

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	82 (1956)
Heft:	10
Artikel:	Répercussion de la disposition en cascade d'aménagements hydro-électriques sur leurs conditions d'exploitation
Autor:	Cuénod, M. / Wahl, J.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-62062

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

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements:
 Suisse: 1 an, 26 francs
 Etranger: 30 francs
 Pour sociétaires:
 Suisse: 1 an, 22 francs
 Etranger: 27 francs
 Prix du numéro: Fr. 1.60
 Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »
 N° II. 57 75, à Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à Imprimerie La Concorde, Terreaux 31, Lausanne

Rédaction
 et éditions de la S. A. du Bulletin technique (tirés à part), Case Chauderon 475
**Administration de la S.A.
du Bulletin Technique**
 Ch. de Roseneck 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président: R. Neeser, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. Epitaux, architecte, à Lausanne; Secrétaire: J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg: MM. H. Gicot, ingénieur; M. Waeber, architecte — Vaud: MM. F. Chenaux, ingénieur; A. Chevalley, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. Cl. Grosgruin, architecte; E. Martin, architecte — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. G. de Kalbermann, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
 de la Société anonyme du Bulletin technique: A. Stucky, ingénieur, président;
 M. Bridel; G. Epitaux, architecte; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page	Fr. 264.—
1/2 »	» 134.40
1/4 »	» 67.20
1/8 »	» 33.60

**annonces Suisses S. A.
(ASSA)**



Place Bel-Air 2. Tél. 22 33 26
 Lausanne et succursales

SOMMAIRE : Répercussion de la disposition en cascade d'aménagements hydro-électriques sur leurs conditions d'exploitation, par M. CUÉNOD et J. WAHL, ingénieurs à la Société Générale pour l'Industrie, Genève. — **Le bâtiment d'usine**, par MARCEL D. MUELLER, architecte S.I.A. — **NÉCROLOGIE : Paul Joye (1881-1955)**. — **BIBLIOGRAPHIE**. — **CARNET DES CONCOURS**. — **SERVICE DE PLACEMENT**. — **DOCUMENTATION GÉNÉRALE**. — **DOCUMENTATION DU BATIMENT**. — **INFORMATIONS DIVERSES**.

RÉPERCUSSION DE LA DISPOSITION EN CASCADE D'AMÉNAGEMENTS HYDRO-ÉLECTRIQUES SUR LEURS CONDITIONS D'EXPLOITATION

par M. CUÉNOD et J. WAHL, ingénieurs à la Société Générale pour l'Industrie, Genève

Introduction

Les différents modes d'exploitation d'un aménagement hydro-électrique peuvent être classés en trois grandes catégories :

- *Marche au fil de l'eau* avec une production variant en fonction des variations de l'apport d'eau du bassin versant, indépendamment d'un programme.
- *Marche sur programme* : La production varie selon un diagramme de charge fixé d'avance, caractérisé par des paliers de puissance s'étendant sur plusieurs heures.
- *Marche avec réglage en fonction d'une variable indépendante* : C'est notamment la marche d'une centrale utilisée pour le réglage de la fréquence d'un réseau en marche isolée ou pour le réglage des puissances d'échange du réseau auquel elle appartient en cas de marche interconnectée. La production des groupes de réglage doit compenser les fluctuations internes du réseau ; elle varie constamment selon un diagramme de charge imprévisible ; l'énergie ainsi produite est dénommée « énergie de réglage » dans la suite de cet exposé.

Ces trois modes d'exploitation sont indiqués dans l'ordre croissant de la valeur de la production. Pour être rentables, les aménagements avec accumulation sa-

sonnière doivent avoir une production de haute qualité, c'est-à-dire produire avant tout de l'énergie sur programme ou mieux de l'énergie de réglage.

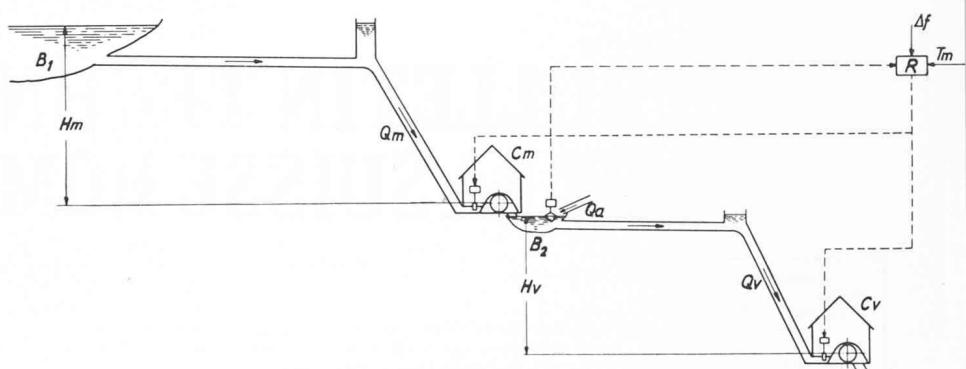
La disposition géographique des aménagements en montagne conduit souvent à fractionner leur chute et à prévoir plusieurs paliers, de façon à pouvoir notamment récolter l'eau des bassins versants intermédiaires. La figure 1 représente par exemple le cas relativement simple d'un aménagement avec deux paliers.

Le palier supérieur est alimenté à partir d'un bassin avec accumulation saisonnière, le palier inférieur à partir d'un bassin de compensation intermédiaire de capacité relativement réduite ; cette disposition implique que la centrale aval absorbe quasi en permanence la totalité de l'eau qui entre dans ce bassin. Dans une étude antérieure, nous avons montré que cette condition est remplie par un réglage à niveau d'eau constant de ce bassin. Les exigences de ce réglage en ce qui concerne la capacité du bassin ont également été précisées (1)¹.

¹ Les chiffres entre parenthèses se réfèrent à la bibliographie indiquée en fin de cet article.

Fig. 1. — Disposition de principe d'un aménagement hydro-électrique avec deux centrales disposées en cascade.

- B_1 Bassin d'accumulation avec un volume de retenue important.
- B_2 Bassin de compensation intermédiaire de faible volume.
- C_m Centrale amont.
- C_v Centrale aval.
- R Régulateur de réseau.
- T_m Télémétrie de la puissance d'échange.
- Δf Mesure de l'écart de fréquence.
- Q_m Débit absorbé par la centrale amont.
- Q_v Débit absorbé par la centrale aval.
- Q_a Débit supplémentaire alimentant le bassin de compensation.
- H_m Hauteur de chute de la centrale amont.
- H_v Hauteur de chute de la centrale aval.



Ce nouvel exposé est un essai de classification des différents modes de réglages de la charge qui peuvent être envisagés par un aménagement hydro-électrique disposé en cascade avec accumulation saisonnière. Il définit le mode de réglage qui permet d'utiliser au maximum la capacité de réglage d'un tel aménagement.

I. Marche sur programme

A. Marche sans réglage de la fréquence

Si l'apport intermédiaire alimentant le bassin de compensation est constant, on peut réaliser une marche sur programme en ajustant la charge des groupes au moyen de leur limiteur d'ouverture. Lors de l'établissement des programmes de production, il faut veiller à ce

que la centrale aval absorbe le débit de la centrale amont, augmenté d'un éventuel apport intermédiaire dans le bassin de compensation. Cette condition de « continuité des débits » est caractérisée par la relation suivante :

$$Q_m + Q_a = Q_v$$

Q_m = débit absorbé par la centrale amont,

Q_a = débit résultant d'un apport intermédiaire dans le bassin de compensation,

Q_v = débit absorbé par la centrale aval.

Si cette condition est rigoureusement remplie, le niveau d'eau du bassin de compensation est automatiquement maintenu constant. En fait, il est cependant

TABLEAU I. — Disposition de principe des principaux modes de réglage d'un aménagement hydro-électrique disposé en cascade

	I. Marche sur programme	II. Marche avec réglage en fonction d'une variable indépendante	
		A. Réglage séparé du niveau d'eau et de la variable indépendante	B. Réglage combiné du niveau d'eau et de la variable indépendante
Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe en marche isolée	Central Amont Aval	1 	2
Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe en marche parallèle	Central Amont Aval	4 	7
Réglage en fonction du niveau d'eau d'une tranche verticale de puissance.	Central Amont Aval	5 	8
		10 	11
		13 	14



Liaison électrique permettant de constituer une tranche verticale de puissance

n → Groupe asservi au niveau d'eau du bassin de compensation

r → Groupe asservi au réglage de la variable indépendante

(A) (B) (C) ... (X) Services A, B, C, ... X.

difficile d'arriver à ce que les puissances fournies par les groupes remplissent rigoureusement cette condition. D'autre part, si le débit intermédiaire alimentant le bassin de compensation est variable, et si le volume de retenue du bassin de compensation est relativement faible, il est alors indispensable de prévoir un réglage du niveau d'eau de ce bassin. En principe, ce réglage peut être effectué de trois façons principales :

a) *Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe en marche isolée*

La puissance d'un groupe ou de plusieurs groupes choisis à volonté dans la centrale amont ou aval est dans ce cas asservie au niveau d'eau du bassin de compensation. On choisira de préférence la centrale amont pour réduire la distance de la télémesure de ce niveau d'eau.

Ainsi que le représente en principe le cas 1 du tableau I, le groupe désigné par B est asservi au niveau d'eau et marche sur un service séparé. Ce groupe est chargé de compenser les fluctuations du débit résultant d'un apport intermédiaire et les écarts éventuels de la production des groupes désignés par A et X par rapport au programme défini par la condition « de continuité des débits ». Les groupes X ont une marche sur programme ; le groupe A, en parallèle ou non avec les groupes X, a également une marche sur programme ; cependant, la puissance de consigne de ce programme n'est ajustable que dans certaines limites imposées par la loi de continuité des débits.

Les conditions qui déterminent quantitativement la production des groupes A et B sont développées en annexe et récapitulées dans le tableau II rubrique a ; elles définissent quatre droites qui délimitent une « zone de réglage » représentée par la surface hachurée de la figure 2 a ; la puissance relative du service A doit être choisie dans cette surface. Pour chaque valeur du débit relatif q_i (débit résultant de l'apport dans le bassin intermédiaire et de la charge des groupes X) la figure 2 a montre entre quelles valeurs extrêmes la puissance du groupe A peut être choisie.

Ce mode de réglage a l'avantage d'être très simple et de limiter les télémesures au minimum ; il a l'inconvénient que le caractère de la production du groupe B asservi au niveau d'eau du bassin de compensation est celui d'un groupe au fil de l'eau dont la puissance varie indépendamment d'un programme ; la qualité de cette production est donc très réduite par rapport à celle que l'on attend d'un aménagement avec accumulation.

b) *Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe marchant en parallèle*

Le groupe de la centrale amont asservi au niveau d'eau peut également marcher en parallèle avec un groupe de la centrale aval ainsi que le représente en principe le cas 2 du tableau I. Les limites entre lesquelles la puissance du service A ainsi constitué doit être choisie sont récapitulées par le tableau II rubrique b et par la figure 2 b.

L'inconvénient de ce mode de réglage est que si le débit résultant q_i est variable, ces variations ont une répercussion sur la production du service A qui a donc le caractère d'une marche au fil de l'eau. D'autre part,

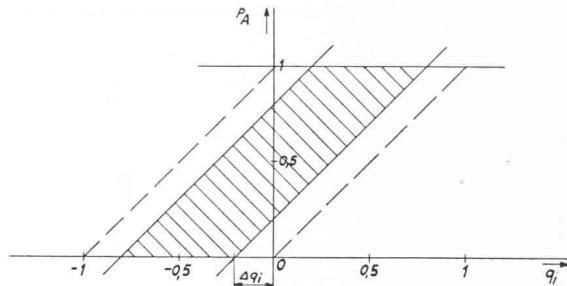


Fig. 2 a
Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe en marche isolée.
(Tableau I, cas 1.)

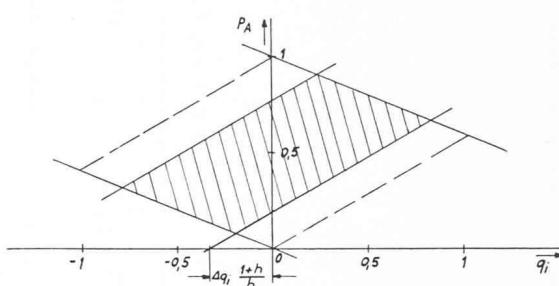


Fig. 2 b
Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe marchant en parallèle.
(Tableau I, cas 2.)

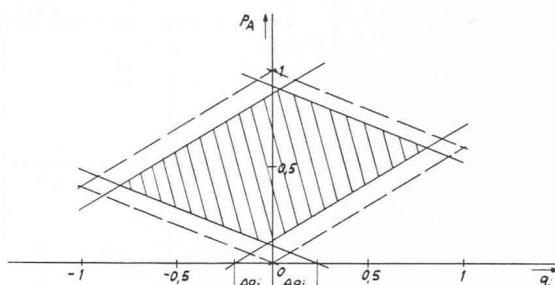


Fig. 2 c
Réglage en fonction du niveau d'eau d'une tranche verticale de puissance.
(Tableau I, cas 3.)

Fig. 2. — Détermination de la « zone de réglage » qui conditionne le choix de la puissance P_A du service A pour les principaux modes de réglage d'un aménagement hydro-électrique disposé en cascade.

P_A Puissance relative de programme du service A.

q_i Débit relatif résultant des apports dans le bassin de compensation et du programme des autres groupes en service dans les centrales amont et aval.

Δq_i Variation relative du débit q_i .

$h = \frac{H_m}{H_v}$ Rapport des hauteurs de chute.

la répartition de la charge du service A entre les centrales amont et aval ne peut être choisie arbitrairement, mais dépend du débit q_i qui n'est pas en général connu de façon explicite. Dans ce cas, la puissance du service A doit être ripée d'une centrale à l'autre jusqu'à ce que la valeur de programme soit atteinte, ce qui peut nécessiter des manœuvres assez fréquentes et compliquées.

TABLEAU II. — Récapitulation des conditions de marche des principaux modes de réglage d'un aménagement hydro-électrique disposé en cascade

	Conditions pour le choix de la puissance du service A	Puissance centrale amont	Puissance centrale aval
a) Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe en marche isolée	$\begin{cases} q_i + \Delta q_i < p_A < 1 + q_i - \Delta q_i \\ 0 < p_A < 1 \end{cases}$	$p_B = p_A - q_i \mp \Delta q_i$	p_A
b) Réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe marchant en parallèle	$\begin{cases} \frac{h}{1+h} + \Delta q_i < p_A < 1 + q_i \frac{h}{1+h} - \Delta q_i \\ -q_i \frac{1}{1+h} < p_A < 1 - \frac{q_i}{1+h} \end{cases}$	$p_{A_m} = p_{A_0} \frac{h}{1+h} - q_i \frac{1}{(1+h)^2} \mp \Delta q_i \frac{1}{1+h}$	$p_{A_v} = p_{A_0} \frac{1}{1+h} + q_i \frac{h}{(1+h)^2}$
c) Réglage en fonction du niveau d'eau d'une tranche verticale de puissance	$\begin{cases} \frac{h}{1+h} (q_i + \Delta q_i) < p_A < 1 + (q_i - \Delta q_i) \frac{h}{1+h} \\ -\frac{1}{1+h} (q_i - \Delta q_i) < p_A < 1 - (q_i + \Delta q_i) \frac{1}{1+h} \end{cases}$	$p_{A_m} = p_A \frac{h}{1+h} - (q_i \mp \Delta q_i) \frac{h}{(1+h)^2}$	$p_{A_v} = p_A \frac{1}{1+h} + (q_i \mp \Delta q_i) \frac{1}{(1+h)^2}$

La signification des symboles de ce tableau est donnée dans l'annexe I. — ¹⁾ Conditions imposées par la centrale amont. — ²⁾ Conditions imposées par la centrale aval.

c) Réglage d'une tranche verticale de puissance en fonction du niveau

Par « tranche verticale de puissance », nous désignons un ou plusieurs groupes des centrales amont et aval reliés électriquement entre eux et correspondant à un même débit nominal.

Ainsi que le représente schématiquement le cas 3 du tableau I, les deux groupes du service A marchent en parallèle et sont asservis l'un et l'autre au niveau d'eau, mais en sens inverse. Si, par exemple, le niveau d'eau du bassin de compensation monte, le réglage diminue automatiquement la production de la centrale amont et augmente de la même quantité celle de la centrale aval jusqu'à ce que le niveau se stabilise autour d'une nouvelle valeur.

Le tableau II rubrique c et la figure 2 c récapitulent les conditions imposées pour le choix de la puissance du service A.

La figure 3 représente schématiquement la réalisation d'un tel réglage. La puissance de programme se trouve automatiquement répartie entre les centrales amont et aval par l'intermédiaire d'un potentiomètre dont le curseur est asservi au niveau d'eau. En cas de réalisation et pour des raisons d'ordre pratique, il peut être avantageux d'obtenir le même résultat en traduisant la variation du niveau d'eau en une tension qui s'ajoute, respectivement, se soustrait à une tension qui caractérise la puissance de programme des groupes amont et aval.

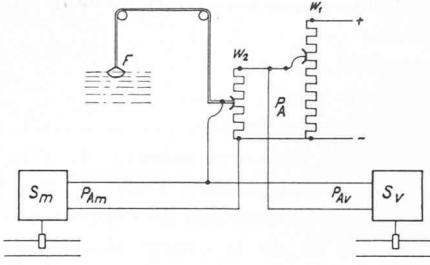


Fig. 3. — Principe du réglage d'une tranche verticale de puissance en fonction du niveau d'eau en asservissant au niveau d'eau le potentiomètre de répartition de la puissance entre centrales amont et aval.

- F Flotteur pour la mesure du niveau d'eau du bassin de compensation.
 W₁ Potentiomètre permettant d'ajuster la puissance de programme P_A.
 W₂ Potentiomètre pour la répartition de la puissance P_A entre les centrales amont et aval.
 S_m, S_v Servo-moteurs à action proportionnelle permettant d'ajuster l'ouverture des turbines des centrales amont et aval.
 P_A Puissance du programme A.
 P_{A_m} Puissance à fournir par la centrale amont.
 P_{A_v} Puissance à fournir par la centrale aval.

L'inconvénient de ce mode de réglage, c'est qu'il nécessite un dispositif de réglage plus compliqué avec un régulateur commun aux deux centrales, une télémétrie du niveau d'eau jusqu'à ce régulateur, une télécommande de ce régulateur aux deux centrales et l'existence d'une liaison électrique entre centrales amont et aval qui soit réservée au service constitué par la tranche verticale.

Son avantage est que, dans la limite de la capacité de

réglage des groupes du service A, la production de ce service est maintenue égale à sa valeur de consigne, indépendamment des variations du débit d'apport intermédiaire et que la répartition optimum de la puissance du service A entre les centrales amont et aval est automatiquement assurée.

B. Marche avec réglage de la fréquence

Les centrales à accumulation sont particulièrement aptes à participer au maintien de la fréquence des réseaux qu'elles alimentent, et c'est dévaloriser leur production que de régler leur production au moyen des limiteurs d'ouverture de leurs turbines ainsi que nous l'avons admis jusqu'ici. Si ces centrales sont les plus importantes de leur réseau, elles jouent le rôle de chef d'orchestre et nous sommes ramenés au cas du réglage selon une variable indépendante que nous examinerons par la suite ; si leur puissance est relativement faible par rapport à la puissance du complexe interconnecté, la fréquence leur est imposée par ce complexe ; pour qu'elles participent cependant au maintien de la fréquence, il faut que l'ajustage de leur puissance en fonction du niveau d'eau s'effectue au moyen du dispositif de changement de vitesse de leurs turbines. Cependant, pour que la condition de continuité des débits soit remplie indépendamment des fluctuations de la fréquence, il faut que les groupes des centrales amont et aval marchent en parallèle et avec le même statisme. Si ces centrales doivent alimenter par groupes séparés différents réseaux, il faut qu'ils forment des tranches verticales de puissance, de façon que les variations de débit résultant des écarts de fréquence de chacun de ces réseaux soient les mêmes pour les centrales amont et aval.

II. Marche avec réglage en fonction d'une variable indépendante

On sait que le principe du réglage puissance-fréquence consiste à régler la charge des groupes de réglage d'un réseau selon la caractéristique puissance-fréquence de ce réseau ; cette caractéristique est horizontale pour un réglage à fréquence constante, inclinée pour un réglage puissance-fréquence et verticale pour un réglage à puissance d'échange constante. La tâche des groupes dits « de réglage » est de compenser les fluctuations internes de charge du réseau auquel ils appartiennent, de façon à maintenir la fréquence et la puissance aux valeurs fixées par la caractéristique puissance-fréquence du réseau. La puissance qu'ils doivent fournir a le caractère d'une variable aléatoire, c'est-à-dire qu'elle est soumise à des fluctuations continues selon un diagramme imprévisible.

Les aménagements avec une importante accumulation sont les plus aptes à supporter de rapides et continues variations de charge dans le cadre d'un complexe interconnecté réunissant des centrales de diverses catégories (centrales au fil de l'eau, éventuellement centrales thermiques). Si cet aménagement comporte différents paliers en cascade, le réglage en fonction d'une variable indépendante et le réglage en fonction du niveau d'eau de leur bassin de compensation peuvent s'effectuer soit séparément, soit au contraire d'une façon coordonnée.

A. Réglage séparé du niveau d'eau et de la variable indépendante

a) Réglage d'un groupe en fonction de la variable indépendante

Ainsi que le représentent en principe les cas 4, 5 et 6 du tableau I, un des groupes désignés précédemment par X (cas 1, 2 et 3) et situé soit dans la centrale amont, soit dans la centrale aval, est asservi au réglage de la variable indépendante désignée par r . Les variations de puissance des groupes de réglage C se traduisent par une variation du débit q_i ; les surfaces hachurées des figures 2 a, 2 b et 2 c donnent directement les « zones de réglage », c'est-à-dire que pour une valeur donnée de la puissance du service A, elles indiquent les limites entre lesquelles le débit q_i est susceptible de varier. Pour que la capacité maximum de réglage puisse être utilisée, le point de fonctionnement doit se trouver en régime non troublé au milieu des zones de réglage représentées par les figures 2 a, 2 b et 2 c. Ces figures permettent ainsi de déterminer en fonction de la puissance du service A la valeur optimum qu'il faut adopter pour la puissance de base du service C de façon à obtenir une capacité de réglage aussi élevée que possible. Ces figures permettent également, lorsque cette condition n'est pas remplie, de juger des marges de réglage qui restent à disposition.

Lorsqu'un seul groupe est asservi au niveau d'eau (cas 4 et 5), le diagramme de ce groupe reflète avec un certain décalage les variations de la charge du groupe de réglage ; le caractère de sa production est donc analogue à celui d'un groupe au fil de l'eau avec débit très variable, ce qui diminue beaucoup la qualité de cette production. Cet inconvénient est évité si le réglage à niveau d'eau agit sur la répartition de la puissance entre groupes amont et aval (cas 6).

La puissance fournie par le service A est constante indépendamment des variations du groupe C. Cependant, à chacune de ces variations correspond une nouvelle répartition de la charge entre les groupes amont et aval du service A, ce qui occasionne un important travail de réglage. D'autre part, pour obtenir une marge de réglage suffisante ainsi que cela ressort de la figure 2c, il faut que la puissance de base des groupes du service A soit ajustée à demi-chARGE, ce qui restreint la liberté du choix de la puissance de programme de ce service.

b) Réglage d'une tranche verticale de puissance en fonction de la variable indépendante

Ainsi que le représentent en principe les cas 7, 8 et 9 du tableau I, les deux modes de réglage en fonction du niveau d'eau et de la variable indépendante peuvent fonctionner sans se troubler l'un l'autre, si l'on a soin d'asservir également une « tranche verticale de puissance » à la variable indépendante ; les ordres de réglage sont alors transmis simultanément aux centrales amont et aval, de façon à correspondre à une même variation de débit. Les cas 7, 8 et 9 du tableau I correspondent aux trois cas définis sous I a, b et c (tableau I, cas 1, 2 et 3). Toutes les considérations développées pour ces premiers cas sont encore valables. Le système de réglage représenté en principe par le cas 9 avec deux tranches verticales de puissance, l'une asservie au niveau, l'autre au réglage de la variable indépendante,

donne une solution correcte de ce problème de réglage, mais a l'inconvénient de nécessiter une double liaison verticale ; d'autre part, le service A est prévu pour une marche sur programme et il est souhaitable qu'un aménagement avec accumulation saisonnière puisse produire avant tout de « l'énergie de réglage », ce qui peut se réaliser en combinant le réglage à niveau d'eau et le réglage en fonction de la variable indépendante.

B. Réglage combiné du niveau d'eau et de la variable indépendante

Ainsi que le représentent en principe les cas 10, 11 et 12 du tableau I, il est possible d'asservir au réglage de la variable indépendante les groupes du service A représentés par les cas 1, 2 et 3. La zone hachurée des figures 2 a, 2 b et 2 c donne à nouveau la zone de réglage disponible, c'est-à-dire que pour une valeur donnée du débit q_i , ces figures indiquent les limites entre lesquelles la puissance du service A est susceptible de varier et la valeur moyenne à partir de laquelle ces variations doivent s'effectuer pour que l'on puisse tirer parti du maximum de la capacité de réglage de l'installation. Il faut à nouveau distinguer deux cas :

a) Réglage d'un groupe en fonction de la variable indépendante

Le cas 10 du tableau I représente l'éventualité où le groupe B asservi au niveau d'eau ne marche pas en parallèle avec le groupe A asservi à la variable indépendante.

Par suite du réglage à niveau d'eau, le diagramme de puissance du groupe B reflète avec un certain décalage les fluctuations de la puissance du groupe A ; le groupe B ne peut donc pas tenir un programme, ce qui amoindrit la valeur de sa production.

Pour le cas 11, le groupe amont du service A est asservi au niveau d'eau et le groupe aval du même service est asservi au réglage de la variable indépendante. La puissance produite par le service A est soumise à deux conditions qui peuvent conduire à des exigences contradictoires :

Si par exemple le réglage du groupe aval commande une augmentation de sa puissance, cette même augmentation se retrouve, après un certain délai, dans la production du groupe amont ; il en résulte un surréglage ; il y a risque d'instabilité. Ce mode de réglage est donc à déconseiller et il est nécessaire qu'au moins un des réglages s'effectue sur une tranche verticale, de façon à ne pas troubler l'autre réglage. C'est ce qui est représenté en principe par le cas 12 où une tranche verticale de puissance est asservie au niveau alors que seul le groupe aval de cette tranche est asservi à la variable indépendante.

b) Réglage d'une tranche verticale de puissance en fonction du niveau et de la variable indépendante

Ainsi que le représente le cas 13, une autre possibilité est d'asservir une tranche verticale de puissance à la variable indépendante et de régler le groupe amont en fonction du niveau d'eau.

Cependant, le réglage le plus rationnel permettant d'utiliser au maximum la capacité de réglage de l'aménagement et réduisant au minimum les interventions

des régulateurs, ainsi que le nombre des liaisons électriques verticales à prévoir entre les centrales amont et aval, est représenté par le cas 14 du tableau I et consiste à régler simultanément une tranche verticale en fonction du niveau d'eau et en fonction de la variable indépendante, selon le schéma de principe représenté par la figure 4 ; les ordres de réglage en fonction de la variable indépendante sont transmis simultanément aux centrales amont et aval et n'ont pas d'influence sur le niveau du bassin de compensation. A ce réglage vient se superposer l'asservissement au niveau d'eau qui modifie la répartition de la charge entre centrales amont et aval dès que la condition de continuité des débits n'est pas remplie. Cette superposition peut s'effectuer également par voie électrique ainsi que nous l'avons déjà vu.

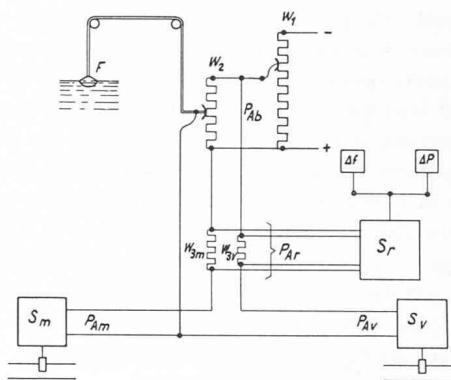


Fig. 4. — Principe du réglage combiné d'une tranche verticale de puissance en fonction d'une variable indépendante et du niveau d'eau.

F	Flotteur pour la mesure du niveau du bassin de compensation.
W ₁	Potentiomètre permettant d'ajuster la puissance de base P _{Ab} .
W ₂	Potentiomètre pour la répartition de la puissance de base P _{Ab} entre la centrale amont et aval.
W _{3m} , W _{3v}	Potentiomètres pour la répartition de la puissance de réglage et réglés dans le rapport des chutes.
Δf	Mesure de l'écart de fréquence.
ΔP	Mesure de l'écart de puissance de la puissance d'échange.
S _m , S _v	Servomoteurs à action proportionnelle permettant d'ajuster l'ouverture de la ou des turbines de réglage amont et aval.
S _r	Servo-moteur à action proportionnelle et intégrale constituant le régulateur de réseau.
P _{Ab}	Puissance de base à fournir par le service A.
P _{Ar}	Puissance de réglage à fournir par le service A.
P _{Am}	Puissance à fournir par la centrale amont.
P _{Av}	Puissance à fournir par la centrale aval.

Si l'on doit prévoir plusieurs services séparés et si l'on veut pouvoir disposer de l'entièvre capacité de réglage de l'aménagement, il faut prévoir autant de liaisons électriques verticales qu'il y a de services séparés. Cependant, si le nombre des liaisons verticales disponibles n'est pas suffisant, il faut envisager d'alimenter un réseau séparé avec un ou plusieurs groupes de l'une des centrales, en répartissant de façon adéquate la puissance de base entre les centrales amont et aval, au détriment toutefois de la capacité de réglage de l'installation.

III. Aspect dynamique du problème du réglage de la puissance d'aménagements disposés en cascade

Nous n'avons tenu compte dans les considérations précédentes que des états de régime permanent. En fait, ces états ne sont atteints qu'après une période transitoire plus ou moins longue qui comporte éventuellement des oscillations amorties autour de l'état de régime ; ces oscillations de réglage seront admissibles si les variations passagères du niveau d'eau du bassin de compensation restent dans des limites acceptables. Une étude dynamique des processus de réglage sortirait du cadre de cet article. Toutefois, dans un cas concret, une telle étude est indispensable. Elle doit montrer en particulier s'il est nécessaire de prévoir des dispositifs de stabilisation et s'il faut éventuellement retarder la transmission des ordres à la centrale aval dans le cas du réglage d'une tranche verticale de puissance, de façon à tenir compte du temps nécessaire à l'écoulement de l'eau de la centrale amont à la centrale aval. D'autre part, cette étude mettra en évidence l'intérêt d'éviter une succession de réglages, mais d'arriver à une coordination des deux modes de réglage pour limiter à un minimum les interventions de réglage.

Si le bassin de compensation n'est pas situé immédiatement à proximité de la centrale amont, mais s'il est relié par l'intermédiaire d'un canal de fuite ou d'une galerie sous pression de longueur non négligeable, le réglage à niveau d'eau risque d'être instable. Ce problème mérite de faire l'objet d'une étude approfondie dans chaque cas où une telle disposition se présente.

IV. Aspect économique du problème du réglage de la puissance des aménagements disposés en cascade

Nous avons vu que selon le mode de réglage qui était adopté, un aménagement disposé en cascade pouvait fournir soit de l'énergie « au fil de l'eau » variant indépendamment de la demande, soit de l'énergie de « programme » dont le diagramme varie par paliers selon une consigne préétablie, soit enfin de l'énergie de « réglage » qui varie de façon imprévisible, de manière à couvrir les fluctuations internes de la charge du dit réseau.

Il est difficile d'attribuer une valeur quantitative à ces différents genres d'énergie ; cependant, certaines indications peuvent être déduites du prix de revient de l'énergie des différentes catégories de centrales, telles qu'elles sont indiquées par la figure 5 (2). On peut admettre que les centrales avec 5000 heures d'utilisation annuelle ou plus fournissent essentiellement de l'énergie au fil de l'eau, tandis que les centrales avec 2000 heures d'utilisation annuelle au moins sont des aménagements avec accumulation saisonnière susceptibles de fournir avant tout de l'énergie de réglage.

Ainsi que cela ressort des courbes 1 et 2 de la figure 5, le rapport entre le prix de production de ces deux catégories de centrales est de 1 à 2,54 pour les centrales construites entre les deux guerres mondiales et de 1 à 2,36 pour les aménagements réalisés depuis la dernière guerre. On peut admettre en première approximation que l'énergie de programme a une valeur intermédiaire. Cette question est très complexe ; il est certain que les conditions d'appréciation sont différentes selon qu'il s'agit d'énergie d'hiver, d'été ou de mi-saison. Cepen-

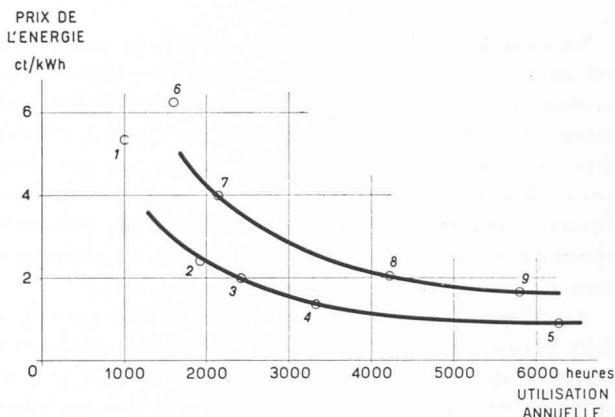


Fig. 5. — Prix de l'énergie de différents aménagements en fonction de leur durée d'utilisation annuelle.

Courbe 1 : Centrales construites entre les deux guerres mondiales.

1. Wäggital.
2. Etzel, Lungernsee-Kaiserstuhl, Sernf.
3. Klosters, EOS.
4. Broc, Handeck I - Innertkirchen, Brusio, Küblis.
5. Mühleberg, Peuffeyre, Albula, Eglisau, Klingnau, Chancy-Pougny, Sembrancher, Verbois, Wynau II, Piottino, Reckingen, Ryburg-Schwörstadt, Nieder恩bach, Dietikon, Wettingen.

Courbe 2 : Centrales construites après la dernière guerre.

6. Lucendro.
7. Handeck II, Miéville.
8. Rossens.
9. Fätschbach, Plessur III, Rabiusa-Realta, Wassen, Julia, Lavey, Rupperswil-Auenstein.

dant, on peut considérer en première approximation que le rapport entre les différentes catégories d'énergie reste le même et admettre pour ce rapport les valeurs relatives suivantes :

Energie au fil de l'eau.	1
Energie de programme.	1,5 à 2
Energie de réglage	2 à 3

Dans les pays avec réseaux thermiques, la production de l'énergie de réglage est coûteuse, aussi l'idée a été développée de mesurer cette énergie de façon à pouvoir la mettre en compte (3, 4, 5). Le prix de l'énergie mesurée par les compteurs habituels doit être dans ce cas multiplié par un certain facteur en fonction des indications du compteur qui mesure « l'énergie de participation au maintien de la fréquence » ou « l'énergie de participation au réglage ».

Dans le cadre d'une interconnexion européenne, les aménagements à grande accumulation sont particulièrement bien aptes à fournir l'énergie de réglage. La bontification de cette énergie permettrait de valoriser au maximum la production de ces aménagements relativement coûteux. Lorsqu'ils sont disposés en cascade, nous avons vu qu'avec un dispositif de réglage judicieux dont le coût est négligeable par rapport au coût de l'ensemble de l'installation, on peut tirer un parti maximum de leur capacité de réglage.

Conclusion

La disposition en cascade d'aménagements hydroélectriques pose des problèmes de réglage qui méritent d'être pris en considération.

Nous avons vu que selon le mode de réglage qui est adopté, la qualité de la production d'un tel aménagement peut présenter le caractère de :

- l'énergie « au fil de l'eau »,
- l'énergie « de programme »,
- l'énergie « de réglage ».

Suivant le système de réglage adopté, la production est ainsi plus ou moins valorisée. Pour être rentable, un aménagement avec accumulation saisonnière doit produire avant tout de l'énergie de haute qualité, c'est-à-dire de l'énergie de réglage. Nous avons vu que, dans ce cas, le mode de réglage le plus rationnel est de prévoir l'asservissement d'une tranche verticale de puissance simultanément au niveau d'eau du bassin de compensation et à la variable indépendante.

Si différents services séparés doivent être prévus, il faut prévoir dans ce cas autant de lignes d'interconnexion entre les centrales amont et aval qu'il y a de services. Si, toutefois, le nombre de ces liaisons verticales est insuffisant, il est possible d'alimenter un ou plusieurs de ces services avec un ou plusieurs groupes de l'une des centrales au prix toutefois d'une réduction de la capacité de réglage de l'aménagement.

Disposer à la fois d'une capacité de réglage élevée et de multiples possibilités de services séparés entraîne des exigences qui sont contradictoires, aussi, à longue échéance, la solution la plus rationnelle pour l'exploitation d'aménagements de ce genre est-elle de prévoir un service unique dans le cadre d'une interconnexion fortement développée.

La technique des réglages automatiques est aujourd'hui avancée à tel point que la réalisation pratique du dispositif de réglage n'offre pas de grandes difficultés. Il paraît rationnel que la transmission des grandeurs à régler, la comparaison avec les grandeurs de consigne et l'émission des ordres de réglage se fassent de façon continue à faible puissance, l'amplification n'intervenant qu'au dernier échelon pour l'action directe sur l'ouverture de la turbine.

Si le volume de retenue du bassin de compensation est relativement faible, une analyse dynamique des processus de réglage est indispensable, analyse qui sort toutefois du cadre de cet article.

ANNEXE

Détermination des conditions de marche d'un aménagement hydro-électrique disposé en cascade avec réglage en fonction du niveau d'eau d'un groupe de la centrale amont en service séparé et marche de la centrale aval sur programme

Nous admettons que les centrales amont et aval sont équipées chacune d'un certain nombre de groupes ayant un même débit nominal ; l'étude pourrait être généralisée dans le cas où les débits nominaux ne sont pas les mêmes. Par l'indice m , nous désignons ce qui se rapporte à la centrale *amont* et par l'indice v ce qui se rapporte à la centrale *aval*. Nous introduisons les définitions suivantes :

Q_m = débit total absorbé par la centrale amont (m^3/s)

Q_v = débit total absorbé par la centrale aval (m^3/s)

$Q_a = Q_{ao} \pm \Delta Q_a$ = débit de l'apport fourni par le bassin versant intermédiaire (m^3/s)

Q_d = débit d'un déversement éventuel du bassin de compensation (m^3/s)

k_m = puissance spécifique de la centrale amont =

$$= \frac{H_m \eta_m}{102} (\text{kW/m}^3)$$

k_v = puissance spécifique de la centrale aval =
 $= \frac{H_v \eta_v}{102} (\text{kW/m}^3)$

H_m = chute de la centrale amont, η_m = rendement de la centrale amont

H_v = chute de la centrale aval, η_v = rendement de la centrale aval

$h = \frac{H_m}{H_v} =$ rapport des chutes $= \frac{k_m}{k_v}$ (dans l'hypothèse que $\eta_m = \eta_v$)

P_A, P_B, \dots, P_X = puissance produite par les groupes A, B, ..., X constituant respectivement les services A, B, ..., X

$Q_{Am}, Q_{Bm}, \dots, Q_{Xm}$ = débit absorbé par les services A, B, ..., X dans la centrale amont

$Q_{Av}, Q_{Bv}, \dots, Q_{Xv}$ = débit absorbé par les services A, B, ..., X dans la centrale aval.

La condition de continuité des débits s'exprime par la relation suivante :

$$Q_m + Q_a - Q_d = Q_v.$$

Ainsi que le représente en principe le cas 1 du tableau I, nous admettons que le service B situé dans la centrale amont est asservi au réglage à niveau et nous nous proposons de déterminer les conditions qui en résultent pour le service A de la centrale aval, compte tenu du ou des services et des apports du bassin versant intermédiaire.

Nous appelons Q_i le débit résultant défini de la façon suivante :

$$Q_i = Q_a + Q_{xm} - Q_d - Q_{xv} = Q_{io} \pm \Delta Q_i$$

avec $Q_{io} = Q_{ao} + Q_{xmo} - Q_{do} - Q_{xro}$

$$\Delta Q_i = \pm \Delta Q_a \pm \Delta Q_{xm} \pm \Delta Q_d \pm \Delta Q_{xv}.$$

Ce débit peut être positif ou négatif. Q_{io} est la valeur moyenne de Q_i ; ΔQ_i sont les variations des débits considérés pendant un palier du programme du service A. Par le jeu du réglage à niveau d'eau, ces variations sont compensées en régime permanent par une variation du débit Q_B . Il en résulte pour les débits des services A et B les conditions suivantes :

Centrale aval : $Q_A = Q_{mo} + Q_{io}$

Centrale amont : $Q_B = Q_{mo} \pm \Delta Q_i$.

Q_{io} et ΔQ_i sont imposés par l'apport intermédiaire et les exigences des services X, Q_{mo} se calcule en tenant compte de la puissance de programme à fournir par le service A

$$P_A = k_v Q_v = k_v (Q_{mo} + Q_{io})$$

$$\text{donc : } Q_{mo} = \frac{P_A}{k_v} - Q_{io}.$$

Il en résulte :

$$Q_A = Q_{mo} + Q_{io} = \frac{P_A}{k_v}$$

$$Q_B = Q_{mo} \pm \Delta Q_i = \frac{P_A}{k_v} - Q_{io} \pm \Delta Q_i.$$

La condition pour que ce service soit possible est que Q_A et Q_B soient compris entre zéro et leur débit

maximum Q_n , nous en déduisons les conditions suivantes :

$$\text{pour la centrale amont : } 0 < \frac{P_A}{k_v} - Q_{io} \pm \Delta Q_i < Q_n$$

$$\text{pour la centrale aval : } 0 < \frac{P_A}{k_v} < Q_n.$$

Nous prenons comme puissance de référence la puissance nominale $P_n = k_v Q_n$ du groupe aval, comme débit de référence le débit nominal Q_n et introduisons des valeurs relatives :

$$\text{centrale amont : } 0 < p_A - q_{io} \mp \Delta q_i < 1$$

$$\text{centrale aval : } 0 < p_A < 1$$

$$\text{avec } p_A = \frac{P_A}{P_n} = \frac{P_A}{k_v Q_n}$$

$$q_i = \frac{Q_{io}}{Q_n}$$

$$\Delta q_i = \frac{\Delta Q_i}{Q_n}.$$

Nous obtenons pour la puissance de programme relative à choisir pour le service A les quatre conditions suivantes :

$$\text{centrale amont : } q_i + \Delta q_i < p_A < 1 + q_i - \Delta q_i$$

$$\text{centrale aval : } 0 < p_A < 1.$$

Ainsi que le représente la figure 6 a, ces quatre conditions définissent quatre droites qui limitent la surface hachurée en forme de trapèze à l'intérieur de laquelle la puissance de consigne p_A doit être choisie. On a admis, dans le cas représenté par la figure 6 a que $\Delta q_i = 0,2$, c'est-à-dire que les variations du débit Q_i pendant le palier du programme pouvaient s'élever jusqu'à 20 % du débit nominal Q_n . Nous déduisons par exemple, lorsque $q_i = 0,5$, la condition suivante pour p_A :

$$0,7 < p_A < 1.$$

Les lignes en pointillés représentent l'extension maximum de la surface admissible dans le cas particulier où $\Delta q_i = 0$. La ligne en trait mixte représente la valeur moyenne à donner à p_A , lui assurant le maximum de possibilités de variations.

Lorsque deux groupes de la centrale amont sont asservis au réglage du niveau d'eau, il en résulte pour p_A les conditions suivantes :

$$\text{centrale amont : } q_i + \Delta q_i < p_A < 2 + q_i - \Delta q_i$$

$$\text{centrale aval : } 0 < p_A < 1.$$

La figure 6 b représente la surface dans laquelle la puissance de programme p_A doit être choisie.

Lorsque deux groupes de la centrale aval sont asservis au programme, il en résulte :

$$\text{centrale amont : } q_i + \Delta q_i < p_A < 1 + q_i - \Delta q_i$$

$$\text{centrale aval : } 0 < p_A < 2.$$

La figure 6 c représente la surface qui dicte le choix de p_A dans ce dernier cas.

Dans le cas où deux groupes sont asservis simultanément au réglage du niveau d'eau et au programme, on

se trouve ramené au premier cas défini ci-dessus avec la différence que l'échelle des abscisses et des ordonnées se trouve doublée.

La puissance du service B est liée à la puissance du service A de la façon suivante :

$$P_B = k_m Q_m = k_m \left(\frac{P_A}{k_v} - Q_{io} \mp \Delta Q_i \right).$$

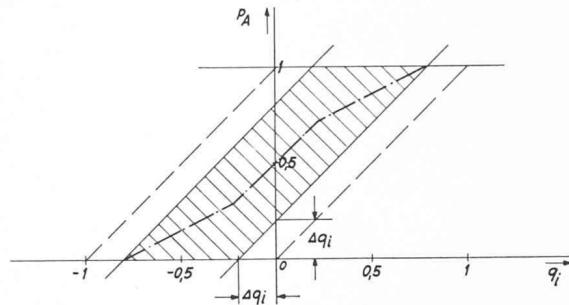


Fig. 6 a

Service avec 1 groupe asservi au réglage à niveau d'eau et 2 groupes asservis au programme.

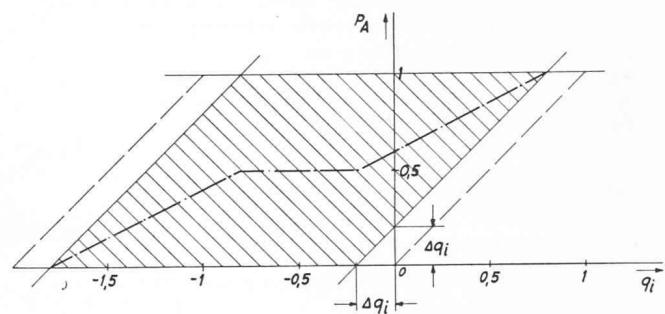


Fig. 6 b

Service avec 2 groupes asservis au réglage à niveau d'eau et 1 groupe asservi au programme.

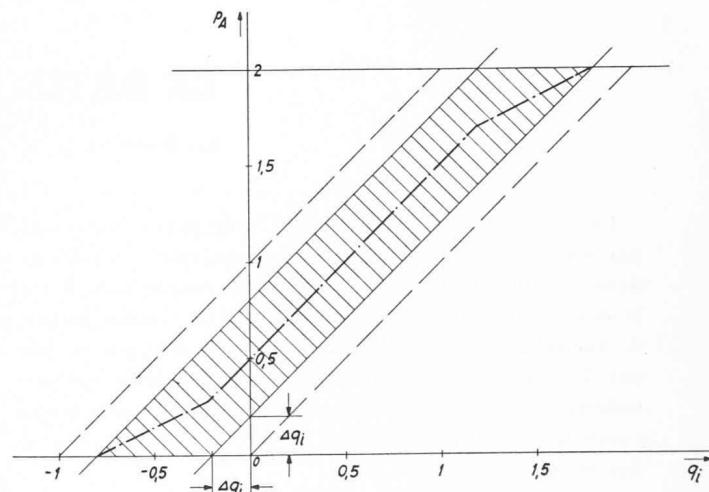


Fig. 6 c.

Service avec 1 groupe asservi au réglage à niveau d'eau et 2 groupes asservis au programme.

Fig. 6. — Conditions d'exploitation d'un aménagement hydro-électrique disposé en cascade avec marche sur programme sans réglage de la fréquence, centrales amont et aval sur service séparé.

p_A Puissance relative de programme du service A.

q_i Débit relatif des apports dans le bassin de compensation.

Δq_i Variation relative de q_i .

En introduisant à nouveau les valeurs relatives, nous obtenons

$$p_B = \frac{P_B}{k_m Q_n} = p_A - q_i \mp \Delta q_i.$$

La surface hachurée de la figure 7 représente la zone dans laquelle la puissance du service B se trouvera maintenue. Pratiquement, le débit résultant q_i ne sera

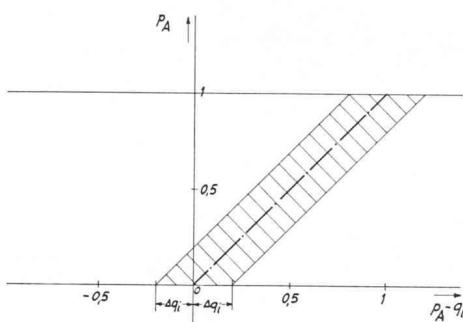


Fig. 7. — Centrales amont et aval sur services séparés.
Variation de la puissance du service B en fonction de la puissance du service A et de la variation du débit des apports intermédiaires.

p_A Puissance relative du service A.
 p_B Puissance relative du service B.
 q_i Débit relatif des apports dans le bassin de compensation.
 Δq_i Variation relative du débit q_i .

pas connu explicitement d'avance ; par suite du réglage à niveau d'eau, le débit imposera une certaine puissance au service B. D'après la charge du service B, on pourra en déduire dans quel domaine on pourra choisir la puissance du service A.

Nous concluons que la disposition d'un aménagement hydro-électrique en cascade a pour conséquence, avec

ce mode de réglage, d'imposer une puissance pour le service B qui a le caractère d'une production au fil de l'eau et de restreindre le domaine dans lequel la puissance du service A peut être choisie dès que le débit $Q_i \neq 0$.

* * *

Un développement du même genre est possible pour les autres cas que nous avons définis ; ce développement sortirait cependant du cadre de notre article. Le résultat auquel il conduit est récapitulé dans le tableau II et les figures 2 b et 2 c.

Adresse des auteurs : M. CUÉNOD et J. WAHL,
Société Générale pour l'Industrie,
17, rue Bovy-Lysberg, Genève.

BIBLIOGRAPHIE CITÉE

- (1) M. CUÉNOD et A. TERRISSE : *Le réglage de la puissance de centrales disposées en cascade*. Schweizerische Bauzeitung, 31 juillet 1954.
- (2) A. KOECHLIN : *L'énergie de pointe et l'exportation*. Bulletin technique de la Suisse romande, n° 19-20, 1955.
- (3) M. CUÉNOD : *Définition et comptage de l'énergie de participation au maintien de la fréquence*. Bulletin de l'Association suisse des Electriciens 1947, n° 24.
- (4) M. CUÉNOD : *Contribution au réglage des réseaux offerte par la mesure de l'énergie de participation au maintien de la fréquence et de la tension*. Bulletin de l'Association suisse des Electriciens 1951, n° 3.
- (5) M. CUÉNOD, A. JACQUES et R. RENCHON : *Contrôle du réglage des puissances d'échange entre réseaux électriques interconnectés*. Bulletin de la Société française des Electriciens, mars 1954.

LE BÂTIMENT D'USINE

par MARCEL D. MUELLER, architecte S.I.A.

Le siècle dernier se caractérise tout particulièrement par le phénomène de l'industrialisation, qui se manifeste dans la plupart des pays de l'Europe occidentale. C'est là une chose nouvelle, car l'antiquité ne connaît jamais de véritable grande industrie organisée, n'ayant en fait pas dépassé le stade artisanal, comme le relève fort justement André Siegfried. Or, cette situation ne variera guère durant tout le moyen âge et le commencement des temps modernes.

Au moyen âge, le mouvement commercial européen est avivé par les grandes foires de Beaucaire, Lyon, Genève, Bruges, Francfort, etc. Il suscite la formation de corporations de marchands, que le négoce finit par enrichir. Ce seront ces hommes qui, possédant une organisation de vente, deviendront les premiers industriels. Ils auront en effet l'idée de fabriquer eux-mêmes certains produits, en donnant du travail à façon à des artisans et en dirigeant les opérations successives entrant dans leur fabrication.

Quels sont les locaux qui seront utilisés pour la production des objets ? Le marchand possède une maison construite et aménagée pour son négoce. Elle comprend des locaux d'entreposage et de manutention des marchandises, plus un comptoir de vente. Quant à l'artisan, plus modeste, il ne dispose comme lieu de travail que d'une boutique avec arrière-boutique, occupant le rez-de-chaussée de sa maison, les étages étant réservés à l'habitation.

La première fois que l'on verra apparaître des locaux de travail conçus sur une grande échelle, ce seront des créations de l'Etat, disposant de moyens puissants. Ainsi l'arsenal de la République de Venise comprendra de grands ateliers attenant au chantier naval, avec des bâtiments bâtis spécialement pour cette destination. L'Arsenal royal de Cadix sera conçu d'une manière analogue, et dans ce même pays on verra se créer plus tard la Manufacture royale des Tabacs à Séville, avec ses grands ateliers fort bien aménagés. En Angleterre, on