

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins |
| Herausgeber: | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke |
| Band: | 61 (1970) |
| Heft: | 8 |
| Artikel: | Remarques concernant le rendement général et le coefficient énergétique des installations hydro-électriques |
| Autor: | Tiercy, J. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-915935 |

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: 20.02.2026

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

Remarques concernant le rendement général et le coefficient énergétique des installations hydro-électriques

Par J. Tiercy, Lausanne

945-950

621.311.21:621.3.017.8

Le rendement général et le coefficient énergétique des installations hydro-électriques à accumulation sont des grandeurs fondamentales pour l'exploitation et la gestion de ce type d'ouvrage. Dans cet article l'auteur expose la nature physique et l'expression de ces grandeurs, et étudie leurs variations moyennes et extrêmes ainsi que l'influence de ces variations sur la comptabilité énergétique de l'ouvrage.

Der Gesamtwirkungsgrad und der Energie-Koeffizient sind die fundamentalen Größen für den Betrieb und die Verwaltung von hydroelektrischen Speicherkraftwerken. In diesem Artikel weist der Verfasser auf die physikalischen Eigenschaften dieser Größen hin und stellt sie mathematisch dar. Weiter werden ihre mittleren und extremen Veränderungen sowie deren Einfluss auf die Energiebuchhaltung untersucht.

1. Introduction

Une installation hydro-électrique, considérée dans son ensemble, est une «chaîne» de transformateurs d'énergie disposés en série ou en série-parallèle selon que les ouvrages d'adduction alimentent un seul ou plusieurs groupes de production. Les transformations successives de l'énergie se font avec des pertes qui déterminent leurs rendements respectifs.

A l'entrée de l'ouvrage, prise d'eau ou bassin d'accumulation, chaque unité de volume d'eau représente une quantité d'énergie productible variant avec la chute brute et le rendement général de l'ensemble des transformations successives. Pour tenir la comptabilité énergétique de l'ouvrage, il est indispensable d'en connaître le «Coefficient énergétique» qui, exprimé en kWh/m³ ou en MWh/10³m³, représente l'énergie productible par unité de volume d'eau turbinée. Le coefficient varie avec la chute brute et le rendement général de l'installation.

Lorsqu'un ouvrage hydro-électrique à accumulation est exploité par plusieurs partenaires, la comptabilité énergétique

prend alors le nom d'«Exploitation fictive» et fait obligatoirement intervenir le coefficient énergétique de l'ouvrage. Les principes de cette comptabilité particulière ont été exposés dans une publication antérieure ¹⁾.

2. Notations

La fig. 1 définit les grandeurs principales caractérisant l'exploitation de l'ouvrage. Les notations suivantes sont utilisées:

Grandeurs

Le point surmontant un symbole (•) indique la dérivation par rapport au temps de la grandeur symbolisée (Par exemple \dot{V} = débit volume).

L'astérisque noté en exposant d'un symbole indique une valeur relative de la grandeur symbolisée.

| | |
|--------------|--|
| H_b | Chute brute (énergie brute à disposition de l'ouvrage) |
| $H_{b\max}$ | Chute nette (énergie nette à l'entrée des turbines) |
| $H_{b\min}$ | Pertes de charge des ouvrages d'adduction |
| H_b | Débit volume |
| \dot{V} | Débit masse = $\rho \dot{V}$ |
| E | Energie |
| P | Puissance (débit énergie) |
| v | Vitesse de l'eau |
| V | Volume contenu dans le bassin d'accumulation |
| Y | Cote du plan d'eau au-dessus de la prise d'eau |
| ρ | Masse volumique de l'eau |
| η_{gr} | Rendement d'un groupe de production |
| η_u | Rendement de l'usine |
| η_{add} | Rendement des ouvrages d'adduction |
| η_g | Rendement général |
| K_e | Coefficient énergétique |
| K_x | Coefficient constant, caractéristique de l'ouvrage |
| n | Coefficient, variable de l'exploitation de l'ouvrage |
| i | Nombre de groupes de production |
| Z | Nombre de groupes en service |
| | Altitude d'un plan d'eau |

Indices

| | |
|-------------|------------------------------------|
| a | Alternateur |
| add | Adductions |
| t | Turbine |
| tr | Transformateur |
| u | Usine |
| 1, 2, 3 ... | Groupes de production particuliers |
| i | Nombre de groupes en service |
| m | Moyen |
| max | Maximum |
| min | Minimum |

¹⁾ Voir Bulletin de l'ASE 1970, n° 2.

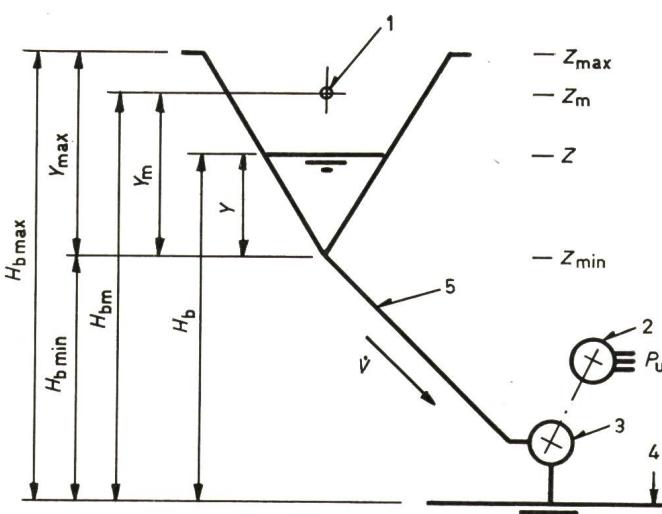


Fig. 1

Grandeurs principales caractérisant l'exploitation

1 centre de gravité de la retenue pleine; 2 alternateur; 3 turbine; 4 niveau de restitution; 5 adductions; Y hauteurs de remplissage; P_u puissance de sortie usine; H_b chutes brutes; \dot{V} débit-volume; Z altitude du plan d'eau; Z_m altitude du centre de gravité de la retenue pleine; Z_{\max} altitude du déversoir; Z_{\min} altitude de la prise d'eau

3. Définition du coefficient énergétique K_e

Pour un régime de production donné, le coefficient énergétique de l'installation est le quotient de l'énergie produite par le volume d'eau turbiné. Il s'exprime, en kWh/m³:

$$K_e = \frac{\varrho \dot{V} g H_b \eta_g \cdot 10^{-3}}{3600 \dot{V}} = \frac{H_b}{367} \eta_g \quad (1)$$

Le rendement général η_g de l'installation tient compte de toutes les pertes, y compris les pertes de charges des ouvrages d'adduction.

En remplaçant le rendement général η_g par le «rendement usine» η_u et en introduisant séparément les pertes de charge H_r des ouvrages d'adduction:

$$K_e = \frac{H_b - H_r}{367} \eta_u \quad (2)$$

Ces expressions montrent que le coefficient énergétique est une fonction des divers rendements, ou des pertes qui leur sont liées, ainsi que de la chute brute H_b , variable avec l'altitude des plans d'eau amont et aval.

4. Le rendement d'un «groupe machines» η_{gr}

Les rendements de la turbine, de l'alternateur et du transformateur qui composent un groupe de production sont donnés par les constructeurs et contrôlés lors d'essais de réception. Chacun d'eux est exprimé en fonction de la puissance de sortie propre de la machine:

$$\eta_t = f(P_t) \quad \eta_a = f(P_a) \quad \eta_{tr} = f(P_{tr})$$

Le «Rendement machines» η_{gr} d'un groupe de production est le produit des rendements particuliers:

$$\eta_{gr} = \eta_t \eta_a \eta_{tr}$$

Le calcul de la caractéristique $\eta_{gr} = f(P_{gr})$ ne présente pas de difficultés. Il faut toutefois tenir compte pour chaque régime de marche de la puissance de sortie propre de chaque machine.

Lorsque l'usine est équipée de plusieurs groupes de production, le rendement de l'usine résulte de la composition des rendements des groupes en service. Son expression générale est la suivante:

$$\eta_u = \frac{P_u}{\frac{1}{\eta_1} P_1 + \frac{1}{\eta_2} P_2 + \dots + \frac{1}{\eta_i} P_i} \quad (3)$$

Cette expression montre que le rendement de chacun des groupes en service est pondéré par sa puissance de sortie particulière. En considérant la courbure des caractéristiques η_{gr} , il est facile de démontrer que, pour une puissance quelconque, le rendement usine est maximum lorsque tous les groupes en service fonctionnent à la même puissance. Cette loi est importante et indique que, pour une usine réglante, tous les groupes en service doivent participer au réglage.

La fig. 2 représente le rendement usine η_u en fonction de la puissance de sortie de l'usine P_u lorsque tous les groupes en service fonctionnent à la même puissance. L'expression de η_u s'écrit alors pour i groupes en service:

$$\eta_u \text{ (pour } P_u) = \eta_{gr} \left(\text{pour } P_{gr} = \frac{P_u}{i} \right) \quad (4)$$

Cette représentation met en évidence les plages de puissance qui devront être couvertes avec 1, 2, ..., i groupes en

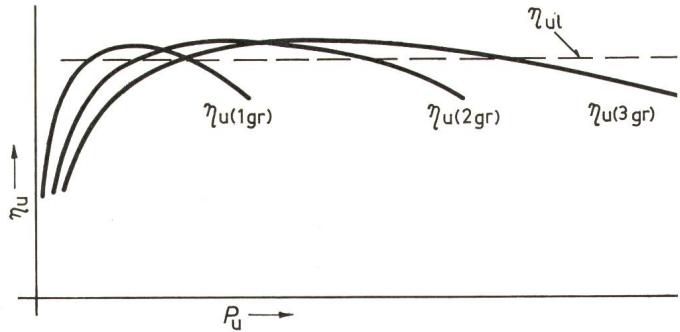


Fig. 2
Rendement usine lorsque tous les groupes en service fonctionnent à la même puissance
 $\eta_{u\text{il}}$ rendement usine linéarisé; P_u puissance de sortie usine; η_u rendement usine

service, l'exploitation optimum étant réalisée en suivant l'enveloppe des courbes particulières à chaque nombre de groupes.

5. Le rendement des ouvrages d'adduction η_{add}

Les pertes dans les ouvrages d'adduction, galerie et conduite forcée, dites «Pertes de charge» H_r , varient avec le carré de la vitesse d'écoulement, donc avec le carré du débit:

$$H_r = f(v^2) = f(\dot{V}^2) \quad (5)$$

Leur courbe caractéristique est donc une parabole. A une très légère approximation près, provenant des fluctuations du rendement usine η_u , ces pertes de charge sont également une fonction parabolique de la puissance de sortie usine.

$$H_r \approx f(P_u^2)$$

$$\eta_{add} = \frac{H_b - H_r}{H_b} = f(H_b, P_u^2) \quad (6)$$

Les grandeurs H_r et η_{add} devraient toujours être soigneusement mesurées lors des essais de réception des turbines. Le rendement η_{add} varie donc avec la perte de charge, elle-même fonction de la puissance, ainsi qu'avec la chute brute dont les variations relatives peuvent être importantes dans les ouvrages à accumulation.

6. Le rendement général de l'installation η_g

Finalement, le rendement général η_g est le produit du rendement usine η_u par le rendement des adductions η_{add} .

La fig. 3 est la représentation du rendement général $\eta_g = f(P_u)$ pour une installation équipée de plusieurs «groupes machines» identiques, en tenant compte du nombre variable de groupes en service.

Pour une telle usine, la puissance de sortie sera toujours comprise entre le tiers de la puissance d'un groupe et la puissance maximum de tous les groupes. La fig. 2 montre qu'il est alors possible de linéariser le rendement usine η_u , les erreurs particulières ainsi introduites, tantôt positives tantôt négatives, s'annulent statistiquement. Dans le choix de la valeur linéarisée du rendement usine, il faut tenir compte que le nombre de groupes en service ne sera pas toujours le nombre optimum.

Le rendement général est alors la résultante de deux caractéristiques ayant chacune une expression analytique simple:

$$\eta_u = a = (\text{constante})$$

$$\eta_{add} = 1 - b P_u^2 \text{ (parabole)}$$

et, selon la fig. 3, s'exprimera par une équation de la forme suivante, dont les constantes sont faciles à déterminer:

$$\eta_g = a - b' P_u^2 \quad \text{avec } b' = a b \quad (7)$$

De plus, si les pertes de charges sont relativement faibles, la fonction η_{add} peut elle-même être linéarisée sans introduire d'erreur importante et on obtient alors:

$$\eta_g = a - b'' P_u \quad (8)$$

7. Etude des variations du coefficient énergétique K_e

La comptabilité énergétique des ouvrages à accumulation exploités par plusieurs partenaires, dite «Exploitation fictive», exige, selon l'unité comptable employée, soit la conversion des énergies produites en volumes d'eau soutirés, soit la conversion des volumes stockés et du volume des apports naturels en énergie. Ces conversions se font à l'aide du coefficient énergétique.

Lorsque l'ouvrage est équipé d'une installation de mesure et d'intégration des débits turbinés, les valeurs relevées peuvent servir à l'établissement du bilan du bassin réel. Les bilans des bassins fictifs devront toujours être établis à partir de valeurs calculées au moyen du coefficient énergétique.

Les mesures industrielles permanentes des grands débits et des grands volumes d'eau présentent toujours des erreurs de l'ordre de 2 à 4 %. Les coefficients énergétiques, calculés sur la base des valeurs relevées lors des essais de rendement, sont connus avec une précision supérieure. Il est donc intéressant d'étudier l'importance des variations du coefficient énergétique, et spécialement de déterminer les conditions limites permettant d'introduire sans erreur appréciable un coefficient énergétique moyen constant dans les calculs comptables.

Les expressions du coefficient énergétique établies précédemment sont les suivantes:

$$K_e = \frac{H_b}{367} \eta_g = \frac{H_b - H_r}{367} \eta_u = \frac{H_n}{367} \eta_u \quad (9)$$

Les termes entrant dans ces expressions varient tous en fonction des conditions journalières d'exploitation:

H_b avec le degré de remplissage du bassin réel
 H_r avec la charge instantanée de l'usine

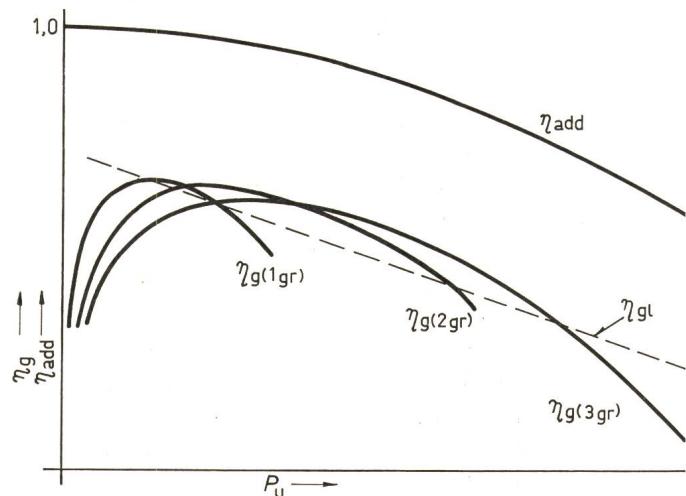


Fig. 3

Rendement des adductions η_{add} (galerie et conduite forcée) et rendement général η_g lorsque tous les groupes en service fonctionnent à la même puissance

η_{gl} rendement général linéarisé; P_u puissance de sortie usine

η_u avec la charge instantanée de l'usine et sa répartition sur les groupes en service

η_g avec l'ensemble des paramètres ci-dessus

7.1 Coefficient énergétique moyen de l'installation K_{em}

Selon les notations de la fig. 1 et du paragraphe 1, les termes suivants sont des constantes caractéristiques de l'ouvrage:

H_{bm} chute brute moyenne au centre de gravité de la retenue pleine

$Y_{\text{max}} = K H_{\text{bm}}$

$Y_m = K_1 Y_{\text{max}} = K K_1 H_{\text{bm}}$

$H_{\text{rmax}} = K_2 H_{\text{bm}} = K_3 P_{\text{umax}}^2$

η_u constante selon l'hypothèse du paragraphe 6

Les pertes de charge variant avec le carré de la puissance instantanée de l'usine (paragraphe 5) et la charge moyenne d'exploitation étant généralement voisine du 70 % de la charge maximum, la perte de charge moyenne est alors:

$$H_{\text{rm}} = 0,5 H_{\text{rmax}} = 0,5 K_2 H_{\text{bm}}$$

Le coefficient énergétique moyen d'exploitation s'établit alors:

$$K_{\text{em}} = \frac{H_{\text{bm}} - H_{\text{rm}}}{367} \eta_u = \frac{H_{\text{bm}} (1 - 0,5 K_2)}{367} \eta_u \quad (10)$$

7.2 Coefficient énergétique de l'installation K_e pour un régime de marche quelconque

À un niveau et à une charge quelconque le coefficient énergétique est, avec $Y = K_{x1} Y_{\text{max}}$; K_{x1} étant une variable comprise entre 0 et 1:

$$K_e = \frac{H_{\text{bm}} + Y - Y_m - H_r}{367} \eta_u = \frac{H_{\text{bm}} + Y_{\text{max}} (K_{x1} - K_1) - H_r}{367} \eta_u \quad (11)$$

Les valeurs extrêmes du coefficient énergétique sont définies par les conditions:

K_{emax} chute brute maximum $Y = Y_{\text{max}}$
puissance faible $H_r = 0$

K_{emin} chute brute minimum $Y = 0$
puissance maximum $H_r = H_{\text{rmax}} = K_2 H_{\text{bm}}$

d'où:

$$K_{\text{emax}} = \frac{H_{\text{bm}} + Y_{\text{max}} (1 - K_1)}{367} \eta_u \quad (12)$$

et:

$$K_{\text{emin}} = \frac{H_{\text{bm}} (1 - K_2) + Y_{\text{max}} (0 - K_1)}{367} \eta_u \quad (13)$$

Exprimées en valeur relative par rapport au coefficient énergétique moyen défini au paragraphe 7.1, les trois valeurs établies ci-dessus s'écrivent, avec:

$$H_r = K_{x2} H_{\text{bm}}$$

K_{x2} étant une variable comprise entre 0 et K_2 :

$$K_e^* = \frac{K_e}{K_{\text{em}}} = \frac{1 + K (K_{x1} - K_1) - K_{x2}}{1 - 0,5 K_2} \quad (14)$$

$$K_{\text{emax}}^* = \frac{1 + K (1 - K_1)}{1 - 0,5 K_2} \quad (15)$$

$$K_{\text{emin}}^* = \frac{1 - K K_1 - K_2}{1 - 0,5 K_2} \quad (16)$$

7.3 Limites normales du coefficient énergétique

Les limites extrêmes données par les équations 15 et 16 sont si rarement atteintes en exploitation normale qu'elles n'ont aucune signification pour la gestion de l'ouvrage.

En année normale, un bassin d'accumulation est rarement entièrement vidé. On y conserve une réserve minimum de 5 à 15 %. En raison de la forme quasi pyramidale de la retenue, dont le volume est fonction de la hauteur à une puissance comprise entre 2 et 3, on peut admettre:

$$Y_{\min} = \left(\frac{1}{3} \text{ à } \frac{1}{4} \right) Y_{\max} \rightarrow \frac{1}{3} < K_{x1} < 1$$

$$Y_m = \left(\frac{2}{3} \text{ à } \frac{3}{4} \right) Y_{\max} \rightarrow \frac{2}{3} < K_1 < \frac{3}{4}$$

La perte de charge maximum est toujours de l'ordre de 4 à 8 % de la chute brute moyenne: $K_2 \approx 0,06$ et $1 - 0,5 K_2 \approx 0,97$. De plus, la puissance moyenne de production sera en général plus élevée lorsque la retenue est pleine que lorsqu'elle est vide.

Avec les hypothèses précédentes, les limites «normales» du coefficient énergétique s'établissent:

$$K_{\text{emax}}^* = \frac{1 + K \left(1 - \frac{2}{3} \right) - 0,5 K_2}{0,97} \approx 1 + \frac{1}{3} K \quad (17)$$

$$K_{\text{emin}}^* = \frac{1 + K \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) - 0,5 K_2}{0,97} \approx 1 - \frac{1}{3} K$$

Si on admet maintenant que la précision des mesures industrielles de grands volumes d'eau est de l'ordre de 2 à 4 % et que les calculs faits à l'aide du coefficient énergétique moyen K_{em} doivent être d'une exactitude au moins égale, on peut définir le domaine d'application d'une telle méthode par:

$$1 + \frac{1}{3} K \leq 1,03 \rightarrow K < 0,1$$

Cette valeur indique que la variation maximum de la chute brute $Y_{\max} = H_{\text{bmax}} - H_{\text{bmin}}$ doit être inférieure au 10 % de la chute brute H_{bm} pour que l'erreur journalière due à l'emploi d'un coefficient énergétique moyen soit du même ordre que l'erreur de mesure des volumes d'eau.

8. Estimation de l'erreur comptable saisonnière due à l'emploi du coefficient énergétique moyen K_{em} constant

L'erreur comptable saisonnière, ou erreur statistique, est en réalité beaucoup plus faible que l'erreur journalière, définie au paragraphe précédent. Ces dernières sont en effet positives ou négatives selon que le niveau du lac est supérieur ou inférieur au niveau moyen défini par Y_m . Or, le niveau journalier évolue mensuellement ou saisonnièrement de part et d'autre de Y_m et les erreurs tendent à se compenser sur la durée d'une vidange ou d'un remplissage du lac.

Si, pour simplifier les calculs, nous admettons que le bassin d'accumulation a une forme pyramidale:

$$Y_m = \frac{3}{4} Y_{\max} \rightarrow K_1 = \frac{3}{4}$$

$$V = f(Y^3) = K_4 Y^3 = K_4 K_{x1}^3 Y_{\max}^3$$

et que la production d'énergie est faite à charge moyenne:

$$H_{\text{rm}} = K_{x2} H_{\text{bm}} = 0,5 K_2 H_{\text{bm}}$$

l'expression (14) devient:

$$K_e^* = 1 + K \frac{K_{x1} - K_1}{1 - 0,5 K_2} \text{ avec } 0 < K_{x1} < 1$$

L'erreur élémentaire en énergie pour une variation élémentaire du volume du lac s'écrit alors:

$$d(\Delta E) = (K_e - K_{\text{em}}) dV = K_{\text{em}} (K_e^* - 1) dV$$

avec

$$dV = K_4 3 Y^2 dY = K_4 Y_{\max}^3 3 K_{x1}^2 dK_{x1}$$

$$d(\Delta E) = K_{\text{em}} K \frac{K_{x1} - K_1}{1 - 0,5 K_2} K_4 Y_{\max}^3 3 K_{x1}^2 dK_{x1} =$$

$$= \frac{3 K_{\text{em}} K K_4 Y_{\max}^3}{1 - 0,5 K_2} (K_{x1}^3 - K_1 K_{x1}^2) dK_{x1} =$$

$$= K_5 (K_{x1}^3 - K_1 K_{x1}^2) dK_{x1}$$

avec

$$K_5 = \frac{3 K_{\text{em}} K K_4 Y_{\max}^3}{1 - 0,5 K_2} = \text{constante de l'ouvrage}$$

En intégrant l'erreur pour une vidange *ou* un remplissage complets:

$$\Delta E = \int_{K_{x1}=0}^{K_{x1}=1} dE = \left[K_5 \frac{K_{x1}^4}{4} - K_5 K_1 \frac{K_{x1}^3}{3} \right]_{K_{x1}=0}^{K_{x1}=1}$$

et comme:

$$K_1 = \frac{3}{4} = \frac{Y_m}{Y_{\max}}$$

on obtient finalement:

$$\Delta E = \frac{K_5}{4} \left[K_{x1}^4 - K_{x1}^3 \right]_{K_{x1}=0}^{K_{x1}=1}$$

Cette expression s'annule pour toute évolution du lac entre les limites extrêmes $K_{x1} = 0$ et $K_{x1} = 1$, ainsi qu'entre une infinité de paires de limites conjuguées.

Ceci démontre que les erreurs dues à l'introduction d'un coefficient énergétique constant dans les calculs de gestion *tendent* à s'annuler statistiquement.

La limite maximum de variation de la chute brute $Y_{\max} = H_{\text{bmax}} - H_{\text{bmin}}$ permettant l'emploi d'un coefficient énergétique K_{em} constant dans les calculs de gestion sera en définitive beaucoup plus élevée que la valeur définie au paragraphe 7.3 :

$$Y_{\max} < 0,1 H_{\text{bm}}$$

Ces résultats restent valables lorsque le volume de la retenue a une forme différente de la pyramide. L'erreur continue à s'annuler pour des évolutions du lac entre une infinité de paires de limites conjuguées, qui prennent simplement une valeur différente. Si, d'autre part, l'erreur tend à s'annuler pour une évolution, cette tendance sera encore plus forte pour un grand nombre d'évolutions successives.

L'erreur statistique sera toutefois un peu plus importante lorsque les volumes d'apports naturels reçus et immédiatement utilisés à lac haut et à lac bas sont très différents.

De toute façon, et malgré les approximations introduites dans les calculs, l'erreur statistique résiduelle reste très faible lorsqu'elle ne s'annule pas.

Adresse de l'auteur:

Jacques Tiercy, ing., S. A. l'Energie de l'Ouest Suisse, Place de la Gare 12, 1000 Lausanne.