LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS B. ARTHAUD, Succ^r de J. REY, GRENOBLE

Pour la Rédaction :
S'adresser à M. P. PAGNON
Secrétaire Général

Abonnement { France..... 40 francs
pour une Année { Etranger 50 francs

Pour les Abonnements et Annonces :
S'adresser à M. B. ARTHAUD
Editeur

5, Place Jacqueline-Marval, 5
GRENOBLE

Le Numéro : 7 francs

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

23, Grande-Rue, 23
GRENOBLE

COMITÉ DE DIRECTION SCIENTIFIQUE

BARBILLION, Professeur titulaire d'Electrotechnique à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.
CAMICHEL, Directeur de l'Institut Electrotechnique de Toulouse.
CHALUMEAU, Ingénieur en chef de la ville de Lyon.
DARRIEUS, Ingénieur des Arts et Manufactures.
DUVAL, Directeur des Services électriques de la Société Générale d'Entreprises.
FLUSIN, Directeur de l'Institut d'Electrochimie et d'Electrometallurgie de Grenoble.
GENISSIEU, Ingénieur en chef au Ministère des Travaux Publics.

GRIGNARD, Membre de l'Institut, Doyen de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Ecole de Chimie Industrielle de l'Université de Lyon.
MAUDUIT, Directeur de l'Institut Electrotechnique et de Mécanique appliquée à Nancy.
MERCIER, Administrateur-Délégué de l'Union d'Electricité.
DE PAMPELONNE, Inspecteur général du Génie Rural.
PARODI, Directeur honoraire des Services d'Electrification de la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans.
PEPY, Professeur à la Faculté de Droit de Grenoble.
PAGNON, Ingénieur I. E. G., Secrétaire général.

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE. — Les bassins de compensation et leur rôle dans les aménagements hydrauliques - Bases pouvant servir à leur étude et mode d'utilisation - Examen de quelques exemples réalisés en France, par M. R. LANGLOIS.
ELECTRICITE. — Un nouvel analyseur harmonique basé sur le principe du planimètre polaire par L. BARBILLION. — Le réglage automatique hydraulique ultra-rapide des fours électriques tourmentés.
DOCUMENTATION. — **LEGISLATION.** — **INFORMATION.** — **BIBLIOGRAPHIE.**

HYDRAULIQUE

Les bassins de compensation et leur rôle dans les aménagements hydrauliques - Bases pouvant servir à leur étude et mode d'utilisation - Examen de quelques exemples réalisés en France

par M. R. LANGLOIS, Ingénieur à la Société des Forces motrices de la Vienne ⁽¹⁾
(suite et fin)

CHAPITRE III

Emploi des bassins de compensation. Phases du mode opératoire.

La consigne d'exploitation d'un tel bassin a donc pour but de régler les détails d'utilisation du réservoir de volume $V = 14\ 000\text{AM}$ de façon à assurer la compensation des irrégularités journalières du débit de la rivière que pourrait apporter l'exploitation des usines d'amont et en particulier de l'usine de pointe P située en queue d'aménagement.

A cet effet, le débit régularisé Q_R restitué à l'aval du bassin R constituant le bassin de compensation (et auquel est accolée la plupart du temps une usine équipée spécialement, ainsi qu'il est indiqué précédemment) sera égal, en principe, au débit journalier moyen évacué à l'aval de la dernière usine P (voir fig. 2).

Ce débit moyen évacué à l'aval de P peut lui-même être défini à l'aide du débit moyen des turbines Q_{tm} à P et du débit moyen journalier supplémentaire Q_{vm} évacué par les organes évacuateurs du barrage provenant, soit d'une manœuvre intempestive aux usines d'amont, soit d'une perte d'eau inévitable.

soit enfin, d'une valeur importante de $Q_n > Q_M$ et être représenté par :

$$Q_{tm} + Q_{vm}.$$

Quand au débit Q_R , si l'on tient compte des apports intermédiaires éventuels, on aura :

$$Q_R = Q_i + Q_v + q_n \text{ (fig. 2),}$$

où q_n défini précédemment représente le débit naturel de ces apports.

Pratiquement, la détermination et la réalisation du débit régularisé Q_R se feront en deux phases :

a) La première phase comprendra la détermination journalière du débit régularisé prévu pour le lendemain et les opérations à effectuer pour assurer ce débit.

b) Au cours de la seconde phase, dite d'ajustage, seront effectués le contrôle de la régularisation et les corrections éventuelles à apporter au débit prévu.

(1) Rapport présenté au Cinquième Congrès de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique, tenu à Zurich-Lausanne en Août-Septembre 1934.

A. Première phase : consigne d'exploitation du bassin R.

Ainsi qu'il vient d'être dit, cette consigne doit comporter la détermination de Q_R et sa réalisation.

1° DÉTERMINATION DU DÉBIT RÉGULARISÉ Q_R À PRÉVOIR POUR LE LENDEMAIN. — Cette détermination se fait très simplement à partir des 2 éléments de base suivants :

a) Le débit moyen naturel prévu Q_n devant arriver à la retenue de l'usine P, ce débit étant déterminé par la connaissance du débit naturel de la rivière à l'amont et du programme de marche des usines d'amont.

b) Le nombre W de kilowattheures à produire par P et qui est connu à l'avance selon les nécessités de l'exploitation du lendemain, ce nombre W étant bien entendu fonction lui aussi de Q_n et de l'utilisation que l'on désire faire du réservoir alimentant P, toutes déterminations qui incombent d'ailleurs au Service d'Exploitation de la Société concessionnaire de l'aménagement.

La connaissance de W permet, en effet, d'en déduire le débit moyen des turbines Q_{tm} pendant la période de 24 h. considéré par la formule :

$$Q_{tm} = \frac{1}{H_m} \times 5,5 \times 10^{-3} W$$

où H_m est la hauteur de chute nette moyenne de l'usine P, car on sait qu'un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ produit en moyenne à P une puissance de $7,5 \times 1 \times H_m \text{ kW}$, ce qui correspond en 24 heures à une productivité de :

$$W = 24 \times 7,5 \times H_m \text{ kWh}$$

et le débit Q_{tm} a une productivité $W = 24 \times 7,5 \times Q_{tm} \times H_m$ d'où

$$Q_{tm} = \frac{1}{H_m} \times \frac{1}{24 \times 7,5} \times W = \frac{1}{H_m} \times 5,5 \times 10^{-3} W \text{ m}^3/\text{s}.$$

En comparant le débit moyen des turbines prévu Q_{tm} au débit moyen naturel Q_n prévu à P et en tenant compte du niveau de la retenue de P, on examinera s'il y a lieu de prévoir le fonctionnement des organes évacuateurs correspondants au cours de la journée et d'adapter pour Q_{vm} une valeur non nulle et positive.

En conséquence : a) Pour $Q_n > Q_2 = \lambda M$, on est en période de *très hautes eaux*, les usines ne donnent plus lieu à éclusées et l'on se bornera à maintenir en R la cote de retenue normale à l'aide des organes évacuateurs dont une partie est à fonctionnement automatique.

b) Pour $\lambda M > Q_n > Q_M = 0,625\lambda M$, on est encore en période de *hautes eaux* entraînant le fonctionnement *probable* des organes évacuateurs de P (sauf remplissage important du réservoir, s'il y a lieu) on adoptera pour Q_R la valeur :

$$Q_R = Q_M + Q_{vm} + q_n.$$

c) Pour $0,625\lambda M > Q_n > 0,36\lambda M$ qui correspond à la zone la plus délicate de fonctionnement du bassin de compensation (débits moyens), on adoptera également :

$$Q_R = Q_{tm} + Q_{vm} + q_n$$

où Q_{vm} correspond au fonctionnement *possible* mais assez exceptionnel, des organes évacuateurs de P provenant, soit d'une manœuvre anormale prévue des usines d'amont soit, dans certains cas, d'une perte d'eau inévitable.

d) Enfin, pour $Q_n < 0,36\lambda M$ toute perte d'eau doit et peut être évitée, on a $Q_{vm} = 0$ et l'on aura $Q_R = Q_{tm} + q_n$.

C'est ce qui se produit, en particulier, dans toutes les périodes de *basses eaux*.

2° RÉALISATION DU DÉBIT RÉGULARISÉ Q_R . — Le personnel de R, qui doit assurer l'écoulement du débit Q_R , en principe constant au cours d'une même période de 24 heures, dispose à cet effet des groupes de son usine et de vannes appropriées à commande facile. Il doit, en outre, posséder les tableaux de tarages précis à double entrée, du modèle ci-annexé, lui permettant de déterminer instantanément, en fonction du niveau N de sa retenue :

a) La puissance maximum en kilowatt que son usine peut débiter correspondant à un débit des turbines q_t .

b) La ou les hauteurs de levée de ou des vannes de vidange correspond au débit Σq_v tel que :

$$\Sigma q_v + q_t = Q_R \text{ (fig. 2).}$$

3° CAS PARTICULIERS DES PÉRIODES TRANSITOIRES DE VARIATION BRUSQUE DE Q_n . — Lorsque le débit naturel à l'amont est susceptible de varier considérablement au cours d'une période de 24 h (commencement ou fin de crue ou de sécheresse), le débit doit pouvoir suivre ces variations, car le réservoir R doit à ce moment compenser uniquement les irrégularités de débit dues à la marche des usines d'amont et non celles entraînées par les variations du débit naturel.

MODÈLE DE TABLEAU DE CORRESPONDANCE
ENTRE LA PUISSANCE FOURNIE PAR R ET LE DÉBIT TURBINE q_t .

PUISSANCES FOURNIES EN kW	VALEURS DU DÉBIT DES TURBINES q_t EN m^3/s SUivant LA COTE DU PLAN D'EAU		
	Cote de retenue normale	Cotes intermédiaires	Cote de retenue minimum

$$Q_R = q_t + \Sigma q_v \quad \text{d'où} \quad \Sigma q_v = Q_R - q_t.$$

MODÈLE DE TABLEAU DE CORRESPONDANCE
ENTRE LA HAUTEUR DE LEVÉE D'UNE VANNE DE RÉGLAGE
ET LE DÉBIT À ÉVACUER q_v .

DÉBITS q_v FOURNIS PAR LA VANNE	VALEURS DE LA LEVÉE h EN m DE LA VANNE SUivant LA COTE DU PLAN D'EAU		
	Cote de retenue normale	Cotes intermédiaires	Cote de retenue minimum

A cet effet, la valeur de Q_R au lieu d'être donnée la veille, une fois pour toute la journée du lendemain, sera modifiée au cours de cette journée aussi souvent qu'il sera nécessaire.

Il est également prudent dans ces périodes, pour éviter le fonctionnement brutal des organes évacuateurs de P (susceptibles de donner à la crue un front raide au lieu du front naturel), d'effectuer, s'il y a lieu, au barrage P des lâchers d'eau progressifs pour dessiner ladite crue.

B. Deuxième phase : contrôle de la régularisation.

On subirait de sérieux mécomptes si, se contentant de la détermination une fois pour toutes de Q_R , on n'en vérifiait pas à certaines heures appropriées de la journée l'adaptation adéquate au régime exact de la rivière, d'où nécessité du contrôle.

PRÉPARATION GRAPHIQUE DU CONTRÔLE. — A cet effet, il y a lieu de préparer à l'avance ce contrôle en déterminant :

a) Les heures prévues de niveau minimum et de niveau maximum à R.

b) Le niveau minimum et le volume disponible (c'est-à-dire le creux nécessaire) à l'heure prévue ci-dessus.

Ce contrôle peut s'établir chaque jour commodément en utilisant le diagramme journalier des débits devant arriver le lendemain dans le bassin de compensation R, ce diagramme étant toutefois décalé d'un temps $OO_1 = \theta$ représentant le temps nécessaire au flot pour parcourir la distance PR, temps que nous admettrons d'ailleurs constant pour les différentes valeurs de débits envisagés.

Ce diagramme total indiqué sur le graphique (fig. 4) est d'ailleurs obtenu simplement en sommant à chaque instant les ordonnées des diagrammes journaliers partiels correspondants : au débit Q_1 turbiné par P, au débit Q_v évacué par les organes évacuateurs de P et au débit naturel q_n correspondant aux apports $Q = Q_1 + Q_v + q_n$.

Nous tracerons également l'horizontale correspondant au débit moyen Q_m arrivant en R et qui doit représenter également le débit constant régularisé Q_R à l'aval de R.

Sur le même graphique et au-dessous, nous tracerons à l'échelle des volumes la courbe des débits cumulés O_1Q_R correspondant au diagramme total ainsi que la droite O_1Q_R correspondant au débit constant régularisé Q_R .

Il est facile de constater que les écarts verticaux entre la courbe O_1Q_R et la droite O_1Q_R représentent à l'instant considéré les écarts entre le volume d'eau évacué à l'aval de R et le volume d'eau arrivant dans le bassin R depuis l'origine des temps adoptée jusqu'à ce même instant.

En conséquence, on relèvera tout d'abord le point m de la courbe O_1Q_R pour lequel cette distance mm' est maximum ; il suffit pour cela de tracer les tangentes à la courbe O_1Q_R parallèles à la droite O_1Q_R .

L'heure H_m correspondant à ce point m sera l'heure de niveau minimum de la retenue R et, d'autre part, on aura une indication sur le bon fonctionnement de la régularisation en vérifiant qu'entre les heures θ et H_m la baisse du plan d'eau de R correspond sensiblement à une capacité de mm' mètres cubes d'eau.

Il suffira ensuite de relever le point M de la courbe O_1Q_R compris dans le restant de la journée et pour lequel la distance

verticale MM_1 entre la courbe O_1Q_R et la parallèle mm et la droite O_1Q_R est maximum.

L'heure H_m sera l'heure de niveau maximum de la retenue R et la distance MM_1 ainsi déterminée représente en mètres cubes le volume nécessaire pour assurer avec le bassin de compensation R pendant la journée considérée la régularisation du débit Q arrivant à la retenue $V = MM_1$.

Remarque. — 1° L'examen des graphiques (fig. 4) montre que lorsque le débit Q croît, le coefficient angulaire de la droite

Fig. 4. — Diagramme journalier des débits arrivant en R et de Q_R , et diagrammes des débits cumulés.

O_1Q_R croît proportionnellement, le point m se déplace vers la droite et à un certain moment sera confondu avec le point Q_R .

Ceci se produira, en particulier, toutes les fois que le débit moyen naturel Q_n sera à tout instant supérieur au débit instantané des turbines Q_1 , c'est-à-dire pour :

$$Q_n > Q_2 = \lambda M_1$$

Dans ce cas, ainsi que nous l'avons déjà signalé, il ne se produit plus d'écluesées et le personnel de R se borne à maintenir constant le niveau de la retenue.

2° Si une erreur s'est produite dans l'évaluation de Q_{vm} ou dans la détermination du diagramme journalier de Q_v ou encore dans l'évaluation de q_n , on voit que la vérification du volume $V = MM_1$ permettra d'y remédier par réduction ou augmentation de Q_R .

2° RÉALISATION DU CONTRÔLE. — Par mesure de sécurité et lorsque la chose est possible, on majorera V et l'on adoptera $V_m = 1,2 V$ pour valeur du creux à l'heure H_m , ce qui revient à admettre d'ailleurs qu'à H_m l'heure (heure du niveau maximum à R), il doit subsister un creux $v = 0,2 V$.

Le contrôle de la régularisation est alors facile à réaliser :

a) On relève les niveaux de la retenue R aux heures H_m et H_M et à l'aide de la courbe de capacité du réservoir établie à l'origine, on déduit les valeurs des creux réalisés aux dites heures.

b) On comparera les creux ainsi mesurés à ceux déterminés précédemment à l'aide des courbes de débits cumulés et l'on donnera, s'il y a lieu, des corrections appropriées au débit régularisé Q_R fixé la veille pour toute la journée en cours.

Remarque. — Ces corrections ne doivent pas être brusques et il est prudent de les étaler en les répartissant sur un intervalle de 6 h.

Etant donné qu'une modification de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 6 h correspond à un écart de volume de

$$3\,600 \times 6 = 21\,600 \text{ m}^3.$$

Si E représente en mètres cubes l'écart constaté au paragraphe ci-dessus (E étant > 0 ou < 0 selon que le niveau de R est trop élevé ou trop bas) la correction à apporter au débit sera donc :

$$\varepsilon = \frac{E}{21\,600}.$$

En pratique, on pourra admettre que la régularisation est assurée dans de bonnes conditions si le débit corrigé $Q_R + \varepsilon$ ne s'écarte pas de plus de 10 pour 100 de la valeur moyenne du débit régularisé dans la journée, soit :

$$\frac{1}{2} [Q_R + (Q_R + \varepsilon)] = Q_R + \frac{\varepsilon}{2}$$

$$Q_R + \frac{\varepsilon}{2} \leq 1,10 Q_R$$

$$\frac{\varepsilon}{2} \leq 0,10 Q_R$$

$$\varepsilon \leq 0,20 Q_R.$$

Autrement dit la correction ε ne doit pas s'écarter de plus de 20 pour 100 du débit régularisé Q_R déterminé la veille.

CHAPITRE IV

Examen de quelques cas réalisés en France.

Nous allons maintenant examiner quelques exemples réalisés en France de réservoirs jouant totalement ou partiellement le rôle de bassins de compensation des aménagements dont ils font partie.

1° La Roche-qui-Boit (Forces motrices de la Sélune).

Ce cas peut paraître un peu exceptionnel en ce sens que l'usine de Vézins sur la Sélune, usine possédant un fort suréquipement et située en amont de La Roche-qui-boit, a été réalisée plusieurs années après celle-ci (fig. 5) — mais on peut dire que c'est l'existence de cette dernière avec son réservoir de $900\,000 \text{ m}^3$ de capacité, qui a permis de prévoir, un débit maximum dérivé aussi important à Vézins.

Il en résulte que La Roche-qui-Boit, qui était considérée à l'origine comme usine de production, peut assurer maintenant un rôle supplémentaire de bassin de compensation pour Vézins.

Si l'on examine maintenant les caractéristiques techniques de cet ensemble reportées sur le croquis ci-contre on constate que pour un module $M = 11 \text{ m}^3/\text{s}$ l'usine de Vézins est équipée pour un débit maximum :

$$Q_2 = 3 \times 16 = 48 \text{ m}^3/\text{s}$$

qui pourra être porté à $Q_{2M} = 4 \times 16 = 64 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ceci montre que le coefficient d'aménagement λ tel que $Q_2 = \lambda M$ et qui possède la valeur actuelle $\lambda_1 = 4,5$ est prévu comme pouvant ultérieurement atteindre la valeur $\lambda_2 \approx 6$.

Le volume du réservoir qui serait ainsi nécessaire pour assurer dans nos hypothèses une régularisation correcte de l'usine de Vézins serait pour la valeur maximum Q_{2M} de Q_2 :

$$V = 14\,000 \times Q_{2M} = 64 \times 14\,000 \text{ m}^3 = 900\,000 \text{ m}^3,$$

chiffre qui représente effectivement la capacité utile du réservoir de La Roche-qui-Boit.

Fig. 5. — Société des Forces motrices de la Sélune. Profil en long de l'aménagement.

Par ailleurs, il y a lieu de noter que c'est pour la valeur $Q = 0,43 Q_2$ c'est-à-dire : $20 \text{ m}^3/\text{s}$ dans la période actuelle et $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$ lors de l'aménagement total de Vézins que la régularisation totale nécessite l'utilisation maximum du bassin de compensation.

On peut observer également que l'équipement actuel de Vézins permettrait d'assurer sensiblement la régularisation de son débit dans toutes les hypothèses possibles puisque le volume maximum nécessaire dans ces conditions est de :

$$21\,600 Q_2 = 21\,600 \times 48 \approx 1\,000\,000 \text{ m}^3,$$

c'est-à-dire, supérieur de 10 pour 100 seulement à la capacité utile de La Roche-qui-Boit. Mais on peut ajouter que, même dans ce cas, la régularisation totale est possible en utilisant les vannes de vidange du barrage.

Conclusion. — Le réservoir de La Roche-qui-Boit pourrait donc, si la nécessité s'en faisait sentir, assurer la régularisation correcte de l'usine de Vézins dans tous les cas le fonctionnement de celle-ci.

Toutefois, en raison de la proximité de la mer (2 à 3 km) et de la présence à l'aval du seul village de Ducey où aucun moulin n'existe, cette régularisation totale ne présente aucun caractère de nécessité.

Il semble, au contraire, que l'on puisse encore accorder à l'usine de La Roche-qui-Boit la possibilité d'assurer quelques pointes, d'autant plus que son débit maximum dérivé :

$$q_2 = 2,27 \times M = 25 \text{ m}^3/\text{s} = \lambda M$$

correspond déjà à un certain suréquipement (coefficient d'aménagement $\lambda = 2,27$),

Ce débit q_2 déjà très supérieur au module de la rivière, se trouve, en outre, voisin du débit moyen maximum utilisable actuellement à Vézins, soit :

$$Q_M = 0,625 \times Q_2 = 0,625 \times 48 = 30 \text{ m}^3/\text{s}$$

ainsi que le prévoit l'une des remarques de notre étude.

2° La Roche-aux-Moines (Union Hydroélectrique).

Le barrage de la Roche-aux-Moines sur la Creuse (fig. 6), étudié par M. LAPORTE et réalisé à l'aval d'Eguzon, possède une capacité très supérieure à celle résultant de l'application de notre formule, car l'usine d'Eguzon, a été prévue comme pouvant débiter sur le réseau spécial qu'elle alimente des pointes importantes suivies de périodes d'arrêt total se rapprochant davantage des conditions les plus défavorables possibles que celles admises dans notre étude.

En effet, pour un module de $M = 45 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à $18,75 \text{ l/s/km}^3$, l'usine d'Eguzon est équipée pour un débit maximum

$$Q_2 = 5 \times 25 = 125 \text{ m}^3/\text{s}$$

pouvant être porté en utilisant l'unité de réserve à

$$Q_{2M} = 6 \times 25 = 150 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Le coefficient d'aménagement λ prévu $Q_2 = \lambda M$ peut donc atteindre les valeurs 2,75 ou 3 et avec nos hypothèses les volumes qui seraient nécessaires pour assurer une bonne régularisation seraient :

$$\text{Pour } Q_2 = 125 \text{ m}^3/\text{s}, V = 14\,000 \times 125 = 1\,750\,000 \text{ m}^3$$

$$\text{Pour } Q_{2M} = 150 \text{ m}^3/\text{s} \quad V = 14\,000 \times 150 = 2\,100\,000 \text{ m}^3$$

tandis que dans l'hypothèse la plus défavorable envisagée par M. LAPORTE et sans utiliser l'unité de réserve, on a :

$$V = 21\,600 \times 125 = 2\,700\,000 \text{ m}^3,$$

chiffre qui a été admis et réalisé.

La réserve utilisable du barrage d'Eguzon, qui atteint $16\,000\,000 \text{ m}^3$ permet en effet de réaliser les pointes très importantes et prolongées que nécessite le service du réseau, ce qui justifie l'adoption d'une capacité de cette importance à La Roche-aux-Moines.

En ce qui concerne l'équipement de l'usine de La Roche-aux-Moines, il y a lieu de remarquer que le débit maximum dérivé $q_2 = 3 \times 25 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond au débit moyen maximum utilisable de l'usine d'Eguzon soit $0,5 Q_{2M}$, pour $Q_{2M} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ dans les conditions les plus défavorables de régularisation admises pour cette usine.

Fig. 6. — Union hydroélectrique. Profil en long de l'aménagement.

Remarque.—Actuellement ce barrage vient de subir une surélévation de 0,50 m correspondant à l'utilisation éventuelle de son réservoir comme bassin inférieur d'une installation de pompage.

Cette étude faite en 1931 par M. LAPORTE montre l'utilisation supplémentaire qu'il serait possible d'accorder à certains bassins de compensation dont la retenue normale peut atteindre le bief aval de l'usine amont. Bien entendu, ces installations ne sont financièrement viables que si la station de pompage est incluse dans l'usine amont et peut utiliser une ou plusieurs conduites forcées de cette usine sans nécessiter l'installation de conduites supplémentaires.

Fig. 7. — Société Bonne et Drac. Profil en long de l'aménagement.

3° Saint-Pierre (Bonne et Drac).

L'ensemble des deux chutes de Sautet Cordéac sur le Drac (fig. 7), qui seront rigidement conjuguées et dont actuellement celle du Sautet est seule réalisée par la Société Bonne et Drac, possède en tête un réservoir de grande capacité saisonnière (100 millions de mètres cubes) qui rend cet ensemble particulièrement apte à produire des pointes importantes et de longue durée dont la régularisation doit pouvoir être assurée.

Actuellement, la chute de Saint-Pierre n'est pas réalisée, mais le batardeau construit à l'amont en vue des travaux possède un réservoir d'une capacité de $1\,200\,000 \text{ m}^3$ avec galerie de dérivation du Drac pouvant débiter $150 \text{ m}^3/\text{s}$ munie de vannes permettant d'assurer le réglage possible des débits évacués jusqu'à $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si nous nous plaçons dans les hypothèses de notre étude, on constate que la réserve de ce batardeau est suffisante pour assurer une bonne régularisation du débit puisque :

$$14\,000 Q_2 = 14\,000 \times 90 = 1\,260\,000 \text{ m}^3,$$

chiffre très peu différent de la capacité de cette retenue provisoire.

D'autre part, le débit pour lequel la régularisation sera la plus délicate à réaliser étant de $0,43 Q_2 = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ on voit que le réglage du débit évacué dans ce cas sera toujours possible.

En ce qui concerne maintenant le stade définitif du projet d'aménagement du Drac, on constate que la Chute de Saint-Pierre avec son réservoir de $5\,300\,000 \text{ m}^3$ permettrait d'effectuer la régularisation des éclusées de Sautet Cordéac dans les conditions les plus défavorables puisque :

$5\,300\,000 > 21\,600 \times 90 = 1\,950\,000 \text{ m}^3$, mais l'on constate en même temps que le débit maximum dérivé de Saint-Pierre atteint $q_2 = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ et qu'en conséquence, cette usine est également prévue comme devant pouvoir elle-même produire des pointes importantes et utiliser à d'autres fins que

la régularisation de Sautet Cordéac une partie importante de son réservoir.

Un nouveau réservoir de compensation de : $14\ 000 \times 150 = 2\ 100\ 000\ \text{m}^3$ sera donc nécessaire à l'aval de Saint-Pierre ; aussi la Société Bonne et Drac a-t-elle prévu dans un stade ultérieur la réalisation des 3 chutes aval de Cognet, Saint-Jean-d'Hérans et de Marcieu, qui assureront successivement cette régularisation au fur et à mesure de leur mise en service.

4° Chauvan (Forces motrices de la Vienne).

Le bassin de compensation de Chauvan sur le Taurion (affluent de la Vienne) (fig. 8) a été créé par la Société des Forces Motrices de la Vienne en 1932 pour régulariser les éclusées produites par l'aménagement des Chutes de Chatelus, La Châtre et Saint-Marc réalisées sur cette rivière et, en particulier, de cette dernière qui a été suréquipée pour permettre la production de pointes dans le cadre cependant des hypothèses admises dans cette étude.

Cet exemple cadre donc parfaitement avec les résultats de notre étude et que l'on peut résumer comme suit :

Débit maximum dérivé $Q_2 = \lambda M = 48\ \text{m}^3/\text{s}$.

Module $M = 20\ \text{m}^3/\text{s}$ ou $20\ \text{l/s/km}^2$ d'où $\lambda = 2,4$.

Volume du bassin de compensation $= 14\ 000 \lambda M = 670\ 000\ \text{m}^3$, alors que le chiffre réel de la tranche utilisable du bassin de Chauvan est de $660\ 000\ \text{m}^3$, pouvant d'ailleurs atteindre par manœuvre des vanues de vidange une capacité de $1\ 000\ 000\ \text{m}^3$.

Le débit moyen maximum utilisable de Saint-Marc étant :

$$Q_M = 0,625 \lambda M = 30\ \text{m}^3/\text{s}$$

on voit que l'usine de Chauvan a été équipée pour un débit maximum dérivé $q_2 = 27\ \text{m}^3/\text{s}$

compris entre le module $M \approx 20\ \text{m}^3/\text{s}$

et le débit moyen maximum utilisable $Q_M = 30\ \text{m}^3/\text{s}$ ci-dessus et qu'il est assez voisin de ce dernier.

Il y a lieu de noter enfin, que c'est pour la valeur :

$$Q = 0,43 \cdot Q_2 = 20\ \text{m}^3/\text{s},$$

c'est-à-dire pour le module lui-même, que la régularisation nécessitera l'utilisation totale du bassin de compensation.

5° La Jourdanie (Energie électrique du Tarn).

L'usine du Pinet sur le Tarn actuellement réalisée par l'Energie électrique du Rouergue possède un réservoir journalier de l'ordre

Fig. 8. — Société des Forces motrices de la Vienne. Profil en long de l'aménagement.

de $5\ 000\ 000\ \text{m}^3$, qui lui permet de produire des pointes de débit pouvant atteindre :

$$Q_2 = \lambda M = 5 \times 30 = 150\ \text{m}^3/\text{s}.$$

ce qui, pour un module $M = 64\ \text{m}^3/\text{s}$, correspond à un coefficient d'aménagement voisin de $\lambda = 2,35$.

Immédiatement à l'aval se trouve la chute de Truel, qui, avec sa faible réserve de capacité de $200\ 000\ \text{m}^3$, n'est pas suréquipée (débit maximum dérivé $Q_2 = 30\ \text{m}^3/\text{s}$, en 4 groupes) et ne peut assurer la régularisation des éclusées produites par Pinet.

L'Energie électrique du Rouergue a donc été amenée à faire usage du réservoir d'alimentation de l'usine de la Jourdanie (fig. 9) appartenant à sa filiale, l'Energie électrique du Tarn, comme bassin de compensation.

Fig. 9. — Energie électrique du Rouergue. Energie électrique du Tarn. Profil en long de l'aménagement.

Les conclusions de notre étude s'appliquent, d'ailleurs, parfaitement à cet exemple, puisque le volume du réservoir, qui serait nécessaire pour assurer dans nos hypothèses une régularisation parfaite du débit, serait :

$$V = 14\ 000 \cdot Q_2 = 14\ 000 \times 150 = 2\ 100\ 000\ \text{m}^3.$$

Or, la tranche utile de la Jourdanie, atteint une capacité de l'ordre de $4\ 700\ 000\ \text{m}^3$, qui paraît surabondante, même dans le cas le plus défavorable possible, puisque :

$$4\ 700\ 000 > 21\ 600 \times 150 = 3\ 240\ 000\ \text{m}^3$$

En réalité, la Société a voulu profiter des conditions topographiques locales favorables pour augmenter la hauteur de chute et la puissance de son usine et créer parallèlement une réserve supplémentaire pouvant être amenée à jouer hebdomadairement et que l'on rétablit aisément en fin de semaine.

L'étude faite nous amène à admettre comme débit moyen maximum utilisable de Pinet :

$$Q_M = 0,625 Q_2 \approx 94\ \text{m}^3/\text{s}.$$

tandis que la régularisation nécessitera l'utilisation de la capacité maximum pour un débit moyen :

$$Q = 0,43 Q_2 = 64,5\ \text{m}^3/\text{s}.$$

En ce qui concerne l'équipement de l'usine de la Jourdanie, on voit que le débit maximum dérivé $Q_2 = 72\ \text{m}^3/\text{s}$ est effectivement compris entre le module $M = 64\ \text{m}^3/\text{s}$ et le débit moyen maximum utilisable de Pinet $Q_M = 94\ \text{m}^3/\text{s}$, ainsi que nous l'avons indiqué dans notre étude.

6° Guerlédan (Hydroélectricité armoricaine).

L'usine de Guerlédan (fig. 10 et 11) a dû tenir compte de certaines exigences concernant la navigation sur le Blavet en ce sens que, d'une part, le canal de Nantes à Brest empruntant

le lit du Blavet en amont de l'usine, a été immergé dans la retenue du barrage et que, d'autre part, immédiatement à l'aval du bief de l'usine, ce canal se sépare du Blavet et longe la rivière pendant quelques kilomètres avant de reprendre le cours canalisé du Blavet lui-même (fig. 10).

Quoique aucun ascenseur hydraulique ou moyen analogue n'ait encore été réalisé pour assurer la continuité de la circulation sur ce canal en raison de son faible trafic, l'Hydroélectrique armoricaine a dû, néanmoins, en prévoir l'installation éventuelle; le bief du Blavet canalisé sur lequel est située l'usine constituant en outre, par l'intermédiaire d'une écluse, le bief d'alimentation dudit canal vers l'aval.

Ce bief d'une capacité de 60 000 m³ seulement, qui avait été prévu comme devant servir corrélativement de bassin de compensation de l'usine de Guerlédan, s'est révélé à l'usage insuffisant pour la protection des avalisants, d'autant plus que l'addition d'un quatrième groupe à l'usine a porté son débit maximum dérivé de 28 m³/s à

$$Q_2 = \lambda M = 49 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ce débit pour un module $M = 11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond à un coefficient d'aménagement de l'ordre de

$$\lambda = 4,2.$$

En conséquence, la Société a prévu et vient de réaliser, à quelque distance de l'aval, un nouveau barrage destiné à constituer une réserve suffisante pour assurer une régularisation satisfaisante des débits de l'usine de Guerlédan, dont le suréquipement et la capacité saisonnière de sa tranche utilisable de 26 millions de mètres cubes permettent d'envisager la production de pointes importantes.

Toutefois, la société a dû tenir compte, tout d'abord, des conditions topographiques particulières de la zone située à l'aval de l'usine, dont la configuration assez plate ne permettait pas de s'éloigner trop de cette usine, et en outre, de la proximité de la levée du canal qui longe le Blavet, dont l'existence limitait la cote de retenue normale du nouveau réservoir.

Dans ces conditions, une digue en terre de 5 m. de hauteur, située près du Bourg de Saint-Aignan, a été prévue de manière à réaliser une capacité suffisante à régulariser dans des conditions d'approximation satisfaisantes les variations de débit provenant de l'exploitation normale de l'usine de Guerlédan (fig. 10).

Il doit donc être tenu compte très exactement de ces conditions qui, d'après nos renseignements, peuvent être représentées par le diagramme ci-contre peu différent du diagramme type admis dans notre étude, mais dont les déformations, en fonction du débit, doivent être envisagées différemment de manière à limiter la tranche d'eau de Guerlédan utilisée journalièrement (fig. 11).

Le débit moyen maximum utilisable de Guerlédan étant obtenu avec

$$Q_1 = 30 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_0 = 15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Fig. 10. — Union hydroélectrique armoricaine. Profil en long de l'aménagement.

et la valeur de Q_2 restant naturellement fixé à $Q_2 = 49 \text{ m}^3/\text{s}$ atteint donc conformément au diagramme la valeur :

$$Q_M = 23,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

obtenue en donnant à Q_0 , Q_1 , Q_2 les valeurs précitées dans l'équation $24Q_M = 3,5Q_2 + 8,5Q_1 + 9,5Q_0$.

Pour des valeurs décroissantes du débit moyen journalier utilisé, nous admettons, conformément au diagramme (ci-contre fig. 11) :

Fig. 11. — Union hydroélectrique armoricaine. Diagramme journalier des débits turbinés à Guerlédan. Graphique de variation de Q_0 , Q_1 et $(Q_M - Q_0)$ en fonction de Q_M .

- 1° Tout d'abord, variation de Q_0 de 15 à 10 m³/s pour $Q_1 = 30 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 2° Ensuite, variation de Q_1 de 30 à 10 m³/s pour $Q_0 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 3° Enfin, pour $Q_0 = Q_1$, variation corrélatrice jusqu'à zéro.

L'équation donnant alors la valeur du volume V nécessaire à assurer la régularisation et correspondant à l'aire Σ du diagramme est de la forme :

$$V = 3\,600\,0 (Q_M - Q_0)$$

ou

$$\theta = \frac{AB + CD}{2}.$$

La valeur de θ étant variable dans des limites assez restreintes il est facile de constater que V atteindra son maximum en même temps que $(Q_M - Q_0)$ d'où :

$$V = 3\,600 \times 8,35 \times 11,75 \# 350\,000 \text{ m}^3 \# 7\,000 Q_2,$$

chiffre qui est légèrement supérieur au total de 310 000 m³ correspondant, d'une part, à la tranche utilisable du réservoir de Saint-Aignan, qui atteint seulement 250 000 m³ et, d'autre part, à celle du bassin supérieur (bief du canal), qui ne dépasse pas 60 000 m³.

Ainsi que nous l'avons déjà indiqué cette régularisation n'a toutefois pas besoin d'être rigoureuse ; il suffit en fait, pour ne pas troubler les conditions de navigabilité sur le cours canalisé du Blavet, d'obtenir au cours d'une même période de 24 h. des écarts de débit ne dépassant pas ± 10 pour 100 du débit moyen régularisé Q_R et la capacité rigoureusement nécessaire dans cette hypothèse ne dépasse pas

$$0,8 V = 280\,000\text{ m}^3,$$

chiffre qui est inférieur de 10 pour 100 environ, à la capacité totale réalisée.

L'Hydroélectricité armoricaine a, en outre, prévu l'installation d'un enregistreur de niveau Ott, afin de vérifier la correction des opérations.

Les hypothèses faites nous amènent donc à admettre comme débit moyen maximum utilisable à Guerlédan :

$$Q_M = 0,475 Q_2 = 23,3\text{ m}^3/\text{s},$$

le débit moyen pour lequel le volume de 350 000 m³ serait nécessaire pour obtenir une compensation totale étant :

$$Q = 0,444 Q_2 = 21,75\text{ m}^3/\text{s}.$$

Cette dernière valeur de Q est d'ailleurs voisine de celle à laquelle conduisait notre étude générale, soit $0,43 Q_2$.

7° Laparayrie (Forces motrices de l'Agoût).

Le barrage de Laparayrie sur l'Agoût (fig. 12) a été réalisé par la Société des Forces motrices de l'Agoût pour compenser les éclusées de son usine de Luzières.

Cet exemple constitue d'ailleurs une application de l'une des remarques faites à la fin du chapitre II de notre étude. En effet, la chute de Luzières, équipée pour un débit maximum dérivé

$$Q_2 = \lambda M = 25\text{ m}^3/\text{s}$$

qui pour un module de la rivière

$$M = 15\text{ m}^3/\text{s}$$

correspond à un coefficient d'aménagement $\lambda = 1,66$, possède en tête un réservoir dont la capacité de 55 000 m³ seulement ne peut constituer qu'une réserve strictement journalière.

Dans ces conditions, ainsi que nous l'avons exposé, la capacité du bassin, qui est nécessaire pour assurer une compensation rigoureuse des éclusées de cette usine dans toutes les conditions de débit, est égale à celle de cette réserve journalière utilisable soit 55 000 m³.

Or, la régularisation n'a pas besoin d'être rigoureuse, des écarts de débit ne dépassant pas ± 10 pour 100 du débit moyen régularisé Q_R pouvant en effet être autorisés, il en résulte que la capacité nécessaire peut être réduite à

$$0,8 V = 44\,000\text{ m}^3.$$

chiffre inférieur à la capacité effectivement utilisable de Laparayrie, soit :

$$50\,000\text{ m}^3.$$

Il y a lieu de noter, en outre, qu'il est particulièrement intéressant pour les avalisants de posséder en période d'étiage un débit parfaitement régularisé pour éviter des variations de puissance. Il importe de citer à ce sujet le dispositif adéquat prévu par la Société des Forces Motrices de l'Agoût comportant une vanne à réglage automatique du débit pour les débits inférieurs à 5 m³/s.

Fig. 12. — Société des Forces motrices de l'Agoût.
Diagramme journalier des débits turbinés.
Profil en long de l'aménagement.

Le fonctionnement de cette vanne ramène, en effet, à une valeur constante en période d'étiage les débits naturels de cette rivière, rendus variables par le fonctionnement de Luzières.

Lorsque le débit moyen turbiné Q_{tm} , qui doit être égal ou inférieur au débit naturel de l'Agoût Q_n dépasse cette valeur de 5 m³/s et atteint la valeur moyenne maximum utilisable Q_M , il doit être fait usage des vannes de barrage pour évacuer le débit moyen régularisé à l'aval.

Il nous reste donc, pour achever l'examen de cet exemple, de déterminer cette valeur moyenne maximum Q_M du débit des turbines ainsi que la loi (ou consigne d'exploitation) qui permet, tout en ne disposant que d'un réservoir journalier de 55 000 m³ de capacité, d'utiliser sans aucune perte d'eau la totalité du débit.

Pour cela, nous supposons que le diagramme de charge de l'usine de Luzières affecte l'allure adoptée dans l'exemple précédent de Guerlédan où le débit moyen des turbines est donné par la relation :

$$24 Q_{tm} = 3,5 Q_2 + 8,5 Q_1 + 9,5 Q_0$$

et le volume de la réserve journalière ou du bassin de compen-

sation nécessaire par une relation de la forme

$$V = 36000 (Q_{tm} - Q_0)$$

dans laquelle l'écart de temps θ varie assez peu pour les valeurs les plus élevées des débits Q_0 et Q_1 que nous envisageons (voir fig. 12).

Si nous adoptons $\theta = 8$ et $V = 55\,000\text{ m}^3$, nous aurons :

$$Q_{tm} - Q_0 = \frac{55\,000}{8 \times 3600} = 1,91$$

$$Q_{tm} = 1,91 + Q_0$$

Si nous reportons cette valeur de Q_{tm} dans la première équation avec $Q_2 = 25$, nous aurons :

$$24Q_{tm} = 3,5 \times 25 + 8,5Q_1 + 9,5Q_0$$

$$24(1,91 + Q_0) = 87,5 + 8,5Q_1 + 9,5Q_0$$

$$14,5Q_0 = 41,7 + 8,5Q_1$$

$$Q_0 = 2,88 + 0,585Q_1$$

qui constitue la relation cherchée entre Q_0 et Q_1 .

La valeur maximum de Q_m Q_{tm} qui représentera le débit moyen maximum utilisable de l'usine de Luzières sera évidemment obtenue par la valeur maximum de $Q_1 = \mu Q_2$ que l'on

peut admettre, soit, par exemple, pour $\mu = \frac{2}{3}$:

$$Q_1 = \frac{2}{3} \times 25 = 16,66\text{ m}^3/\text{s},$$

d'où $Q_0 = 2,88 + 0,585 \times 16,66 = 12,64\text{ m}^3/\text{s}$.

d'où $Q_M = 1,91 + 12,64 = 14,55\text{ m}^3/\text{s} = 0,582 Q_2$.

soit $Q_M \approx 15\text{ m}^3/\text{s} = M$ avec $\mu = 0,76 \approx \frac{3}{4}$,

correspondant ainsi au module de la rivière.

Il y a lieu de noter d'ailleurs que ce chiffre est très voisin de celui obtenu par application des hypothèses de notre étude générale où

$$Q_M = 0,625Q_2 = 15,5\text{ m}^3/\text{s}.$$

8° Malassis (Compagnie hydroélectrique de la Cure).

L'aménagement très complet réalisé par la Compagnie hydroélectrique de la Cure, comprend, non seulement son usine de pointe du Bois de Cure et son bassin de compensation de Malassis, mais, en outre, 3 réservoirs en tête de capacités importantes et jouant le rôle de réserves saisonnières (fig. 13).

L'un, le réservoir des Settons sur la Cure, d'une capacité de 22 millions de mètres cubes appartient au service de la Navigation et avait été prévu à l'origine pour l'alimentation convenable, en période d'étiage, du canal du Nivernais, dont l'écluse d'alimentation se trouve à une trentaine de kilomètres à l'aval de Malassis (fig. 13).

Le second réservoir, dit de Chaumeçon, d'une capacité de 20 millions de mètres cubes vient d'être réalisé par la Compagnie hydro-électrique de la Cure sur le Chalaux, affluent de la Cure. Il contribue avec le troisième réservoir, dit du Crescent, d'une capacité utile de 9 000 000 m³ alimentant l'usine du Bois de Cure, à augmenter sensiblement le débit d'étiage de la Cure (de l'ordre de 7 m³/s pour un débit naturel de 1 m³/s) tout en procurant une régularisation saisonnière de la puissance des usines.

C'est ce point important de relèvement du débit d'étiage, qui a amené le département de la Seine à participer à la réalisation de ces réservoirs ; une autre conséquence, de moindre importance relative il est vrai, étant la faculté de réduire les crues de la rivière l'Yonne, affluent particulièrement irrégulier de la Seine.

On peut donc en déduire que le triple rôle joué par cet ensemble est le suivant :

1° Il permet la transmission des lâches effectuées par le lac

Fig. 13. — Compagnie hydroélectrique de la Cure. Profil en long de l'aménagement.

des Settons pour l'alimentation, en période d'étiage, du canal du Nivernais et l'utilisation hydroélectrique de ces lâches.

2° Les réservoirs supplémentaires de Chaumeçon et de Crescent permettent également d'obtenir une régularisation saisonnière de la productivité des usines et une augmentation importante et particulièrement intéressante pour le département de la Seine du débit d'étiage de la Cure et par conséquent de la Seine.

3° Le bassin de compensation de Malassis, d'une capacité utile de 342 000 m³, permet, en tout état de cause, de restituer à la Cure un débit parfaitement régularisé et corrigeant même les irrégularités du débit naturel grâce aux réservoirs précités.

Contrairement aux apparences, cet aménagement ne semble pas présenter, du point de vue de la régularisation du débit, de difficultés particulières provenant de sa contribution à la navigation, puisqu'il suffit de conjuguer habilement les lâches des Settons avec celles des autres réservoirs.

Si nous appliquons maintenant les conclusions de notre étude au bassin de compensation de Malassis, nous constatons que, dans le cadre de nos hypothèses concernant la consigne d'Exploitation de l'usine de pointe et sans tenir compte de la majoration facultative que nous avons adoptée, le volume du bassin de compensation nécessaire à compenser totalement les éclusées du Bois de Cure serait :

$$V = 11\,750Q_2,$$

$$Q_2 = \lambda M = \text{débit maximum dérivé} = 33\text{ m}^3/\text{s}$$

où

$$V = 11\,750 \times 33 = 385\,000\text{ m}^3,$$

chiffre qui est légèrement supérieur à la tranche utilisable du réservoir de Malassis, qui atteint : 342 000 m³ et à la capacité totale qui atteint : 371 000 m³.

Il y a lieu de remarquer cependant, ainsi que nous l'avons exposé au cours du « Contrôle de la Régularisation », que celle-ci n'a pas besoin d'être rigoureuse et qu'en fait, il suffisait d'obtenir au cours d'une même période de 24 h. des écarts de débit ne dépassant pas ± 10 pour 100 du débit moyen régularisé.

La capacité rigoureusement nécessaire dans cette hypothèse se trouve donc ramenée à :

$$0,8 V \# 310\,000 \text{ m}^3,$$

chiffre qui se trouve nettement inférieur au volume de la tranche utilisable par les turbines.

Le débit moyen maximum utilisable de l'usine du Bois de Cure serait donc, selon nos hypothèses :

$$Q_M = 0,625Q_2 \# 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

et le débit moyen, pour lequel le volume de 375 000 m³ serait nécessaire pour obtenir une compensation totale, serait de :

$$Q = 0,43, \times Q_2 = 14 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Or, dans la période actuelle, l'utilisation journalière du débit maximum dérivé du Bois de Cure ne dépassant pas 7 à 8 h, ce qui correspond à un débit moyen maximum utilisé de 11 m³/s, environ, soit 0,33Q₂.

Il en résulte que la capacité du bassin de compensation actuellement nécessaire se trouve réduite et ne dépasse pas

$$9\,500Q_2 = 310\,000 \text{ m}^3,$$

ce qui, pour une régularisation totale, laisse une marge disponible de 0,50 m par rapport à la cote de retenue normale de Malassis.

En ce qui concerne l'équipement de l'usine de Malassis, il y a lieu de remarquer qu'il correspond exactement à celui indiqué dans notre étude, soit :

$$q_2 = Q_M + q_n$$

où Q_M représente le débit moyen maximum utilisable de l'usine de pointe, soit :

$$Q_M = 20,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

et q_n le débit naturel correspondant aux apports de bassin versant entre Crescent et Malassis, soit :

$$q_n = kQ_M$$

avec

$$k = \frac{\Delta S}{S} = \frac{80}{405} = 0,21,$$

d'où

$$q_2 = 1,21Q_M = 1,21 \times 20,6 = 25 \text{ m}^3/\text{s}$$

alors que la valeur réelle de ce débit est de :

$$q_2 = 26 \text{ m}^3/\text{s}.$$