

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	84 (1958)
Heft:	14
Artikel:	Quelques considérations sur le réglage fréquence-puissance et son application au réseau belge
Autor:	Denis, François
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-63497

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraisant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'E.P.U.L. (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: † G. Epitaux, arch. à Lausanne
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: Cl. Grosgruin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermann, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; E. d'Okolski, arch.;
Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: A. Stucky, ing.
Membres: M. Bridel; R. Neeser, ing.; P. Waltenspuhl, arch.
Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, ing.
Rédaction et Edition de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 26.—	Etranger . . .	Fr. 30.—
Sociétaires	»	22.—	» . . .	27.—
Prix du numéro	»	1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II. 57 75, Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 275.—
1/2 » » 140.—
1/4 » » 70.—
1/8 » » 35.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Quelques considérations sur le réglage fréquence-puissance et son application au réseau belge, par François Denis, ingénieur en chef à la Société C.P.T.E., à Bruxelles

L'épuration des eaux usées dans le cadre de l'urbanisme, par Yves Maystre, ingénieur E.P.F.

Association amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

Nécrologie: Victor Amaudruz, ingénieur

Divers — Carnet des concours — Documentation générale — Service de placement

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LE RÉGLAGE FRÉQUENCE-PUISSEANCE ET SON APPLICATION AU RÉSEAU BELGE¹

par FRANÇOIS DENIS, Ingénieur en chef à la Société C.P.T.E., à Bruxelles

Il y a quelques années, l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, U.N.I.P.E.D.E., et l'Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité, U.C.P.T.E., ont, au cours de leurs travaux, reconnu l'intérêt de la marche en parallèle des réseaux de l'Europe occidentale. Afin de rendre possible cette marche en parallèle, elles ont recommandé la mise en application, dans chaque pays, d'un réglage automatique secondaire basé sur la loi bien connue liant la puissance d'interconnexion à la fréquence et dénommé réglage fréquence-puissance.

L'exploitation d'un complexe aussi étendu ne peut en effet se concevoir sans l'application de règles bien définies à observer par chacun des participants :

La première règle est que, à la fréquence nominale, chaque réseau constituant respecte, dans les limites nécessaires, les programmes d'échanges concertés avec ses voisins. Ceci revient à dire qu'il doit adapter en permanence sa production à sa consommation, ou en d'autres termes, qu'il doit compenser ses propres variations de charge. Nous revien-

drons plus loin sur l'expression « dans les limites nécessaires » introduite ci-dessus.

La seconde règle est de faire participer chaque réseau au réglage de la fréquence, en modifiant l'équilibre production-consommation dans un sens ou dans l'autre en fonction de l'écart de la fréquence par rapport à sa valeur nominale.

Cette seconde règle équivaut en quelque sorte à une règle d'entraide, puisqu'en cas de défaillance dans l'un des réseaux, entraînant par exemple une chute générale de fréquence, les autres réseaux sont amenés à modifier leur production dans un sens tendant à corriger cet écart de fréquence.

Il est facile de démontrer que, pour observer ces deux règles, chaque réseau doit agir sur la production de ses machines de manière à faire tendre vers zéro l'expression bien connue :

$$\Delta E = \Delta P + \lambda \Delta f$$

dans laquelle ΔE représente l'écart de réglage global ;

ΔP l'écart des échanges avec les réseaux voisins par rapport au programme, soit $P - P_o$, P et P_o étant comptés positivement en cas d'exportation ;

¹ Communication faite le 5 septembre 1957, à Zurich, aux 2^{mes} Journées d'information de l'Association suisse pour l'Automatique.

Δf = l'écart de fréquence, $f - f_0$;

λ = un coefficient appelé énergie réglante du réglage. On cherche en général à rendre λ aussi voisin que possible de l'énergie réglante naturelle du réseau K , de manière à assurer le maximum de concordance entre les réglages primaire et secondaire.

Rappelons ici que l'énergie réglante K est définie par le rapport

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

dans lequel Δf est la variation de fréquence du réseau considéré provoquée par une variation de charge ΔP .

Les installations de réglage réalisées ou prévues dans les divers réseaux d'Europe occidentale appelés à s'interconnecter sont basées sur l'observation des règles définies ci-dessus, mais du fait des conditions particulières de chaque réseau, il apparaît dès à présent que les installations seront fort différentes les unes des autres.

L'objet essentiel de la présente communication est de montrer comment le problème s'est posé en Belgique et comment les diverses exigences particulières ont été satisfaites. Nous pensons que du fait de la similitude existant entre les réseaux suisses et les réseaux belges, tout au moins en ce qui concerne la subdivision en réseaux partiels commercialement distincts, les solutions adoptées en Belgique pourraient éveiller l'intérêt des exploitants suisses.

Toutefois, avant d'aborder cette question, revenons quelques instants sur l'expression « dans les limites nécessaires » introduite pour la tenue du programme à l'interconnexion.

Lorsqu'on examine le diagramme des échanges sur une ligne d'interconnexion, on constate qu'aux échanges suivant programme se superposent des fluctuations de périodes diverses. Pour simplifier, classons ces fluctuations en deux catégories :

— les fluctuations de période inférieure à la minute, composées en ordre principal d'oscillations de périodes de l'ordre de la seconde. On observe que leur amplitude croît avec la puissance des réseaux interconnectés par cette ligne. D'une manière assez générale, ces fluctuations rapides ne mettent pas en danger la tenue des interconnexions, et leur élimination par réglage, même si elle était possible, ne se justifierait pas. MM. Renchon et Daumerie, dans un rapport à la C.I.G.R.E. sur « L'image thermique de ligne aérienne », en 1956, ont montré l'insensibilité relative des lignes à ces fluctuations ;

— les fluctuations de période supérieure à la minute qui, elles, constituent en fait des échanges de compensation entre réseaux. Leur amplitude dépend de la nature des charges des réseaux interconnectés et de la rapidité d'intervention et de la précision des moyens mis en œuvre pour tenir le programme des échanges. Plus le dispositif de réglage est rapide et précis, mieux ces fluctuations sont éliminées du diagramme des échanges. Bien entendu, en contrepartie, moins on bénéficie de la compensation des variations de charge entre réseaux, plus les machines chargées du réglage sont sollicitées et plus coûteuses sont les opérations de réglage. Le prix de

l'installation de réglage elle-même croît avec la rapidité d'intervention. La solution à adopter doit donc résulter d'un compromis.

Les « limites nécessaires » dans lesquelles les programmes d'échange doivent être tenus dépendent essentiellement de la capacité de transport des lignes d'interconnexion et de leur état de charge. Ces limites peuvent donc varier dans le temps en fonction de ces deux paramètres. Par exemple, si, dans l'avenir, la puissance ou le nombre des lignes d'interconnexion vient à augmenter, il pourrait y avoir intérêt, du point de vue économie, à élargir les limites des écarts admissibles. Ceci revient à dire que les exigences de rapidité et de précision que l'on poserait aujourd'hui aux dispositifs de réglage par suite de la capacité assez limitée des liaisons internationales pourraient ne plus être nécessaires demain. L'apparition dans les réseaux de fortes charges intermittentes (fours électriques, gros lamoins) pourrait également reposer le problème. D'ores et déjà, on peut estimer que l'intérêt général résiderait dans la possibilité de permettre la compensation, sur le plan international, des variations dues à ces charges.

Ces considérations nous incitent à exprimer l'avis qu'il est peu indiqué, à l'heure actuelle, sauf peut-être dans des cas particuliers, de chercher à réaliser par une technique poussée et onéreuse la vitesse et la précision de réglage maxima.

1. Le problème en Belgique

1.1 Organisation de la production

Le réseau belge dont la charge maximum est de l'ordre de 2500 MW et la production exclusivement thermique est formé par la juxtaposition d'une dizaine de réseaux fortement interconnectés appartenant à des sociétés commercialement distinctes et dont la pointe de charge va de quelques dizaines de MW pour les plus petits à 600 MW pour le plus important. La coordination de l'exploitation de ces réseaux partiels est confiée à la Société pour la coordination de la production et du transport de l'énergie électrique (C.P.T.E.).

Chaque réseau partiel possède un centre de répartition, lequel définit le programme journalier de production de ses machines en tenant compte du diagramme présumé de sa charge et des programmes d'échanges avec le réseau général. Ces programmes de production sont modifiés au cours de la journée, à l'intervention du répartiteur, pour tenir compte d'écarts accidentels dans la production ou imprévus dans la charge. Le critère utilisé par le répartiteur est la valeur réelle des échanges avec ses voisins, confrontée avec le programme. Chaque réseau partiel procède donc à un certain réglage « manuel ». Il dispose en principe à cet effet d'une puissance de réglage qu'il met en œuvre par paliers, à l'intervention de son répartiteur. Il en résulte que le réglage des échanges est assez grossier et subit un certain retard. Par contre, il a l'avantage d'être sélectif au point de vue de l'économie relative des machines chargées du réglage.

Les programmes de production et d'échanges dont il est question ci-dessus ont été établis de commun accord avec la C.P.T.E.

Celle-ci a procédé aux opérations de coordination nécessaires et a tenu compte, notamment, des programmes d'échanges avec l'étranger. En cours de journée, la C.P.T.E. intervient pour corriger les écarts persistants qui se produisent sur les raccordements avec

l'étranger en modifiant, en accord avec les répartiteurs des réseaux partiels et suivant les critères d'économie, certains programmes de production.

Une telle organisation, sans le réglage automatique, conduit à des résultats assez favorables. En effet, les écarts apparaissant sur les liaisons d'interconnexion avec l'étranger dépassent rarement la valeur de 30 MW. Comparé à la pointe de charge du réseau belge, de l'ordre de 2500 MW, cet écart peut être considéré comme faible. Comparé à la capacité de chacune des liaisons d'interconnexion avec l'étranger, de l'ordre de 100 MW, cet écart apparaît au contraire très appréciable.

En ce qui concerne la fréquence lorsque le réseau belge est en parallèle avec ses voisins, aucun réglage permanent n'est effectué. Bien entendu, en cas de variation importante de la fréquence, la C.P.T.E. intervient pour apporter toute l'aide dont elle est capable, mais avec le retard inhérent à l'organisation existante.

1.2 *Conditions imposées dès l'origine au dispositif de réglage automatique*

1.2.1 Une seule zone.

L'une des questions les plus importantes qui s'est posée lors de l'étude du problème du réglage pour la Belgique était de savoir si l'on devait subdiviser le réseau belge en zones de réglage indépendantes, en fonction de la subdivision commerciale existante, chaque zone réglant en fréquence-puissance en fonction des échanges à ses frontières propres ou bien si l'on devait considérer le réseau belge comme un tout constituant une seule zone de réglage.

La première solution était la plus simple au point de vue organisation puisqu'elle laissait à chaque exploitant son entière autonomie. Mais du point de vue technique et économique, elle ne se justifiait pas. En effet, il aurait fallu installer autant de régulateurs qu'il y avait de réseaux partiels, et, du fait de l'interpénétration de ces réseaux, un très grand nombre de télémesures aurait été nécessaire. Par ailleurs, la création de multiples zones de réglage aurait supprimé l'avantage de la compensation partielle des écarts de charge entre réseaux. En d'autres termes l'effort total de réglage aurait été plus grand qu'il n'était nécessaire pour l'ensemble du réseau.

D'autre part, la capacité des liaisons entre les divers exploitants étant suffisante pour laisser passer en plus des échanges normaux, les écarts résultant du réglage manuel, il ne se justifiait pas de régler automatiquement les échanges sur ces liaisons.

Il a par conséquent été décidé de considérer le réseau belge comme une seule zone, devant être réglée suivant la loi fréquence-puissance. De cette décision a découlé le fait qu'une marge de réglage relativement faible, de $\pm 30\text{MW}$ était pratiquement suffisante, toutes autres conditions restant égales.

1.2.2 Maintien de l'organisation existante.

La seconde condition essentielle était que le dispositif de réglage devait se superposer à l'organisation existante décrite ci-dessus en la complétant et non en la modifiant. Cette condition était apparemment en contradiction avec la condition précédente consistant

à mettre sous la dépendance d'un régulateur central des unités dont la production était normalement fixée et contrôlée par les répartiteurs des réseaux partiels.

1.2.3 Maintien de la répartition économique de la production.

Le réglage automatique ne devait pas modifier substantiellement la répartition des charges sur les différentes unités, celle-ci étant déduite des règles d'économie en usage.

Cette condition entraînait comme conséquence la nécessité d'équiper du réglage un grand nombre d'unités de façon à pouvoir dégager à tout moment la puissance de réglage où elle se trouve, c'est-à-dire en principe sur les unités les moins économiques fonctionnant au moment considéré.

Cette condition du grand nombre d'unités à équiper découlait également du fait que, celles-ci étant toutes du type thermique, il était essentiel de réduire l'effort individuel de réglage sur chacune d'elles afin de ne pas perturber les conditions d'exploitation des chaufferies, ni affecter leur rendement.

2. **Choix du dispositif de réglage**

Les exigences résultant des trois conditions énoncées ci-dessus pouvaient difficilement être satisfaites simultanément par les dispositifs de réglage en usage il y a quelques années en France et actuellement encore aux Etats-Unis.

Dans ces dispositifs, le régulateur central transmet des ordres de réglage (augmenter ou diminuer) vers les moteurs variateurs de vitesse des machines, qui servent en quelque sorte d'intégrateurs d'ordres. Pour éviter des glissements de production sur ces machines, dus à l'imperfection des intégrateurs, des dispositifs d'équilibrage compliqués doivent être installés dans les centrales d'une part et au dispatching central d'autre part :

Ces dispositifs nécessitent non seulement l'introduction dans le circuit de réglage de la télémesure des productions des centrales réglantes mais également la transmission vers les centrales des ordres individuels corrigés par le dispositif d'équilibrage. Outre que ces complications augmentent considérablement le coût des installations et accroissent les risques et la gravité des perturbations, leur inconvénient essentiel en ce qui concerne l'application au réseau belge est que la totalité de la production des usines réglantes serait pratiquement mise sous la dépendance du régulateur central. Une telle situation ne pourrait être acceptée par les exploitants des réseaux constitutifs, ceux-ci devant de ce fait renoncer à une part importante de leur autonomie.

Il était indispensable que le dispositif de réglage transmette du dispatching central vers les unités non pas des ordres « augmenter » ou « diminuer » mais plutôt un signal fixant exactement et à tout moment la puissance de réglage demandée à chaque machine en supplément de la puissance produite en programme. La production de ces machines devait ainsi être asservie à ce signal, considéré comme niveau de référence. Il était ainsi possible de répartir avec précision l'effort de réglage entre les réseaux constituants dans des proportions déterminées au préalable et acceptées par chacun.

Les téléméasures de production en retour vers le dispatching pouvaient être évitées.

Par une coïncidence heureuse, c'est au moment où les moyens nécessaires pour satisfaire ces désiderata étaient recherchés que les premiers travaux de MM. Cahen et Chevallier, de l'Electricité de France, sur le réglage puissance-phase ont été connus.

Prenant le problème par l'autre bout, c'est-à-dire celui du réglage de la fréquence d'un grand réseau à l'aide de centrales disséminées dans ce réseau, puis en le développant pour faire intervenir la puissance échangée, l'Electricité de France a mis au point un ensemble d'équipements répondant non seulement à ses propres besoins mais également susceptibles de satisfaire d'une manière quasi parfaite à nos conditions d'exploitation et aux critères énoncés ci-dessus.

Afin de s'assurer de la réalité de ces avantages, des essais de réglage fréquence-puissance du réseau belge ont été décidés en 1953 et effectués en 1954, en pleine collaboration avec le service de l'Electricité de France.

2.1 L'installation d'essais

Cette installation, réalisée en 1954, comportait :

— l'asservissement individuel de la production de sept groupes répartis dans trois centrales, à la valeur d'un signal de référence appelé « niveau », suivant l'équation :

$$p = p_o + p_r N \quad (1)$$

avec : p = production de la machine en MW ;

p_o = programme moyen de production de la machine, en MW ;

p_r = participation maximum au réglage de la machine considérée, en MW ;

N = niveau, grandeur sans dimension, susceptible de varier de -1 à $+1$ au cours du réglage.

On voit qu'à chaque valeur du niveau correspond, à l'équilibre, une production bien définie pour chacune des machines et que pour l'ensemble de celles-ci, la puissance de réglage mise en jeu à un moment donné est donnée par :

$$\Delta p = \Sigma(p - p_o) = P_r N, \quad \text{avec } P_r = \Sigma p_r.$$

P_r représente ainsi la puissance de réglage maximum, effectivement développée, en plus ou moins, lorsque le niveau atteint ses valeurs limites $+1$ et -1 .

La bande de réglage, c'est-à-dire l'étendue totale de variation de la production, est égale à $2P_r$.

— un régulateur central élaborant le niveau suivant l'équation :

$$N = -\frac{\alpha}{P_r} \int_o^t \left(\Delta f + \frac{\Delta P}{\lambda} \right) dt \quad (2)$$

dans laquelle α est un paramètre caractéristique du réglage appelé « puissance réglante » et s'exprimant en MW par tour.

On voit que la puissance de réglage $P_r N$ dégagée à chaque instant, et par conséquent le niveau, est proportionnelle à l'intégrale dans le temps de l'écart de réglage changé de signe.

Tenant compte de ce que les intégrales dans le temps de l'écart de fréquence Δf et de l'écart de puissance ΔP sont respectivement des écarts de phase $\Delta\phi$ et d'énergie ΔW , et éliminant la variable N entre les équations (1) et (2), on obtient l'équation de réglage :

$$\Delta p + \alpha \left(\Delta\phi + \frac{\Delta W}{\lambda} \right) = 0.$$

Cette équation justifie le nom de réglage puissance-phase-énergie, donné par M. Cahen à ce mode de réglage.

On peut poser, pour simplifier :

$$\Delta\phi + \frac{\Delta W}{\lambda} = \Delta\psi$$

ce qui conduit à l'équation de réglage :

$$\Delta p + \alpha \Delta\psi = 0.$$

$\Delta\psi$ est un écart de phase fictif, différent de l'écart de phase $\Delta\phi$ du réseau.

2.2 Résultats obtenus avec l'installation d'essai

Les résultats de l'un des essais, effectué le 26 août 1954, ont été décrits dans le rapport n° 325 de la C.I.G.R.E. 1956, rapport présenté par MM. Cahen, Chevallier, Robert, Favez et Carpentier. Voici quelques informations complémentaires :

La figure 1 montre un enregistrement de la fréquence du réseau belge isolé de ses voisins en date du 15 octobre 1951. Comme on le voit, ce diagramme n'est assurément pas satisfaisant. Il s'explique par le fait qu'il n'est pas possible de confier à une seule centrale le réglage de ce réseau, que les corrections de production nécessaires sont difficiles à estimer par le répartiteur central et que ces corrections lorsqu'elles sont demandées ne sont exécutées qu'avec un retard important.

La figure 2 donne le diagramme de fréquence obtenu le 10 août 1954 lors d'un essai de réglage automatique, le réseau belge étant isolé. La bande de réglage disponible n'était que de 45 MW. La puissance du réseau était de 1200 MW.

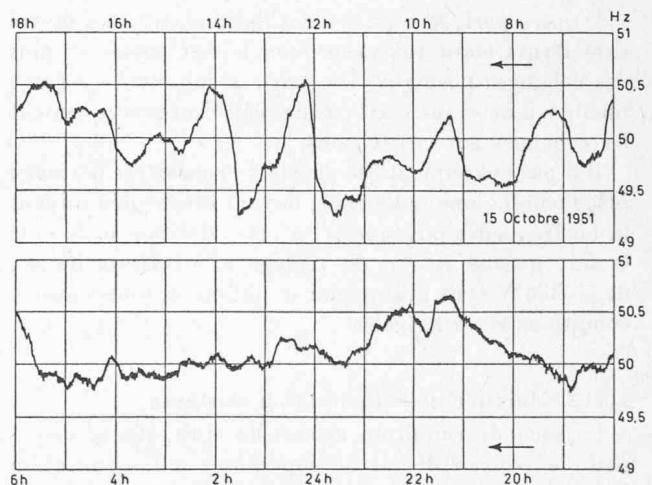


Fig. 1. — Enregistrement de la fréquence du réseau belge isolé des réseaux étrangers voisins, le 15 octobre 1951.

Ce document fournit un excellent critère du bon fonctionnement du dispositif de réglage. On voit l'évolution du niveau et de la production de l'une des deux centrales réglantes. La fréquence a été tenue à 0,05 Hz près.

La figure 3 se rapporte à un essai de réglage fréquence-puissance en parallèle avec la France le 26 août 1954. La puissance du réseau est de 1200 MW et la bande de réglage, répartie sur trois centrales, est de 70 MW. Ce cliché montre la fréquence commune, le niveau, la production de l'une des trois centrales réglantes et les échanges avec le réseau français.

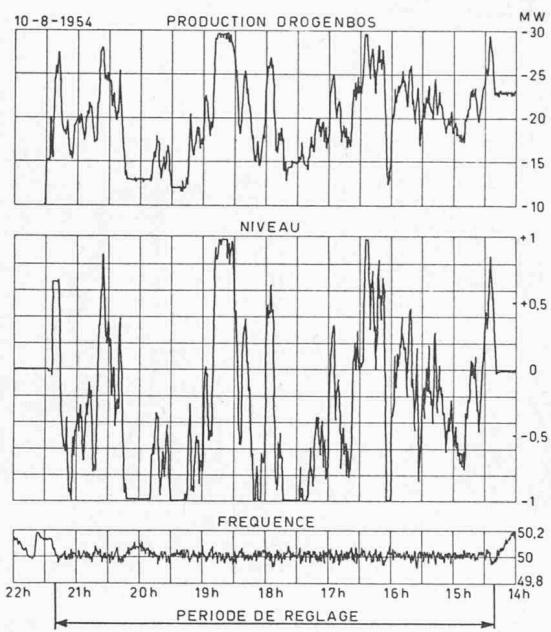


Fig. 2. — Essai de réglage automatique de la fréquence du réseau belge isolé, le 10 août 1954.

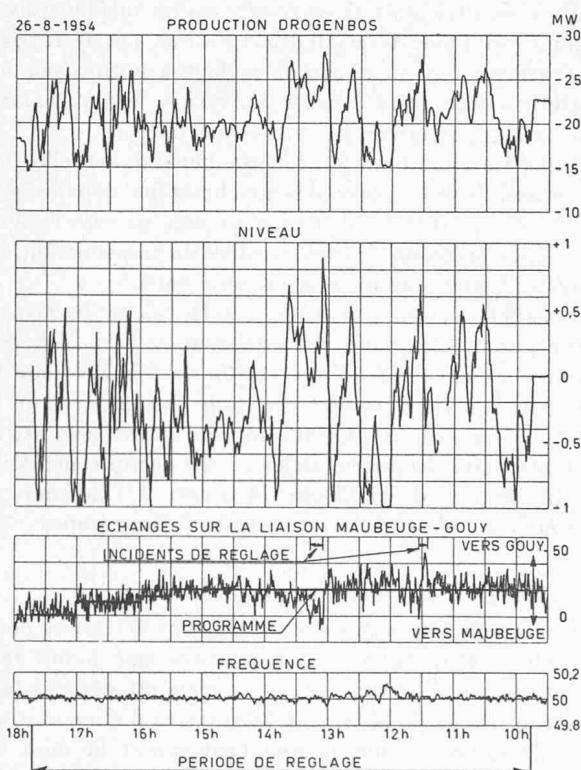


Fig. 3. — Essai de réglage automatique fréquence-puissance du réseau belge en parallèle avec le réseau français, le 26 août 1954.

Ces résultats ayant été jugés satisfaisants, tant au point de vue du fonctionnement suivant les prévisions qu'à celui de la tenue du matériel, l'extension du dispositif a été aussitôt décidée.

3. Description des installations

Le schéma fonctionnel de la figure 4 donne une idée générale de l'ensemble des installations pour la plupart réalisées aujourd'hui.

3.1 Installation au dispatching de la C.P.T.E.

La mesure des échanges sur les quatre lignes d'interconnexion du réseau belge avec ses voisins sont transmises par courants porteurs à haute fréquence au dispatching de la C.P.T.E., à Bruxelles, où elles sont reçues par des enregistreurs, munis de potentiomètres retrasmetteurs. La fréquence du réseau est transmise par fils téléphoniques depuis Drogenbos, poste le plus voisin à 150 kV, sous forme de tension monophasée.

Les équipements chargés d'élaborer le niveau comportent :

— Deux convertisseurs, commutables à partir du pupitre de réglage, délivrant une fréquence f' donnée par l'équation

$$f' = f + \frac{\Delta P}{\lambda}.$$

Chacun d'eux est constitué essentiellement par un « Selsyn », dont l'arbre tourne à une vitesse proportionnelle à $\frac{\Delta P}{\lambda}$ et alimenté en triphasé par une tension à la fréquence du réseau f . Cette tension triphasée est obtenue par un filtre à composante directe, auquel on applique la tension monophasée reçue de Drogenbos. On recueille aux bornes du second enroulement du Selsyn une tension de fréquence f' .

— Deux détecteurs-intégrateurs d'écart commutables, élaborant tous deux l'écart de phase fictif à partir des valeurs de f' et f , suivant l'équation

$$\Delta \Psi = \int_0^t (f' - f_0) dt.$$

Cet équipement ayant été décrit dans tous ses détails par MM. Cahen et Chevallier (*Bibl. 1 et 2*), nous nous bornerons à signaler que l'écart de phase est matérialisé, sur les deux intégrateurs, par la position du bras mobile d'un potentiomètre de précision. Ce bras se déplace par échelons, sous l'action d'impulsions résultant des battements, entre une tension à la fréquence 2000 Hz donnée par quartz (40×50 Hz) et une tension à la fréquence f' préalablement multipliée par 40.

Il faut 4000 impulsions pour faire parcourir au bras mobile toute l'étendue du potentiomètre, chaque impulsion correspondant, en fait, à un déphasage de $1/40$ de tour de la tension à fréquence f' par rapport à la fréquence nominale de 50 Hz.

La tension appliquée aux bornes du potentiomètre de l'intégrateur en service est réglée à partir du pupitre à une valeur proportionnelle à $\frac{\alpha}{P_r}$.

La tension prélevée entre le bras mobile et le point milieu du potentiomètre constitue ainsi le niveau, suivant l'équation

$$N = -\frac{\alpha}{P_r} \int_0^t (f' - f_0) dt.$$

— Six amplificateurs à courant continu, traduisant le niveau en courant continu proportionnel pour le transmettre vers les différents groupes de centrales.

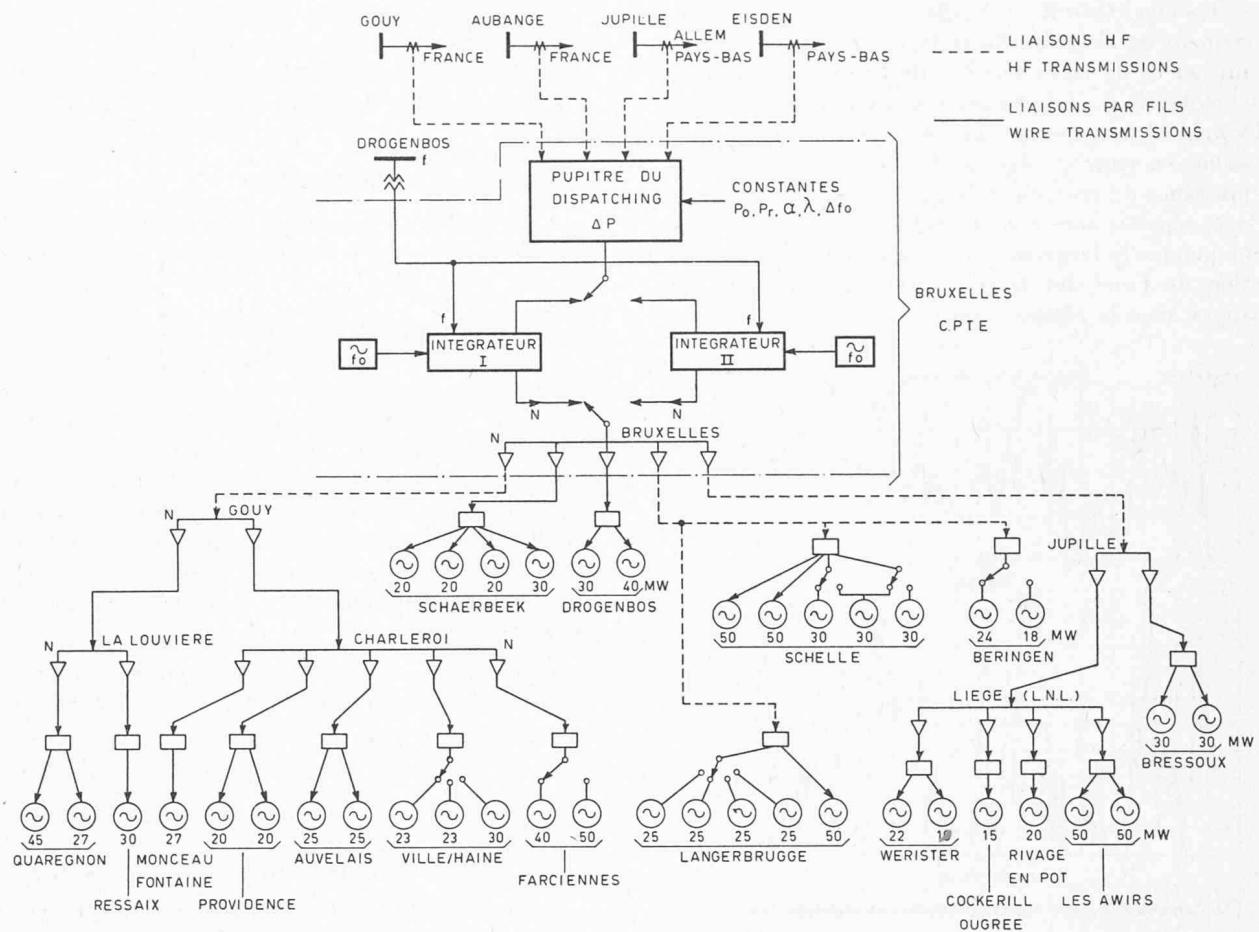


Fig. 4. — Schéma fonctionnel des installations de réglage fréquence-puissance du réseau belge.

— *Le pupitre de réglage*, présenté à la figure 5, centralise les informations reçues par les télémesures, commande les détecteurs-intégrateurs d'écart, y introduit les constantes de réglage

$$P_0, \lambda, \alpha, P_r \text{ et } \Delta f_0$$

et distribue le niveau vers les centrales.

Les dispositions de sécurité suivantes ont été prises.

Un enregistreur, indiquant la valeur du niveau est muni de contacts de fin de course supprimant l'intégration dans un sens ou dans l'autre lorsque le niveau atteint ses limites +1 ou -1. De même des contacts réglables ont été disposés sur les enregistreurs de puissance échangée sur les lignes d'interconnexion. On peut ainsi faire en sorte d'arrêter l'intégration, dans un sens ou dans l'autre, lorsque la puissance sur l'une des lignes d'interconnexion atteint les limites assignées. Dans ces conditions, on est au moins certain que le réglage ne contribuera pas au dépassement éventuel de ces limites.

Certains défauts sur les mesures d'échanges ainsi que des défauts survenant dans les équipements de réglage proprement dits ont pour effet d'arrêter toute intégration, c'est-à-dire de maintenir le niveau à une valeur constante.

3.2 Les transmissions du niveau vers les centrales

Comme on le voit à la figure 4, le niveau émis se répartit vers les centrales par des subdivisions en patte d'oeie successives.

La première subdivision s'opère à Bruxelles et comporte cinq divisions. Il en résulte qu'un incident quelconque sur l'une de ces liaisons ne met pas le réglage hors service. La puissance de réglage à fournir par les machines accrochées à cette dérivation sera automatiquement répartie sur les autres machines.

Dans les conditions de fonctionnement actuelles où la puissance de réglage des machines ne dépasse pas 5 MW et se situe le plus souvent aux valeurs de 2 et 3 MW, la précision des télémesures de transmission du niveau ne joue pas un rôle prépondérant.

En effet, un écart de 10 % sur la valeur du niveau reçue par une machine, de participation de 5 MW par exemple, n'entraîne qu'une erreur de 0,5 MW sur la répartition de la puissance de réglage au moment où le niveau est maximum. Ce qui importe avant tout est la stabilité et la définition, telles qu'un accroissement de l'ordre de 1 % de la valeur du niveau à l'émission se retrouve au circuit d'asservissement des groupes.

Sécurités pour la transmission du niveau

Les mesures de sécurité suivantes ont été prises pour les télémesures du niveau transmises par haute fréquence : à la réception, la disparition du signal basse fréquence, celle de la tension alternative d'alimentation et celle de la tension plaque provoquent la mise en court-circuit de la sortie en courant continu, ramenant ainsi le niveau à la valeur zéro. Il en est de même à l'émetteur de télémétrie, où le fonctionnement du

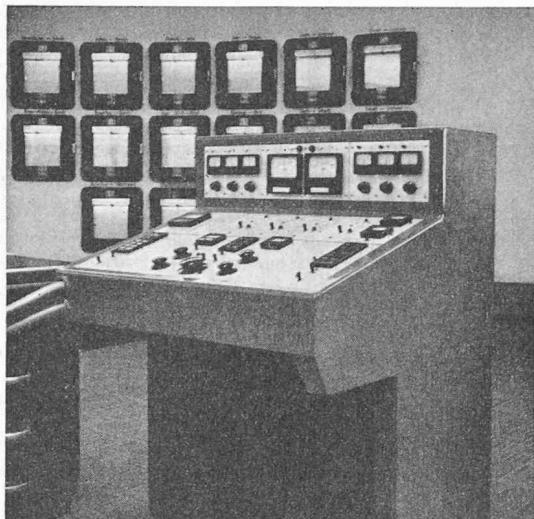


Fig. 5. — Pupitre de réglage installé au dispatching de la C.P.T.E. à Bruxelles.

dispositif d'alarme court-circuite la sortie basse fréquence et ramène ainsi, à distance, le niveau à zéro.

Aucune disposition spéciale n'a été prise pour les amplificateurs à courant continu distribuant le niveau vers les centrales ; ces appareils appliquent le principe classique de l'équilibrage des couples développés sur un équipage mobile par le courant reçu d'une part et le courant retransmis d'autre part. En cas de disparition de la tension d'alimentation, le courant retransmis est évidemment nul, ce qui a pour effet de ramener le niveau à zéro.

3.3 Installations dans les centrales

Les différents termes intervenant dans l'équation d'asservissement de la production d'une machine :

$$p = p_o + p_r N$$

sont traduits en tensions continues proportionnelles et introduits dans un circuit commun.

La tension représentant la production de la machine « p » est obtenue aux bornes d'une résistance fixe dans laquelle on fait circuler un courant proportionnel à la production. Ce courant est fourni par un émetteur wattmétrique, branché sur les transformateurs de mesure d'intensité et de potentiel de la machine.

La tension représentant le programme « p_o » est obtenue aux bornes d'un potentiomètre gradué en MW et parcouru par un courant continu stabilisé.

La tension proportionnelle à « $p_r N$ » est obtenue également par un dispositif potentiométrique dans lequel on fait circuler le courant proportionnel à N reçu du dispatching de Bruxelles. La position du potentiomètre permet de choisir le coefficient p_r de participation au réglage de la machine.

La tension d'écart est appliquée à l'entrée d'un amplificateur-émetteur d'impulsion, traduisant l'écart en impulsions positives ou négatives, de longueurs proportionnelles. Ces impulsions sont alors envoyées, en passant par des relais auxiliaires, vers le moteur variateur de vitesse de la machine. Tout écart apparaissant entre p et $[p_o + p_r N]$ provoque ainsi l'envoi d'impulsions qui tendent à rétablir l'égalité.

La longueur des impulsions est rendue proportionnelle à l'écart par un dispositif à thyratrons basé sur le temps de charge d'un condensateur. Leur cadence est imposée par un petit moteur synchrope entraînant un dispositif à came. La cadence adoptée pour toutes les machines est de une impulsion pour six secondes. Un seuil d'insensibilité peut être ajusté dans l'émetteur d'impulsions pour éviter qu'il ne réponde aux oscillations normales de la production de la machine. De ce fait, les longueurs minimum des impulsions peuvent être fixées à des valeurs de l'ordre de 0,1 à 0,2 seconde.

Un dispositif à came permet également de limiter la longueur maximum des impulsions transmises vers le groupe à une valeur quelconque. Ce dispositif peut soit supprimer les impulsions trop longues, soit mettre hors service le réglage de la machine. Dans le premier cas il permet d'éviter des variations trop rapides de la production, dans le second il constitue un dispositif de sécurité : en effet toute perturbation importante dans l'appareillage constituant l'écart, comme par exemple la disparition du terme production ou du terme programme, entraîne automatiquement la suppression du réglage sur le groupe.

Des relais additionnels permettent également de supprimer soit les impulsions positives soit les impulsions négatives. Ces relais sont mis sous la dépendance d'index ajustables incorporés dans le milliampèremètre donnant la production du groupe. Le wattman peut ainsi, à l'aide de ces index, fixer des limites de production, indépendantes de la valeur du niveau.

Les amplificateurs et émetteurs d'impulsions d'une même centrale sont logés dans un bâti commun contenant également les sources de courant stabilisées pour l'alimentation des potentiomètres de programme.

Dans chaque centrale également, un coffret de réglage de petites dimensions, rassemblant tous les appareils nécessaires à la prise et à la conduite du réglage des machines est mis à la disposition du wattman.

La figure 6 montre le coffret réalisé lors des essais de 1954 pour la centrale de Schaerbeek.

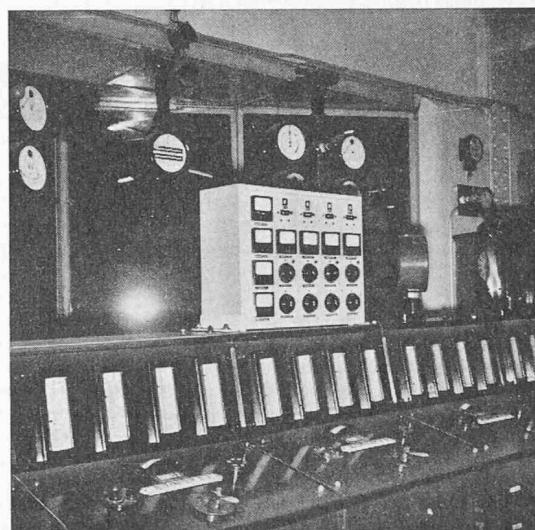


Fig. 6. — Coffret de réglage de la Centrale de Schaerbeek pour la commande de quatre unités.

4. Compatibilité des actions de réglage sur la production des machines

Si l'on considère l'ensemble des dispositifs de réglage mis simultanément en service, on constate que la production des machines est sous la dépendance :

- du réglage primaire, dans lequel le régulateur de vitesse de la machine modifie la production en fonction de la fréquence. La constante de temps de ce réglage est de l'ordre de quelques secondes ;
- du réglage secondaire automatique, effectué par les équipements de réglage fréquence-puissance, et dont la constante de temps est de l'ordre de la minute ;
- du réglage secondaire manuel, effectué par des wattmen pour respecter les programmes de production préétablis, ou pour respecter des programmes d'échanges. On pourrait considérer ici qu'il s'agit d'un réglage tertiaire, les interventions des wattmen devant s'effectuer par intermittence avec des intervalles de temps plus ou moins longs, disons de l'ordre du quart d'heure, en fonction de la vitesse de variation de la charge.

La première condition pour que ces divers réglages ne réagissent pas défavorablement l'un sur l'autre et n'entraînent pas des oscillations est que les constantes de temps soient suffisamment différentes les unes des autres. Cette condition est satisfaite automatiquement pour le réglage primaire et le réglage secondaire. En ce qui concerne le réglage manuel il importe, comme dit ci-dessus, que les wattmen n'interviennent que d'une manière discontinue, à intervalles de temps suffisamment longs. Il est souhaitable que leur intervention soit coordonnée avec la valeur du niveau (par exemple, ne pas exécuter un programme de diminution de production si le niveau est proche de la valeur +1 ; attendre pour exécuter ce réglage manuel que le niveau évolue vers les valeurs négatives).

La seconde condition serait que l'action d'un réglage lent n'annule pas celle effectuée précédemment par un réglage plus rapide.

a) Cela signifie par exemple que le dispositif d'asservissement des groupes à la valeur du programme corrigé par le niveau devrait laisser passer les variations de production résultant du réglage primaire de la machine. Ceci pourrait être réalisé en insérant dans la boucle d'asservissement un terme proportionnel à $\frac{\Delta f}{s}$, s étant le statisme moyen du groupe considéré.

Un autre moyen de réaliser cette condition serait d'asservir au niveau non pas la production du groupe, mais la position du moteur de réglage secondaire de la machine. Du fait de la non-linéarité de la réponse de la machine par rapport à la position de ce moteur, le niveau n'aurait plus une signification aussi précise en ce qui concerne la puissance de réglage mise en œuvre.

En pratique cependant, du fait de l'ampleur des réseaux interconnectés, de la compensation des charges et des moyens mis en œuvre pour régler la fréquence, on constate que cette fréquence ne varie que de quelques centièmes de Hz. Les écarts plus importants sont relativement rares et en général, ne se forment que lentement. Il en résulte que le réglage primaire, tel qu'il existe actuellement, et auquel est superposé un réglage secondaire automatique, ne joue plus qu'un rôle de sécurité soit dans le cas où, par suite d'incident, des réseaux d'importance réduite sont séparés du réseau général, soit dans les cas très rares de variation brusque et importante de la fréquence où ils assurent la prise en charge immédiate de l'à-coup par les groupes en service.

La fréquence étant en principe bien tenue, grâce au réglage automatique secondaire, il n'y a pas lieu de se préoccuper autre mesure du terme $\frac{\Delta f}{s}$ cité ci-dessus.

Dans le cas d'incident entraînant la séparation du

réseau général d'un réseau partiel comportant une majorité de groupes avec asservissement de la production à un programme (éventuellement corrigé par le niveau) il pourrait se faire que l'action du réglage primaire étant annulée par le réglage secondaire, l'équilibre production-consommation ne soit pas réalisé. A ce moment, la fréquence du réseau isolé se déplacerait progressivement, ce déplacement n'étant limité que par le réglage primaire des groupes non asservis et l'autoréglage de la charge. Pour parer aux conséquences de tels accidents, des relais de fréquence ont été installés dans les centrales réglantes. Ces relais mettent hors service l'asservissement secondaire des groupes lorsque la fréquence atteint les valeurs de 49 ou 51 Hz.

- b) Cette seconde condition exige également que l'action du réglage automatique fréquence-puissance ne soit pas détruite par les réglages manuels effectués par les wattmen.

Il en serait bien ainsi si le réseau belge était constitué par une entreprise unique dans laquelle les programmes production seraient strictement suivis.

En fait, le réseau belge se subdivise comme nous l'avons vu en un ensemble de complexes, dont un certain nombre modifie en cours de journée les programmes des unités pour respecter un programme d'échanges avec les complexes voisins. Il est clair que, sans précautions spéciales, la puissance dégagée par certains groupes du complexe au titre du réglage fréquence-puissance serait annulée par l'action du wattman.

Ces wattmen doivent en fait laisser passer, en plus de leur programme d'échange, la puissance développée au titre du réglage automatique. Cette correction du programme peut être calculée aisément à partir de la valeur du niveau et de la participation posée aux différents groupes réglants du complexe. Un dispositif simple permet au wattman de lire directement sur un appareil la valeur du programme corrigé.

5. Conclusion

L'adoption du réglage de niveau a permis de satisfaire aux conditions particulières imposées au dispositif de réglage fréquence-puissance du réseau belge, à des conditions économiquement avantageuses. Bien que, pour des raisons d'exploitation, l'ensemble du dispositif n'ait pu être expérimenté jusqu'à présent, qu'au cours d'essais de durée limitée, il semble bien que les résultats obtenus soient conformes aux prévisions. Grâce à la simplicité du principe mis en jeu et à la simplicité du schéma général de l'installation les répartiteurs et les wattmen ont facilement compris le mécanisme du réglage et se sont rapidement accoutumés au maniement des appareils.

BIBLIOGRAPHIE

1. F. CAHEN et A. CHEVALLIER : *Le réglage puissance-phase. Nouvelle méthode pour le réglage automatique de la fréquence d'un réseau comportant de multiples usines génératrices.* Bulletin SFE, octobre 1953.
2. F. CAHEN et A. CHEVALLIER : *Le réglage automatique de la fréquence dans les grands réseaux : le réglage intégral.* CIGRE 1954, rapport 339.
3. F. CAHEN : *Le problème du réglage de la fréquence et des échanges de puissance.* U.N.I.P.E.D.E., Congrès de 1955, III-1.
4. R. RENCHON et G. DAUMERIE : *Image thermique de ligne aérienne.* C.I.G.R.E., 1956, rapp. 303.
5. F. CAHEN, A. CHEVALLIER, R. ROBERT, B. FAVEZ, J. CARPENTIER : *Les problèmes de réglage automatique de la fréquence et des échanges de puissance dans les grands réseaux.* C.I.G.R.E., 1956, rapp. 325.