'ouverture du vannage, n'est pas celle obtenue en considérant les  $n$  tronçons successifs:

$$T_{r0} = 4 \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_i}{c_i} \right) \quad (13)$$

Comme l'ont montré Camichel, Eydoux et Gariel [8] la période apparente de résonance  $T_{ra}$  est plus petite que celle correspondant à l'expression (13);

<sup>9)</sup> Caractéristique  $q = \frac{c v_0}{2g H_0}$  d'Allievi.

elle peut être calculée selon le procédé indiqué par Favre [9] et basé sur l'hypothèse d'une conduite à caractéristique linéairement variable. Le résultat des opérations est le suivant:

Longueur des conduites	$l$	$= 5930$	m
Célérité moyenne	$c_m$	$= 1131$	m/s
Période des conduites	$T_{r0}$	$= 20,95$	s
Diamètre à l'extrémité amont	$d_a$	$= 1,42$	m
Célérité à l'extrémité amont	$c_a$	$= 923$	m/s
Diamètre à l'extrémité aval	$d_0$	$= 0,985$	m
Célérité à l'extrémité aval	$c_0$	$= 1340$	m/s
Facteur de réduction <sup>10)</sup>	$K$	$= 0,81$	
Période apparente de résonance	$T_{ra}$	$= 17$	s

La concordance entre le résultat du calcul de la période apparente de résonance  $T_{ra}$  et le résultat de la mesure de la période propre du réglage  $T_r$  est donc satisfaisante. Ce contrôle de l'abscisse (fréquence) du maximum de la courbe figurative de la transmittance  $g(\nu)$  constitue en même temps une vérification de l'abscisse (légèrement différente) du maximum de la courbe figurative de la densité énergétique spectrale  $A_\omega(\nu)$  des variations de vitesse.

## VII. Conclusions

Les résultats des essais effectués le 28 mars 1957 sur le réseau de Lausanne ont apporté des renseignements extrêmement instructifs, au sujet de l'utilisation de l'analyse spectrale pour l'étude des variations  $\Delta p_r$  de charge et des variations consécutives  $\Delta \omega$  de vitesse (fréquence); nous les résumons de la façon suivante.

Tout d'abord, en ce qui concerne la variabilité de la charge consommée par la clientèle d'un réseau [document a)], les essais ont apporté une nouvelle confirmation du fait que la théorie avait fait prévoir, à savoir que la densité énergétique des écarts décroît comme l'inverse du carré de leurs fréquences  $\nu$ , du moins dans la gamme des

également bien à ce que le calcul permettait d'attendre.

Pour ce qui est plus spécialement de la transmittance  $g(\nu)$ , qui constitue la clef pour passer du spectre des variations de charge au spectre des variations de vitesse, on distingue dans sa courbe représentative, tracée sur un diagramme à échelles logarithmiques (fig. 5):

1° un sommet, avec un maximum à la fréquence propre du réglage. Cette partie de la courbe caractérise le degré de stabilité du réglage;

2° à gauche, vers les basses fréquences  $\nu$ , une branche qui tend vers l'asymptote de pente +1:

$$g(\nu) = 2\pi\tau'\nu \quad (2)$$

caractéristique de la promptitude du réglage;

3° à droite, vers les hautes fréquences  $\nu$ , une branche qui tend vers l'asymptote de pente -1:

$$g(\nu) = \frac{1}{2\pi T_a} \nu^{-1} \quad (3)$$

caractéristique de l'inertie spécifique des masses tournantes.

En vue de prédéterminer, au moyen de cette clef, l'écart quadratique moyen  $\varepsilon_\omega$  des variations de vitesse, à partir de l'écart quadratique moyen  $\varepsilon_p$  des variations de charge satisfaisant à la relation (14), il faut en toute rigueur établir le spectre des variations de vitesse (fig. 3 et 4), puis opérer une intégration graphique, comme expliqué au chapitre IV sous 3°.

Un calcul approximatif, *par défaut*, peut toutefois être effectué en assimilant la courbe représentative de la transmittance  $g(\nu)$  à ses deux asymptotes. On aboutit alors à l'expression suivante de l'écart quadratique moyen  $\varepsilon_{\omega d}$  des variations de vitesse de la gamme  $\nu = 0,01 \dots \nu = 0,2$  Hz:

$$\varepsilon_{\omega d} = \varepsilon_p \sqrt{\frac{(2\pi\tau')^2}{95} \left[ \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau'T_a}} - 0,01 \right]} + \frac{1}{95(2\pi T_a)^2} \left[ \frac{(2\pi\sqrt{\tau'T_a})^3}{3} - 42 \right] \quad (15)$$

fréquences présentant un intérêt en vue de l'examen des qualités du réglage. Pour les raisons que nous avons déjà exposées, cette gamme s'étend, dans le cas du réglage considéré, de  $\nu = 0,01$  Hz à  $\nu = 0,2$  Hz; ces limites ne doivent pas être bien différentes dans d'autres cas étant donné que les temps  $\tau'$  caractéristique de la promptitude et  $T_a$  caractéristique de l'inertie spécifique restent du même ordre de grandeur.

Si l'on admet ces limites, la fonction spectrale  $A_p(\nu)$  des variations de charge a dès lors pour expression:

$$A_p(\nu) = \frac{\varepsilon_p^2}{95} \nu^{-2} \quad (14)$$

ou  $\varepsilon_p$  désigne l'écart quadratique moyen.

La forme du spectre  $A_\omega(\nu)$  des variations de vitesse [document b)] et l'allure de la transmittance  $g(\nu)$  du circuit de réglage [document c)], répondent

<sup>10)</sup> Voir fig. 5 op. cit. sous [9].

Cette valeur  $\varepsilon_{\omega d}$  de l'écart quadratique moyen pêche par défaut, parce que si le calcul prend en considération deux des caractéristiques essentielles du réglage: la promptitude  $\tau'$  et l'inertie spécifique  $T_a$ , il ne tient pas compte de la troisième: le degré de stabilité du réglage, qui définit le sommet de la courbe de la transmittance  $g(\nu)$ . Il faut donc écrire:

$$\varepsilon_\omega = k \varepsilon_{\omega d} \quad \text{avec} \quad k > 1 \quad (16)$$

Ainsi, selon les résultats des essais du 28 mars 1957, avec:

$$\varepsilon_p = 0,615 \% \quad \tau' = 0,66 \text{ s} \quad T_a = 8,5 \text{ s}$$

on trouve:

$$\varepsilon_{\omega d} = 0,0735 \% \quad \text{au lieu de} \quad \varepsilon_\omega = 0,0855 \%$$

d'où  $k = 1,16$ .

L'expression (15) peut néanmoins être utilisée, si par un calcul plus serré ou mieux par des résul-

tats d'expériences à multiplier, il est possible de faire l'estimation du coefficient  $k$ , selon les degrés de stabilité réalisés dans la pratique.

Les résultats des essais du 28 mars 1957 sur le réseau de Lausanne constituent plus qu'un encouragement à poursuivre les expériences et leur valorisation par l'analyse spectrale. Si ces résultats doivent être pris, du point de vue quantitatif, avec certaines réserves, la cause ne doit pas en être attribuée à la méthode, mais à la faiblesse des variations constatées, ainsi qu'à l'échelle de nos appareils de mesure. Les expériences doivent être renouvelées si possible sur des réseaux où la clientèle témoignera d'une consommation plus mouvementée, avec des appareils dotés de plus grandes échelles, surtout en ce qui concerne le fréquencesmètre.

Du point de vue où nous nous sommes placés, les qualités du réglage se résument finalement, pour la pratique, au rapport de l'écart quadratique moyen  $\varepsilon_\omega$  des variations de vitesse, à l'écart quadratique moyen  $\varepsilon_p$  des variations de charge consommée par la clientèle. Ce rapport qui doit être rattaché à une certaine gamme de fréquences  $\nu$ , définit l'imprécision dynamique du réglage, notion qui nous paraît pouvoir rendre de très utiles services. Nous espérons que nos lecteurs, spécialement ceux s'occupant de l'exploitation des réseaux, par-

tageront notre intérêt pour ces recherches s'étendant à l'influence du  $PD^2$  des groupes générateurs, puis à celles de la promptitude et du degré de stabilité du réglage, sur son *imprécision dynamique*.

### Bibliographie

- [1] Chevallier, A., P. Passérieux et M. Holleville: Etude et pré-détermination des fluctuations de puissance sur une liaison d'interconnexion de deux réseaux. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> série, t. 4(1954), n° 43, p. 401...418.
- [2] Gaden, D.: Considérations sur la précision du réglage. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> série, t. 2(1952), n° 16, p. 179...197.
- [3] Lehmann, G.: Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> série, t. 3(1953), n° 34, p. 593...595.
- [4] Fortet, R.: Spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7<sup>e</sup> série, t. 4(1954), n° 47, p. 712...717.
- [5] Gaden, D.: Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. Bull. ASE t. 46(1955), n° 2, p. 45...56.
- [6] Juillard, E.: Instrumentation; appareils spéciaux nécessités par les essais. Bull. ASE t. 43(1952), n° 13, p. 571...574.
- [7] Blanc, Ch.: A propos de l'étude des fonctions aléatoires. Bull. techn. Suisse rom. t. 81(1955), n° 18, p. 265...268.
- [8] Camichel, C., D. Eydoux et M. Gariel: Etude théorique et expérimentale des coups de bélier. Toulouse: Ed. Privat; Paris: Dunod 1919.
- [9] Favre, H.: La résonance des conduites à caractéristiques linéairement variables. Bull. techn. Suisse rom. t. 68(1942), n° 5, p. 49...54; n° 6, p. 61...66.

### Adresse de l'auteur:

D. Gaden, professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, directeur des Ateliers des Charmilles S. A., Genève.

## Aus der Praxis der Leistungsfrequenzregelung<sup>1)</sup>

Von F. Schär, Olten

621.316.726 : 621.316.728 : 621.311.161

*In der Arbeit wird kurz über den Zusammenschluss der Netze mit Hilfe der Leistungsfrequenzregelung berichtet. Sie erläutert die für die Steuerung mehrerer Maschinen verwendeten Blockschemata und beschreibt auch ungünstige Dispositionen. Es werden Messungen der Übergabeleistung sowie des statischen und dynamischen Verhaltens der Turbinenregler besprochen und Forderungen daraus abgeleitet.*

*Bref aperçu de l'interconnexion de réseaux avec réglage fréquence-puissance. Description des schémas fonctionnels utilisés pour la commande de plusieurs machines, de même que des dispositions défavorables. Exposé des mesures de la puissance de transfert et du comportement statique et dynamique des régulateurs des turbines, ainsi que des exigences qui en résultent.*

### 1. Einführung

Obschon die Entwicklung auf dem Gebiet der Leistungsfrequenzregelung nicht abgeschlossen ist, dürften die folgenden Ausführungen von Interesse sein, da sie auf Grund bisher erreichter Resultate zu weiteren Verbesserungen anregen können.

### 2. Allgemeines

Fig. 1 zeigt schematisch einige grosse Netze mit ihren Kuppelleitungen, welche an den Übergabepunkten mit Messwertumformern versehen sind, die über Fernregulierkanäle zu Regulierlastverteilern führen. Diese sind derart mit den Regelkraftwerken verbunden, dass die Übergabeleistung oder auch Summen davon an den verschiedensten Orten geregelt und konstant gehalten werden können. Beispielsweise gestattet der Netzregler in Lavorgo, die Übergabeleistung in Mettlen, Gösgen oder Bottmingen zu regulieren. Wie das Schema erkennen lässt, können mit Hilfe der Leistungsfrequenzregelung die Energieflüsse derart beherrscht werden, dass sich

die Vorteile einer mehr regionalen Betriebsführung mit denjenigen des Verbundbetriebes kombinieren lassen.

### 3. Die Disposition der Maschinensteuerung

Aus Fig. 2 ist die Disposition zur Steuerung von 4 Maschinen in Form eines Blockschemas ersichtlich. Der mechanische Netzregler des Kraftwerkes Piottino ist bereits im Betrieb, der elektronische kurz vor der Fertigstellung. Von diesem wird später noch die Rede sein.

Wie das Blockschema erkennen lässt, ist jede Maschine über je 1 Potentiometer an 2 Sammelschienen angeschlossen. Die eine davon führt eine konstante Spannung, die andere ist mit dem Netzregler verbunden. Mit dem linken Potentiometer kann der gewünschte Regellastanteil, mit dem anderen der Grundlastanteil der Maschine eingestellt werden, womit dem Wasser-Zu- und Abfluss gebührend Rechnung getragen wird.

Bei den Aggregaten links in Fig. 2 wird der Stellbefehl über einen elektronischen Vorverstärker bzw. Messwandler und einen Hauptverstärker dem Dreh-

<sup>1)</sup> Das Manuskript wurde am 11. Februar 1958 der Redaktion eingereicht.