

# Comment déterminer si, et si oui quand l'accumulation artificielle devra être utilisée en Suisse pour compléter la production d'énergie régularisée

Autor(en): **Colomb, A.L.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 22

PDF erstellt am: **15.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916647>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

eingestuft. Im weiteren wurden mit Hilfe der in Tabelle VI festgelegten Bewertungsunterlagen die Materialgruppen rechnerisch ermittelt und in Kolonne 17, Tabelle V eingesetzt. Kolonne 18 zeigt, dass die durch Vergleich und die mittels Bewertungssystem ermittelten Materialgruppen weitgehend übereinstimmen. Man kann somit für ein bestimmtes Material, aufgrund der dafür in Betracht fallenden Einsatzbedingungen und Streckenkomponenten mit Hilfe der in Tabelle VI aufgeführten Bewertungsunterlagen Luft- und Kriechstrecken auf einfache Weise ermitteln.

#### 4. Zusammenfassung

Ausgegangen von genormten Nennisolationsspannungen und diesen zugeordneten minimalen Prüfspannungen, wurden über Basisluftstrecken, mit Hilfe eines konstanten Streckensprunges, die minimalen Luft- und Kriechstrecken für das gesamte Niederspannungsgebiet festgelegt.

Unter Annahme von 6 Streckenkomponenten, Nennisolationsspannung, Kurzschlussauswirkung, Verschmutzung, Kriechwegfestigkeit, besondere Gefahren und Konstruktion, als Vielfaches des Streckensprunges bewertet, wurde ein Bewertungssystem aufgestellt, mit dessen Hilfe für ein gewähltes Material die entsprechenden Luft- und Kriechstrecken ermittelt werden können.

Das System ist verschieden anwendbar. So können minimale Luft- und Kriechstrecken für ein bestimmtes Material nach Tabelle VI einzeln ermittelt werden, wenn die Bewertung der entsprechenden Streckenkomponenten festgelegt ist. Es können auch Streckentabellen, ähnlich Tabelle IV, erstellt werden, indem für ein bestimmtes Material, die dessen Einsatzart entsprechende Materialgruppe (siehe Tabelle VII) ermittelt wird und je nach Bedarf weitere Materialgruppen z. B. für die verschiedenen Kriechwegfestigkeiten der Isolierstoffe usw. angegliedert werden.

Das System ist erweiterungsfähig und kann auch auf das Gebiet der Hochspannung ausgedehnt werden.

In dem Masse, als die interessierten Länder in der Aufteilung und Bewertung der Streckenkomponenten sich einigen, sind einheitliche Isolationsvorschriften für elektrisches Material möglich.

#### Literatur

- [1] Vorschriften für Niederspannungsschalter. Publ. 0119.1947/1955 des SEV.
- [2] Vorschriften für nichtkeramische Isolierpreßstoffe. Publ. 177 des SEV.
- [3] Regeln für die Prüfung von Isolierteilen an elektrischem Material für Betriebsspannungen bis 1000 V. Publ. 3010.1965 des SEV.
- [4] Lignes de fuite et distances dans l'air. Recommendations du Comité des Règles Générales. CEE REC 3. Octobre 1964.
- [5] Appareillage de commande à basse tension à l'usage industriel. Première Partie: Contacteurs. CEI-Publication 158-1, première édition 1964, annexe C.
- [6] Normzahlen und normale Masszahlen. Normblatt VSM 10001 Blatt 1...4. (ISO/R3-1953.)
- [7] Vorschriften für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel. VDE-Vorschrift 0171/2.61.
- [8] Bestimmungen für die Bemessung der Kriech- und Luftstrecken elektrischer Betriebsmittel. VDE-Vorschrift 0110/5.65.
- [9] Vorschriften für explosions sichere elektrische Installationsmaterialien und Apparate. Publ. 1015.1959 des SEV.
- [10] 4. Entwurf der Expertenkommission des CES für Kriechwege und Luftdistanzen. Regeln für die Bemessung und Beurteilung von Luft- und Kriechstrecken. CES EK-KL 61/3, Klassen 1, 2, 3.
- [11] USA Standards for Safety, Industrial Control Equipment. Underwriters Laboratories Chicago, UL 508, 10th edition, September 1964.
- [12] Specification for Industrial Control Equipment. Canadian Standard Association, CSA C 22.2, Nr. 14, Ottawa 1953.
- [13] Motor Starters and Controllers. British Standard 587 : 1957.
- [14] Industrial Control. National Electrical Manufacturers Association, New York. NEMA Standards Publication No. IC 1-1965.
- [15] Hausinstallationsvorschriften des SEV. Publ. 1000.1961 des SEV.

#### Adresse des Autors:

Jakob Schwyn, Oberingenieur, a. Konstruktionschef der Carl Maier & Cie., Schaffhausen.

## Comment déterminer si, et si oui quand l'accumulation artificielle devra être utilisée en Suisse pour compléter la production d'énergie régularisée

Par A. L. Colomb, Baden

621.31(494)

*La Suisse, jusqu'à présent, a couvert ses besoins d'énergie électrique avec la production d'usines hydrauliques. Grâce à l'aménagement de nombreuses installations à accumulation saisonnière, la production d'énergie régularisée n'a jamais posé de problèmes. Aujourd'hui, les possibilités de production hydro-électrique sont presque épuisées et l'installation de centrales thermiques s'impose. Les centrales thermiques produisant avant tout de l'énergie de base, il devient nécessaire d'examiner les possibilités de production d'énergie régularisée. Le problème est assez complexe et le but de ce travail ne sera pas le résoudre mais, pour l'ensemble du réseau suisse, d'essayer de définir une méthode menant à sa solution et de déterminer quelles sont les informations nécessaires pour y arriver.*

*Bis in die Gegenwart konnte die Schweiz ihren Energiebedarf durch hydraulische Kraftwerke decken. Dank der Errichtung zahlreicher Saisonspeicherwerke gab es in der Spitzenenergieversorgung nie Schwierigkeiten. Heute sind jedoch die Möglichkeiten der hydraulischen Energie nahezu erschöpft und der Bau thermischer Kraftwerke drängt sich auf. Da thermische Kraftwerke vor allem Bandenergie erzeugen, wird es notwendig, dass man die Möglichkeiten der Spitzendeckung studiert. Dieses Problem ist ziemlich komplex und der Sinn dieser Arbeit ist nicht, dasselbe zu entscheiden, sondern es soll versucht werden, für die gesamte schweizerische Energieversorgung einen Weg zu finden, dieses Problem zu lösen und zu bestimmen, welche Informationen man benötigt, um eine solche Lösung zu finden.*

### 1. Généralités

Deux principaux types d'accumulation artificielle sont en usage aujourd'hui. Il s'agit d'abord, dans un système purement hydraulique, de l'accumulation artificielle saisonnière. De l'énergie de surplus est employée pour accumuler de l'eau disponible dans un bassin que les apports naturels n'arrivent pas à remplir. Il est évident qu'un tel système est à conseiller chaque fois que les conditions topographiques et hydrologiques le

permettent. Dans le cas d'un tel système, seule l'énergie de perte du système peut être considérée comme détruite car sans accumulation artificielle, l'eau disponible aurait été dans la plupart des cas perdue. La production nette d'énergie est donc toujours positive.

Ceci n'est pas nécessairement le cas pour le second type d'accumulation artificielle consistant en installations mixtes thermiques-hydrauliques. Dans ce cas, la production nette

d'énergie est négative. Le système produit une valeur purement économique car il permet d'accumuler de l'énergie potentielle utilisable au moment le plus favorable (haut prix de l'énergie) en employant de l'énergie thermique à bon marché ou de déchet.

Ces principes de base, bilan énergétique en tout cas passif, bilan économique peut être actif, indiquent d'emblée les sujets à étudier pour se rendre compte si l'installation de stations d'accumulation par pompage est indiquée pour un système thermique générateur d'énergie électrique.

Pour commencer, il faut voir si le système envisagé est capable de produire de l'énergie régularisée par des moyens directs, accumulation naturelle, turbine à gaz, etc. Ceci est important car il est évident que la création d'un bien purement économique à partir de la destruction d'une valeur primaire (énergie) est une opération inflationnaire si elle est effectuée sans nécessité fondamentale donc dans un but purement lucratif. Il faut ensuite, au cas où la production d'énergie de pointe est déficiente, comparer la rentabilité des différents moyens de génération, dont l'accumulation artificielle, et choisir le plus avantageux.

Le but de ce travail, de nature préliminaire, n'est pas de prédire de façon précise quand et avec quelle puissance il faudra installer des aménagements d'accumulation artificielle en Suisse. Il s'agit plutôt de déterminer, en se servant d'un modèle très schématique, quelles sont les informations nécessaires pour pouvoir estimer comment et quand il faudra faire appel à ce type d'installation pour satisfaire au mieux aux besoins d'énergie régularisée du pays.

## 2. Estimation sommaire des possibilités suisses de production d'énergie régularisée

Les possibilités suisses de production d'énergie hydro-électrique, pour une année d'hydraulicité moyenne, présentées dans le tableau suivant ont été estimées, pour la période allant de 1963 à 1971, en se basant sur les pronostics présentés dans la communication annuelle de l'office fédéral de l'économie énergétique [1]<sup>1)</sup>.

Ces pronostics ont été projetés jusqu'à l'année 1974/75 suivant le rapport d'avril 1965 des dix grandes compagnies d'électricité [2]. Il a de plus été admis que la productibilité aura atteint son maximum à cette date.

La productibilité des usines hydro-électriques a été séparée en deux catégories: production non régularisée et production régularisée. La production non régularisée a été définie comme étant la somme de la production des usines au fil de l'eau et de 50 % de l'énergie produite par les apports naturels aux usines à accumulation.

Pour la production régularisée, 50 % de l'énergie produite par les apports naturels aux usines à accumulation ont été additionnés à l'énergie produite par les accumulations saisonnières<sup>2)</sup>. Il est clair que cette répartition de l'énergie produite par les apports naturels aux usines à accumulation est tant soit peu arbitraire, mais vu le manque d'information sur ce sujet il faut s'en contenter pour l'instant. Il est certain qu'une étude analysant les possibilités de régularisation de tous les apports

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

<sup>2)</sup> 80 % de l'énergie accumulée au 1<sup>er</sup> octobre est attribuée au semestre d'hiver et 20 % à celui d'été.

naturels aussi bien aux usines à accumulation qu'aux usines au fil de l'eau serait d'une grande utilité pour optimiser les caractéristiques techniques et économiques des aménagements futurs.

Les valeurs de la demande d'énergie<sup>3)</sup>, pour la période s'étendant jusqu'en 1990 (tableau I), ont été obtenues en utilisant les valeurs moyennes des accroissements de consommation observés pour les semestres d'hiver et d'été pendant les quatorze dernières années. Il est reconnu qu'il est hasardeux d'établir une projection aussi lointaine avec une hypothèse aussi grossière. Le but de ce travail n'étant pas l'étude d'hypothèses de projection, mais plutôt l'analyse sommaire des lignes générales contrôlant l'utilisation économique de l'accumulation artificielle, les faiblesses possibles d'une telle hypothèse ne seront pas discutées ici. Il est toutefois bon de constater que vu la loi des grands nombres les variations de la demande avec le temps auront toujours en moyenne un caractère exponentiel; donc les conclusions obtenues avec un taux d'accroissement erroné seront tout au plus déplacées dans le temps.

Les valeurs de la demande ainsi obtenues ont été subdivisées en demande de base<sup>4)</sup> et en demande régularisée<sup>5)</sup>. L'examen des diagrammes de charge des mercredis de l'année hydrographique 1963/64 [1] montre que la demande de base, telle qu'elle est définie plus haut, se monte à 75 % de la demande totale et que la demande régularisée représente 25 % de cette dernière.

Les valeurs indiquées dans les colonnes de production thermique ne tiennent pas compte des usines thermiques (classiques ou nucléaires) en exploitation ou en construction. Elles ont été déterminées de façon à ce que le bilan énergétique annuel soit balancé en tenant compte que l'énergie régularisable contenue dans les bassins d'accumulation sert pour l'instant en bonne partie à satisfaire à la demande de base. En comparant la colonne de production thermique régularisée à la dernière colonne du tableau montrant l'excédent de production régularisée on constate que l'énergie régularisée à disposition ne suffira plus à satisfaire à la demande régularisée entre les années 1974/1975 et 1979/1980. Il est évident que la définition utilisée pour caractériser la demande de base est par trop restrictive et que la puissance limite pourrait être montée dans le diagramme de charge, ce qui aurait pour effet de retarder le temps auquel la production d'énergie régularisée devra être complétée par des installations autres qu'hydrauliques. Néanmoins, le manque d'informations concernant les possibilités d'accumulations à court terme des usines au fil de l'eau ainsi que des apports naturels aux usines à accumulation ne justifie pas, pour l'instant, l'utilisation d'un modèle plus détaillé.

Il est donc possible de conclure provisoirement que l'ensemble des centrales suisses peuvent satisfaire à la demande d'énergie régularisée en tout cas jusqu'en 1980 et que la qualité de cette estimation pourrait être améliorée par une meilleure connaissance des possibilités de réglage des apports naturels aux usines hydrauliques et des facteurs contrôlant le développement de la consommation.

<sup>3)</sup> Sans tenir compte de la consommation des chaudières électriques et de l'accumulation par pompage.

<sup>4)</sup> Pour ne pas obscurcir le problème, la demande de base a été définie comme étant la quantité d'énergie produite par la plus grande puissance demandée 24 h par jour. Sur un diagramme de charge journalier cette énergie est représentée par le plus grand rectangle à la base du diagramme.

<sup>5)</sup> Demande totale moins demande de base.

| Année   | Demande de base<br>TWh | Production non régularisée        |                  |               | Demande régularisée<br>TWh | Production régularisée           |                  |               | Demande totale<br>TWh | Production totale<br>TWh | Excédent de production<br>TWh | Excédent production régularisée utilisée pour demande de base<br>TWh |
|---------|------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------|----------------------------|----------------------------------|------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|--|
|         |                        | Fil de l'eau <sup>1)</sup><br>TWh | Thermique<br>TWh | Totale<br>TWh |                            | Hydraulique <sup>2)</sup><br>TWh | Thermique<br>TWh | Totale<br>TWh |                       |                          |                               |  |
| 1963/64 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 8,1                    | 4,9                               | 0                | 4,9           | 2,7                        | 5,9                              | 0                | 5,9           | 10,8                  | 10,8                     | 0                             | 3,2  |
| Été     | 8,0                    | 8,9                               | 0                | 8,9           | 2,7                        | 3,0                              | 0                | 3,0           | 10,7                  | 11,9                     | 1,2                           | 0,3  |
| Total   | 16,1                   | 13,8                              | 0                | 13,8          | 5,4                        | 8,9                              | 0                | 8,9           | 21,5                  | 22,7                     | 1,2                           | 3,5  |
| 1969/70 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 11,5                   | 5,9                               | 2,1              | 8,0           | 3,8                        | 7,3                              | 0                | 7,3           | 15,3                  | 15,3                     | 0                             | 3,5  |
| Été     | 10,7                   | 12,3                              | 0                | 12,3          | 3,6                        | 4,4                              | 0                | 4,4           | 14,3                  | 16,7                     | 2,4                           | 0,8  |
| Total   | 22,2                   | 18,2                              | 2,1              | 20,3          | 7,4                        | 11,7                             | 0                | 11,7          | 29,6                  | 32,0                     | 2,4                           | 4,3  |
| 1974/75 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 15,3                   | 6,0                               | 6,9              | 12,9          | 5,1                        | 7,5                              | 0                | 7,5           | 20,4                  | 20,4                     | 0                             | 2,4  |
| Été     | 13,7                   | 12,5                              | 1,2              | 13,7          | 4,6                        | 4,5                              | 0,1              | 4,6           | 18,3                  | 18,3                     | 0                             | 0  |
| Total   | 29,0                   | 18,5                              | 8,1              | 26,6          | 9,7                        | 12,0                             | 0,1              | 12,1          | 38,7                  | 38,7                     | 0                             | 2,4  |
| 1979/80 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 20,4                   | 6,0                               | 13,7             | 19,7          | 6,8                        | 7,5                              | 0                | 7,5           | 27,2                  | 27,2                     | 0                             | 0,7  |
| Été     | 17,6                   | 12,5                              | 5,1              | 17,6          | 5,9                        | 4,5                              | 1,4              | 5,9           | 23,5                  | 23,5                     | 0                             | 0  |
| Total   | 38,0                   | 18,5                              | 18,8             | 37,3          | 12,7                       | 12,0                             | 1,4              | 13,4          | 50,7                  | 50,7                     | 0                             | 0,7  |
| 1984/85 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 27,1                   | 6,0                               | 21,1             | 27,1          | 9,1                        | 7,5                              | 1,6              | 9,1           | 36,2                  | 36,2                     | 0                             | 0  |
| Été     | 22,6                   | 12,5                              | 10,1             | 22,6          | 7,5                        | 4,5                              | 3,0              | 7,5           | 30,1                  | 30,1                     | 0                             | 0  |
| Total   | 49,7                   | 18,5                              | 31,2             | 49,7          | 16,6                       | 12,0                             | 4,6              | 16,6          | 66,3                  | 66,3                     | 0                             | 0  |
| 1989/90 |                        |                                   |                  |               |                            |                                  |                  |               |                       |                          |                               |  |
| Hiver   | 36,1                   | 6,0                               | 30,1             | 36,1          | 12,1                       | 7,5                              | 4,6              | 12,1          | 48,2                  | 48,2                     | 0                             | 0  |
| Été     | 28,9                   | 12,5                              | 16,4             | 28,9          | 9,6                        | 4,5                              | 5,1              | 9,6           | 38,5                  | 38,5                     | 0                             | 0  |
| Total   | 65,0                   | 18,5                              | 46,5             | 65,0          | 21,7                       | 12,0                             | 9,7              | 21,7          | 86,7                  | 86,7                     | 0                             | 0  |

<sup>1)</sup> Comprend 50 % des apports aux usines à accumulation.

<sup>2)</sup> Production provenant d'accumulations saisonnières plus 50 % des apports aux usines à accumulation.

### 3. Utilisation économique de l'accumulation par pompage dans le cas d'un système thermique

Afin d'illustrer de façon concrète quelles sont les considérations à faire pour estimer les conditions de rentabilité d'installation d'accumulation artificielle, un exemple de principe est montré ci-dessous.

Etant donné le manque d'informations concernant les possibilités de réglage des apports naturels aux usines hydroélectriques, le cas simple d'un système composé uniquement de centrales thermiques et à accumulation artificielle sera traité ici. Il va sans dire que le principe de calcul restera le même pour un système plus compliqué, seuls les résultats quantitatifs changeront.

Fig. 1 montre l'allure générale d'un diagramme de charge journalier moyen.

Les puissances remarquables sont définies:

- $P_p$  puissance maximum demandée
- $P_b$  puissance de base
- $P_a$  puissance thermique nécessaire et disponible pendant certaines heures pour l'accumulation par pompage

$P_a$  peut aussi être considérée comme étant la puissance de base du système mixte.

Les frais de production  $C$  seront pour un système uniquement thermique

$$C = P_p a + (W_b + W_p) b$$

où

- $W_b$  énergie de base produite en une année (kWh)
- $W_p$  énergie régularisée et de pointe produite en une année (kWh)
- $a$  frais annuels fixes de l'installation thermique (Fr./kW)
- $b$  coût du combustible thermique (Fr./kWh)

Dans le cas d'un système avec accumulation par pompage les frais de production  $C_a$  seront donnés par:

$$C_a = N_a a + (P_p - P_a) a_a + W_b b + \frac{1}{\eta} W_p b$$

*244 - 245*

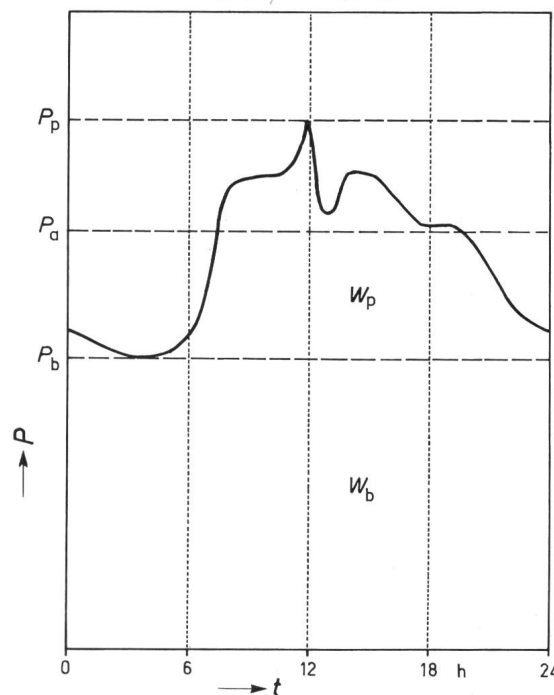


Fig. 1

**Diagramme d'un charge journalier moyen**

$P$  puissance;  $P_p$  puissance maximum demandée;  $P_b$  puissance de base;  $P_a$  puissance thermique nécessaire et disponible pendant certaines heures pour l'accumulation par pompage;  $W_b$  énergie de base produite en une année (kWh);  $W_p$  énergie régularisée et de pointe produite en une année (kWh);  $t$  temps

où

- $a_a$  frais annuels fixes de l'installation d'accumulation par pompage
- $\eta$  rendement général de l'installation d'accumulation par pompage

En admettant que l'installation thermique puisse être arrêtée et démarrée sans produire de frais supplémentaires, il faut que

$$C_a \leq C$$

pour que l'installation d'un système d'accumulation par pompage puisse être économiquement justifié.

Donc

$$P_a a + (P_p - P_a) a_a + W_b b + \frac{1}{\eta} W_p b \leq W_p a + (W_b + W_p) b$$

ou après quelques transformations élémentaires:

$$\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{W_p}{P_p - P_a}\right) \leq \frac{a - a_a}{b}$$

$P_a$  est une quantité qui doit se calculer séparément.

$$P_a = \frac{1}{t_0} \left( W_b + \frac{1}{\eta} W_p \right)$$

où

$$t_0 = 8760 \text{ h}$$

En définissant

$$W_p = p_1 W_b$$

et

$$P_p = p_2 P_b$$

Il est possible d'écrire l'inégalité précédente de la façon suivante:

$$\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{p_1}{p_2 - 1 - \frac{p_1}{\eta}}\right) t_0 \leq \frac{a - a_a}{b}$$

L'expression  $p_2 - 1 - p_1/\eta$  doit rester positive car cette quantité est égale à  $P_p - P_a$  et  $P_a > P_p$  n'a aucun sens.

Donc

$$p_2 - 1 - \frac{p_1}{\eta} > 0$$

ou

$$\eta > \frac{p_1}{p_2 - 1}$$

Cette forme peut s'écrire de la façon suivante en fonction des puissances remarquables du système.

$$\eta > \frac{W_p}{W_b} \left( \frac{P_b}{P_p - P_b} \right)$$

et avec

$$W_b = P_b t_0$$

et

$$W_p = (P_p - P_b) \hat{t}_p$$

$$\frac{\hat{t}_p}{t_0} < \eta$$

$\hat{t}_p$  représente la durée d'utilisation de la puissance  $P_p - P_b$  rapportée à l'énergie de pointe  $W_p$ .

Il faut donc pour commencer que le rendement de l'installation d'accumulation par pompage soit plus grand qu'une certaine valeur donnée par l'allure du diagramme de charge pour que le système ait un sens.

Avec cette restriction, la formule de la page précédente donne les conditions pour lesquelles le pompage est économiquement intéressant.

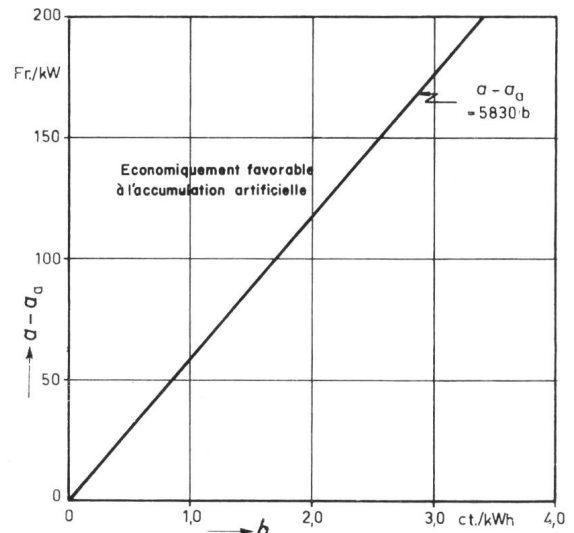


Fig. 2  
Conditions économiquement avantageuses pour l'accumulation artificielle  
 $a - a_a$  Différences des frais annuels fixes;  $b_c$  Frais de combustible

### Exemple numérique

Appliquons le résultat obtenu pour ce système de production arbitraire aux besoins de la Suisse tels qu'ils sont définis par les 4 diagrammes de charge des 4 mercredis de 1963/64.

On obtient ainsi  $p_1 = 0,33$  et  $p_2 = 1,75$ . Voyons d'abord quelle est la valeur minimum acceptable pour le rendement de l'installation.

$$\eta > \frac{p_1}{p_2 - 1}$$

$$\eta > 0,45$$

Cette condition est donc facilement réalisable.

Admettons

$$\eta = 0,67$$

$$\frac{1-\eta}{\eta} \left( \frac{p_1}{p_2 - 1 - p_1/\eta} \right) t_0 = 0,67 t_0 = 0,67 \cdot 8760 = 5830 \text{ h}$$

donc

$$5830 \leq \frac{a - a_a}{b}$$

### Investissements spécifiques approximatifs

Tableau II

|  | Accumulation artificielle | Centrale thermique |                                  |                               |
|--|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|  |                           | Classique          | Nucléaire                        |                               |
|  |                           |                    | Uranium enrichi<br>Eau naturelle | Uranium naturel<br>Eau lourde |
| Investissements spécifiques (Fr./kW)                     | 600                       | 600                | 850                              | 1200                          |
| Loyer de l'argent et frais d'exploitation et d'entretien | 7 %                       | 10 %               | 10 %                             | 10 %                          |
| Frais annuels fixes (Fr./kW/an)                          | 42                        | 60                 | 85                               | 120                           |
| Différences des frais annuels fixes                      | —                         | 18                 | 43                               | 78                            |
| Frais de combustible (ct./kWh)                           | —                         | 1,8                | 0,8                              | 0,3                           |
| $\frac{a - a_a}{b}$                                      | —                         | 1000               | 5400                             | 26000                         |



La figure 2 montre les relations entre la différence des frais annuels fixes et le prix du combustible favorable à l'accumulation artificielle pour couvrir la production régularisée du système envisagé.

Pour conclure cet exemple, voyons si les centrales thermiques classiques et les centrales nucléaires de types éprouvés doivent être complétées par un système d'accumulation artificielle pour produire de l'énergie régularisée. Le tableau II montre les investissements spécifiques approximatifs ainsi que les frais annuels fixes de différentes installations considérées. Il est à noter que les deux types de centrales nucléaires produisent de l'énergie au même prix pour une durée d'utilisation de 7000 h par an.

On voit donc que les centrales nucléaires à uranium naturel et eau lourde devront être complétées par des systèmes à accumulation artificielle pour produire de l'énergie régularisée avantagusement.

Le cas des centrales nucléaires à uranium enrichi et eau naturelle est marginal et une analyse beaucoup plus serrée est nécessaire avant de décider comment produire de l'énergie régularisée. Les centrales thermiques classiques, principalement à cause de leurs hauts frais de combustible, pourront satisfaire directement à la demande d'énergie régularisée.

Il est évident que ces résultats ne peuvent s'appliquer directement aux conditions du réseau suisse, car l'exemple numérique présenté ici ne tient pas compte des possibilités de production d'énergie de base par les usines au fil de l'eau et

d'énergie de pointe par les usines à accumulation. Malheureusement, étant donné le manque d'information cité plus haut, il n'est pas justifiable pour l'instant d'effectuer une analyse beaucoup plus exacte.

#### 4. Conclusions

Les résultats de cette étude préliminaire montrent que, si les usines thermiques installées en Suisse sont à combustible nucléaire, l'accumulation artificielle devra compléter les installations productrices d'énergie régularisée, peut-être déjà au cours de la décennie suivant 1980. Malheureusement, toutes les informations nécessaires à l'étude détaillée de ce problème ne sont pas actuellement disponibles. Il faudrait en tous cas connaître les durées de retenue de tous les apports naturels aux usines hydro-électriques aussi bien pour celles au fil de l'eau que pour celles à accumulation. La connaissance de diagrammes de charge de jours ouvrables autres que les mercredis permettrait aussi d'obtenir de meilleurs résultats.

#### Bibliographie

- [1] Office fédéral de l'économie énergétique: Production et consommation d'énergie électrique en Suisse pendant l'année hydrographique 1963/64. Bull. ASE 56(1965)7, p. 251...269.
- [2] W. Schürmlin et E. Zihlmann: Perspectives d'approvisionnement de la Suisse en électricité. Bull. ASE 56(1965)10, p. 397...406.

#### Adresse de l'auteur:

A. L. Colomb, «Motor-Columbus» S. A. d'Entreprises Electriques, 5400 Baden.

## Einige Grundlagen tiefgekühlter Leiter und Supraleiter

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 17. Mai 1966 in Zürich,

von J. L. Olsen, Zürich

In diesem Aufsatz werden die Physik und einige technologische Probleme gekühlter Leiter und Supraleiter besprochen. Die physikalischen Eigenschaften und wesentlichen Probleme der tiefgekühlten normalen Leiter sind von jenen der Supraleiter ganz verschieden. In beiden Fällen liegen jedoch die Vorteile der Verwendung von tiefen Temperaturen in der grossen damit verbundenen Reduktion des Widerstandes. Es ist ja der spezifische Widerstand, der die Leistungsaufnahme und die Dimensionierung der elektrischen und elektromechanischen Geräte bestimmt. Im Fall der normalen, nicht supraleitenden Metalle kann man je nach deren Reinheit und Temperatur eine Widerstandsreduktion um einen Faktor  $10^5$  gegenüber der Zimmertemperatur erzeugen. Im Falle der Supraleiter ist der Tieftemperatur-Widerstand für Gleichstrom gleich Null und das Widerstandsverhältnis ist unendlich.

### 1. Normalleiter

Der Widerstand  $\varrho$  eines normalen Metalls setzt sich aus zwei unabhängigen Gliedern zusammen:

$$\varrho = \varrho_r + \varrho_{th} \quad (1)$$

$\varrho_r$  ist der Widerstand, der von der Streuung der Elektronen durch Verunreinigungen und Gitterstörstellen herrührt, und  $\varrho_{th}$  der Widerstand, der von der thermischen Bewegung des Gitters herrührt. Das erste Glied  $\varrho_r$  ist temperaturunabhängig, und der zweite Anteil,  $\varrho_{th}$ , ist von  $\varrho_r$  fast unabhängig. Diese Aussage, die sog. Matthiessensche Regel, ist sehr nützlich für

die Berechnung des elektrischen Widerstandes eines Metalls. Genauere Untersuchungen von  $\varrho_{th}$  zeigen bei allen Metallen annähernd die selbe Temperaturabhängigkeit; dies kann man so schreiben:

$$\varrho_{th}(T) = \varrho_{th}(\Theta) \cdot f(T/\Theta) \quad (2)$$

Hier ist die Funktion  $f(T/\Theta)$  gegeben durch:

$$f(T/\Theta) = 4,225 \left(\frac{T}{\Theta}\right)^5 J_5\left(\frac{\Theta}{T}\right) \quad (3)$$

Die Konstante  $\Theta$  hängt vom Metall ab und ist von der selben Grössenordnung wie die Debye-Temperatur, die in der Theorie

Werte von  $J_5(\Theta/T)$  und  $f(T/\Theta)$

Tabelle I

| $\frac{T}{\Theta}$ | $J_5\left(\frac{\Theta}{T}\right)$ | $4,225 \left(\frac{T}{\Theta}\right)^5 \cdot J_5\left(\frac{\Theta}{T}\right)$ |
|--------------------|------------------------------------|--|
| 0                  | 124,43                             | 0  |
| 0,05               | 124,42                             | $1,64 \cdot 10^{-4}$   |
| 0,07692            | 123,14                             | $1,40 \cdot 10^{-3}$   |
| 0,1                | 116,38                             | $4,92 \cdot 10^{-3}$   |
| 0,125              | 101,48                             | $1,31 \cdot 10^{-2}$   |
| 0,166              | 70,873                             | $3,85 \cdot 10^{-2}$   |
| 0,2                | 50,263                             | $6,79 \cdot 10^{-2}$   |
| 0,25               | 29,488                             | $1,22 \cdot 10^{-1}$   |
| 0,333              | 12,771                             | $2,22 \cdot 10^{-1}$   |
| 0,5                | 3,2293                             | $4,27 \cdot 10^{-1}$   |
| 0,6666             | 1,1199                             | $6,23 \cdot 10^{-1}$   |
| 0,8333             | 0,47907                            | $8,13 \cdot 10^{-1}$   |
| 1                  | 0,23662                            | 1,0  |
| 1,25               | 0,098845                           | 1,275  |