

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

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

**Band:** 62 (1971)

**Heft:** 20

**Artikel:** L'optimalisation économique de l'exploitation d'un bassin d'accumulation présentant des pertes

**Autor:** Tiercy, J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915858>

#### 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:** 16.01.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## L'optimalisation économique de l'exploitation d'un bassin d'accumulation présentant des pertes

Par J. Tiercy, Pully

621.221.3 : 65.011.44

*Les pertes par infiltration dans le bassin de retenue des ouvrages hydro-électriques à accumulation peuvent parfois atteindre des valeurs importantes et influencer le bilan énergétique et financier de l'installation. Il est alors essentiel de rechercher l'optimum économique de l'exploitation de l'ouvrage, c'est-à-dire d'optimaliser la production compte tenu de l'évolution saisonnière des pertes et du prix de l'énergie. Dans cet article, l'auteur expose une méthode simple pour atteindre ce but.*

*Die durch Einsickerung in durchlässige Schichten eines Speicherwerkes entstehenden Verluste erreichen manchmal Werte, die die Bilanz des Kraftwerkes in hydraulischer und finanzieller Hinsicht beeinflussen. Es ist deshalb wesentlich, die wirtschaftlichste Betriebsart anzustreben unter Berücksichtigung der saisonbedingten Sickerverluste und der Energiepreise. Der Autor dieses Artikels beschreibt eine einfache Methode, um dieses Ziel zu erreichen.*

### 1. Introduction

Les bassins d'accumulation des ouvrages hydro-électriques présentent toujours des pertes. L'évaporation, dont l'intensité varie avec les conditions météorologiques et la grandeur de la surface d'eau libre artificiellement créée, est inévitable. Les pertes par infiltration au travers du barrage lui-même et des roches de fondation sont réduites au minimum par des voiles d'injections. En dernier lieu des zones perméables de la surface immergée du bassin de retenue peuvent être le siège de pertes par infiltrations parfois importantes.

Les débits d'eau à restituer à la rivière pour assurer le maintien de l'écologie ou pour l'alimentation de réseaux d'irrigation sont fixés par les actes de concession. Ces restitutions sont connues, viennent en déduction des apports d'eau utilisables, et ne peuvent être considérées comme pertes proprement dites.

Les pertes réelles sont généralement très faibles et pratiquement indétectables. Elles n'interviennent alors pas dans les calculs de gestion de l'ouvrage.

Dans quelques cas heureusement rares, les pertes par infiltration peuvent atteindre des valeurs importantes et influencer le bilan énergétique et financier de l'installation. Elles varient avec la pression régnant sur la surface perméable immergée. Cette surface peut elle-même varier avec le niveau de l'eau dans la retenue. La mesure directe de ces pertes n'est pratiquement jamais possible. Elles doivent être estimées statistiquement avec une certaine approximation, et leur expression en fonction du niveau d'eau ou du volume contenu dans la retenue est appelée la «fonction pertes» de l'ouvrage.

Etant donné que:

- a) un bassin de retenue présente des pertes,
- b) ces pertes sont fonction du volume contenu,
- c) le volume contenu évolue saisonnièrement,

d) l'évolution du volume contenu dépend principalement des apports naturels et des prélèvements effectués,  
e) le prix de l'énergie varie selon la saison,

il est essentiel de rechercher l'optimum économique de l'exploitation de l'ouvrage, c'est-à-dire d'optimaliser la production compte tenu de l'évolution saisonnière des pertes et du prix de l'énergie.

Cette recherche est le but de la présente étude.

Remarquons dès maintenant que si le prix de l'énergie était constant, l'optimum économique serait obtenu à pertes nulles, c'est-à-dire avec une production au fil de l'eau maintenant le bassin d'accumulation constamment vide. Le prix de l'énergie étant toujours plus élevé en hiver qu'en été et en heures pleines qu'en heures creuses, l'optimisation économique de l'exploitation comprendra obligatoirement:

- a) un stockage d'énergie en été,
- b) un déstockage d'énergie en hiver,
- c) des pertes saisonnières d'énergie.

Lorsque le bassin de retenue ne présente pas de pertes par infiltration, les deux cas suivants sont à envisager:

- a) Si le prix de l'énergie est constant et égal en hiver et en été, l'optimum économique est toujours atteint, que les prélèvements soient faits en été ou en hiver.
- b) Dès que le prix de l'énergie d'hiver est supérieur au prix d'été, l'optimum économique sera atteint, en procédant au stockage intégral des apports d'été et en effectuant les prélèvements en hiver uniquement.

### 2. Notations

Pour simplifier les calculs, l'unité de temps choisie est le mois, standardisé à 30 jours. L'année est subdivisée en deux périodes distinctes: l'été comprenant les mois de mai à septembre, soit 5 mois et 150 jours, et l'hiver comprenant les mois d'octobre à avril, soit 7 mois et 210 jours.

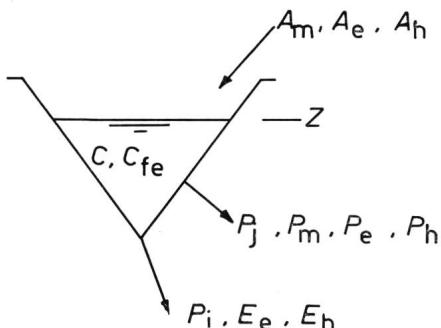


Fig. 1

**Paramètres d'exploitation du bassin d'accumulation présentant des pertes**  
 $A$  apports naturels (mensuels, été, hiver);  $C$  contenu du bassin;  $C_{fe}$  contenu du bassin à la fin de l'été;  $P$  perte énergétique (journalière, mensuelle, été, hiver);  $P_i$  puissance installée;  $E$  énergie produite (été, hiver);  $Z$  cote d'altitude du plan d'eau

Temps	$t$	(en mois)
Période	$T$	(en mois)
Période d'été	$T_e = 5$	
Période d'hiver	$T_h = 7$	
Contenu de la retenue	$C$	(GWh)
Contenu final d'été	$C_{fe}$	(au 30 septembre)
Pertes	$P$	(GWh)
Perte journalière	$P_j$	
Perte mensuelle	$P_m$	
Perte totale d'été	$P_e$	
Perte totale d'hiver	$P_h$	
Apports moyens d'été	$A_e$	(GWh)
Apports moyens d'hiver	$A_h$	
Coefficient de prix	$K_p$	
Coefficients d'exploitation	$K_i$	
Énergie produite	$E$	
Coefficients de contrôle	$K$	(annuel)
	$K_e$	(été)
	$K_h$	(hiver)
Indices: Maximum	max	
optimum	opt	
journalier	j	
mensuel	m	
été	e	
hiver	h	

### 3. Caractéristiques d'exploitation de l'ouvrage

La fig. 1 représente schématiquement les paramètres influençant l'exploitation de l'ouvrage. Ce sont:

a) Les apports naturels  $A$ . Les relevés hydrographiques et les statistiques d'exploitation mettent en évidence les moyennes multianuelle suivantes:

- les apports mensuels moyens  $A_m$ ;
- les apports moyens d'été  $A_e$ ;
- les apports moyens d'hiver  $A_h$ ;
- les écarts-types de chacune de ces 3 valeurs.

b) Les pertes par infiltration  $P$ . La fonction perte de l'ouvrage est étudiée au paragraphe 4.

c) La puissance installée  $P_i$ . Cette puissance fixe la valeur maximum de la production  $E$  (ou prélèvement) qu'il est possible d'effectuer dans un temps donné.

d) Le contenu de la retenue  $C$ . L'évolution saisonnière du contenu conditionne la valeur des pertes saisonnières. Le contenu est par conséquent un paramètre de base du calcul d'optimisation économique de l'exploitation.

L'expérience acquise par l'exploitation de nombreux bassins d'accumulation conduit à adopter, pour l'évolution saisonnière du contenu, les courbes représentées par la fig. 2. Cette figure met en évidence le caractère très différent de l'été, période d'apports importants et de stockage d'énergie, et de l'hiver, période d'apports faibles et de déstockage d'énergie.

#### 3.1 Evolution du contenu en été

Les prélèvements effectués en été dans un bassin d'accumulation sont toujours limités dans toute la mesure du possible

aux périodes d'Heures Pleines, durant lesquelles le prix de l'énergie est le plus favorable. En mai, les apports naturels sont encore modérés et le stockage d'énergie est généralement faible. En juin et juillet, les apports sont importants et le stockage d'énergie l'est également, surtout si les prélevements sont limités aux heures de forte charge. En août, un léger stockage est encore réalisé alors qu'en septembre le contenu du bassin varie peu et diminue même parfois légèrement.

Les remarques précédentes justifient l'allure des caractéristiques choisies pour l'évolution du contenu en été (fig. 2), dont l'expression analytique est la suivante:

$$C = a t + b t^2 \quad (1)$$

Les constantes saisonnières  $a$  et  $b$  de la fonction contenu peuvent être modifiées au moyen d'un paramètre de forme  $K_0$  permettant d'adapter l'évolution du contenu aux possibilités d'exploitation:

$$a = K_0 C_{fe} \quad b = C_{fe} \frac{1 - K_0 T_e}{T_e^2} \quad (2)$$

L'introduction du paramètre de forme  $K_0$  permet d'exprimer le contenu en fonction du contenu final d'été  $C_{fe}$  qui est précisément la grandeur fondamentale à optimiser:

$$C = K_0 C_{fe} t + \frac{1 - K_0 T_e}{T_e^2} C_{fe} t^2 \quad (1a)$$

et, avec  $T_e = 5$

$$C = K_0 C_{fe} t + \frac{1 - 5 K_0}{25} C_{fe} t^2 \quad (1b)$$

La fig. 3 montre l'influence du paramètre de forme  $K_0$  sur l'allure de la courbe de remplissage en été. On remarque notamment, de même que sur la fig. 2, que la valeur particulière  $K_0 = 0,2$  correspond à un remplissage linéaire du bassin. Les valeurs  $K_0 = 0$  et  $K_0 = 1$  sont certainement des valeurs extrêmes pouvant être envisagées. L'expérience conduit à penser que, pour un calcul d'optimisation ayant un caractère prévisionnel, des valeurs proches de  $K_0 = 0,5$  pourront être retenues.

#### 3.2 Evolution du contenu en hiver

Au cours des mois d'octobre à avril les apports naturels sont faibles et leurs variations ont peu d'im-

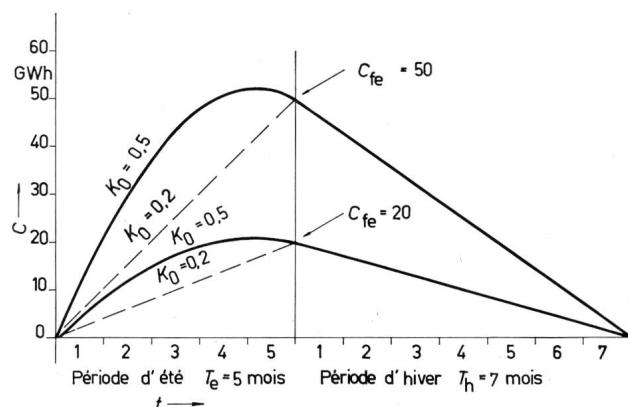


Fig. 2  
**Courbes de remplissage et de vidange du bassin**

Evolution saisonnière du contenu

$$\text{Eté } C = f(t, C_{fe}, K_0)$$

$$\text{Hiver } C = f(t, C_{fe})$$

$T_e$  période d'été, 5 mois;  $T_h$  période d'hiver, 7 mois;  $C_{fe}$  contenu final d'été;  $K_0$  paramètre de forme;  $t$  temps

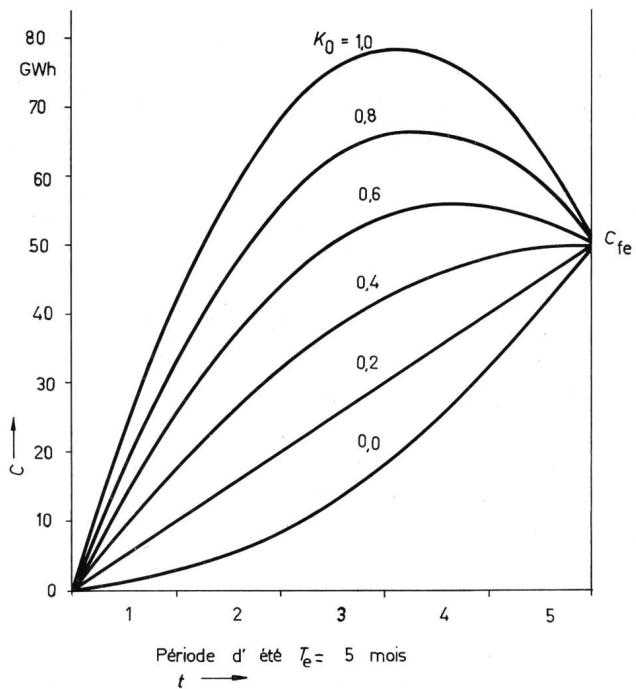


Fig. 3

**Courbes de remplissage en été**

Influence du paramètre de forme  $K_0$  sur l'évolution du contenu  $C$  pour une période d'été  $T_e = 5$  mois;  $C_{fe}$  contenu final d'été

portance en valeur relative. L'évolution du contenu en hiver dépend principalement des prélèvements réalisés. Comme le calcul d'optimisation est basé sur des prévisions d'apports, une trop grande précision est illusoire et on peut admettre en hiver une diminution quasi linéaire du contenu selon l'expression:

$$C = C_{fe} - a_1 t \quad (3)$$

$$\text{avec } a_1 = \frac{C_{fe}}{T_h} \text{ et } T_h = 7$$

$$C = C_{fe} \left(1 - \frac{t}{7}\right) \quad (3a)$$

**4. La fonction pertes du bassin de retenue**

Les pertes par infiltration varient avec le niveau d'eau ou avec le volume contenu dans la retenue. Leur mesure directe n'étant généralement pas possible, elles doivent être estimées statistiquement et ne sont connues qu'avec une certaine approximation. Il est toujours possible de leur donner une expression analytique suffisamment précise de la forme:

$$P_j = A_j C + B_j C^2$$

La valeur journalière donnée ci-dessus (indice  $j$ ) intervient dans le bilan énergétique journalier de l'ouvrage<sup>1)</sup>.

En adoptant le mois standardisé à 30 jours comme unité de temps on obtient pour la perte énergétique mensuelle:

$$P_m = A C + B C^2 \quad (4)$$

avec

$$A = 30 A_j$$

$$B = 30 B_j$$

La fig. 4 représente la fonction pertes d'un bassin d'accumulation dont le contenu maximum est 128 GWh, et qui sera

<sup>1)</sup> Voir Bulletin de l'ASE N° 2/1970.

utilisé par la suite comme exemple numérique. Les constantes de la fonction pertes et les caractéristiques de ce bassin sont les suivantes:

$$\begin{aligned} A_j &= 2,3 \cdot 10^{-3} & B_j &= 18 \cdot 10^{-6} \\ A &= 69 \cdot 10^{-3} & B &= 0,54 \cdot 10^{-3} \\ A_e &= 110 \text{ GWh} & A_h &= 22 \text{ GWh} \end{aligned}$$

Pour donner par la suite plus de clarté à l'ensemble, chaque expression générale de la méthode sera suivie de l'expression particulière à l'exemple numérique, tenant compte des constantes ci-dessus, repérée par le même numéro muni de l'indice  $a$ .

**5. Perte totale d'été  $P_e$** 

$$\text{avec } P_m = A C + B C^2 \text{ et } C = a t + b t^2$$

La perte totale en été s'établit:

$$P_e = \int_{t=0}^{t=5} A (at + bt^2) dt + \int_{t=0}^{t=5} B (at^2 + 2abt^3 + b^2 t^4) dt$$

en intégrant de  $t = 0$  à  $t = 5$ :

$$\begin{aligned} P_e &= 12,5 A a + 41,666 A b + \\ &\quad + 41,666 B a^2 + 312,5 B a b + 625 B b^2 \end{aligned}$$

en introduisant les valeurs de  $a$ ,  $b$  et  $T_e = 5$ :

$$\begin{aligned} a &= K_0 C_{fe} \text{ et } b = C_{fe} \frac{1 - K_0 T_e}{T_e^2} = C_{fe} \frac{1 - 5 K_0}{25} \\ P_e &= A C_{fe} (1,6666 + 4,1666 K_0) + \\ &\quad + B C_{fe}^2 [1 + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2] \end{aligned} \quad (5)$$

Les coefficients numériques de l'équation 5 ne dépendent pas de l'ouvrage étudié. Ils proviennent uniquement de l'intégration entre les limites  $t = 0$  et  $t = 5$ . Cette équation montre que la perte saisonnière d'été ne dépend que du coefficient de

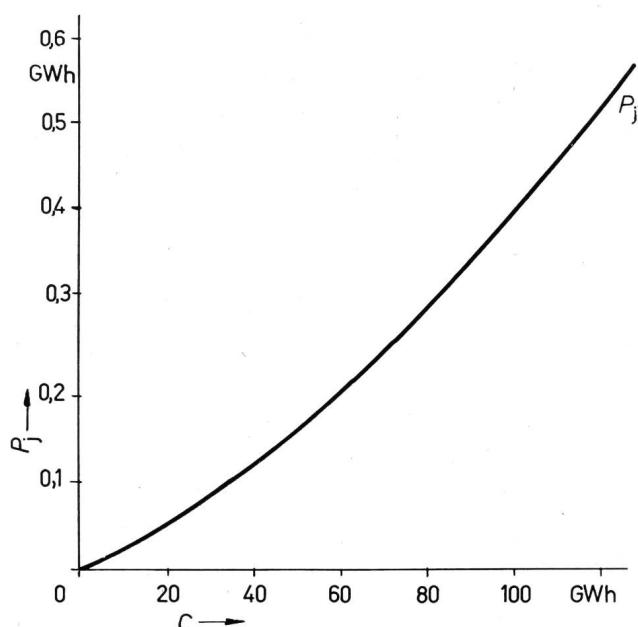


Fig. 4  
Fonction perte du bassin d'accumulation retenu pour l'exemple numérique

$$\begin{aligned} P_j &= A_j C + B_j C^2 & P &= AC + BC^2 \\ A_j &= 2,3 \cdot 10^{-3} & A &= 69 \cdot 10^{-3} \\ B_j &= 18 \cdot 10^{-6} & B &= 0,54 \cdot 10^{-3} \\ C &= \text{contenu; } P_j & & \end{aligned}$$

forme  $K_0$ , qu'il est possible de choisir en adaptant les prélèvements aux apports naturels, et du contenu final d'été, valeur à optimiser.

En portant dans l'équation 5 les valeurs particulières des constantes  $A$  et  $B$  propres au bassin retenu pour l'exemple numérique, selon la fig. 4, on obtient:

$$P_e = C_{fe} (0,115 + 0,2875 K_0) + C_{fe}^2 \cdot 10^{-3} (0,54 + 1,35 K_0 + 2,35 K_0^2) \quad (5a)$$

### 6. Perte totale d'hiver $P_h$

L'hypothèse d'une vidange quasi linéaire de la retenue, faite au paragraphe 3.2 et représentée sur la fig. 2 a pour expression:

$$C = C_{fe} - a_1 t$$

$$\text{avec } a_1 = \frac{C_{fe}}{T_h} \quad \text{et} \quad T_h = 7 \text{ (mois)}$$

et

$$P_m = A C + B C^2$$

La perte totale en hiver s'établit:

$$P_h = \int_{t=0}^{t=7} A(C_{fe} - a_1 t) dt + \int_{t=0}^{t=7} B(C_{fe}^2 - 2a_1 C_{fe} t + a_1^2 t^2) dt$$

en intégrant de  $t = 0$  à  $t = 7$ :

$$P_h = 7 A C_{fe} - 24,5 A a_1 + 7 B C_{fe}^2 - 49 B a_1 C_{fe} + 114,333 B a_1^2$$

En introduisant les valeurs de  $a_1$  et  $T_h = 7$ :

$$P_h = 3,5 A C_{fe} + 2,3333 B C_{fe}^2 \quad (6)$$

Les coefficients numériques de l'équation (6) proviennent uniquement de l'intégration entre les limites  $t = 0$  et  $t = 7$  et sont indépendants de l'ouvrage étudié. Dans l'hypothèse d'une vidange linéaire du bassin de retenue, la perte saisonnière en hiver ne dépend que du contenu final d'été, grandeur à optimiser.

En portant dans l'équation (6) les valeurs particulières des constantes  $A$  et  $B$  propres au bassin considéré pour l'exemple numérique, selon la fig. 4, on obtient:

$$P_h = 0,2415 C_{fe} + 1,26 \cdot 10^{-3} C_{fe}^2 \quad (6a)$$

### 7. Optimisation économique de l'exploitation

Les apports moyens d'été  $A_e$  et d'hiver  $A_h$  sont des données statistiques de l'ouvrage qui influencent directement l'énergie productible.

L'optimum économique de l'exploitation d'un ouvrage à accumulation présentant des pertes par infiltrations importantes sera situé entre les deux cas limite défini ci-dessous:

a) Si un bassin présente des pertes, et si le prix de l'énergie d'été est égal à celui d'hiver, l'optimum économique est atteint en utilisant les apports au fil de l'eau et sans stockage, c'est-à-dire en réalisant  $C_{fe} = 0$ .

b) Si un bassin, ne présente pas de pertes, et si le prix de l'énergie d'hiver est supérieur à celui d'été, l'optimum économique est atteint en procédant à un stockage maximum des apports d'été, c'est-à-dire en réalisant  $C_{fe} = C_{max}$ .

On peut en conclure intuitivement que, pour un bassin présentant des pertes, le prix de l'énergie d'hiver étant supérieur à celui d'été, l'optimum économique sera atteint en réalisant

sant un certain stockage des apports d'été. Le contenu final d'été  $C_{fe}$  est bien la grandeur à optimiser, en tenant compte de la variation du prix de l'énergie.

L'énergie produite en été et en hiver s'établit:

$$E_e = A_e - C_{fe} - P_e \quad (7)$$

$$E_h = A_h + C_{fe} - P_h \quad (8)$$

Les pertes  $P_e$  et  $P_h$  étant toutes deux fonctions de  $C_{fe}$ , les productions  $E_e$  et  $E_h$  le sont également, alors que les apports saisonniers moyen  $A_e$  et  $A_h$ , sont considérées comme des constantes. En introduisant le rapport de prix:

$$K_p = \frac{\text{Prix moyen de l'énergie en hiver}}{\text{Prix moyen de l'énergie en été}}$$

l'optimum économique de l'exploitation sera déterminé par le maximum de l'énergie productible valorisée défini par l'expression:

$$E_v = E_e + K_p E_h \quad (9)$$

et, en portant (7) et (8) dans (9):

$$E_v = C_{fe} (K_p - 1) + A_e + K_p A_h - P_e - K_p P_h \quad (10)$$

Les variables de gestion étant  $K_p$  et  $K_0$ , avec:

$$C_{fe} = f(K_p, K_0)$$

$$P_e = f(C_{fe}, K_0)$$

$$P_h = f(C_{fe})$$

En portant dans (10) les valeurs de  $P_e$  et  $P_h$  trouvées précédemment (5) et (6):

$$E_v = A_e + K_p A_h + C_{fe} (K_p - 1) - A C_{fe} (1,6666 + 3,5 K_p + 4,1666 K_0) - B C_{fe}^2 (1 + 2,3333 K_p + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2) \quad (11)$$

Dans l'expression (11), tous les coefficients numériques sont indépendants de l'ouvrage étudié et proviennent des intégrations précédentes.

En introduisant les valeurs de l'exemple numérique on obtient:

$$E_v = 110 + K_p (22 + 0,7585 C_{fe}) - C_{fe} (1,115 + 0,2875 K_0) - C_{fe}^2 \cdot 10^{-3} (0,54 + 1,26 K_p + 1,35 K_0 + 2,25 K_0^2) \quad (11a)$$

Cherchons l'expression du lieu des maximums de la fonction  $E_v = f(C_{fe})$  pour les paramètres annuels  $K_0$  et  $K_p$ . Cette expression est maximum pour

$$\frac{d E_v}{d C_{fe}} = 0$$

en dérivant on obtient:

$$\frac{d E_v}{d C_{fe}} = K_p - 1 - A (1,6666 + 3,5 K_p + 4,1666 K_0) - 2 B C_{fe} (1 + 2,3333 K_p + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2)$$

d'où on calcule le contenu final d'été optimum en fonction des paramètres annuels  $K_0$  et  $K_p$ :

$$C_{fe\text{ opt}} = \frac{K_p - 1 - A (1,6666 + 3,5 K_p + 4,1666 K_0)}{2 B (1 + 2,3333 K_p + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2)} \quad (12)$$

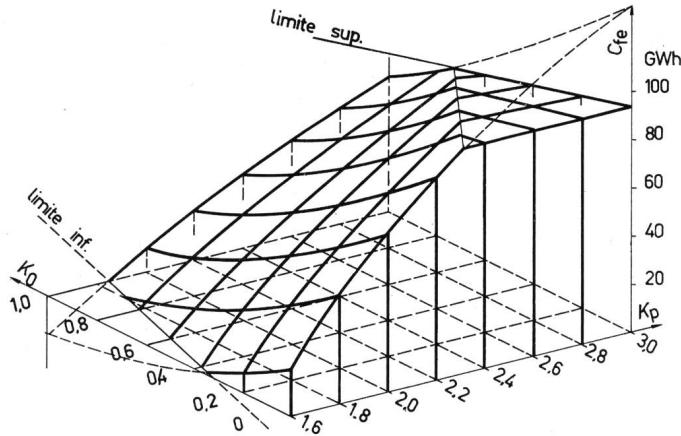


Fig. 5  
Représentation perspective à trois dimensions de la fonction  
 $C_{fe \text{ opt}} = f(K_p, K_0)$  [équation (12a)]

En portant dans l'équation (12) les valeurs particulières des constantes  $A$  et  $B$  propres au bassin considéré pour l'exemple numérique, selon la fig. 4, on obtient:

$$C_{fe \text{ opt}} = \frac{0,7585 K_p - 1,115 - 0,2875 K_0}{2 \cdot 10^{-3} (0,54 + 1,26 K_p + 1,35 K_0 + 2,25 K_0^2)} \quad (12a)$$

L'énergie à produire en été, pour réaliser le contenu final optimum correspondant à une paire de valeurs choisies pour  $K_p$  et  $K_0$  s'écrit avec

$$\begin{aligned} E_e &= A_e - C_{fe \text{ opt}} - P_e \text{ et } C_{fe} = f(K_p, K_0) \\ E_e &= A_e - C_{fe \text{ opt}} [1 + A (1,6666 + \\ &\quad + 4,1666 K_0) + B C_{fe \text{ opt}} (1 + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2)] \end{aligned} \quad (13)$$

soit, avec les valeurs de l'exemple numérique:

$$\begin{aligned} E_e &= 110 - C_{fe \text{ opt}} [1,115 + 0,2875 K_0 + \\ &\quad + C_{fe \text{ opt}} \cdot 10^{-3} (0,54 + 1,35 K_0 + 2,952 K_0^2)] \end{aligned} \quad (13a)$$

Connaissant les constantes de l'ouvrage, l'optimisation économique de l'exploitation consistera donc à:

- a) Choisir les coefficients  $K_p$  et  $K_0$ ;
- b) Déterminer  $C_{fe \text{ opt}}$  selon l'expression (12);
- c) Calculer l'énergie à produire en été  $E_e$  selon l'expression (13);
- d) Adapter la production aux apports naturels pour réaliser les deux valeurs calculées  $C_{fe \text{ opt}}$  et  $E_e$ , en respectant au mieux la courbe de remplissage prévue et déterminée par le coefficient  $K_0$ .

## 8. Définition des limites d'exploitation

Les limites inférieure et supérieure du domaine dans lequel l'exploitation peut être conduite sont définies par les conditions suivantes:

- a) Le contenu physique du bassin ne peut être négatif, notamment le contenu final d'été.
- b) La somme  $C_{fe} + P_e$  ne peut être supérieure aux apports d'été  $A_e$ .

### 8.1 Limite inférieure d'exploitation

Cette limite est définie par la première des conditions énoncées ci-dessus et qui s'exprime:

$$C_{fe} = 0$$

La valeur de  $C_{fe}$  donnée par l'équation (12) s'annule lorsque son numérateur s'annule, soit lorsque:

$$K_p - 1 - A (1,6666 + 3,5 K_p + 4,1666 K_0) = 0$$

Pour les deux paramètres  $K_p$  et  $K_0$  on obtient les valeurs réciproques:

$$\text{soit: } K_p = \frac{1 + A (1,6666 + 4,1666 K_0)}{1 - 3,5 A} \quad (14)$$

$$\text{soit: } K_0 = - \frac{1 + A (1,6666 + 3,5 K_p) - K_p}{4,1666 A} \quad (15)$$

Les expressions (14) et (15), établies pour la condition  $C_{fe} = 0$ , sont linéaires et sont représentées par des droites dans le plan  $(K_p, K_0)$  de la fig. 5.

En portant dans les équations (14) et (15) les valeurs particulières des constantes  $A$  et  $B$  propres au bassin considéré pour l'exemple numérique on obtient:

$$\text{soit: } K_p = \frac{1,115 + 0,2875 K_0}{0,7585} \quad (14a)$$

$$\text{soit: } K_0 = - \frac{1,115 - 0,7585 K_p}{0,2875} \quad (15a)$$

### 8.2 Limite supérieure d'exploitation

Cette limite est définie par la seconde des conditions énoncées précédemment et qui s'exprime:

$$C_{fe \text{ max}} + P_e = A_e$$

ou

$$C_{fe \text{ max}} + P_e - A_e = 0$$

En introduisant la valeur de  $P_e$  [expression (5)] on obtient pour  $C_{fe \text{ max}}$  une équation canonique du deuxième degré dont la solution est la suivante:

$$C_{fe \text{ max}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (16)$$

$$\text{avec: } a = B(1 + 2,5 K_0 + 4,1666 K_0^2)$$

$$b = 1 + 1,6666 A + 4,1666 A K_0^2$$

$$c = -A_e$$

En portant les valeurs particulières des constantes  $A_e$ ,  $A$  et  $B$  propres au bassin considéré pour l'exemple numérique on obtient:

$$a = 10^{-3} (0,54 + 1,35 K_0 + 2,25 K_0^2)$$

$$b = 1,115 + 0,2875 K_0$$

$$c = -110$$

Remarquons que les limites d'exploitation définies ci-dessus ont un caractère très théorique. Dans les deux cas, en effet, le coefficient  $K_0$  est indéterminé. Pour la limite inférieure, avec  $C_{fe} = 0$ , les coefficients  $a$  et  $b$  [équation (2)] sont nuls et  $K_0$  est indéterminé. Pour la limite supérieure, avec  $C_{fe} = C_{fe \text{ max}}$ , aucun prélèvement n'a lieu en été et la forme de la courbe de remplissage ne dépend plus que de l'allure des apports naturels. Le coefficient  $K_0$  devrait être corrigé dans ce sens.

## 9. Définition d'un critère de contrôle de l'exploitation

Une méthode d'optimisation économique de l'exploitation de l'ouvrage a été proposée dans les paragraphes précédents. Cette méthode, permettant de choisir la politique d'exploitation à réaliser, est entièrement basée sur des prévisions: prévisions d'apports, de placement de l'énergie, de prix moyen probable de l'énergie.

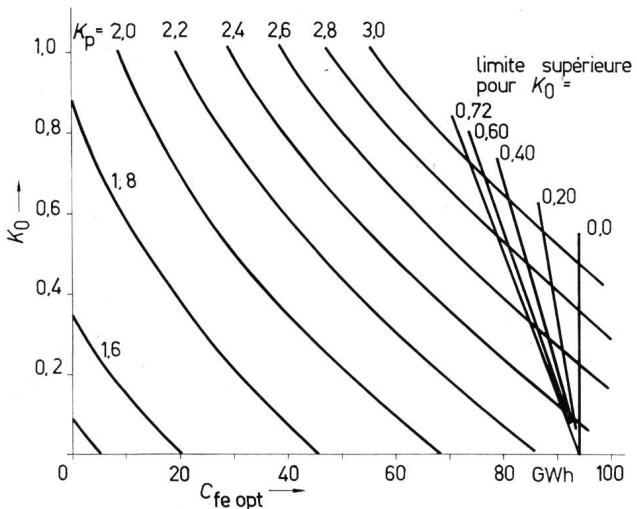


Fig. 6  
Graphique de la fonction  $C_{fe \text{ opt}} = f(K_0, K_p)$  [selon l'équation (12a)]

La réalité sera toujours différente des prévisions. Les apports peuvent varier sensiblement autour de la moyenne multiannuelle indiquée par les statistiques. Le prix de l'énergie, influencé par l'état du marché, peut également s'écartez sensiblement des prévisions. Enfin, les possibilités de placement de l'énergie, également influencées par l'état du marché, peuvent conduire à réaliser des courbes de remplissage et de vidange assez différentes de celles envisagées. Les pertes saisonnières seront alors également différentes des valeurs moyennes prévues.

Il est donc souhaitable de rechercher un «Critère de contrôle» permettant de qualifier à posteriori d'une manière simple et rapide, l'exploitation telle qu'elle a pu être réalisée.

Les pertes saisonnières sont fonction des apports et de la politique de prélèvement. Les effets de cette dernière pourront être mis en évidence si on parvient à éliminer l'influence des variations de l'Hydrologie. Ce résultat peut être approché de la manière suivante:

En considérant que, pour un bassin d'accumulation situé à une certaine altitude:

- les apports d'hiver sont généralement faibles et peu variables,
- les apports d'été conditionnent directement les pertes en été et indirectement les pertes de l'hiver suivant par la valeur du contenu final d'été qu'ils auront contribué à réaliser.

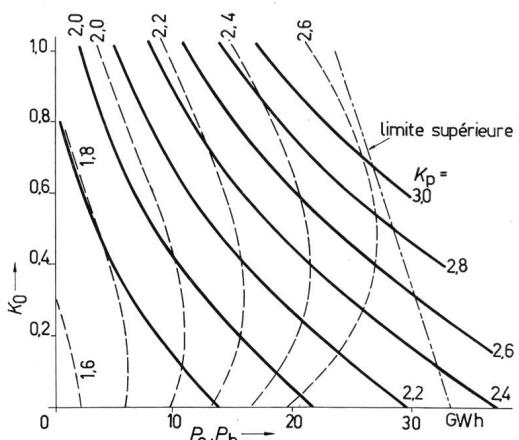


Fig. 7  
Graphique des pertes d'été  $P_e$  et d'hiver  $P_h$  en fonction des paramètres  $K_0$  et  $K_p$ , selon les équations (5a) et (6a), le contenu final d'été optimum  $C_{fe \text{ opt}}$  étant réalisé  
---  $P_e$ ; —  $P_h$

On obtient un coefficient adimensionnel  $K$  caractérisant l'exploitation réalisée en divisant les pertes énergétiques saisonnières par les apports de l'été correspondant. Ce coefficient sera sensiblement indépendant des variations de l'hydraulicité. Il pourra être comparé à la valeur optimum déterminée selon les hypothèses et prévisions faites pour  $A_e$ ,  $A_h$ ,  $K_0$  et  $K_p$ .

On peut encore affiner le contrôle de l'exploitation en traitant séparément les périodes d'été et d'hiver au moyen de deux coefficients particuliers  $K_e$  et  $K_h$  définis de la même manière que le coefficient  $K$ :

$$K = \frac{P_e + P_h}{A_e} \quad K_e = \frac{P_e}{A_e} \quad K_h = \frac{P_h}{A_e} \quad (17)$$

$$\text{avec } K = K_e + K_h$$

En valeur absolue, ces divers coefficients n'ont pas de signification précise. Toutefois, les apports d'hiver étant généralement faibles et peu variables, le coefficient  $K$  représente approximativement la perte spécifique par unité d'apports. Par contre, les variations annuelles de ces coefficients, de même que leur comparaison avec les valeurs moyennes calculées sur la base

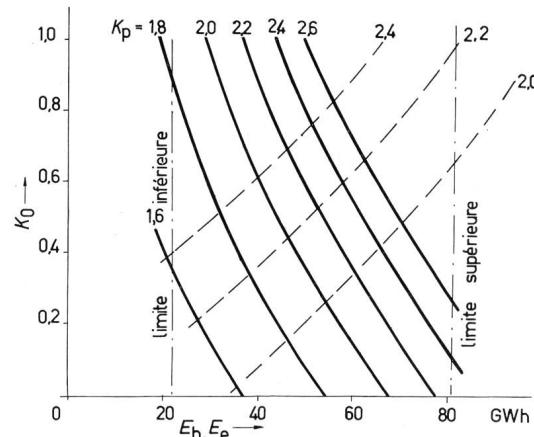


Fig. 8  
Energies productibles en été  $E_e$  et en hiver  $E_h$  en fonction des paramètres  $K_0$  et  $K_p$   
selon les équations (7) et (8), le contenu final d'été optimum  $C_{fe \text{ opt}}$  étant réalisé  
---  $E_e$ ; —  $E_h$

des hypothèses d'optimisation, permettront de juger de la qualité de l'exploitation réalisée.

## 10. Exemple numérique

Il était souhaitable de concrétiser les résultats de la méthode d'optimisation économique présentée dans les paragraphes précédents par un exemple numérique. Cet exemple est établi sur la base d'un bassin réel, présentant des pertes importantes, et dont les caractéristiques principales sont les suivantes:

Contenu maximum (jamais atteint en exploitation en raison des pertes)  
 $C_{\max} = 128 \text{ GWh}$

Constantes de la fonction pertes, fig. 3,  
équation (4)

Apports moyens d'été

$$A = 69 \cdot 10^{-3}$$

Apports moyens d'hiver

$$B = 0,54 \cdot 10^{-3}$$

Domaine de variation du coefficient de forme de la courbe de remplissage

$$A_e = 110 \text{ GWh}$$

Domaine de variation du coefficient de prix de l'énergie

$$A_h = 22 \text{ GWh}$$

$$0 \leq K_0 \leq 1$$

$$1,6 \leq K_p \leq 3$$

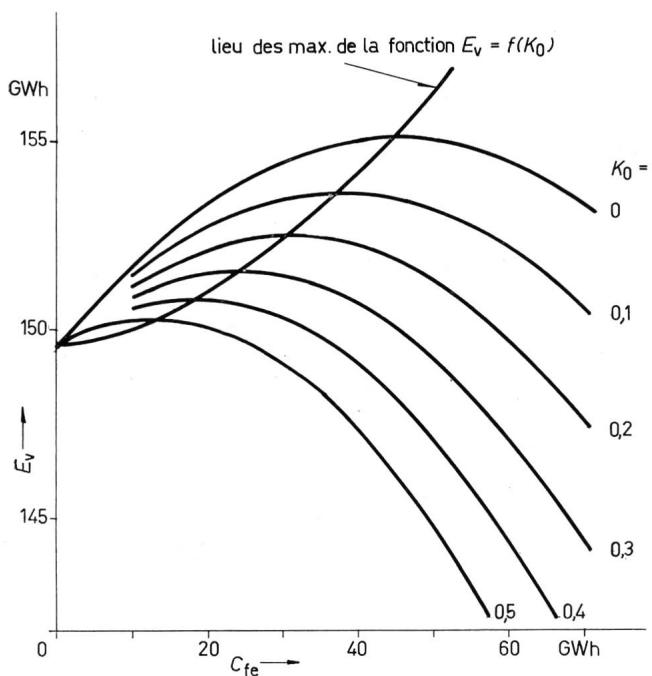


Fig. 9

**Energie valorisée annuelle  $E_v$  en fonction du contenu final d'été  $C_{fe}$  et du coefficient  $K_0$**

calculée selon équation (11a) pour la valeur particulière  $K_p = 1,8$ . Le lieu des maximums de la fonction permet de déterminer pour chaque valeur de  $K_0$  le contenu final d'été optimum correspondant

Pour donner plus de clarté à l'ensemble, l'exposé de la méthode et l'exemple numérique ont été conduits simultanément. Pour chaque grandeur étudiée, l'expression générale de la méthode est suivie de l'expression particulière de l'exemple numérique, tenant compte des caractéristiques de l'ouvrage, et repérée par le même numéro muni de l'indice  $a$ . Il s'agit notamment des expressions suivantes:

$$(5a) \quad P_e = f(C_{fe}, K_0)$$

$$(6a) \quad P_h = f(C_{fe})$$

$$(11a) \quad E_v = f(K_p, K_0, C_{fe})$$

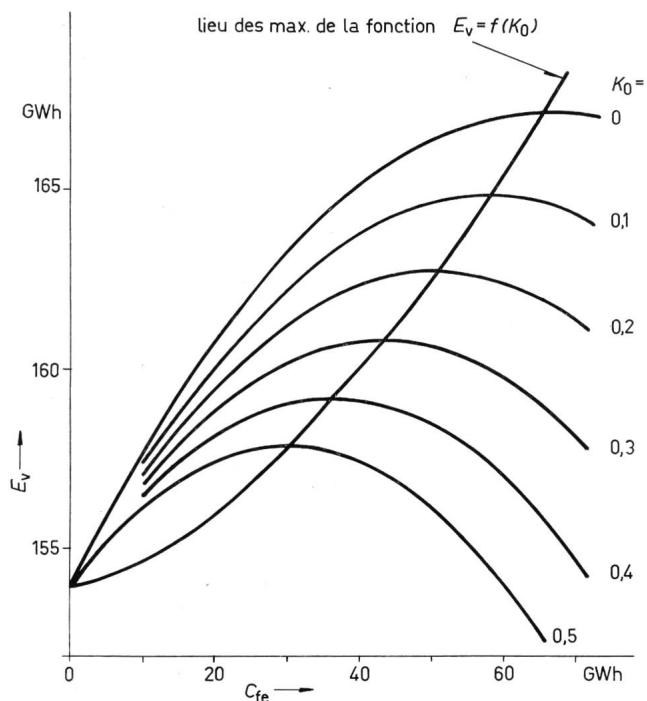


Fig. 10

Comme la fig. 9, mais pour la valeur particulière  $K_p = 2$

- $$(12a) \quad C_{fe\text{ opt}} = f(K_p, K_0)$$
- $$(13a) \quad E_e = f(C_{fe\text{ opt}}, K_0)$$
- $$(14a) \quad K_p = f(K_0) \text{ pour } C_{fe\text{ opt}}$$
- $$(15a) \quad K_0 = f(K_p) \text{ pour } C_{fe\text{ opt}}$$

La fig. 5 est une représentation perspective à trois dimensions de  $C_{fe\text{ opt}} = f(K_p, K_0)$  selon l'équation (12a), et pour les domaines de variation envisagés pour  $K_p$  et  $K_0$ . Cette figure montre également la limite inférieure d'exploitation, définie par (14a) ou (15a), et la limite supérieure d'exploitation, définie par l'expression 16 et ses paramètres particuliers. La limite supérieure d'exploitation est une surface gauche inclinée et son calcul numérique est fastidieux. Comme la courbure de la surface est faible, on peut sans grande erreur l'assimiler à une plan incliné défini par trois points.

La fig. 6 est également une représentation de  $C_{fe\text{ opt}}$  selon l'équation (12a), sous la forme d'un réseau de courbes plus

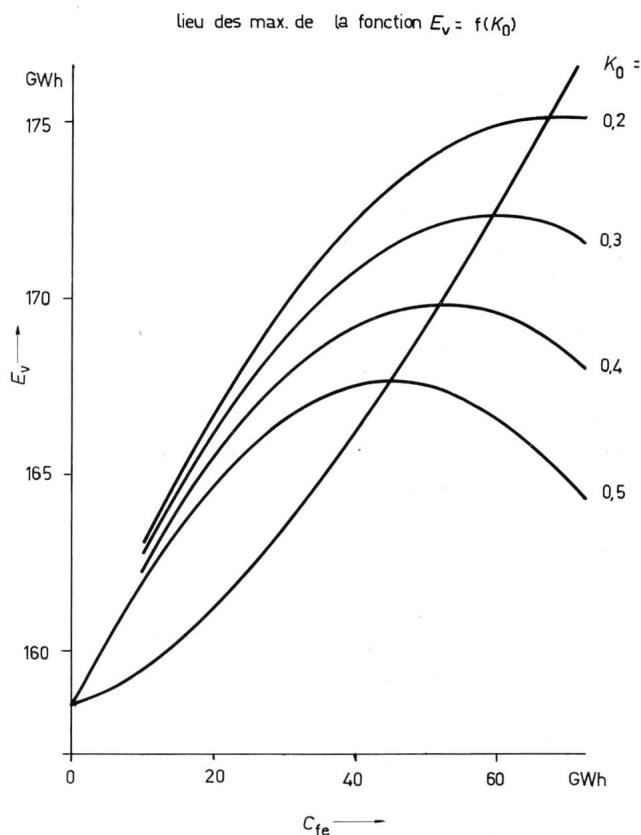


Fig. 11  
Comme la fig. 9, mais pour la valeur particulière  $K_p = 2,2$

pratique à utiliser. Dans cette figure la limite inférieure d'exploitation est définie par l'axe des ordonnées  $C_{fe\text{ opt}} = 0$ , alors que la limite supérieure est représentée par un réseau de courbes (assimilées à droites) pour diverses valeurs de  $K_0$ .

La fig. 7 comporte deux réseaux de courbes représentant les valeurs des pertes d'été et d'hiver en fonction des paramètres  $K_0$  et  $K_p$ , selon les équations (5a) et (6a). La limite supérieure indiquée pour les pertes d'hiver a été assimilée à une droite.

La fig. 8 comporte deux réseaux de courbes représentant les valeurs des énergies produites en été et en hiver en fonction des paramètres  $K_0$  et  $K_p$ , selon les équations (7) ou (13a) et (8), pour  $C_{fe\text{ opt}}$ . Les limites inférieures et supérieures d'exploitation ont été assimilées à des droites verticales.

Les fig. 9, 10 et 11 représentent l'énergie valorisée annuelle, équation (11a), en fonction du contenu final d'été et du coefficient de forme  $K_0$ , et pour une valeur particulière du coefficient

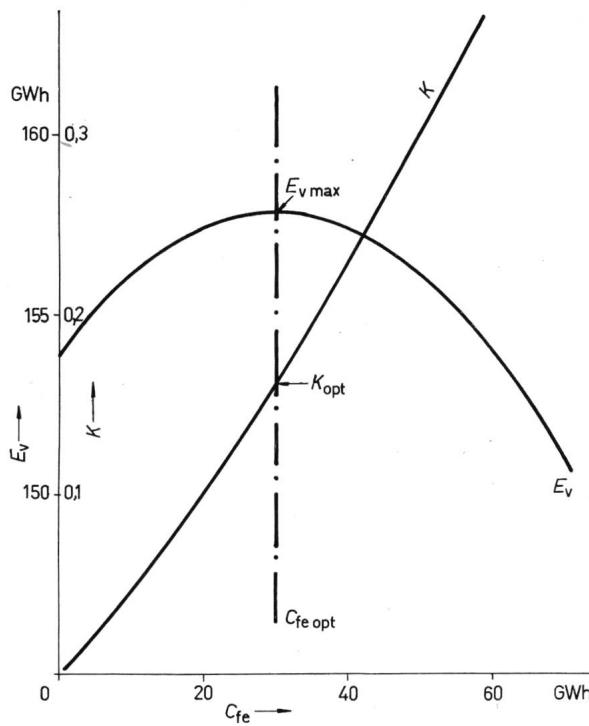


Fig. 12

Energie valorisée  $E_v$  [équation (11a)] et coefficient  $K_0$  [critère de contrôle, équation (17)] calculés pour une paire de valeurs particulières  $K_0 = 0,5$  et  $K_p = 2$   
La verticale tracée à partir de  $E_v$  max détermine les valeurs  $K_{opt}$  et  $C_{fe opt}$

de prix  $K_p$  par figure. Les figures comportent encore pour le coefficient  $K_p$  particulier, le lieu des maximum de la fonction  $E_v = f(K_0, C_{fe})$ , ce qui permet de lire sur l'échelle des abscisses la valeur de  $C_{fe opt}$  pour chaque valeur de  $K_0$ .

La fig. 12, établie pour les valeurs particulières  $K_0 = 0,5$  et  $K_p = 2$ , montre comment la valeur optimum du «critère de contrôle»  $K_{opt}$  peut être déterminée. Les grandeurs  $E_v$  [équation (11a)] et  $K$  [équation (17)] ont été calculées et portées en fonction du contenu final  $C_{fe}$ . L'optimum se situe au maximum de  $E_v$ , et sur la verticale correspondante on peut lire  $C_{fe opt} = 30$  GWh et  $K_{opt} = 0,161$ .

La fig. 13 représente le réseau  $K_{opt} = f(K_0, K_p)$ , alors que la fig. 14 représente le réseau  $K_{opt} = f(C_{fe opt}, K_p)$ . Pour une campagne écoulée, c'est à la valeur  $K_{opt}$  indiquée par les fig. 13 et 14 que devra être comparée la valeur  $K$  résultant de l'exploitation telle qu'elle a pu être établie.

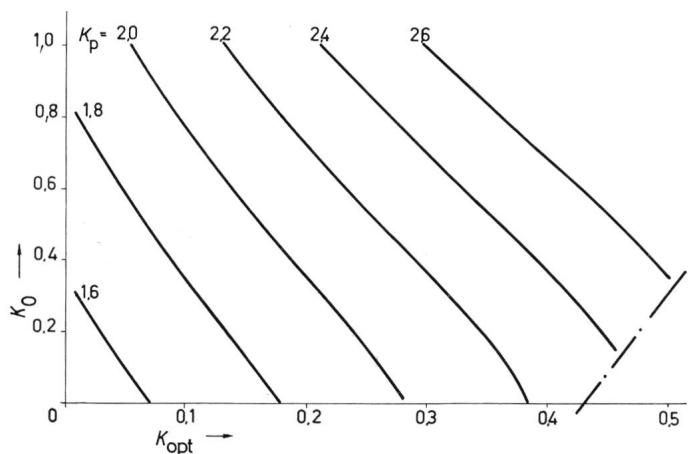


Fig. 13

Valeur optimum du critère de comparaison  $K_{opt}$  exprimée en fonction des deux paramètres  $K_0$  et  $K_p$

## 11. Conclusions

La méthode d'optimisation économique de l'exploitation d'un bassin d'accumulation présentant des pertes, telle qu'elle a été établie, est entièrement basée sur des prévisions: Prévisions d'apports, de prix de l'énergie, de possibilités de prélèvement influençant les courbes de remplissage et de vidange. Elle est destinée à faciliter le choix d'une politique d'exploitation ou de prélèvements judicieux. Les variations possibles des grandeurs statistiques utilisées rendent illusoire une trop grande précision de calcul. Le critère de contrôle, établi en dernier lieu, permet de compenser à posteriori l'influence des variations de l'hydraulique.

Cette méthode est perfectible, et divers éléments nouveaux pourraient lui être adjoints:

a) Le coefficient de prix  $K_p$ , quotient du prix moyen d'hiver par le prix moyen d'été, pourrait être remplacé par une «Fonction Prix», représentant d'une manière continue l'évolution probable du prix de l'énergie au cours de l'année.

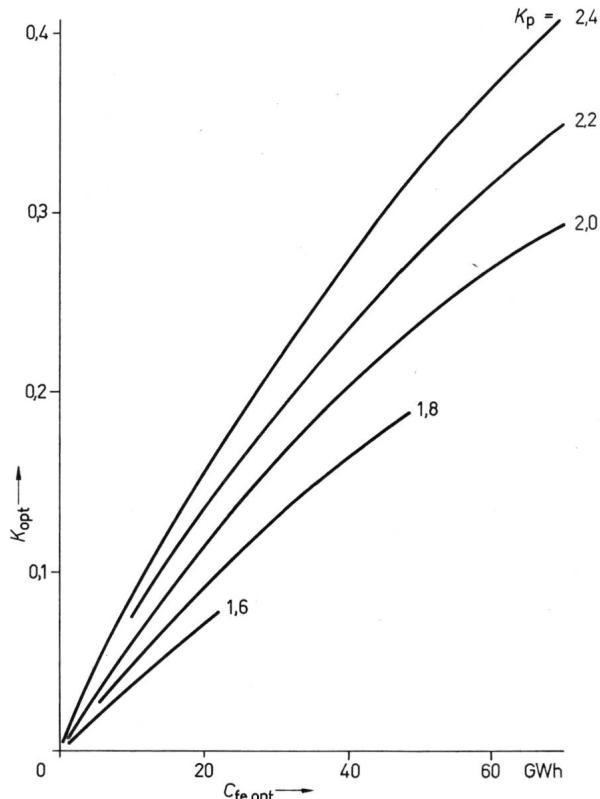


Fig. 14  
Valeur optimum du critère de comparaison  $K_{opt}$  exprimée en fonction des deux paramètres  $K_p$  et  $C_{fe opt}$

b) Le choix des courbes de remplissage et de vidange peut être critiqué. Les fonctions paraboliques et linéaires choisies pourraient être remplacées par d'autres expressions mathématiques, s'adaptant mieux aux divers cas particuliers mais conduisant à des calculs beaucoup plus compliqués.

c) Enfin, pour des raisons exposées dans une publication précédente<sup>2)</sup>, il n'a pas été tenu compte des variations du coefficient énergétique de l'ouvrage avec le degré de remplissage du bassin.

Toutes ces adjonctions sont possibles, mais elles auraient conduit à des complications mathématiques sans rapport avec le but recherché, et rendu l'exposé de la méthode beaucoup moins clair.

### Adresse de l'auteur:

Jacques Tiercy, ing., S. A. l'Energie de l'Ouest-Suisse, Place de la Gare 12, Lausanne.

<sup>2)</sup> Voir Bulletin de l'ASE N° 8/1970.