

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 57 (1931)  
**Heft:** 17

**Artikel:** Calcul de l'énergie réalisable dans une installation hydraulique, en partant de la courbe de fréquence des débits  
**Autor:** Calame, Jules  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-44159>

### **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:** 12.07.2025

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

# BULLETIN TECHNIQUE

Réd. : D<sup>r</sup> H. DEMIERRE, ing.

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN

ORGANE DE L'ASSOCIATION SUISSE DE TECHNIQUE SANITAIRE

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : *Calcul de l'énergie réalisable dans une installation hydraulique, en partant de la courbe de fréquence des débits, par M. JULES CALAME, ingénieur-conseil à Genève. — Concours pour un bâtiment d'école des garçons de la commune de Sion. — La fabrication des lampes à incandescence. — Les constructions locatives communales de Charmontey, à Vevey. — A Genève. — Premier congrès de la Nouvelle Association Internationale pour l'essai des matériaux, Zurich, septembre 1931. — Congrès de Génie civil. — Service de placement.*

## Calcul de l'énergie réalisable dans une installation hydraulique, en partant de la courbe de fréquence des débits

par Jules CALAME, ingénieur-conseil à Genève.

Si l'on a sous la main une courbe de *fréquence des débits*, soit une courbe des débits moyens disponibles du cours d'eau à aménager, classés en fonction des jours de l'année (fig. 1), la surface comprise entre cette courbe et l'axe des temps représente le *volume d'eau* total qui s'est écoulé dans le cours d'eau pendant la période considérée : le volume d'eau *disponible*.

Or les turbines de l'installation ne sont prévues, en général, que pour absorber le débit des basses eaux ou des eaux moyennes, de sorte qu'en cas de crue, le volume d'eau *théoriquement utilisable* doit se calculer sur la base du débit *maximum* que peuvent absorber les turbines.

Ce volume d'eau connu, il est facile d'estimer l'*énergie réalisable* qui lui est proportionnelle, si l'on convient d'admettre, pour simplifier le calcul, une chute nette *moyenne* durant toute l'année et un rendement *moyen* des machines.

Si, au contraire, on estime que la variation de la chute nette ou celle du rendement ou toutes les deux à la fois sont trop importantes pour qu'on puisse simplement leur substituer une valeur moyenne, il sera pratiquement toujours possible d'exécuter l'intégration sous la forme d'une somme de produits dont chaque terme sera choisi entre deux limites suffisamment proches pour qu'entre ces limites la chute nette et le rendement puissent être regardés comme constants. C'est ce que nous allons examiner de plus près.

### 1. Détermination du plus grand volume d'eau utilisable.

Complétons d'abord la courbe de fréquence du *débit disponible* de la figure 1 en traçant la courbe du *débit utilisable* (qui n'est rien d'autre que la courbe du débit maximum que peuvent absorber les turbines quand le débit disponible est surabondant) et considérons à part un certain nombre de jours constituant l'élément de

temps  $\Delta t_m$  pendant lequel on pourra, sans erreur appréciable, calculer une valeur moyenne  $Q_m$  du débit.

Le volume d'eau qui s'est écoulé pendant le temps  $\Delta t_m$  n'est rien d'autre que le produit  $Q_m \cdot \Delta t_m$  et le volume total absorbé par les turbines au cours de l'année est représenté par la somme

$$V = \sum_1^n V_m = \sum_1^n Q_m \cdot \Delta t_m$$

si  $n$  désigne le nombre des éléments de l'intégration graphique.

Le professeur *Schoklitsch* a montré<sup>1</sup>, sauf erreur le premier, qu'on peut calculer ce volume très simplement à l'aide du procédé usuel des polygones dynamique et funiculaire.

Si l'on projette, en effet, sur une ordonnée parallèle à l'axe des débits  $Q$ , les débits moyens  $Q_m$  équivalents pendant les temps  $\Delta t_m$  de ceux de la courbe des débits utilisables, on constitue, sur cette ordonnée, une échelle de « forces », qui va permettre de tracer très simplement la *courbe intégrale* dont les ordonnées exprimeront, à une certaine échelle, le *volume d'eau absorbé* par les turbines à partir de l'origine  $o$  des temps.

Le tracé de la courbe intégrale se fait en choisissant un pôle  $A$  situé à une distance  $a$  de l'échelle des « forces » et en tirant de ce pôle des rayons qui le joignent à chacune des divisions de l'échelle des « forces ».

Partant ensuite de l'origine  $o$ , on tracera, à la manière d'un polygone funiculaire, une série de côtés parallèles aux rayons polaires du polygone des forces, côtés qui seront chaque fois limités par les ordonnées verticales des éléments  $\Delta t$ .

Le tracé terminé, l'ordonnée finale  $Y$  représente, à une certaine échelle, le total du volume d'eau absorbé par les turbines.

La démonstration est des plus simples, si l'on remarque que la différence  $\Delta Y_m$  des deux ordonnées extrêmes d'un élément de la courbe intégrale ne représente rien d'autre que le volume d'eau qui s'est écoulé pendant le temps  $\Delta t_m$ .

On a, en effet, en comparant les deux triangles semblables hachurés sur la figure 1 :

<sup>1</sup> *Graphische Hydraulik*. — Teubner, Leipzig 1923, p. 6.

$$\frac{\Delta Y_m}{Q_m} = \frac{\Delta t_m}{a} \quad (1)$$

c'est-à-dire

$$\Delta Y_m = \frac{1}{a} \cdot Q_m \Delta t_m = \frac{1}{a} \cdot V_m$$

et pour le total

$$Y = \sum_1^n \Delta Y_m = \frac{1}{a} \sum_1^n V_m = \frac{1}{a} \sum_1^n Q_m \Delta t_m$$

Il reste à déterminer l'échelle des  $Y$ , si l'on veut que ces ordonnées expriment immédiatement les volumes d'eau cherchés.

Supposons qu'on ait représenté les différentes variables aux échelles suivantes :

$$1 \text{ cm} = \epsilon_q \text{ m}^3/\text{s}$$

$$1 \text{ cm} = \epsilon_t \text{ jours} = 86\,400 \cdot \epsilon_t \text{ sec}$$

$$1 \text{ cm} = \epsilon_v \text{ m}^3$$

et qu'on ait adopté une distance polaire de  $a$  cm.

Le rapport des vraies valeurs des variables, correspondant à l'égalité (1) s'écrira dès lors :

$$\frac{\Delta Y_m}{\epsilon_v} : \frac{Q_m}{\epsilon_q} = \frac{\Delta t_m}{\epsilon_t} : a$$

soit

$$\frac{\Delta Y_m \epsilon_q}{Q_m \epsilon_v} = \frac{\Delta t_m}{\epsilon_t a}$$

mais, comme on veut précisément, dans le diagramme, que l'ordonnée partielle  $\Delta Y_m$  représente exactement le produit  $Q_m \cdot \Delta t_m$ , en d'autres termes que

$$\Delta Y_m = Q_m \cdot \Delta t_m$$

il faut dès lors choisir

$$a = \epsilon_v : \epsilon_q \epsilon_t \quad (2)$$

Si l'on choisit, par exemple comme échelle des  $Q$  :  $1 \text{ cm} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$  ; comme échelle des  $t$  :  $1 \text{ cm} = 10 \text{ jours} = 864\,000 \text{ sec}$ . et  $a = 15 \text{ cm}$  on obtient, comme échelle des  $V$  :

$$1 \text{ cm} = 15 \cdot 50 \cdot 864\,000 = 648 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

## 2. Calcul du total de l'énergie réalisable.

Pour calculer l'énergie correspondant au volume d'eau absorbé par les turbines, on pourrait utiliser immédiatement la courbe du volume d'eau, mais il faudrait alors que, durant toute l'année, la chute nette disponible et le rendement des machines fussent constants.

L'énergie réalisable au cours d'une année peut s'écrire, en effet

$$E = \sum_1^n E_m = \sum_1^n N_m \Delta t_m$$

Or la puissance moyenne  $N_m$  durant l'élément  $\Delta t_m$  s'écrit généralement, exprimée en kW au départ de l'usine :

$$N_m = \frac{736}{75} \frac{Q_m H_m}{\eta_m} \cdot \eta_m$$

$$= 9,8 \frac{Q_m H_m}{\eta_m}$$

$$= K_m \cdot Q_m$$

si l'on désigne par  $\eta_m$  le produit des rendements moyens de la turbine, de la génératrice et des transformateurs.

L'énergie moyenne, en kW. sec, s'écrit dès lors

$$E_m = K_m \cdot Q_m \Delta t_m$$

ou, en kWh

$$E_m = \frac{K_m}{3600} Q_m \Delta t_m = C_m \cdot Q_m \Delta t_m$$

L'énergie totale au cours de l'année, en kWh s'exprime par

$$E = \sum_1^n E_m = \sum_1^n C_m Q_m \Delta t_m \quad (3)$$

valeur dans laquelle :

$$C_m = \frac{9,8 \cdot H_m \eta_m}{3600} = 0,00272 \cdot H_m \eta_m \quad (4)$$

Si l'on estime pouvoir admettre, pour tout le cours de l'année, des valeurs constantes de  $H_m$  et  $\eta_m$ ,  $C_m$  devient à son tour constant et l'on peut écrire, dans ce cas particulier :

$$E = C_m \sum_1^n Q_m \Delta t_m = C_m \cdot V \quad (5)$$

où  $V$  désigne le volume d'eau total absorbé par les turbines pendant tout le temps correspondant, ainsi qu'il a été défini sous chiffre 1.

Si, au contraire,  $H_m$  ou  $\eta_m$  varie d'une manière sensible, il est généralement possible, tout de même, de pouvoir envisager certaines périodes durant lesquelles  $H_m$  et  $\eta_m$  peuvent être considérés simultanément comme constants.

Durant ces périodes que nous caractériserons par les chiffres I, II, III, etc., on peut donc envisager des constantes  $C_I$ ,  $C_{II}$ ,  $C_{III}$ , etc. en même temps que des volumes d'eau partiels  $\Delta V_I$ ,  $\Delta V_{II}$ ,  $\Delta V_{III}$ , etc. et le total de l'énergie réalisable devient, dans ce cas plus général :

$$E = C_I \Delta V_I + C_{II} \Delta V_{II} + C_{III} \Delta V_{III} + \dots \quad (6)$$

$$E = \Delta E_I + \Delta E_{II} + \Delta E_{III} + \dots$$

## 3. Etablissement direct du diagramme de l'énergie réalisable.

Plutôt que de calculer le total de l'énergie en passant par le volume d'eau absorbé, on peut se proposer de calculer graphiquement, d'une manière immédiate, l'énergie disponible au bout d'un temps quelconque  $t_m$ .

Nous supposons toujours ici, comme point de départ, une courbe de fréquence des débits dans laquelle l'axe des temps puisse être subdivisé en un certain nombre de périodes durant lesquelles la chute nette  $H_m$  et le rendement  $\eta_m$  des machines soient pratiquement constants.

Si l'on se reporte à la figure 1, on voit que la courbe intégrale ou courbe des volumes d'eau absorbés est obtenue, à une certaine échelle, en adoptant dans le polygone des « forces » la distance polaire  $a$ . Si l'on change cette distance polaire, la courbe intégrale se développe diffé-

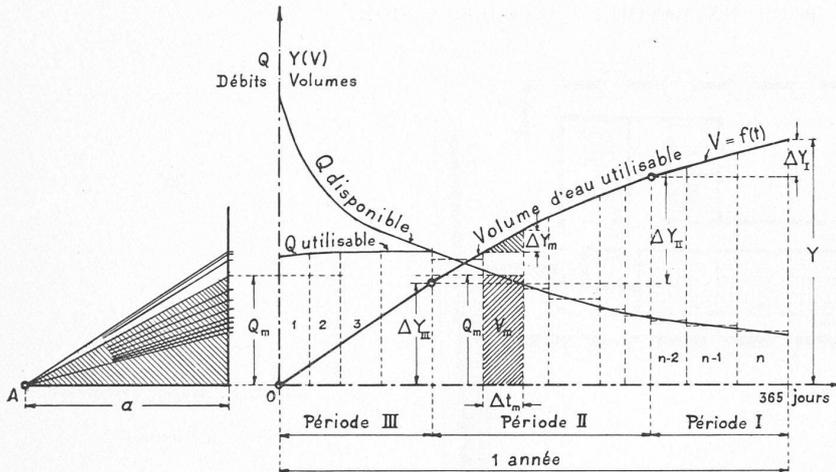


Fig. 1. — Courbe de fréquence des débits et courbe du volume d'eau maximum utilisable.

remment, mais ses ordonnées, comptées au-dessus de l'axe des temps, sont toujours proportionnelles à la distance polaire  $a$ , l'axe des temps jouant le rôle d'axe d'affinité.

Or, ainsi qu'on vient de le montrer à la fin du paragraphe qui précède, les énergies partielles  $\Delta E_I, \Delta E_{II}, \Delta E_{III}, \dots$  sont proportionnelles aux volumes d'eau  $\Delta V_I, \Delta V_{II}, \Delta V_{III}, \dots$  totalisés à la fin de ces périodes, ce qui revient à dire que, durant chacune de ces périodes, il sera possible, par le choix de distances polaires appropriées  $a'_I, a'_{II}, a'_{III}, \dots$ , de tracer directement la courbe de l'énergie réalisable. Il suffira, pour le faire, de changer la distance polaire, à l'instant où l'on passe d'une période à la suivante.

Il est d'ailleurs facile de fixer ces distances polaires de manière que la courbe ainsi tracée corresponde à une certaine échelle de l'énergie  $E$ , en raisonnant comme suit :

A la fin de l'une quelconque des périodes de rang  $i$ , l'énergie déjà réalisée  $a$  pour valeur :

$$E_i = C_i \sum_1^i Q_m \Delta t_m = C_i V_i \quad (7)$$

Elle est proportionnelle à  $V_i$ . Par conséquent l'ordonnée  $Z_i$  qui la représente sur le dessin a pour valeur :

$$Z_i = \frac{C_i}{a} \sum_1^i Q_m \Delta t_m = C_i Y_i$$

ce qui revient à dire que les ordonnées  $Z$  de l'intégrale de la courbe de fréquence des débits représentent les énergies réalisables  $E$  à l'échelle  $a : C_i$ .

Si l'on désire cependant que les ordonnées  $Z$  représentent directement les énergies  $E$  et à supposer qu'on ait choisi, comme échelle des  $E$ ,  $1 \text{ cm} = \epsilon_E \text{ kWh}$

la distance polaire qui convient est

$$a' = \epsilon_E : \epsilon_Q \epsilon_t \cdot C_i \quad (8)$$

si l'on a eu soin d'exprimer en heures l'échelle des temps.

Cette valeur de  $a'$  s'obtient simplement aussi de la valeur de  $a$ , si l'on remarque qu'en vertu de l'égalité (7)

$$\epsilon_V = \epsilon_E : C_i$$

Durant cette période de rang  $i$  pendant laquelle la chute nette a pour valeur moyenne  $H_i$  et le rendement  $\eta_i$

$$C_i = \frac{736 H_i}{75} \eta_i = 0,00272 H_i \eta_i \quad (9)$$

La figure 2 montre une application de ce procédé, dans le cas où l'on peut envisager 3 périodes distinctes, auxquelles on peut faire correspondre 3 distances polaires différentes  $a'_I, a'_{II}, a'_{III}$ .

Il est toujours possible de choisir la disposition du polygone dynamique et le point de départ du polygone funiculaire de manière à obtenir une disposition favorable pour la courbe de l'énergie totalisée.

L'ordonnée finale  $Z$  de cette courbe représente donc à l'échelle du dessin, la somme  $E$  de l'énergie utilisée au cours de l'année.

Une différence  $\Delta Z_m$  de deux ordonnées quelconques de la courbe d'énergie exprime à son tour la fraction de l'énergie  $\Delta E_m$  réalisée pendant le temps  $\Delta t_m$  qui lui correspond sur l'axe des abscisses.

\* \* \*

L'intérêt de ce procédé, c'est qu'il est trois à quatre fois plus rapide que le calcul purement numérique. Son exactitude, qui dépend de celle du dessin, permet d'atteindre le résultat à 2 ou 3% près, ce qui est amplement suffisant quand il s'agit d'estimer l'énergie d'un cours d'eau dont le régime varie d'une année à l'autre dans une proportion généralement bien plus forte.

Genève, janvier 1931.

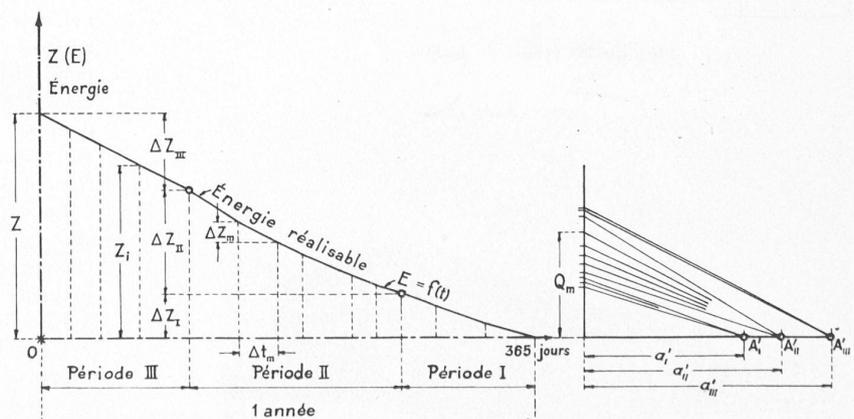


Fig. 2. — Diagramme de l'énergie maximum réalisable.