LA HOUILLE BLANCHE

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

Pour la Rédaction :

Abonnement

{ France..... 40 francs

Pour les Abonnements et Annonces :

S'adresser à M. P. PAGNON

pour une Année

{ Etranger 50 francs

S'adresser à M. B. ARTHAUD

Secrétaire Général

Le Numéro : 7 francs

Editeur

5, Place Jacqueline-Marval, 5

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

23, Grande-Rue, 23

GRENOBLE

GRENOBLE

COMITÉ DE DIRECTION SCIENTIFIQUE

BARBILLON, 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. — L'alimentation en eau potable de la ville d'Ankara, nouvelle capitale de la Turquie, par F. A. LIEFRINCK.

ELECTRICITE. -- Nouveaux planimètres pour puissances à exposants fractionnaires.

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⁾

PLAN DE L'ETUDE.

Considérations générales sur l'évolution de la théorie des aménagements hydrauliques et conséquences.

CHAPITRE PREMIER :

A. Définition et rôle des bassins de compensation.

B. Cas général et cas particuliers (régulateurs de crues, réservoirs de navigation).

CHAPITRE II :

Bases pouvant servir à l'étude des bassins de compensation:

A. Consigne d'exploitation de l'usine de pointe à régulariser et détermination du débit moyen maximum utilisable Q_M .

B. Détermination de la capacité du bassin de compensation.

CHAPITRE III :

Mode d'utilisation des bassins de compensation. Phases du mode opératoire :

A. Première phase : consigne d'exploitation :

1° Détermination du débit moyen régularisé Q_R .

2° Réalisation de Q_R .

3° Cas particulier des périodes transitoires.

B. Deuxième phase : contrôle de la régularisation :

1° Préparation graphique du contrôle.

2° Réalisation pratique du contrôle.

CHAPITRE IV :

Examen de quelques exemples réalisés en France :

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

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

3° Saint Pierre (Bonne et Drac).

4° Chauvan (Société des Forces motrices de la Vienne).

5° La Jourdanie (Énergie électrique du Tarn).

6° Guerlédan (Hydro-électrique armoricaine.)

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

8° Malassis (Compagnie hydro-électrique de la Cure).

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

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉVOLUTION DE LA THÉORIE DES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES ET CONSÉQUENCES.

Les premiers aménagements hydrauliques, qui remontent d'ailleurs à des temps très éloignés, étaient constitués en réalité par les nombreux moulins existant sur la plupart des cours d'eau.

Ces moulins comprenaient, avec un petit barrage de prise d'eau, un canal d'amenée et un appareil de transformation directe d'énergie hydraulique en énergie mécanique, tout d'abord du genre des anciennes roues à eau, puis de véritables turbines.

Il est bien évident d'ailleurs que ces moulins appelés à fonctionner en toute saison empruntaient au cours d'eau des débits très faibles, la plupart du temps inférieurs au débit d'étiage et qu'en outre, les périodes de hautes eaux correspondaient généralement à des périodes d'arrêt, en raison de la submersion des ouvrages de prise d'eau.

Les aménagements hydrauliques proprement dits et d'une importance beaucoup plus grande (comportant ou non des générateurs d'énergie électrique) ont commencé à faire leur apparition au cours des quinze dernières années du siècle dernier et, jusqu'au début de ce siècle, ils étaient considérés comme devant fournir de l'énergie régularisée.

Comme à cet époque, en raison du développement encore restreint des applications de l'électricité, les besoins en énergie étaient relativement réduits, on était amené à prévoir l'équipement des chutes pour une puissance dont on était à peu près sûr de disposer à tout instant et beaucoup de chutes datant de cette époque sont installées au fil de l'eau sans réservoir et équipées pour un débit voisin du débit caractéristique d'étiage de la rivière envisagée.

Cette conception s'est d'ailleurs prolongée un peu lors du développement de certaines installations électriques comportant des usines thermiques : en effet, l'énergie croissante, dont avait besoin le réseau, était d'abord fournie par l'usine hydraulique fonctionnant à charge sensiblement constante, tandis que les puissances supplémentaires étaient demandées aux installations thermiques facilement développables et dont le prix de revient du kilowatt ou du cheval de puissance installée était nettement inférieur à celui du kilowatt ou du cheval de puissance hydraulique.

L'insuffisance d'une technique nettement établie pour le transport de l'énergie aidant, les installations hydrauliques semblaient vouées à revêtir une importance locale ou à devenir l'appoint constant de Centrales thermiques voisines développées postérieurement.

L'évolution rapide de la technique du transport de l'énergie électrique alliée au souci de plus en plus grand d'utiliser davantage les richesses naturelles du patrimoine national ont entraîné, dans les quinze premières années de ce siècle et dans la plupart des pays intéressés, une évolution corrélative très nette de la théorie des aménagements hydrauliques dans le sens d'un accroissement de l'utilisation des débits des rivières.

Cette évolution amorcée en France avant la guerre s'est accélérée de manière sensible après celle-ci, en même temps qu'apparaissait une nouvelle législation des cours d'eau sous la forme de la loi du 16 octobre 1919.

Nous nous sommes donc acheminés en France, suivant en cela les applications faites ou en cours d'exécution dans certains autres pays, dont notamment le Canada, les Etats-Unis d'Amé-

rique, la Suisse et les Pays scandinaves, vers une utilisation de plus en plus intégrale des débits des rivières entraînant corrélativement une modification du mode d'utilisation de l'énergie ainsi produite et de sa collaboration avec l'énergie thermique.

La théorie actuelle à ce sujet peut d'ailleurs être envisagée de la manière suivante pour les régions possédant des richesses hydrauliques naturelles et d'alimentation onéreuse en combustible ou qui sont reliées à des installations hydrauliques par des lignes d'interconnexion.

Dans la plupart de ces cas, en effet, l'énergie hydraulique tend à constituer la base de l'alimentation du réseau, tandis que l'énergie thermique n'est plus considérée que comme source d'appoint ou même de secours.

Dans cette hypothèse évidemment, l'hydraulicien, qui cherche à adapter au mieux la courbe de productivité de ses aménagements à la courbe de charge de son réseau, ne peut généralement pas y parvenir avec une seule usine ou un groupe d'usines de même type, mais il facilite grandement son œuvre en envisageant l'établissement, soit sur une même rivière, soit sur des rivières différentes, d'usines en cascade présentant les caractéristiques différentes suivantes :

1° Usines hydrauliques pour lesquelles les charges financières fixes varient sensiblement avec la puissance installée ; elles sont destinées à avoir une utilisation aussi bonne que possible de la puissance installée et devront par conséquent produire, en principe, une fraction de la partie constante de la courbe de charge du réseau.

Ces usines avec ou sans réservoir, qui feront partie, soit d'un aménagement de haute ou moyenne chute possédant, en particulier, un long canal d'amenée, soit d'un aménagement de basse chute où l'usine présente une certaine importance vis-à-vis du barrage, seront équipées pour un débit voisin du débit moyen ou module de la rivière et non pour le débit d'étiage, ainsi qu'on le prévoyait autrefois.

2° Usines hydrauliques pour lesquelles les charges fixes sont peu fonction de la puissance installée ; elles peuvent ainsi avoir une moins bonne utilisation horaire de cette puissance et devront, en conséquence, assurer, non seulement une partie de la charge constante du réseau, mais aussi et dans une certaine mesure, produire l'énergie de pointe qui lui est nécessaire.

Ces usines, qui devront comporter un réservoir en tête et faire partie, soit d'un aménagement de basse chute possédant un court canal d'amenée, soit d'un aménagement de moyenne chute ne possédant pas de canal d'amenée, seront équipées pour un débit souvent très supérieur au module, c'est-à-dire suréquipées.

Enfin, pour produire, d'une part, l'appoint d'énergie nécessaires aux heures de pointe en sus de l'énergie hydraulique disponible et, d'autre part, les appoints d'énergie plus importants, en cas de manque de débit des rivières, l'hydraulicien doit logiquement envisager l'établissement d'usines thermiques dont le prix du kilowatt installé est, en outre, plus faible que celui des usines hydrauliques. Il est à noter d'ailleurs que l'utilisation de lacs naturels ou artificiels importants pouvant servir de réserve saisonnière peut remplacer totalement ou partiellement la production des appoints d'énergie thermique ; il en est de même également dans le cas où des lignes d'interconnexion relient des bassins hydrographiques différents à régimes hydrologiques différents.

CONSÉQUENCES. — Les théories actuelles des aménagements hydrauliques ci-dessus exposées montrent *qu'en dehors des usines sans réservoir, c'est-à-dire au fil de l'eau*, faiblement équipées ou à charge constante, dont le fonctionnement n'est susceptible de provoquer aucune altération du débit des rivières en dehors de la zone dérivée, les producteurs d'énergie hydroélectrique ont été amenés à réaliser, des usines équipées pour un débit voisin du débit moyen annuel des rivières, et des usines suréquipées.

Toutes ces usines sont souvent munies de réservoirs journaliers, hebdomadaires ou même saisonniers destinés à permettre la production de pointes journalières et dont le fonctionnement par éclusées entraîne des perturbations certaines du débit des rivières en aval.

CHAPITRE PREMIER

A. Définition et rôle des bassins de compensation.

Les variations brusques de débit provenant du fonctionnement par éclusées d'une usine de pointe sont souvent intolérables pour les riverains avalisants qui possèdent, en général, des moulins au fil de l'eau alimentés en basse chute par des prises d'eau comportant un petit barrage en rivière.

En effet, pendant les périodes d'arrêt de l'usine, le manque d'eau entraîne l'arrêt du moulin, tandis que les forts débits des heures de pointe risquent de noyer la chute et de provoquer un manque de puissance à une heure où les besoins s'en font encore sentir.

Il y a lieu de noter toutefois que l'horaire suivant lequel se font sentir les éclusées aux différents points situés à l'aval varie selon la distance de ce point à l'usine productrice d'éclusées.

Il peut donc en résulter, sur certaines rivières, comportant toute une série de petits moulins en cascade situés à l'aval d'une telle usine, que des plaintes et des réclamations, souvent justifiées s'élèvent, obligeant ainsi le concessionnaire de la chute amont, soit à verser des indemnités substantielles, soit à prendre instantanément toutes dispositions destinées à faire disparaître pour les avalisants les conséquences fâcheuses de ses éclusées.

D'ailleurs l'Administration française ayant reconnu la nécessité de prévoir de telles dispositions, stipule actuellement à l'article 15 des nouveaux cahiers des charges de concessions hydrauliques une clause lui réservant le droit de réglementer les éclusées ou d'obliger le concessionnaire à réaliser les dispositifs de régularisation du débit pour sauvegarder les intérêts généraux.

Parmi les dispositions qui peuvent ainsi être prises par le concessionnaire, il faut citer en premier lieu la suppression du fonctionnement par éclusées de son usine, ce qui revient pratiquement à modifier radicalement le rôle de celle-ci dans l'aménagement d'ensemble. Les conséquences économiques de cet état de choses sont souvent aussi onéreuses que le versement d'indemnités aux avalisants, si bien que cette solution ne peut constituer en réalité qu'un pis aller provisoire.

La seule solution technique et économique qui s'impose est donc la constitution, immédiatement à l'aval des usines à éclusées d'un barrage formant bassin de compensation. Ce bassin, dont le niveau sera essentiellement variable au cours d'une journée, devra avoir une capacité suffisante pour emmagasiner l'eau débitée par l'usine de pointe aux heures de forte charge, de manière à la restituer progressivement à l'aval sous forme d'un débit sensiblement voisin du débit naturel de la rivière à l'amont au cours d'une même journée.

Cette capacité peut d'ailleurs théoriquement se définir de la manière suivante :

Soit AB, le diagramme ci-contre représentant la variation du débit turbiné instantané Q_t au cours de la période de temps choisie et s'écoulant de 0 à T , le débit moyen turbiné Q_{tm} peut alors être défini par la formule

$$Q_{tm} = \frac{1}{T} \int_0^T Q_t dt,$$

et si, pour chaque point M du diagramme, on détermine la valeur du débit différentiel q tel que $q = Q_t - Q_{tm}$, il est facile de

Fig. A

constater que ce débit q représente le débit qui devra être emmagasiné à chaque instant par le bassin de compensation. Ce débit est naturellement tantôt positif (emmagasinement réel) et tantôt négatif (vidange) et sa valeur moyenne au cours de l'intervalle de temps choisi 0 — T doit être nulle, soit :

$$\frac{1}{T} \int_0^T q dt = 0.$$

Quant au volume d'eau à emmagasiner par le bassin de compensation, à partir de l'origine des temps jusqu'au temps t , il est donné que la formule :

$$V_t = \int_0^t q dt$$

ou, ce qui revient au même, il correspond à l'aire comprise entre le diagramme des débits Q_t et l'horizontale Q_{tm} .

La capacité du bassin de compensation sera donc égale au maximum de l'intégrale ci-dessus lorsque t variera de 0 à T .

Quoi qu'il en soit, au barrage formant bassin de compensation peut être accolée une usine hydroélectrique dont la productivité aidera le concessionnaire à supporter les charges financières afférentes à cet ouvrage supplémentaire.

Il est d'ailleurs intéressant, dans ce cas, de prévoir le bassin de compensation de telle façon que tout le volume nécessaire à assurer l'emmagasinement des éclusées soit compris dans la tranche utilisable par les groupes de l'usine, d'une part, et que les groupes puissent absorber toute l'eau utilisable par l'usine amont, d'autre part. Ceux-ci, puisque nous avons en général affaire à une basse chute, seront économiquement prévus pour fonctionner avec un bon rendement sous une chute très variable, et, en particulier, les turbines du type Kaplan avec aubes mobiles automatiquement inclinables en fonction du débit turbiné remplissent actuellement cette condition.

De toute façon, il résulte de ce qui précède que les sociétés concessionnaires ont le plus souvent grand intérêt à prévoir la réalisation de bassins de compensation avant la terminaison de leurs travaux d'aménagements d'un cours d'eau.

B. Cas général et cas particuliers.

1° Cas général.

Le cas le plus général que nous nous sommes proposés d'envisager dans cette étude est celui d'une usine suréquipée dont le fonctionnement normal comporte des pointes assez fortes ; cette usine devant comporter pour son alimentation un réservoir journalier, hebdomadaire ou même saisonnier.

On peut considérer que ce cas est analogue à celui plus complexe de l'aménagement d'ensemble d'un cours d'eau possédant diverses usines en cascade des divers types envisagés précédemment et comportant à sa base ladite usine de pointe.

En effet, l'étude et l'exploitation rationnelles d'un tel ensemble doivent être prévues de telle façon que les pertes d'eau pouvant provenir d'un fonctionnement non nécessaire et par conséquent intempestif des organes évacuateurs de l'une des usines et, en particulier, de celle située en queue d'aménagement soient réduites au minimum. C'est donc une question de consigne d'exploitation intérieure qui doit être scrupuleusement suivie et permettre ainsi de déterminer à l'avance les débits qui arriveront à chaque heure de la journée à l'usine de pointe que l'on doit régulariser.

Nous nous sommes placés dans le cas où l'aménagement d'ensemble appartient au même concessionnaire, mais bien entendu, lorsqu'il n'en est pas ainsi, des accords entre les divers concessionnaires doivent nécessairement intervenir pour régler l'exploitation de leurs usines et permettre au bassin de compensation de l'ensemble de jouer son rôle dans des conditions satisfaisantes. — Une fausse manœuvre, en effet, dans l'exploitation des usines d'amont pourrait amener une concordance dans l'afflux des débits, concordance pouvant rendre insuffisante la capacité du bassin de compensation initialement calculée.

2° Cas particuliers.

a) Parmi les divers cas qui peuvent se présenter pour l'étude d'un tel bassin, il y a lieu d'envisager celui d'un apport intermédiaire dû à des affluents débouchant directement dans le bassin. Il suffit alors de pouvoir déterminer le débit naturel de ces apports, ce qui ne semble pas présenter de difficultés en raison de la proximité du bassin de compensation et de l'usine de pointe.

L'exploitant, qui connaît, en effet, les valeurs des bassins versants en ces 2 points et le débit naturel amont, peut admettre la proportionnalité des débits aux bassins versants.

Si q_n représente le débit naturel dû à ces apports, Q_n le débit naturel amont, S_0 et S les bassins versants respectifs de la chute amont et du bassin de compensation, on a :

$$q_n = Q_n \times \frac{\Delta S}{S_0} \quad \text{ou} \quad \Delta S = S - S_0$$

b) Les bassins de compensation prévus initialement pour la régularisation du débit peuvent dans certains cas favorables être utilisés, ainsi que l'a préconisé M. LAPORTE, administrateur-Ingénieur conseil de l'Union hydroélectrique, comme bassin inférieur d'une installation de pompage destinée à fournir de l'énergie de pointe (1).

La réalisation économique nécessite cependant la possibilité d'établir le plan d'eau du bassin de compensation sensiblement

au niveau de la cote de restitution de l'usine de pointe, la station de pompage pouvant ainsi être incorporée à cette usine.

c) Certains bassins de compensation peuvent constituer des installations annexes d'autres systèmes présentant un caractère d'intérêt général.

Ces barrages réservoirs peuvent ainsi être rattachés à un système régulateur de crues d'un fleuve important ou à un système d'ouvrages de navigation tels que canaux ou rivières navigables ; ils peuvent enfin dépendre simultanément de ces deux modes de systèmes.

Les barrages rattachés à des systèmes régulateurs de crues et situés sur des affluents d'un grand fleuve doivent, en effet, retenir l'eau en abondance en certaines périodes et la restituer progressivement à d'autres époques ne concordant pas avec celles de restitution des autres affluents de ce même fleuve, de manière à éviter les crues soudaines et massives de ce dernier et supprimer le front raide de celle-ci.

Les barrages rattachés à des systèmes de navigation doivent permettre l'écoulement de débits réserves dans des conditions bien déterminées permettant l'alimentation convenable des voies navigables, surtout en période de basses eaux.

Tous ces réservoirs de compensation d'une nature plus ou moins spéciale ne feront pas l'objet de la présente étude du point de vue de leur détermination, seuls quelques exemples de réalisation seront cités en terminant.

CHAPITRE II

Bases pouvant servir à l'étude des bassins de compensation.

Si nous étudions maintenant plus en détail le cas le plus général des bassins de compensation ci-dessus envisagé, nous remarquons tout d'abord que le point primordial est de laisser écouler à l'aval un débit moyen journalier, dit débit régularisé Q_R , qui ne présente pas plus d'irrégularités que le débit naturel à l'amont Q_n . Ce n'est donc pas la valeur absolue de ce débit Q_R qui importe, mais les variations de ce débit qui doivent être réduites au minimum et dans tous les cas ne pas dépasser proportionnellement celles du débit naturel.

Il se peut, en effet, que l'ensemble de l'aménagement comprenne une ou plusieurs chutes comportant des réservoirs hebdomadaires, mensuels, voir même saisonniers, pouvant entraîner, par suite de lâchers ou de retenues d'eau, des plus ou moins-values qui affectent la valeur du débit journalier par rapport à celle du débit naturel Q_n .

Ce n'est que dans le cas où toutes les chutes en cascade ne possèdent que des réservoirs journaliers que le débit moyen régularisé doit être égal au débit naturel de la rivière, sous réserve seulement des légers écarts, en plus ou en moins, normalement prévus.

Quoi qu'il en soit, la capacité du bassin, de compensation que l'on se propose de déterminer et qui doit servir à emmagasiner les débits élevés de l'usine de pointe aux heures de forte charge, est donc essentiellement fonction de la Consigne d'exploitation de ladite usine, consigne qui fixe la durée et l'importance des pointes, en un mot sa courbe de production journalière ; celle-ci étant d'ailleurs elle-même fonction de la capacité du réservoir d'alimentation et de son usage prévu.

(1) c. f. Laporte - Barrages conjugués et Bassins de compensation
Laporte - Barrages conjugués et Installations de Pompage

A. Consigne d'exploitation de l'usine à régulariser.

Nous baserons donc notre étude sur l'adoption d'un diagramme de puissance journalier de l'usine, diagramme qui contient en lui-même toutes nos hypothèses conditionnelles et dont nous ferons varier certains paramètres en fonction du *débit moyen journalier* Q_n alimentant l'usine à régulariser. Bien entendu, ainsi qu'il est dit ci-dessus, cette valeur de Q_n tient déjà compte des Consignes d'Exploitation des usines amont, s'il y a lieu, et des retenues ou lâchers d'eau éventuels correspondants.

Par suite de la correspondance qui existe entre les puissances produites, en kilowatts et les débits, en mètres cubes par seconde, le diagramme de charge journalier de l'usine sera transposé sous forme de diagramme des débits turbinés Q_t que nous représenterons par le schéma (fig. 1) dont la détermination totale se ramène à la connaissance des 3 valeurs Q_0 , Q_1 , Q_2 , du débit et de la durée τ de la pointe.

Ce diagramme est en réalité un diagramme théorique simplifié permettant de faire dépendre la valeur moyenne Q_{lm} du débit turbiné, des trois valeurs caractéristiques Q_0 , Q_1 , Q_2 , ci-dessus. Il s'applique d'ailleurs dans la forme adoptée au cas général des distributions d'énergie électrique.

Il est intéressant également, pour rendre l'étude plus facilement applicable dans la plupart des cas, d'exprimer ces débits en litres par seconde par kilomètre carré de bassin versant ; il sera nécessaire cependant de connaître le module de la rivière et le coefficient d'aménagement λ .

Fig. 1. — Diagramme journalier des débits turbinés

Le fonctionnement rationnel d'une telle usine conduit, en effet, quel que soit le débit dont on dispose, à utiliser, durant les pointes d'éclairage, la puissance maximum de cette usine qui correspond au débit maximum dérivé qu'elle peut débiter, soit :

$$Q_2 = \lambda M$$

où M est le module.

On appelle module d'une rivière la moyenne annuelle des débits journaliers ; cette moyenne étant calculée sur le nombre maximum d'années possible et au moins sur 10 ans.

Au cours des heures de charge de la journée (matinée et après-midi), la puissance peut être restreinte à une valeur correspondant à $Q_1 = \mu Q_2 = \lambda \mu M$.

Enfin, aux heures de faible charge, en particulier la nuit et au creux de midi, la production peut être restreinte à une valeur correspondant à

$$Q_0 = \nu Q_1 = \lambda \nu \mu M.$$

A ce diagramme des débits de turbines correspond évidemment une valeur moyenne Q_{lm} que l'on peut exprimer de la manière suivante en fonction du débit moyen naturel.

$$Q_n = Q_{lm} + Q_v + Q_e \quad (\text{fig. 2})$$

Q_v représente, selon la capacité du réservoir de l'usine à régulariser et selon son état de remplissage, le débit non utilisé et perdu par les organes évacuateurs.

Fig. 2. — Schéma de l'aménagement des usines P. et R. Profil en long.

lariser et selon son état de remplissage, le débit non utilisé et perdu par les organes évacuateurs.

Ceci peut se produire lorsque Q_n , étant supérieur au débit moyen maximum utilisable Q_M , que nous définirons ci-après, le réservoir d'alimentation de l'usine ne peut assumer, en raison de son importance ou de son état de remplissage, aucun emmagasinement.

De même, il peut y avoir perte d'eau par suite d'une manœuvre intempestive des usines d'amont.

Q_e est positif ou négatif et représente :

- Soit le débit non utilisé et emmagasiné dans le réservoir de l'usine ($Q_e > 0$) qui correspond par conséquent à une retenue d'eau ;
- Soit, lorsque la capacité de ce réservoir le permet, le débit des turbines pris sur la réserve emmagasinée ($Q_e < 0$) et qui correspond à un lâcher d'eau.

Quoi qu'il en soit, à chaque valeur de Q_{lm} correspond une certaine productivité de W kilowattheures que l'exploitant doit se fixer chaque jour et, sauf cas particuliers ci-dessus, il doit normalement la déterminer de telle façon que $Q_e = Q_v = 0$, c'est-à-dire $Q_{lm} = Q_n$ afin d'obtenir l'utilisation optimum et rationnelle du débit Q_n .

En définitive, et sous réserve de non-remplissage ou non-vidange du réservoir, on peut donc, pour $Q_n < Q_M$ étudier les déformations du diagramme de charge de l'usine et valeurs correspondantes des paramètres en fonction de Q_n .

DÉFORMATION DU DIAGRAMME DE CHARGE EN FONCTION DE Q_n .

En ce qui concerne la valeur de λ , qui caractérise l'aménagement et le débit de pointe $Q_2 = \lambda M$, on peut considérer que :

- Pour une usine à équipement normal ou sous-équipée $\lambda < 1,5$;
- Pour une usine suréquipée $\lambda \geq 1,5$

Si le débit disponible Q_n devient inférieur au débit moyen maximum utilisable Q_M , il y a intérêt pour obtenir la déformation du diagramme des débits, à faire porter la réduction, tout d'abord, sur Q_0 (heures creuses), ensuite sur Q_1 (heures de charges), et en dernier lieu sur la durée τ de la pointe et sur sa valeur Q_2 .

En conséquence, nous ferons varier successivement les coefficients ν et μ caractérisant respectivement Q_0 et Q_1 , depuis leur valeur maximum admise jusqu'à zéro, puis nous ferons varier à son tour la durée τ de la pointe, depuis sa valeur maximum jusqu'à zéro et, enfin, Q_2 depuis λM jusqu'à zéro (fig. 3). Cette manière de procéder nous place ainsi dans des conditions plus défavorables que si nous agissions sur τ avant de réduire ν et μ .

Fig. 3 — Graphique de variations des paramètres l, μ, ν , en fonction de Q_n .

Nous admettrons dans cette étude que les valeurs maxima que peuvent atteindre les paramètres ν, μ et τ sont les suivants :

$$\tau = 3, \quad \mu = \nu = \frac{2}{3},$$

ce qui permet ainsi de définir la valeur maximum Q_M du débit moyen possible des turbines Q_{tm} au-dessous de laquelle nous ferons $Q_{tm} = Q_n$.

Ensuite, μ restant égal à $\frac{2}{3}$, nous ferons décroître ν de $\frac{2}{3}$ à 0.

Après cela, ν étant nul, nous ferons décroître μ de $\frac{2}{3}$ à 0.

Enfin, ν et μ étant nuls, nous ferons décroître τ de 3 à 0 jusqu'à un minimum compatible correspondant à :

$$24 Q_n = 2 Q_2 = 2 \lambda M,$$

$$Q_n = \frac{2}{24} \lambda M = 0,083 \lambda M \neq 0,10 \lambda M.$$

Ce minimum de Q_n , au-dessous duquel le diagramme adopté doit être modifié pour réduction de l'importance de la pointe, est suffisamment faible pour que l'on puisse admettre qu'au-dessous de cette valeur limite, les volumes d'eau mis en jeu étant très réduits, la régularisation de leur écoulement sera toujours facile à réaliser. En effet, pour déterminer la capacité du bassin de compensation que l'on se propose d'étudier, nous nous placerons, compte tenu du diagramme, dans les conditions les plus défavorables de débit.

DÉTERMINATION DU DÉBIT MOYEN MAXIMUM UTILISABLE Q_M .

Nous calculerons tout d'abord, en fonction du diagramme annexé le débit moyen turbiné Q_{tm} :

$$24 Q_{tm} = \frac{1}{2} \times \frac{Q_0 + Q_1}{2} + 5 Q_1 + \frac{1}{2} \times \frac{Q_1 + Q_0}{2} + 1,5 Q_0 +$$

$$+ \frac{1}{2} \times \frac{Q_0 + Q_1}{2} + 2 Q_1 + \frac{1}{2} \times \frac{Q_1 + Q_2}{2} + \tau Q_2 +$$

$$+ (3,5 - \tau) \frac{Q_2 + Q_1}{2} + 4 \times \frac{Q_1 + Q_0}{2} + 6 Q_0$$

$$24 Q_{tm} = 10,25 Q_0 + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) Q_1 + \left(2 + \frac{\tau}{2}\right) Q_2,$$

d'où en faisant :

$$Q_0 = \lambda \nu M, \quad Q_1 = \lambda \mu M, \quad Q_2 = \lambda M$$

$$24 Q_{tm} = \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) \mu + 10,25 \nu\right] \lambda M,$$

ce qui pour :

$$\mu = \nu = \frac{2}{3}, \quad \tau = 3$$

donne

$$24 Q_M = 15 \lambda M, \quad Q_M = \frac{15}{24} \lambda M,$$

$$Q_M \neq 0,625 \lambda M,$$

qui correspond évidemment à une utilisation de 15 heures par jour du débit maximum dérivé $Q_2 = \lambda M$.

Au-dessous de cette valeur Q_M de Q_n nous aurons alors :

- Pour $\tau=3$, $\mu=\frac{2}{3}$ et $0 < \nu < \frac{2}{3}$, $0,43 \lambda M < Q_n < Q_M = 0,625 \lambda M$;
- Pour $\tau=3$, $\nu=0$ et $\frac{1}{2} < \mu < \frac{2}{3}$, $0,36 \lambda M < Q_n < 0,43 \lambda M$;
- Pour $\tau=3$, $\nu=0$ et $0 < \mu < \frac{1}{2}$, $0,145 \lambda M < Q_n < 0,36 \lambda M$;
- Pour $Q_n < 0,10 \lambda M$, il y a lieu d'envisager une réduction de l'importance de la pointe (voir fig. 3).

PÉRIODES DE FONCTIONNEMENT DU BASSIN DE COMPENSATION.

De la détermination de Q_M et de la valeur de $Q_2 = \lambda M$, on déduit immédiatement comment sera amené à fonctionner le bassin de compensation pour les diverses valeurs de Q_n :

1° Pour $Q_n > \lambda M$ il n'y a pas d'éclusées et le régime à l'aval est le débit naturel proprement dit sans aucune manœuvre de fonctionnement du bassin de compensation.

2° Pour $Q_M = 0,625 \lambda M < Q_n < \lambda M$ les éclusées se font sentir à l'aval ; elles sont toutefois atténuées par la nécessité d'écouler le supplément de

$$Q_n = Q_M + Q_v,$$

débit Q_v par rapport à Q_M .

3° Pour $Q_n < Q_M = 0,625 \lambda M$ les éclusées deviennent appréciables et c'est en considération de ces débits que doit être déterminée la capacité du bassin de compensation destiné à annuler ces variations de débit.

B. Détermination de la capacité du bassin de compensation.

Reprenant le diagramme journalier des débits (fig. 1) si l'on appelle S_1 , et S_2 les aires situées au-dessus de l'horizontale de débit moyen Q_{lm} et S et Σ les aires hachurées correspondant au creux de midi et de nuit, ces aires représentent des volumes d'eau exprimés en mètres cubes.

Le volume d'eau qu'il est nécessaire de pouvoir emmagasiner dans le bassin de compensation est évidemment représenté par la différence des aires $V = S_1 + S_2 - S$.

Or, l'horizontale correspondant au débit moyen Q_{lm} , on a également :

$$S_1 + S_2 = S + \Sigma,$$

$$\text{d'où } V = S_1 + S_2 - S = \Sigma.$$

Il suffit alors de calculer Σ en fonction des coefficients variables μ et τ , étant entendu que les débits étant exprimés en litres/seconde les temps portés en abscisses seront exprimés en secondes.

L'aire trapézoïdale Σ est égale à :

$$\Sigma = \frac{\overline{AB} + \overline{CD}}{2} \times (Q_{lm} - Q_0).$$

$$\text{Or, } \overline{AB} = \overline{AC} + \overline{CD} + \overline{DB}.$$

Il suffit alors de calculer $\overline{AC} = t_1$ et $\overline{DB} = t_2$.

CALCUL DE $\overline{AC} = t_1$. — L'équation de la droite passant en A est représentée par :

$$Q = Q_0 - \frac{Q_1 - Q_0}{4} t,$$

équation qui pour $Q = Q_{lm}$ donnera

$$t = -\overline{AC} = -t_1,$$

d'où

$$Q_{lm} = Q_0 + \frac{Q_1 - Q_0}{4} t_1$$

avec

$$24Q_{lm} = \left(2 + \frac{\tau}{2}\right) Q_2 + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) Q_1 + 10,25 Q_0,$$

d'où

$$\begin{aligned} Q_{lm} &= \lambda_{\mu\nu} M + \frac{(\lambda_{\mu} - \lambda_{\mu\nu})M}{4} t_1 = \\ &= \frac{1}{24} \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) \mu + 10,25 \mu \nu \right] \lambda M \\ \lambda M \cdot \mu \left[\nu + \frac{(1-\nu)}{4} t_1 \right] &= \\ &= \frac{1}{24} \lambda M \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) \mu + 10,25 \mu \nu \right] \\ \mu \cdot \frac{(1-\nu)}{4} \cdot t_1 &= \frac{1}{24} \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) \mu + 10,25 \mu \nu - 24 \mu \nu \right] \\ t_1 &= \frac{1}{6\mu(1-\nu)} \times \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2}\right) \mu - 13,75 \mu \nu \right] \end{aligned}$$

Nous calculerons t_1 , pour diverses valeurs extrêmes de μ et ν et nous adopterons la valeur moyenne après avoir constaté que les écarts étant très faibles l'erreur commise l'est également.

a) Pour $\mu = \nu = \frac{2}{3}$, $\tau = 3$ on aura le maximum de t_1 , soit :

$$\begin{aligned} t_{1M} &= \frac{1}{6 \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{3}} \left[2 + \frac{3}{2} + \left(11,75 - \frac{3}{2}\right) \times \frac{2}{3} - 13,75 \times \frac{4}{9} \right] \\ t_{1M} &= \frac{3 \times 4,222}{4} = 3,166 \text{ h;} \end{aligned}$$

b) Pour $\mu = \frac{2}{3}$, $\nu = 0$, $\tau = 3$, on aura le minimum de t_1 soit :

$$\begin{aligned} t_{1m} &= \frac{1}{6 \times \frac{2}{3}} \left[2 + \frac{3}{2} + \left(11,75 - \frac{3}{2}\right) \times \frac{2}{3} \right] \\ t_{1m} &= \frac{10,333}{4} = 2,583 \text{ h.} \end{aligned}$$

Nous prendrons pour t_1 la moyenne de ces 2 valeurs extrêmes, soit :

$$t_1 = \frac{t_{1M} + t_{1m}}{2} \quad t_1 = 2,875 \text{ h.}$$

CALCUL DE $\overline{DB} = t_2$. — On constate aisément sur le diagramme (fig. 1) que $\overline{DB} = \frac{\overline{AC}}{8}$,

$$\text{d'où } t_2 = \frac{t_1}{8}, \quad t_2 = 0,360 \text{ h.}$$

Nous aurons donc ainsi avec $\overline{CD} = 6 \text{ h}$

$$\overline{AB} = \overline{CD} + t_1 + t_2 = 6 + 2,875 + 0,360 = 9,235$$

$$\begin{aligned} \text{d'où } V &= \Sigma = \frac{9,235 + 6}{2} (Q_{lm} - Q_0) \times 3\,600 \\ V &\approx 27\,400 (Q_{lm} - Q_0) \end{aligned}$$

d'où

$$\begin{aligned} V &= \frac{27\,400}{24} \cdot \left[2 + \frac{\tau}{2} + \mu \left(11,75 - \frac{\tau}{2} \right) + 10,25 \mu \nu - 24 \mu \nu \right] \lambda M \\ V &= 1\,140 \lambda M \left[2 + \frac{\tau}{2} + \left(11,75 - \frac{\tau}{2} \right) \mu - 13,75 \mu \nu \right] \\ V &= 1\,140 \lambda M \left[2 + (1 - \mu) \frac{\tau}{2} + (11,75 - 13,75 \nu) \mu \right]. \end{aligned}$$

On voit que V est maximum pour $\nu = 0$, $\mu = \frac{2}{3}$ et $\tau = 3$, c'est-à-dire pour $Q_n = 0,43 \lambda M$.

Cette valeur de Q_n pour laquelle V est maximum, c'est-à-dire pour laquelle la régularisation est la plus difficile à réaliser, est comprise dans la zone des débits s'étendant : du débit moyen maximum utilisable

$$\begin{aligned} Q_M &= 0,625 \lambda M \text{ correspondant à } \tau = 3 \mu = \nu = \frac{2}{3} \\ &\text{au débit} \end{aligned}$$

$$Q_n = 0,36 \lambda M \text{ correspondant à } \tau = 3 \mu = \frac{1}{2} \nu = 0.$$

La valeur maximum de V , qui doit représenter la capacité du bassin de compensation, sera donc :

$$\begin{aligned} V_M &= 1\,140 \lambda M \left(2 + \frac{1}{3} \times \frac{3}{2} + 11,75 \times \frac{2}{3} \right) = \\ &= 1\,140 \times (2 + 0,5 + 7,833) \lambda M \\ V_M &= 1\,140 \times 10,333 \times \lambda M \\ V_M &\approx 11\,750 \lambda M. \end{aligned}$$

On peut dans la pratique, si les conditions topographiques le permettent, et afin de pouvoir éliminer facilement les conséquences de certaines erreurs pouvant provenir de l'appréciation des débits, adopter pour V_M une valeur de 20 pour 100 supérieure à la précédente, soit :

$$V = 14\,000 \lambda M.$$

Cette formule simple, résultant de nos calculs, est donc très facilement utilisable et elle s'applique à la plupart des aménagements alimentant normalement des réseaux de distribution d'énergie électrique.

On peut également, cela va sans dire, adopter une valeur beaucoup plus grande dans le but d'augmenter la hauteur de chute produite par le barrage de compensation et de valoriser l'usine correspondante.

Remarques importantes. — 1° Bien entendu, la formule ci-dessus n'est valable que compte tenu des hypothèses faites par nous concernant le diagramme de charge journalière adopté, c'est-à-dire : durée de la pointe τ et valeurs absolues et respectives des coefficients μ et ν .

Si les conditions pratiques d'un aménagement étudié comportaient des caractéristiques très différentes, il y aurait lieu de refaire des calculs appropriés pour éviter de construire un bassin de compensation présentant une capacité insuffisante ou surabondante.

En particulier, si nous appliquions brutalement la formule ci-dessus au barrage de compensation de l'usine d'Éguzon étudié par M. LAPORTE, nous commettrions une erreur en ce sens que certaines hypothèses admises pour le fonctionnement de l'usine d'Éguzon sont *très différentes* de celles admises dans cette étude puisqu'elles prévoient des pointes d'une durée de 6 à 11 h pour un débit de l'ordre de 80 pour 100 du débit maximum dérivé (1).

Par ailleurs, la construction graphique établie par M. Laporte, pour déterminer le maximum maximum de la capacité d'un bassin de compensation montre que celle-ci a été obtenue dans les conditions les plus défavorables correspondant :

a) A une marche continue de l'usine de pointe à charge maximum constante pendant une moitié de la journée avec arrêt total de l'usine pendant l'autre moitié.

b) A un débit moyen turbiné Q_{tm} égal à la moitié du débit maximum dérivé $Q_2 = \lambda M$, c'est-à-dire pour $Q_{tm} = 0,5\lambda M$, valeur qui est légèrement supérieure à celle de $0,43\lambda M$ que nous avons trouvée avec nos hypothèses.

En conséquence, la formule théorique est valable dans tous les cas :

$$V = \frac{1}{4} \times 86\,400 \lambda M$$

établie par M. LAPORTE donne une valeur très supérieure à celle établie dans cette étude (sensiblement le double de la valeur primitive non majorée $V_M = 11\,750\lambda M$), en raison du fonctionnement le plus défavorable possible choisi pour l'usine de pointe et qui n'est pratiquement pas utilisé en général.

Notre méthode de calcul eut donné les mêmes résultats que la méthode purement graphique si nous avions admis dans nos hypothèses de fonctionnement de l'usine P que la durée τ de la pointe put initialement dépasser la valeur de 3 h admise et atteindre la valeur de 12 h corrélative d'une valeur nulle des

coefficients μ et ν et d'une réduction à zéro des durées d'utilisation des débits Q_1 et Q_2 .

2° Il est à noter que si les apports intermédiaires q_n influent sur la détermination du débit régularisé Q_R , c'est-à-dire sur la consigne d'exploitation du bassin de compensation, ils n'ont par contre aucune influence sur la valeur de la capacité de ce bassin.

Ceci est évident, puisque le nouveau volume d'eau apporté par q_n est immédiatement évacué à l'aval.

3° Afin d'utiliser au mieux toute l'eau des turbines de l'usine P, les groupes de l'usine R seront prévus de manière à éviter normalement tout fonctionnement des vannes de ce barrage pour assurer l'évacuation du débit Q_R .

A cet effet, l'usine R devra, en principe, être équipée pour le débit total $q_2 = Q_M + q_n$ où

$$q_n = Q_M \times \frac{\Delta S}{S} = R Q_M$$

$$q_2 = (1 + R) Q_M = 0,625 (1 + R) \lambda M,$$

c'est-à-dire pour le débit moyen maximum utilisable

$$Q_M = 0,625 \lambda M$$

de l'usine P augmenté du débit correspondant des apports.

En pratique, on adopte souvent pour q_2 une valeur comprise entre le module de la rivière et le chiffre ci-dessus.

4° Dans le cas d'une usine suréquipée, mais possédant une faible réserve utilisable en totalité pendant une période de 24 h, le bassin de compensation à prévoir à l'aval doit avoir une capacité équivalente à celle de la réserve utile de l'usine à régulariser.

En effet, le volume d'eau V , qu'il est nécessaire de pouvoir emmagasiner dans le bassin de compensation et qui est représenté sur le diagramme type (fig. 1) par l'aire Σ , correspond exactement à la tranche journalière utilisée du réservoir.

$$S_1 + S_2 - S$$

puisque

$$\Sigma = S_1 + S_2 - S.$$

Dans ces conditions, le maximum de V est égal à la valeur maximum de la réserve utilisée journalièrement, c'est-à-dire à la tranche utilisable elle-même, si celle-ci est seulement d'importance journalière.

5° Il était à prévoir que l'équation donnant V étant de la forme

$$V = 3\,600 \Delta t (Q_{tm} - Q_0),$$

dans laquelle le temps Δt peut varier dans des limites assez restreintes, le maximum de V serait atteint lorsque $(Q_{tm} - Q_0)$, serait lui-même maximum.

C'est effectivement ce que l'on constate en examinant la courbe donnant $(Q_{tm} - Q_0)$ en fonction de Q_n , que nous avons représentée sur le graphique de variation des paramètres en fonction de Q_n (fig. 3).

(à suivre)