

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 69 (1978)

**Heft:** 12

**Artikel:** Les problèmes de la commande optimale de réseaux électriques

**Autor:** Roch, A. / Simonett, J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-914910>

### **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:** 15.01.2026

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

L'accéléromètre *multiaxial* permet de détecter des accélérations dans plusieurs directions. L'accéléromètre *triaxial*, p.ex., permet de détecter une accélération quelconque selon ses 3 composantes; il se compose de trois accéléromètres simples.

#### 4. Applications

On peut classer les capteurs accélérométriques suivant l'utilisation qu'on en fait [2]. Il existe des capteurs pour les accélérations de mouvements linéaires, pour les accélérations angulaires et pour la mesure de l'accélération de gravité. Le principe fondamental de la mesure est le même dans les différents types.

Le capteur à *accélérations de mouvements* est utilisé p.ex. sur les véhicules et dans les avions. L'accélération maximale tolérée est signalée par un élément masse-ressort capable de fermer un circuit électrique pour une valeur déterminée. Pour des accélérations à basse fréquence, on peut utiliser des accéléromètres comportant une amplification mécanique des déformations du ressort.

Pour déterminer l'*accélération angulaire*, une masse à symétrie cylindrique (p.ex. un disque) est montée de manière à pouvoir tourner autour de son axe. Son déplacement angulaire est contrarié par un ressort; il est proportionnel à l'accélération angulaire et peut être mesuré. Ce dispositif est utilisé sur les éléments en rotation d'une machine pour contrôler les accélérations angulaires afin d'éviter qu'ils ne soient soumis à une trop

grande force d'inertie qui pourrait en entraîner la rupture ou la déformation.

Le *gravimètre* est un instrument qui permet de mesurer les variations de l'accélération de gravité. On l'emploie souvent dans les recherches géophysiques du sous-sol. Les gravimètres sont fréquemment utilisés en mer ou en avion. Ce sont des accéléromètres différents de ceux décrits; ils sont montés avec une suspension à un cardan ou sur une plate-forme stabilisatrice qui élimine les accélérations considérables dues aux oscillations du mobile. L'enregistrement des mesures est automatique et continu.

Certains systèmes de haut-parleurs sont munis d'un accéléromètre piézoélectrique fixé sur la calotte de la membrane. Ce capteur mesure l'accélération de la membrane du haut-parleur. L'information reçue par le capteur est comparée avec le signal de sortie de l'amplificateur. Un dispositif correcteur envoie à la membrane une impulsion pour que les signaux d'entrée et de sortie du haut-parleur correspondent.

#### Bibliographie

- [1] Accelerometers, instructions and applications. Nærum, Bruel und Kjaer, 1975; p. 1...75.
- [2] Encyclopédie internationale des sciences et des techniques. Paris, Larousse, 1969.

#### Adresse des auteurs

G. Vilalara, J. Pernegr, D. Tende-Lembe et P. Veuve, étudiants à l'EPFL, Département d'électricité, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

## Les problèmes de la commande optimale de réseaux électriques

Par A. Roch et J. Simonett

### 1. Introduction

Les problèmes de la production d'énergie se posent à trois niveaux dont l'ordre de priorité est bien déterminé: au premier niveau se situent les problèmes de *sécurité* de l'exploitation, puis viennent les considérations de *qualité* (fréquence-puissance), et finalement l'aspect *économique* de la production. Un calcul de répartition optimale de la production ne doit donc jamais mettre en question la sécurité du réseau et diminuer la qualité de l'énergie produite.

D'autres contraintes qualitatives et quantitatives peuvent apparaître dans un tel problème, qui limitent la liberté de résolution de la commande optimale. Nous avons rencontré entre autres les exemples suivants:

- le maintien d'un débit minimum d'un cours d'eau,
- la capacité maximale des conduites, des lignes électriques,
- les relations entre les débits respectifs de centrales au fil de l'eau,
- les temps de démarrage des centrales, en particulier thermiques.

Enfin, l'optimisation du rendement économique est spécifique à chaque réseau et provient le plus souvent d'un caractère de production mixte qu'il s'agit de programmer au mieux des intérêts de l'exploitant, dans le cadre des contraintes à respecter.

Dans son programme d'applications industrielles, l'Institut de réglage automatique a eu l'occasion de résoudre le problème de l'optimisation de la commande de réseaux électriques dans les deux cas suivants:

Il s'agissait d'abord de la commande d'un grand réseau nord-américain, comprenant des centrales thermiques et des centrales hydrauliques; ces dernières étaient pour la plupart

621.311.1: 621.316.71;

au fil de l'eau, et fonctionnaient en cascade. Les centrales thermiques utilisaient du combustible importé, relativement coûteux. Aucune centrale nucléaire n'était connectée.

Le deuxième exemple a été celui d'un réseau régional suisse, dont le caractère mixte provenait d'une production propre partielle (sous forme hydraulique: accumulation et fil de l'eau), et de l'achat (sous contrat énergie-puissance) à un tiers, à un tarif variable selon l'heure et la saison. De plus, il fallait compter avec des pénalisations importantes en cas de dépassement des puissances souscrites.

Les conditions assez dissemblables de ces deux cas concrets nous ont permis d'étudier l'importance d'éléments tels que

- l'influence des pertes en lignes
- les variations de rendement des centrales hydro-électriques
- les conditions de sécurité en réseau isolé et interconnecté
- les données hydrologiques, et la prévision des débits disponibles
- le coût des démarrages et arrêts de groupes et de centrales.

### 2. Formulation mathématique du problème d'optimisation

Pour la clarté de l'exposé, nous nous limiterons ici à présenter le problème d'un réseau de distribution d'énergie répondant à la demande des consommateurs, ce réseau produisant une partie de son énergie, le solde étant acheté à un fournisseur central.

Les méthodes de calcul d'optimisation demandent la formulation d'un *modèle*, c'est-à-dire une description mathématique du système [1; 2]<sup>1)</sup>. Le modèle n'est en général pas unique,

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

car il implique certaines hypothèses simplificatrices, qui peuvent varier d'un cas à l'autre. Le modèle proposé ci-dessous présente des avantages de calcul considérables.

Le plus souvent, on découpe le réseau en *centres* de production et *centres* de consommation d'énergie, reliés par des lignes de transmission (fig. 1). En première approximation, nous négligerons les pertes en lignes, en admettant qu'elles ne sont pas sensiblement affectées par le programme choisi. La somme de la puissance produite dans le réseau et de la puissance achetée doit être égale à la consommation, soit :

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_a(t) = C(t) \quad (1)$$

$P_i$  puissance produite par la  $i^{\text{e}}$  centrale

$P_a$  puissance achetée

$C$  consommation du réseau (pertes comprises)

Chaque *unité de production* peut être décrite par une relation exprimant le rendement selon le point de fonctionnement. Pour une centrale hydro-électrique, le rendement dépend du débit turbiné (avec 1, 2, ... groupes en fonctionnement) et de la hauteur de chute. Ce rendement est traduit en énergie spécifique, qui tient compte des pertes dans les conduites ainsi que des rendements des groupes turbine-alternateur (fig. 2).

La hauteur de chute étant directement liée au volume d'eau retenue dans le bassin d'accumulation, la puissance fournie par la centrale s'exprime par la relation

$$P_i(t) = f_i(V_i, \dot{V}_{ti}) \quad (2)$$

$V_i = V_i(t)$  volume d'eau accumulée (en relation avec la hauteur de chute)

$\dot{V}_{ti} = \dot{V}_{ti}(t)$  débit instantané turbiné

Le débit turbiné, ainsi que le volume d'eau accumulée doivent se trouver entre deux valeurs limites données par les caractéristiques physiques des installations, ou par les contrats d'exploitation :

$$\begin{aligned} V_i \min &\leq V_i \leq V_i \max \\ \dot{V}_{ti} \min &\leq \dot{V}_{ti} \leq \dot{V}_{ti} \max \end{aligned} \quad (3)$$

Les deux grandeurs  $V_i$  et  $\dot{V}_{ti}$  sont, par ailleurs, couplées par l'équation du bassin qui fait encore intervenir les apports d'eau des affluents, soit  $\dot{V}_{ai}$  :

$$V_i(t) = V_i(t_0) + \int_{t_0}^t (\dot{V}_{ai}(t) - \dot{V}_{ti}(t)) dt \quad (4)$$

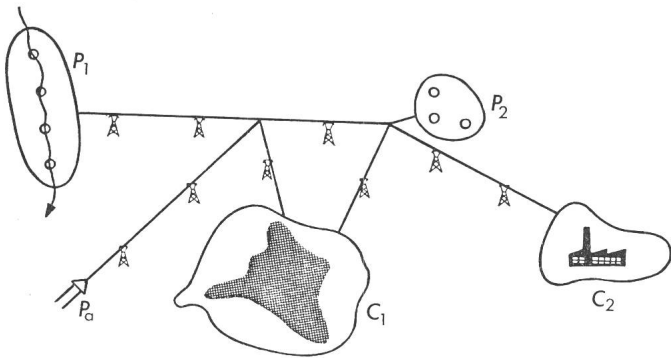


Fig. 1 Représentation schématique d'un réseau électrique

$P_1, P_2$  Centres de production

$P_a$  Puissance achetée

$C_1, C_2$  Centres de consommation

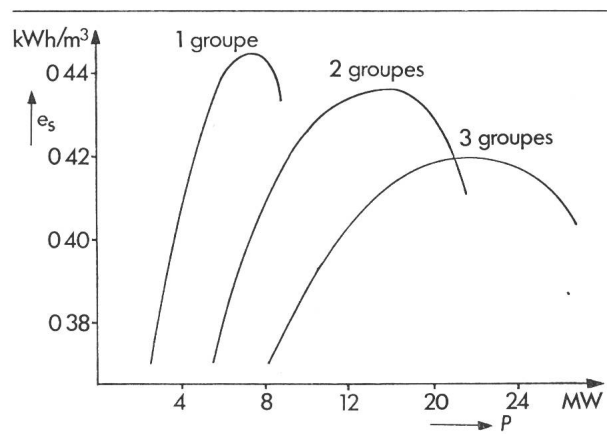


Fig. 2 Energie spécifique  $e_s$  en fonction de la puissance  $P$  pour une hauteur de chute donnée

Le calcul d'*optimisation* doit trouver la répartition de la production qui maximise le gain économique en satisfaisant les relations de contraintes (1) à (4).

Le gain économique peut être traduit en une *fonction-coût*  $J$  qui tient compte des différents tarifs et qui est définie pour une certaine période d'optimisation. En partant de l'idée que l'on veut obtenir le maximum de valeur de l'eau disponible en se basant sur le prix qu'il conviendrait de payer au fournisseur central pour l'énergie produite, on écrit :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} T(t) \cdot \sum_{i=1}^N P_i(t) \cdot dt \quad (5)$$

$t_0$  début de la période d'optimisation

$t_f$  fin de cette période

$T$  tarif (à payer au fournisseur au temps  $t$ )

$P_i$  puissance fournie par la  $i^{\text{e}}$  centrale

Quand cette fonction-coût prend sa valeur maximum, on sait que la répartition de la production est optimale, toute autre répartition entraînant un gain économique inférieur.

En général, on ajoute à ce problème d'optimisation une condition supplémentaire : afin de coordonner la répartition de la production pendant la période considérée (p.ex. pour 24 h) avec la gestion à plus long terme (p.ex. une semaine, ou même une saison), on limite l'énergie hydraulique à transformer à une certaine valeur maximum, qu'on exprimera volontiers en fixant le niveau du bassin à la fin de la période d'optimisation.

Notons que, dans la réalité, la fonction-coût à maximiser aura une forme moins simple, car il y a lieu de tenir compte des pénalisations liées au contrat de fourniture d'énergie, pour ne citer que l'un des éléments accessoires entrant dans l'estimation effective du gain économique de l'entreprise.

### 3. Résolution du problème d'optimisation

La résolution du problème d'optimisation se fait en deux phases bien distinctes.

D'abord, on établit les courbes de rendement de chaque unité de production, et on définit toutes les contraintes physiques et contractuelles, ainsi que celles qui découlent des considérations de sécurité et de qualité.

Dans une seconde étape, on élabore le programme permettant de trouver la solution optimale au problème posé.

La théorie moderne de la commande optimale met différentes méthodes à disposition, parmi lesquelles il s'agit de choisir celle qui convient le mieux au cas étudié. Une adaptation est le plus souvent indispensable pour passer de la théorie à l'application pratique.

*Pronovost* [3] a montré qu'une méthode basée sur la programmation dynamique était très efficace, et présentait des avantages importants par rapport à d'autres méthodes. La méthode générale requiert toutefois des temps de calcul et un nombre de places de mémoires prohibitifs. La méthode adaptée est une technique de programmation dynamique à approximations successives [4]. L'algorithme permet de s'approcher successivement de la solution optimale en améliorant à chaque pas le rendement global de la production.

L'efficacité de la méthode mise au point à l'EPFL a pu être démontrée sur le grand réseau américain pour la répartition journalière optimale, et son adaptation à un réseau régional suisse a pu être faite avec succès. Le temps de calcul de l'algorithme développé prend, sur un mini-ordinateur, entre 1 et 3 minutes par centrale, ou par centre de production. Il est donc bien adapté à une optimisation qui considère une période comprise entre quelques heures et quelques mois, voire une année.

#### 4. Conclusions

L'installation des mini-ordinateurs dans les centres de répartition de la production d'énergie permet l'utilisation des méthodes de la commande optimale. L'amélioration des rendements économiques ainsi obtenue se situe en général entre 1 et 3 %, assurant dans la plupart des cas un amortissement rapide des investissements liés à l'étude du programme: analyse de courbes de rendement des centrales de production, et établissement des programmes d'optimisation adaptés.

L'étude se justifie en tout cas lorsqu'une modernisation de l'installation de traitement d'information a été décidée pour d'autres raisons: télécommande, traitement statistique, etc.

#### Bibliographie

- [1] *H. Edelmann*: Betriebsoptimierung in der elektrischen Energieversorgung. Bull. SEV 67(1976)1, S. 15...20.
- [2] *M. Athans and P.L. Falb*: Optimal control. New York, McGraw-Hill, 1966.
- [3] *G.A. Pronovost*: Répartition optimale à court terme de la production dans les réseaux électriques mixtes. Thèse No. 200 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1973.
- [4] *R.E. Larson and A.J. Korsak*: A dynamic programming successive approximations technique with convergence proofs. Automatica 6(1970)–, p. 245...252.

#### Adresse des auteurs

*A. Roch*, professeur, et *J. Simonett*, Institut de réglage automatique EPFL en Vallaire, 1024 Ecublens.