

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 87 (1961)
Heft: 9: Recherche opérationnelle II

Artikel: Le dimensionnement des aménagements de Grande Dixence dans la zone des adductions
Autor: Meystre, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-65026>

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: 11.01.2026

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

LE DIMENSIONNEMENT DES AMÉNAGEMENTS DE GRANDE DIXENCE DANS LA ZONE DES ADDUCTIONS

par PIERRE MEYSTRE, ingénieur EPUL, ingénieur en chef à la Grande Dixence S.A.¹

La « Zone des adductions » de Grande Dixence (fig. 1) est la zone d'origine des eaux dérivées par la Société pour remplir le lac d'accumulation du Val-des-Dix et alimenter ensuite à l'aval les usines de Fionnay et Nendaz ; elle s'étend d'est en ouest le long des hautes Alpes valaisannes, de la chaîne des Mischabel, dans la vallée de Zermatt, au lac de Grande Dixence, sur une longueur d'environ 50 km et une surface de 357 km².

Les aménagements de cette zone consistent essentiellement en un collecteur situé entre les cotes 2500 et 2360, des embranchements latéraux, des prises d'eau et des installations de pompage.

Toutes les galeries et le collecteur sont souterrains et les dispositions nécessaires sont prises pour que l'écoulement s'y fasse toujours à niveau libre, à l'exception de deux siphons inversés, permettant de passer les vallons de Z'Mutt et du Gorner, et des conduites forcées des usines de pompage (fig. 2).

Le volume total des eaux captées en un été moyen est d'environ 420 millions de m³, dont une moitié approximativement, provenant des glaciers les plus bas, doit être remontée par les quatre usines de pompage.

¹ Conférence donnée le 19 novembre 1960 à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne lors du cours sur la Recherche opérationnelle, organisé par la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.

Le collecteur est dimensionné à son extrémité pour un débit d'environ 80 m³/sec. Sa longueur est de 24 km, celle des galeries secondaires de 75 km, les deux siphons ont 1460 et 1890 m et les conduites forcées des usines de pompage une longueur totale de 4800 m.

Les caractéristiques principales des usines de pompage sont données par le tableau 1.

TABLEAU 1

Caractéristiques principales des usines de pompage

	AROLLA	FER- PÈCLE	STAHEL	Z'MUTT ¹	Gorner	Schali- Bis
Nombre de groupes :	3	3	3 ²	2	2	2 ²
Débit installé : m ³ /sec	12,6	8,4	9,9	10,8	6,2	
Hauteur d'élévation manométrique moyenne : m	312	213	212	470	365	
Puissance installée : ch	3 × 22 000	3 × 9 500	3 × 12 000	2 × 40 500	2 × 25 000	
Puissance installée : MW	48,6	21,0	26,5	60,0	30,0	

¹ Encore en étude.

² Ces deux machines sont prévues pour travailler aussi en turbine.

AMENAGEMENTS HYDRO-ELECTRIQUES DE LA GRANDE DIXENCE

E2/1251c

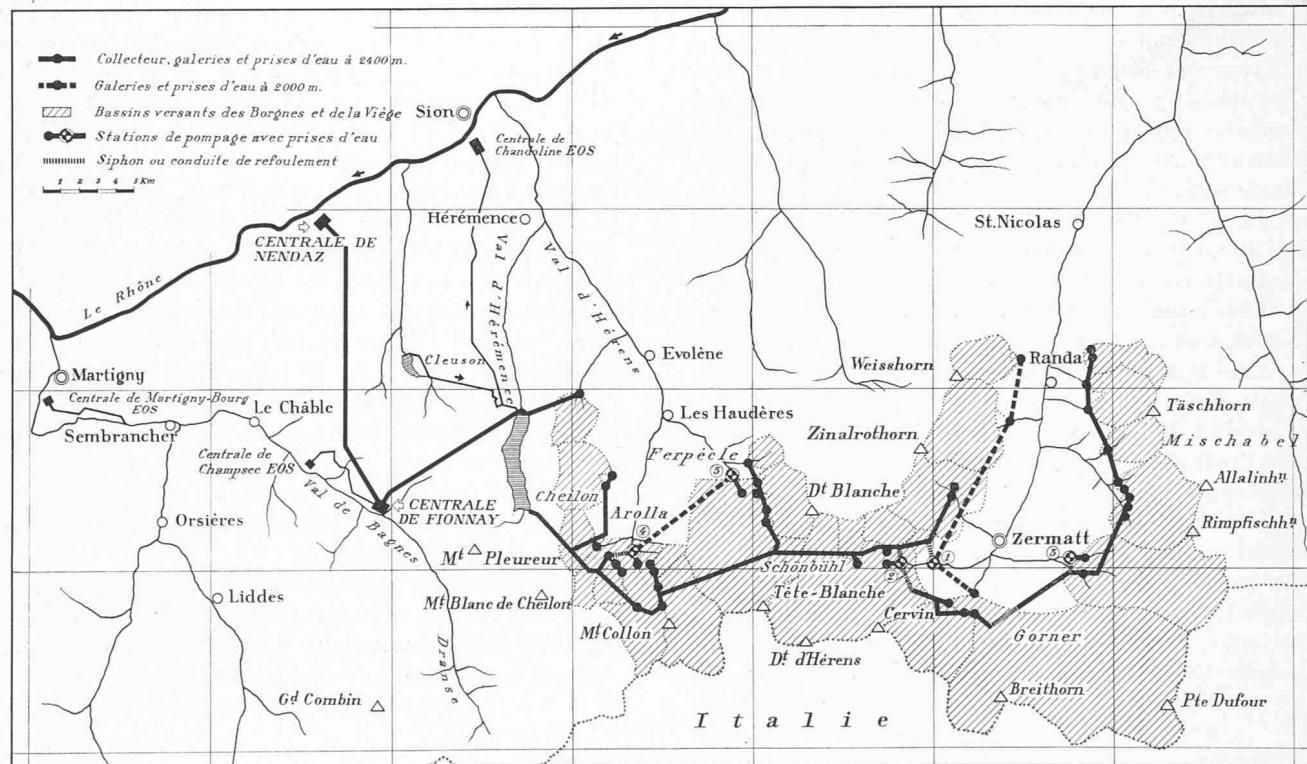


Fig. 1.

La puissance en pompage du Schali-Bis ne dépassera pas 18 500 ch, en tenant compte de toutes les tolérances. La puissance de 25 000 ch est déterminée par la marche en turbine avec 4 m³/sec sous 490 m. Le transformateur alimente encore un petit groupe auxiliaire.

* * *

L'ampleur de ces aménagements, l'importance des capitaux à investir, la valeur de l'eau (1 m³ turbiné dans le groupe d'usines de Fionnay et Nendaz produit en moyenne 4 kWh) et les temps de construction prévus sont tels qu'il était tout indiqué de pousser très loin les calculs économiques ; pour chaque ouvrage nous devions chercher les dimensions optimales assurant la meilleure rentabilité en équilibrant les capitaux à investir avec les pertes d'eau à prévoir en exploitation les jours de grande chaleur et de fort écoulement.

De nombreuses méthodes de calcul ont été utilisées pour le dimensionnement des divers ouvrages : méthodes intuitives ou mathématiques, études graphiques ou essais de diverses variantes d'équipement au moyen de programmes de simulation de fonctionnement introduits dans une machine à calculer.

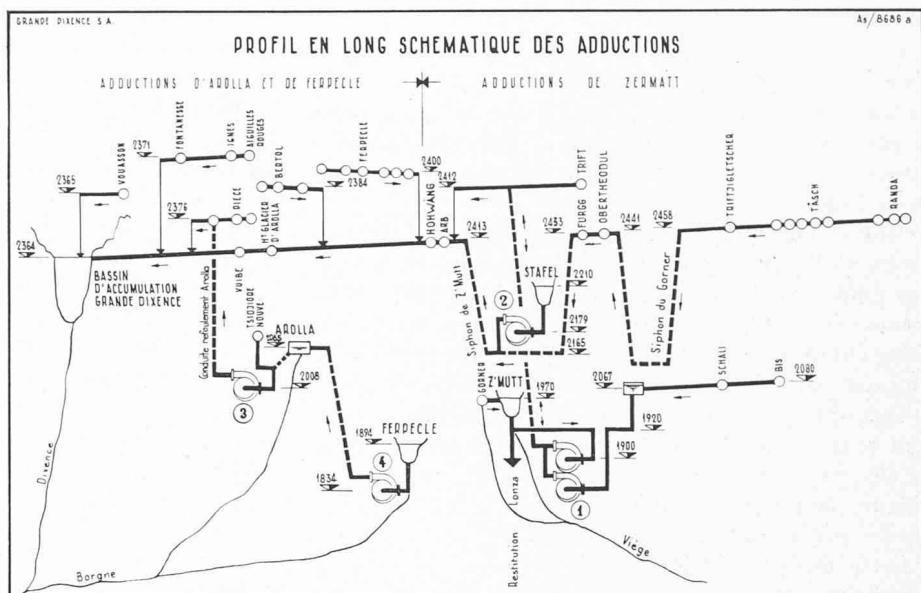
Toutes ces recherches font partie de ce que l'on est convenu d'appeler la recherche opérationnelle, quoique certaines des méthodes utilisées soient nouvelles ou peu fréquentes dans les applications classiques. Le but poursuivi est pourtant le même, puisque l'on cherche à optimiser la construction de l'aménagement et son exploitation.

Nous décrivons ci-après quelques-unes des méthodes de calcul utilisées, en espérant qu'elles pourront être une illustration de ce que peut devenir la recherche opérationnelle appliquée aux problèmes, en général assez complexes, de l'art de l'ingénieur.

Précisons pourtant immédiatement que la R.O. n'est pas un procédé ou une science de calcul des ouvrages ou de leur dimensionnement, car elle ne remplace aucune des sciences ni des techniques de l'art de l'ingénieur ; elle n'est pas une science de l'exploitation des entreprises ou du commandement, car elle ne remplace pas l'intuition du chef ni ses connaissances scientifiques ou techniques nécessaires et ne permet pas à elle seule de prendre une décision quelconque ; elle n'est pas une nouvelle technique, car elle en utilise elle-même plusieurs, dont aucune n'est essentiellement nouvelle.

Qu'est-elle donc ?

Pour nous, sans vouloir risquer une définition que de très nombreux auteurs en ont donnée, constatons simplement qu'elle a été une manière nouvelle, plus approfondie, plus sûre et plus précise de déterminer, en faisant appel à des méthodes de calcul en partie



Le problème général

Pour simplifier, nous avons cherché à éliminer le plus possible ces influences réciproques ; il a suffi pour ceci de partir d'emblée d'un ensemble qui se rapprochait le plus possible de l'aménagement définitif, ce qui a permis de ne considérer que des variations éventuelles assez faibles.

Mathématiquement, on se rapproche ainsi du cas limite où l'on peut dire en toute rigueur que la somme des différentielles partielles est égale à la différentielle totale, c'est-à-dire que l'on limite d'emblée les corrections envisagées de manière que les fonctions diverses puissent être remplacées par des fonctions linéaires. D'autre part, il faut remarquer que les calculs ne mettent plus en cause l'existence ou la rentabilité globale de chaque ouvrage, mais se limitent à des calculs marginaux, la rentabilité globale étant contrôlée par les études préliminaires.

Cette manière de prendre le problème d'ensemble, ou plutôt cette méthode de calcul, a été utilisée pour le dimensionnement final des divers tronçons du collecteur, dont la grandeur est fonction de celles de tous les éléments qui y débouchent, et l'on a pu ainsi se permettre de sommer linéairement les corrections dues aux calculs précis des diverses prises ou pompes. Ces calculs eux-mêmes ne sont pas soumis à l'obligation de la linéarité et peuvent être faits librement.

Cette méthode générale a beaucoup d'analogie avec le calcul marginal des économistes, dont l'avantage principal est d'éviter de devoir chiffrer les coûts de base des ouvrages considérés, ce qui allège d'autant les calculs et élimine des risques d'erreur et des fautes d'approximation.

Dimensionnement du collecteur

Voyons quelles sont les données du problème, les variables possibles et le but que l'on cherche à atteindre.

Données

Le collecteur conduit au lac de Grande Dixence les eaux qui lui sont apportées en divers points de son parcours par des prises ou des galeries latérales. Le collecteur peut être divisé en tronçons délimités par ces points d'introduction.

Les débits des prises ou des amenées secondaires sont proportionnels entre eux aux volumes annuels captés en année moyenne et varient le long de l'année selon les lois d'écoulement représentées par des relevés limnémétriques. Ces relevés montrent des maxima en juillet et août. De plus, il se présente chaque jour un maximum à la fin de l'après-midi et un minimum le matin.

Ces débits s'écoulent dans le collecteur en suivant la loi des écoulements libres, exprimée par exemple par Strickler, qui permet d'établir une relation entre le débit maximum possible et la forme de la galerie ; on tiendra compte éventuellement des courbes de remous.

Le coût de chaque tronçon est calculable avec assez de précision sur la base d'une estimation géologique et des séries de prix convenues avec les entreprises ou proposées dans des soumissions ou encore en vigueur pour d'autres travaux.

On peut calculer encore la valeur de l'eau qui sera probablement perdue dans les pointes non captées en fonction des débits maximum admis.

On peut obtenir ainsi une relation de cause à effet entre le montant des capitaux investis ou les charges financières annuelles et la valeur de l'eau perdue dans les pointes de débit.

Variable indépendante

Nous avons choisi comme variable indépendante le débit de dimensionnement de chaque prise d'eau ou galerie latérale débouchant dans le collecteur.

Le débit de dimensionnement d'un tronçon du collecteur est alors égal à la somme des débits de dimensionnement des amenées d'eau débouchant à l'amont.

Les montants des capitaux à investir comme la valeur de l'eau perdue peuvent être déterminés en fonction de ces débits.

But du calcul

Le but recherché est de trouver l'optimum économique de l'aménagement ; encore faut-il avoir une idée claire du mécanisme économique en jeu et du but recherché. On pouvait hésiter en effet entre divers dimensionnements apportant l'un une production maximum tout en ne dépassant pas un prix donné de l'énergie produite, ou un bénéfice maximum sur les capitaux investis, ou un prix minimum de l'énergie.

Or, l'on sait que Grande Dixence est une société de partenaires dont les capitaux proviennent pour les trois quarts environ d'émission d'obligations et que toute l'énergie produite et tous les frais annuels seront pris en charge par les partenaires. Il en résultera un prix moyen de l'énergie produite et l'intérêt des partenaires sera de disposer de cette énergie au plus bas prix moyen ; cet intérêt est d'ailleurs celui du consommateur en général. La notion de bénéfice disparaît ainsi de l'organisation financière de Grande Dixence.

Il faut remarquer ici que le volume d'eau capté en été suffira presque toujours à remplir le lac d'accumulation et la variation de ce volume, ou autrement dit la variation des pertes d'eau dues aux pointes non captées n'aura une influence que sur la production d'énergie d'été. La variation de cette production doit être valorisée au prix du marché et être introduite dans le compte financier annuel, d'où il résultera une variation du prix de revient moyen de l'énergie d'hiver.

Ce prix moyen de l'énergie d'hiver sera ainsi influencé par la quantité d'énergie d'été vendue, sans oublier d'autre part les charges financières plus ou moins fortes fonctions du dimensionnement des ouvrages.

On aboutit ainsi à la règle suivante :

Dans le cas de Grande Dixence, le dimensionnement des ouvrages d'adduction doit être arrêté à la limite où le bénéfice marginal fait sur l'énergie produite en été s'annule, compte tenu des charges financières de construction et d'exploitation dues à ce dimensionnement.

Le calcul de dimensionnement résultant de ces considérations est extrêmement simple et l'on raisonne comme suit :

Considérons d'abord un ensemble d'ouvrages entre une prise d'eau unique et un bassin d'accumulation.

Cet ensemble est calculé pour un débit choisi approximativement et coûte un certain prix ; on calcule ensuite le prix des mêmes ouvrages pour un débit de 1 m³/sec supérieur ; la différence des coûts entraîne une charge

financière annuelle calculée au taux des emprunts obligatoires augmenté des charges d'amortissement, d'entretien, etc., et qui doit être rentée par la valeur du supplément de volume capté. Le débit supplémentaire étant de $1 \text{ m}^3/\text{sec}$, on en déduit le *temps* pendant lequel la prise doit travailler à plein débit. Il n'y a plus ensuite qu'à chercher sur les débitgrammes le débit correspondant à ce temps. Le calcul sera fait une seconde fois si le débit trouvé est trop différent de celui choisi à l'origine.

Dans le cas de Grande Dixence, où l'on a plusieurs prises d'eau sur le même ensemble, on utilisera la méthode générale exposée ci-dessus et en application de laquelle le calcul du débit est fait séparément pour chaque prise d'eau en y incorporant tous les éléments intéressés du collecteur. Le débit de dimensionnement de chaque élément de collecteur est ensuite obtenu en faisant la somme des débits individuels des prises intéressées.

Le calcul se présente sous forme d'un tableau où l'on donne successivement en face de chaque tronçon de galerie :

- 1^o sa longueur ;
- 2^o le coût d'un surdimensionnement capable de conduire $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ de plus, coût exprimé en Fr./m³ert. par m^3/sec .
- 3^o le coût pour tout le tronçon en Fr./ m^3/sec ;
- 4^o la charge financière annuelle correspondante en Fr./ $\text{m}^3/\text{sec}/\text{an}$;
- 5^o la somme des charges financières pour tous les tronçons situés à l'aval ;
- 6^o le volume d'eau qu'il est nécessaire de capter pour que le bénéfice marginal soit nul, volume obtenu en divisant la charge annuelle par la valeur du m^3 d'eau turbiné en été ; ce volume s'exprime en sec/an au débit marginal de $1 \text{ m}^3/\text{sec}$, et donne le temps de captage limite en ce point de la galerie.

Les coûts et les temps s'additionnent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du lac, ce qui est logique. On trouve ainsi des temps de captage de 4 heures à 3 km du lac, de 30 heures à 23 km, puis, en passant par deux siphons, de 130 heures à 47 km du lac.

Pour les usines de pompage équipées d'un bassin de compensation, les temps trouvés correspondent aux temps pendant lesquels ces bassins débordent¹ ; un bassin qui ne

déborderait jamais serait en effet un bassin économiquement trop grand et il en serait de même de l'usine qui l'accompagne.

Nous avons matérialisé une étape du calcul et le résultat final sur deux graphiques, où l'on voit, en fonction de la distance au lac, la progression du coût de l'agrandissement marginal du collecteur pour $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ (fig. 3), et sur le second les temps d'utilisation minima nécessaires à plein débit (fig. 4).

Il n'y a plus qu'à trouver sur les relevés limnimétriques les débits qui sont atteints pendant ces temps sur les diverses prises d'eau et à faire les sommes.

Cette méthode de dimensionnement nous a donné des chiffres de débit qu'il peut être intéressant de comparer

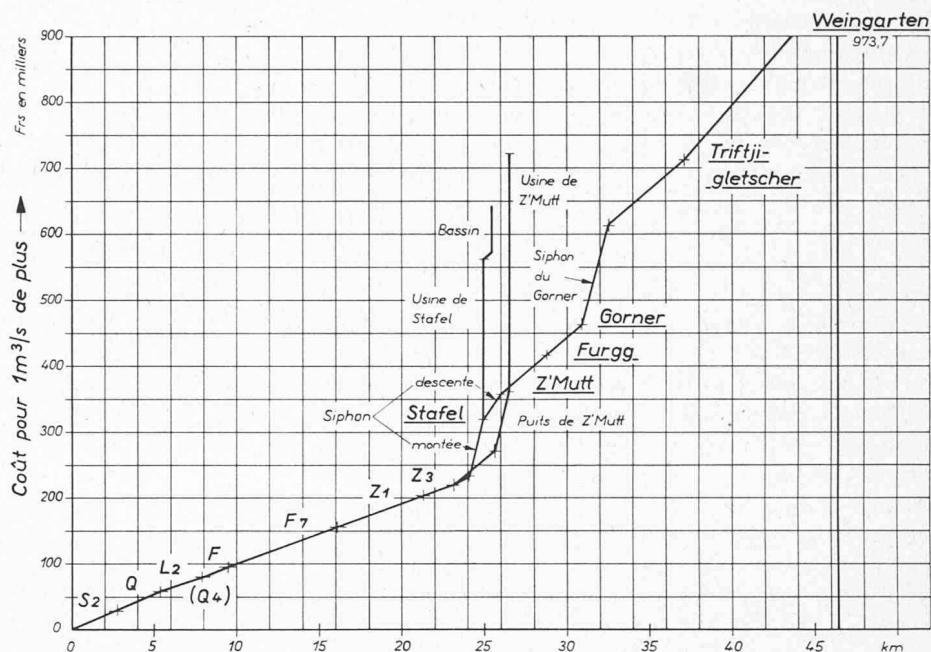


Fig. 3. — Coût d'un agrandissement du collecteur pour un supplément de débit de $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ à partir d'un point quelconque en fonction de la distance au lac.

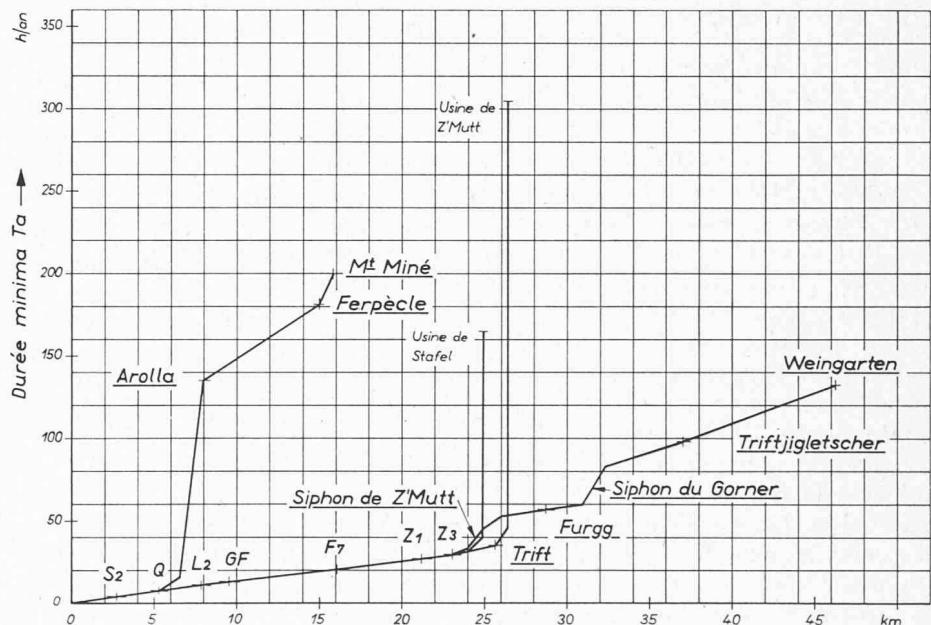


Fig. 4. — Durées limites de débordement pour le dimensionnement économique des diverses prises d'eau en fonction de la distance au lac.

¹ Voir plus loin la définition exacte de ces temps.

avec ceux que donnait une méthode approximative, utilisée au début des études, et qui posait qu'il fallait compter pour le débit de dimensionnement de chaque prise d'eau avec 1,8 fois le débit moyen des cinq mois d'été ou 1,25 fois le débit moyen du mois le plus fort. Cette méthode approchée donne des chiffres assez semblables pour les prises les plus éloignées ; par contre, pour celles qui sont les plus proches du lac, les débits calculés ainsi auraient été deux fois trop faibles.

Ces coefficients de 1,8 ou 1,25 sont donc en moyenne trop faibles pour des galeries de la dimension du collecteur de la zone des adductions de Grande Dixence et pour la chute de 1800 m sous laquelle l'eau est ensuite utilisée. D'autre part, ils ne peuvent raisonnablement pas être les mêmes pour des prises placées à petite distance du lac dans le val d'Arolla ou pour des prises situées le long des Mischabel.

Constatons pour terminer que la méthode de calcul utilisée est entièrement justifiée, qu'elle est rigoureuse et précise ; elle est évidemment soumise aux aléas de la connaissance des débitgrammes des diverses prises d'eau ou d'un débitgramme type et des divers volumes disponibles aux diverses prises ; finalement elle ne résulte pas d'un compromis entre frais de construction et perte d'eau mais d'un calcul économique donnant une limite de dimensionnement précise.

La méthode est applicable *mutatis mutandis* à d'autres installations.

Pour les *installations de pompage*, la variable indépendante reste le débit de dimensionnement et les temps limites trouvés sont les temps pendant lesquels l'usine travaille sans arrêt à plein débit, le bassin de compensation débordant pendant une partie de ce temps. Le temps doit être compté à partir du dernier moment où le bassin était vide et où l'on a mis en service tous les groupes de l'usine en prévision d'une pointe, jusqu'au moment où le bassin finit de déborder et où l'on va pouvoir le vider entièrement. Ces temps sont donc fonction du volume des bassins et des puissances de pompage installées et non plus seulement des débitgrammes. La variation des sommes investies porte aussi sur les usines avec leur équipement complet, les conduites forcées et les bassins de compensation dans la mesure où leur calcul montre une relation entre leur coût et le débit d'équipement du pompage.

Puits blindés

Passons maintenant, si vous le voulez bien, à un autre exemple de dimensionnement économique. Alors que, pour l'exemple précédent, j'ai choisi une méthode très intuitive qui pourrait sembler peut-être trop peu rigoureuse, je vais utiliser une méthode purement analytique qui conduit d'ailleurs à un résultat très semblable, avec l'avantage qu'elle peut être étendue au calcul de conduites forcées, puits blindés, conduites enterrées, etc.

Reprendons le problème à la base et soumettons-le à une analyse serrée :

Le but du dimensionnement économique est de rendre minimum le prix de l'énergie produite par Grande Dixence. Exprimons que l'on cherche le minimum de ce prix en fonction d'une grandeur de dimensionnement G , ou plus exactement : le minimum du prix de revient de l'énergie d'hiver, e_h , qui forme l'essentiel de

notre production et qui, du fait que cette quantité d'énergie est constante et se trouve être chaque année disponible, ne dépend pas des prix du marché :

$$\frac{\partial e_h}{\partial G} = 0.$$

Or, le prix de l'énergie d'hiver peut être exprimé par la formule suivante :

$$e_h = \frac{\text{Dépenses annuelles totales}}{\text{Energie d'hiver disponible}}$$

ou encore

$$e_h = \frac{A + P_e p_e + P_h p_h - (E_e - R_e) e_e}{E_h - R_h} \text{ Fr./kWh}$$

formule dans laquelle :

A = Charges financières annuelles et d'exploitation, non compris les mouvements d'énergie.

P_e = Energie de pompage d'été.

E_e = Energie produite en été.

P_h = Energie de pompage en hiver, indépendante en première approximation du dimensionnement des ouvrages, car les débits d'hiver sont très faibles, mais dont on peut tenir compte pour le dimensionnement des conduites.

Les termes suivants ne sont pas dépendants du dimensionnement des adductions, leur différentielle partielle par rapport à ce dimensionnement doit donc être considérée comme nulle :

p_e = Prix moyen de l'énergie de pompage d'été, au prix du marché.

p_h = Prix moyen de l'énergie de pompage d'hiver, constante car la quantité d'énergie utilisée en hiver est très faible et son prix ne dépend pas du dimensionnement des ouvrages.

R_e = Energie de restitution d'été, constante.

R_h = Energie de restitution d'hiver, constante.

E_h = Energie produite en hiver, constante.

e_e = Prix de l'énergie de restitution d'été ; il s'agit de petites quantités d'énergie dont on peut considérer que le prix ne varie que peu.

On a alors :

$$\frac{\partial e_h}{\partial G} = 0 \quad \text{si} \quad \frac{\partial A}{\partial G} + p_e \frac{\partial P_e}{\partial G} + p_h \frac{\partial P_h}{\partial G} - e_e \frac{\partial E_e}{\partial G} = 0.$$

Limitons-nous d'abord à la recherche du débit de dimensionnement des galeries ; la variable indépendante à choisir, G , est dans ce cas le débit de dimensionnement Q_i de chaque prise.

Introduisons le volume capté en été V_i à chaque prise i . On a alors, pour les volumes qui doivent être captés par pompage :

$$P_e = \sum V_i k_i$$

avec k_i , coefficient énergétique, représentant la dépense d'énergie de pompage par m^3 capté par la prise i ; cette énergie est évidemment nulle dans les prises par gravité. Nous admettons, pour le calcul des débits de dimensionnement des galeries, que k_i est indépendant de Q_i ; l'erreur faite est minime car les pertes de charge

dans les conduites des pompages ne représentent que quelques pour-cent des hauteurs statiques à vaincre, l'erreur sur le débit de dimensionnement est alors pratiquement nulle.

Rappelons à ce propos que la pente des galeries à écoulement libre a été fixée uniformément à 2 %.

Nous avons ensuite :

$$E_e = \sum V_i \cdot e_t$$

avec e_t , coefficient énergétique, représentant l'énergie produite par 1 m³ turbiné dans les installations de Grande Dixence.

En remplaçant P_e et E_e par leurs valeurs en fonction des V_i et en différentiant par rapport à la variable indépendante Q_i , seule grandeur de dimensionnement G envisagée pour l'instant, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{\delta P_e}{\delta G} &= \sum \frac{\delta P_e}{\delta Q_i} = \sum k_i \frac{\delta V_i}{\delta Q_i} \\ \frac{\delta E_e}{\delta G} &= \sum \frac{\delta E_e}{\delta Q_i} = e_t \sum \frac{\delta V_i}{\delta Q_i} \\ \text{et } \frac{\delta P_h}{\delta G} &= \sum \frac{\delta P_h}{\delta Q_i} = 0 \end{aligned}$$

car l'énergie de pompage d'hiver P_h est indépendante du débit de dimensionnement des prises Q_i .

Appelons a_{ci} le supplément des charges financières annuelles pour augmenter de 1 m³/sec le débit dans un tronçon de collecteur c en provenance de la prise i ; la charge annuelle totale A est formée d'une part qui varie avec les débits Q_i et d'une part qui varie avec d'autres éléments des aménagements, mais indépendante des débits Q_i ; la part variant avec les débits Q_i est égale à la somme des termes $a_{ci}Q_i$ intéressant une prise i , étendue à toutes les prises.

On a alors :

$$A f(Q_i) = \text{Const.} + \sum_i \left(Q_i \sum_c a_{ci} \right)$$

et

$$\frac{\delta A}{\delta G} = \sum \frac{\delta A}{\delta Q_i} = \frac{\delta}{\delta Q_i} \sum_i \left(Q_i \sum_c a_{ci} \right) = \sum_i \sum_c a_{ci}$$

Si T_i est le temps pendant lequel la prise i travaille au plein débit de dimensionnement Q_i , on a, en fonction de ce débit de dimensionnement :

$$V_i = \text{Const} + Q_i \cdot T_i$$

$$dV_i = T_i dQ_i \quad \text{d'où } \frac{\delta V_i}{\delta Q_i} = T_i$$

En remplaçant cette dernière valeur dans les équations précédentes, on a :

$$\frac{\delta P_e}{\delta G} = \sum k_i \cdot T_i \quad \text{et} \quad \frac{\delta E_e}{\delta G} = e_t \sum T_i$$

En faisant le calcul successivement pour chaque prise i , indépendamment, on a :

$$\frac{\delta P_e}{\delta Q_i} = K_i T_i \quad \left| \quad \frac{\delta E_e}{\delta Q_i} = e_t T_i \quad \left| \quad \frac{\delta A}{\delta Q_i} = \sum_c a_{ci} \right. \right.$$

et finalement, en remplaçant dans la relation générale :

$$\sum_c a_{ci} + p_e k_i T_i - e_t e_t T_i = 0$$

d'où on tire

$$T_i = \frac{\sum a_{ci}}{e_t e_t - p_e k_i} \quad \left[\frac{\text{Fr./m}^3/\text{sec}}{\text{Fr./kWh} \cdot \text{kWh/m}^3} = \text{sec} \right]$$

Cette égalité peut se formuler ainsi :

Le temps de dimensionnement T_i d'une prise d'eau est égal à la somme des suppléments des charges financières annuelles nécessaires pour augmenter de 1 m³/sec le débit dans l'ensemble des tronçons du collecteur intéressés à cette prise d'eau, divisée par la valeur de l'énergie d'été produite par m³ après déduction de la valeur de l'énergie de pompage éventuellement utilisée par m³.

Le débit de dimensionnement est celui qui, sur le débitgramme de la prise, correspond au temps de travail à plein débit T_i .

Le débit de dimensionnement d'un tronçon de galerie est alors donné par la somme des débits de dimensionnement des prises placées à l'amont.

Cas d'un puits blindé (exemple)

Les calculs ci-dessus peuvent être étendus à tous les cas de conduites forcées, puits blindés, puits bétonnés, conduites enterrées, etc., que l'on soit en deçà ou au-delà de la section minimum de perforation.

Prenons, par exemple, le cas d'un puits blindé.

Le prix n'est plus fonction du seul *débit de dimensionnement* Q_i , puisque la pente de la ligne de charge n'est pas déterminée à priori ; on dispose donc d'une deuxième variable indépendante : la pente de la ligne de charge, ou mieux le *diamètre intérieur de la conduite* D_i . Autrement dit :

$$de_h = \frac{\delta e_h}{\delta Q_i} dQ_i + \frac{\delta e_h}{\delta D_i} dD_i$$

Les variables Q et D étant indépendantes, le prix est minimum lorsque chacun des termes est nul :

$$\frac{\delta e_h}{\delta Q_i} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Condition examinée précédemment} \\ \text{et que nous reprendrons.} \end{array}$$

$$\frac{\delta e_h}{\delta D_i} = 0 \quad \text{Condition nouvelle.}$$

En différentiant e_h par rapport à cette grandeur de dimensionnement D_i remplaçant G , on obtient :

$$\frac{\delta e_h}{\delta D_i} = 0 = \frac{\delta A}{\delta D_i} + p_e \frac{\delta P_e}{\delta D_i} + p_h \frac{\delta P_h}{\delta D_i} - e_t \frac{\delta E_e}{\delta D_i}$$

L'énergie produite en été est indépendante des diamètres des conduites dans la zone des adductions, le dernier terme est donc nul. Il reste :

$$-\frac{\delta A}{\delta D_i} = p_e \frac{\delta P_e}{\delta D_i} + p_h \frac{\delta P_h}{\delta D_i}$$

On constate que le diamètre idéal est celui où la variation de la charge financière annuelle en fonction du diamètre est égale et de signe contraire au coût de la variation de l'énergie de pompage.

Nous avons cherché à exprimer cette charge annuelle A du premier terme en fonction des prix unitaires de

l'excavation, du bétonnage, des blindages, en comprenant dans ces prix unitaires les frais accessoires tels que boisages, peinture, etc., et avons obtenu, dans le cas du puits blindé dimensionné à la pression intérieure seule, la formule :

$$A = \frac{\pi}{4} L \left[t_g C_e (D + \delta)^2 + t_g C_i (2D\delta + \delta^2) + 7,85 t_b C_b \left(\frac{2PD}{\sigma} 10^3 + 4\epsilon \right) D \right]$$

où nous utiliserons les symboles suivants :

t_g	Taux des charges financières sur le génie civil, sans entretien (excavation, béton de bourrage).
t_b	Taux des charges financières sur le blindage.
C_e Fr./m ³	Coût marginal du m ³ d'excavation supplémentaire, y compris boisage, etc.
C_i Fr./m ³	Coût marginal du m ³ de béton intercalé, de bourrage.
C_b Fr./kg	Coût marginal du kg de blindage supplémentaire terminé.
L m	Longueur du puits blindé.
D m	Diamètre intérieur du blindage.
$D + \delta$ m	Diamètre brut de l'excavation.
P kg/cm ²	Pression de calcul du blindage.
σ kg/cm ²	Tension spécifique admise pour le calcul du blindage.
ϵ mm	Surépaisseur de sécurité.
e mm	Epaisseur du blindage.

En différentiant par rapport à D , on obtient :

$$\frac{\delta A}{\delta D} = \frac{\pi}{2} L \left[t_g C_e (D + \delta) + \delta \cdot t_g \cdot C_i + 7,85 C_b t_b \left(\frac{2PD}{\sigma} 10^3 + 2\epsilon \right) \right]$$

Considérons maintenant le second terme fonction de la variation des énergies de pompage P_e ou P_h .

Cette énergie varie avec la hauteur manométrique de refoulement H_m du volume élémentaire dV_i

$$dP_e = \frac{g}{3600} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot H_m \cdot dV_i = 3,15 \cdot 10^{-3} \left(H_{st} + \sum H_p \right) dV_i$$

où H_{st} = hauteur statique ;

H_p = perte de charge ;

η = rendement global du groupe moto-pompe et transformateur.

Afin d'expliciter toute l'influence du diamètre, nous exprimerons les pertes de charge par la formule de Strickler, plus commode ici que la formule générale :

$$H_p = \frac{V^2 L}{K_s^2 R^{4/3}} = 10,28 \frac{L}{K_s^2} \frac{Q^2}{D^{16/3}}$$

D'autre part : $dV_i = Qdt$.

En remplaçant, on obtient :

$$dP_e = 3,15 \cdot 10^{-3} \left[H_{st} + 10,28 \left(\frac{Q}{K_s} \right)^2 \cdot \frac{L}{D^{16/3}} \right] Qdt$$

et l'énergie totale consommée par le pompage du volume d'été $\int Qdt$ capté par cette prise est :

$$P_e = \int_{1 \text{ été}} dP_e = 3,15 \cdot 10^{-3} \int_{1 \text{ été}} \left[H_{st} + 10,28 \left(\frac{Q}{K_s} \right)^2 \cdot \frac{L}{D^{16/3}} \right] Qdt$$

En différentiant par rapport au diamètre et en remarquant que la hauteur statique H_{st} et le volume refoulé $\int Qdt$ ne varient pas avec le diamètre D , on a :

$$\frac{\delta P_e}{\delta D} = 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot 10,28 \frac{L}{K_s^2} \int_{1 \text{ été}} \left(-\frac{16}{3} \right) \frac{1}{D^{19/3}} Q^3 dt$$

et en simplifiant :

$$\frac{\delta P_e}{\delta D} = -0,173 \frac{L}{K_s^2 D^{19/3}} \int_{1 \text{ été}} Q^3 dt$$

On trouverait de même :

$$\frac{\delta P_h}{\delta D} = -0,173 \frac{L}{K_s^2 D^{19/3}} \int_{1 \text{ hiver}} Q^3 dt$$

On trouve finalement le diamètre idéal en remplaçant ces trois différentielles partielles dans l'égalité exprimant la condition économique :

$$-\frac{\pi L}{2} \left[t_g C_e (D + \delta) + \delta t_g C_i + 7,85 t_b C_b \left(\frac{2PD}{\sigma} 10^3 + 2\epsilon \right) \right] = \\ = p_e (-0,173) \frac{L}{K_s^2 D^{19/3}} \int_{1 \text{ été}} Q^3 dt + p_h (-0,173) \frac{L}{K_s^2 D^{19/3}} \int_{1 \text{ hiver}} Q^3 dt$$

ou

$$\frac{\pi}{2 \cdot 0,173} \left[t_g C_e (D + \delta) + \delta t_g C_i + 15,7 \cdot t_b C_b \left(\frac{PD}{\sigma} 10^3 + \epsilon \right) \right] = \\ = \frac{1}{K_s^2 D^{19/3}} \left[p_e \int_{1 \text{ été}} Q^3 dt + p_h \int_{1 \text{ hiver}} Q^3 dt \right]$$

on peut sortir la valeur de $D^{-19/3}$:

$$\frac{D^{-19/3}}{D^{-19/3}} = \frac{9 \cdot K_s^2}{p_e \int_{1 \text{ été}} Q^3 dt + p_h \int_{1 \text{ hiver}} Q^3 dt} \left[t_g (C_e + C_i) \delta + 15,7 C_b t_b \epsilon + \right. \\ \left. + \left(t_g C_e + 15,7 C_b t_b \frac{10^3 P}{\sigma} \right) D \right] = C_1 [C_2 + C_3 D]$$

La méthode de résolution la plus simple consiste à tracer une fois pour toutes la courbe de $D^{-19/3}$ en fonction de D puis, dans chaque cas particulier, la droite $C_1 (C_2 + C_3 D)$; le point d'intersection donne évidemment le diamètre idéal.

Cette méthode de recherche est rigoureuse dans la mesure où l'on peut apprécier la valeur des taux des charges financières et le coût des quantités *marginales* de volume excavé, de béton de bourrage ou de remplissage, de blindage, etc. On peut remarquer qu'elle est donc rigoureuse dans la mesure où le prix payé peut être calculé en partant, par exemple, des séries de prix.

Autres cas

On aurait des formules semblables pour une conduite forcée libre, une conduite enterrée ou même la partie supérieure d'une conduite métallique où l'épaisseur pour les besoins de la construction dépasse l'épaisseur donnée par le calcul à la pression intérieure.

Dans ce dernier cas, le terme ϵ surépaisseur de sécurité doit être remplacé par l'épaisseur minimum e et le terme $\frac{P}{\sigma}$ tombe.

Pour une conduite qui doit être calculée à la pression extérieure, on peut montrer que le diamètre économique est pratiquement indépendant de cette pression extérieure lorsque la conduite est d'abord calculée à la pression intérieure puis est munie des raidissements nécessaires.

Si le diamètre du puits descend en dessous de 1,6 à 2 m, on veillera au fait que la dimension minimum d'excavation peut être plus grande que la dimension trouvée par le calcul ($D + \delta$) ; la formule doit alors être transformée pour exprimer le fait que le diamètre D n'a plus d'influence sur l'excavation mais uniquement sur le blindage et le béton de bourrage, par exemple. L'excavation est alors souvent déterminante pour le choix du diamètre, à moins que l'on ne tombe sur le cas d'une conduite libre dans le puits.

Bassin de compensation de Z'Mutt

Pour d'autres ouvrages, le calcul analytique devient impraticable et on doit revenir souvent à des méthodes par approximation ou à des recherches graphiques.

Ce fut le cas pour le dimensionnement du bassin de Z'Mutt. La situation du barrage était donnée par la disposition des lieux et les emplacements possibles des aménées d'eau et de l'usine de pompage. On vit rapidement qu'il était possible de créer le volume de compensation nécessaire avec un barrage voûte assez petit mais que ce barrage pouvait être haussé au-delà du nécessaire à peu de frais. Le volume d'accumulation ainsi créé de 750 000 m³ utiles était un multiple du volume nécessaire à la simple compensation journalière des débits, mais le coût marginal du rehaussement était assez faible pour permettre de le justifier par le seul gain d'énergie de pompage apporté par le relèvement du centre de gravité de la tranche utilisée le plus fréquemment.

Il a suffi que l'on exprime le bénéfice annuel correspondant à un rehaussement de 1 m du barrage dans les environs de la cote probable du couronnement.

La surface du lac augmentant beaucoup, on constate qu'une élévation de 1 m du barrage permet de gagner 1,2 m sur le centre de gravité de la tranche avec laquelle on travaillera habituellement. Le volume transitant par le lac est en partie pompé, en partie turbiné. Le bénéfice annuel sur le volume pompé pour 1 m d'élévation est ainsi de :

$$B_p = \frac{g}{3600} \cdot \frac{1}{0,85} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 41 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an} \cdot 0,02 \text{ Fr./kWh} = \\ = 3200 \text{ Fr./an.}$$

Le bénéfice sur le volume turbiné, d'environ 20 · 10⁶ est de :

$$B_t = \frac{g}{3600} \cdot 0,84 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 0,025 \text{ Fr./kWh} = \\ = 1372 \text{ Fr./an}$$

soit ensemble l'équivalent d'un capital marginal total de :

$$\underline{90 000 \text{ à } 100 000 \text{ fr.}}$$

Ce capital doit être égal, à la limite, au coût des suppléments du volume de béton et des excavations et autres frais entraînés, en particulier sur la galerie d'aménée des eaux du Gorner.

Au niveau du couronnement, pour le barrage prévu, l'augmentation du volume de béton par mètre d'élévation est d'environ 500 m³ ou 60 000 fr., à quoi il faut ajouter un supplément d'excavation sur les culées et divers autres frais qui peuvent être négligés du fait de l'imprécision des calculs.

Il y a donc intérêt, à raison de 30 000 à 40 000 fr. par mètre, à éléver le barrage au-dessus de la cote prévue et ceci jusqu'au point où l'on se rapproche de la cote d'arrivée des eaux du glacier du Gorner, cote à partir de laquelle les frais par mètre d'élévation augmentent brusquement et dépassent le montant disponible de 100 000 fr./m.

En effet, à cette cote, une variation du plan d'eau maximum entraîne une variation de la cote de l'extrémité de la galerie d'aménée et, par conséquent, de sa pente ; il en résulte une variation de prix de cette galerie de l'ordre de 75 000 à 100 000 fr. par mètre de variation de son extrémité.

Ceci n'est évidemment valable que tant que l'on ne dépasse pas une vitesse admissible pour l'écoulement ; c'est finalement cette vitesse qui a fixé la cote du parement du barrage.

Complexe des usines d'Arolla et de Ferpècle

Dans certains cas, nous avons fait appel aux nouvelles méthodes de calcul que permettent les machines électroniques et nous avons utilisé celle de l'Institut de mathématiques appliquées de l'EPUL à plusieurs reprises, par exemple, pour le dimensionnement des usines de pompage de Ferpècle et d'Arolla.

Ces deux usines travaillent en tandem ; l'usine de Ferpècle, la plus basse, refoule un volume de 57,2 millions de mètres cubes par an à une hauteur manométrique de 213 m. Celle d'Arolla reprend ces eaux, auxquelles s'ajoutent encore 30 millions de mètres cubes pour les refouler à une hauteur manométrique de 312 m.

L'usine de Ferpècle est équipée à l'aval d'un bassin de compensation travaillant entre les cotes 1875 et 1894, d'un volume de 100 000 m³, et refoule à l'amont dans une galerie à écoulement libre de 6,5 km de long en direction d'Arolla. Le débouché de la conduite de refoulement dans la galerie se trouve à l'altitude 2095.

L'usine d'Arolla est équipée de son côté d'un bassin de compensation beaucoup plus petit, de 15 000 m³, travaillant entre les cotes 2074 et 2084 et dans lequel sont rassemblées les eaux en provenance de Ferpècle et celles captées dans le vallon d'Arolla. L'extrémité de la conduite de refoulement débouche dans la galerie de Pièce à la cote 2380.

Chaque usine se trouve sous une charge telle qu'il a été possible, sans difficulté, d'installer des machines à très grande vitesse, 1500 tours/min, comme d'ailleurs à Stafel et à Z'Mutt. La mise en charge est au minimum de 40 m à Ferpècle et de 66 m à Arolla.

Le problème à résoudre était de trouver le meilleur dimensionnement économique des bassins de compensation et des usines, en tenant compte aussi bien de la valeur de l'eau perdue dans les pointes les jours les

ENTRÉE

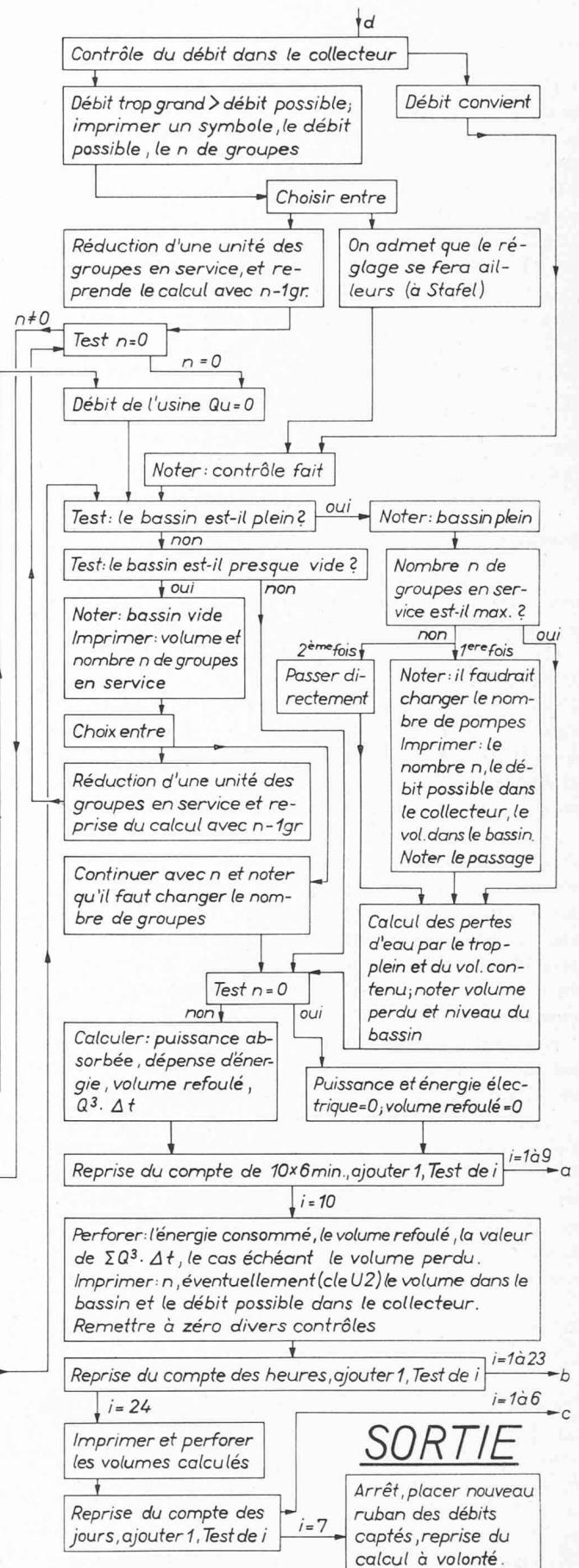
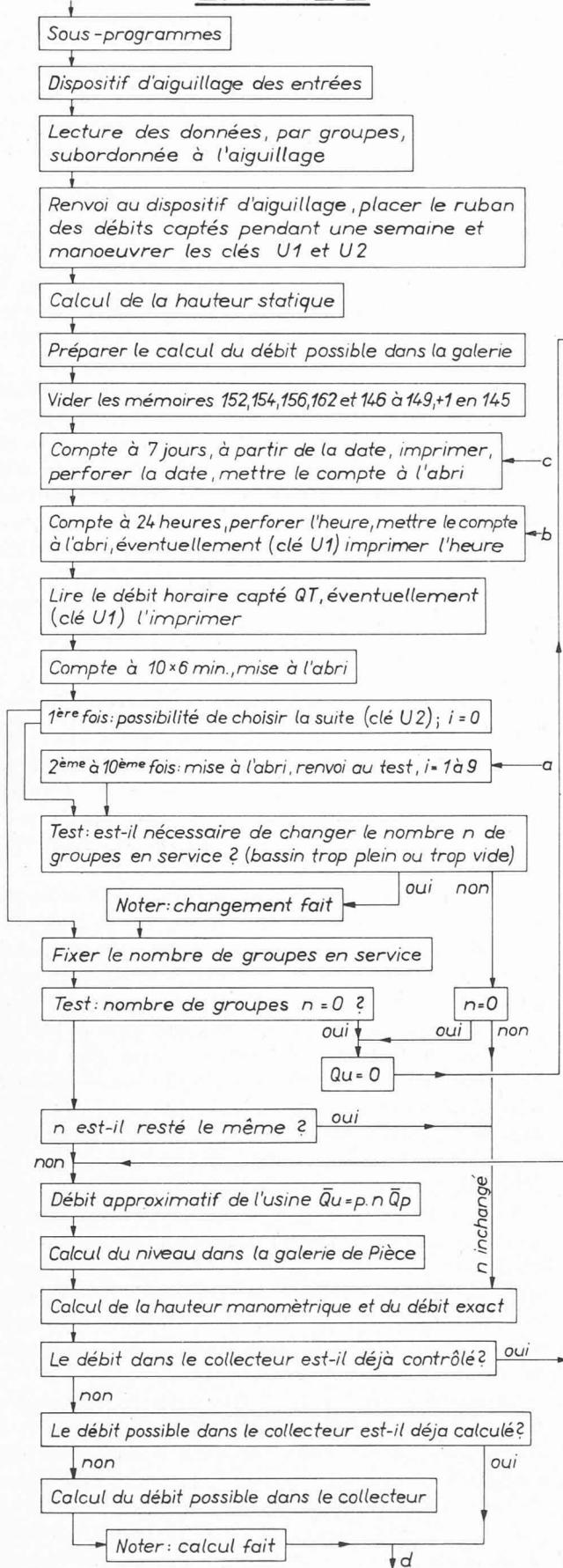


Fig. 5. — Organigramme du calcul de simulation du fonctionnement de l'usine d'Arolla.

plus chauds que des charges financières résultant du coût de l'aménagement. De nombreuses solutions étaient possibles avec des bassins de compensation souterrains ou à l'air libre pour chaque usine, des débits installés plus ou moins forts et répartis sur un nombre de machines à déterminer et des diamètres de conduite et puits blindés plus ou moins grands. La plupart des variantes éliminées ont pu l'être après des comparaisons de prix globales qui faisaient ressortir un net avantage pour la solution choisie définitivement. Ces comparaisons de prix n'ont pas donné, par contre, des indications définitives sur le dimensionnement exact à adopter.

Etant donné le grand nombre des variables restantes : volume des bassins de compensation, débit total installé dans chaque usine, nombre de groupes de chacune des deux usines et l'allure aléatoire des débits dérivés dans les bassins de compensation, une seule méthode de recherche était possible. Nous avons monté un modèle arithmétique simulant la marche complète du complexe pendant les semaines les plus chaudes où des pertes d'eau étaient probables, et l'avons fait travailler avec diverses valeurs des variables en question. Ce modèle tenait compte des caractéristiques débits, pressions et rendements des pompes, des pertes de charge dans les conduites ainsi que des caractéristiques des déversoirs des bassins.

L'organigramme de ce calcul pour l'usine d'Arolla est reproduit sur la figure ci-contre.

Le nombre de groupes en service dans l'usine peut être choisi par un programme automatique en fonction du débit entrant dans le bassin, du contenu de celui-ci, et du prix de l'énergie ; il peut aussi être choisi à la main après impression par la machine des données nécessaires pour permettre le choix et qui sont :

l'heure,
le volume contenu dans le bassin,
le débit refoulé par l'usine.

Ce choix est possible toutes les heures.

Le calcul tient compte des caractéristiques hauteur — débit et rendement — débit des pompes, et la hauteur d'élévation manométrique des pompes tient compte de la hauteur d'eau dans le bassin, des pertes de charge dans les conduites et du plan d'eau dans la galerie de Pièce.

Un cycle de calcul correspond à une durée de marche de six minutes de l'usine ; en cas de débordement du bassin, il est réduit à une minute, pour conserver une précision suffisante.

Il est possible de reprendre tout le calcul à volonté avec des valeurs différentes du débit total installé, du nombre de groupes, du volume du bassin ou des débits captés.

Il a ainsi été possible d'essayer de nombreuses solutions et d'étudier l'influence marginale de chaque variable, puis de choisir pour chacune d'elles la valeur optimum en tenant compte de son coût marginal.

Conclusions

Après avoir vu ces quelques exemples d'application de la R.O. à la détermination des dimensions des ouvrages ou au choix d'une solution entre plusieurs possibles, nous pouvons essayer de définir ce qu'est pour l'ingénieur la R.O. Essayons d'analyser le processus de son emploi :

L'ingénieur utilisera des procédés de la R.O. lorsqu'il se trouve devant un problème qui n'est pas de technique pure mais assaisonné de problèmes économiques, de coût, de rentabilité, d'exploitation. Il faut aussi que plusieurs solutions soient possibles ou que les dimensions de l'ouvrage ne soient pas fixées à priori par le maître de l'œuvre.

La recherche opérationnelle est caractérisée alors par le fait que l'on trouvera la solution à adopter ou la dimension de l'ouvrage, non plus par l'intuition ou quelques contrôles économiques, mais par la mise en œuvre de procédés de recherche et de calcul beaucoup plus précis et systématiques, souvent assez complexes et quelquefois hors de la portée de l'ingénieur responsable de la construction. Aucun de ces procédés n'est réellement nouveau mais ils peuvent faire appel à des techniques de calcul nouvelles ou peu utilisées exigeant souvent l'emploi des machines à calculer électroniques, digitales ou analogiques. Ces techniques utilisent souvent des systèmes de résolutions mathématiques à plusieurs équations ou inéquations linéaires dont l'emploi a conduit à développer ce que l'on appelle la programmation linéaire. Mais l'ingénieur n'a pas souvent la chance de pouvoir réduire ses équations à un système linéaire, même par approximation.

La R.O. est devenue ainsi une branche d'activité souvent confiée à des personnes spécialisées et étrangères au bureau responsable de l'ouvrage et les solutions qu'elle apporte doivent être contrôlées : il arrive que la solution proposée soit inapplicable pour une raison tellement évidente à l'ingénieur responsable qu'il a oublié de la mettre en équation ! ou qu'elle sorte des limites admissibles parce qu'une condition économique ou une équation quelconque a été oubliée.

La R.O. pourrait ainsi être définie comme une activité exercée, souvent sur mandat, par des spécialistes ayant des connaissances multiples et approfondies de techniques mathématiques et économiques particulières et qui permet de proposer les solutions les meilleures lorsque la multiplicité des solutions et des variables ne permet pas à la personne responsable de choisir elle-même par les méthodes classiques la solution à appliquer ou la dimension à choisir.

Remarquons que les ingénieurs ont en général une formation mathématique suffisante pour se mettre au courant des techniques utilisées par la R.O. et pouvoir programmer eux-mêmes leurs problèmes. Il est bon alors de séparer dans son propre travail ce qui est R.O. et ce qui est décision et de considérer toujours d'un œil critique le résultat de ses propres recherches.

Les occasions de faire de la R.O. ne manquent pas dans notre profession, il suffit de considérer un ouvrage quelconque, un aménagement, et pour chaque élément de se demander si la dimension choisie est bien la plus adéquate et pour l'ensemble de l'aménagement si la solution choisie dans l'avant-projet est réellement la meilleure ou la seule.

Je sème un peu d'inquiétude dans vos esprits, je pense que cette inquiétude est nécessaire aux ingénieurs dont la responsabilité est de plus en plus grande dans beaucoup d'ouvrages, et dont les actes peuvent avoir des conséquences économiques, financières et sociales très grandes.