

Les principes de l'emmagasinement des eaux de distribution

par
F. CAMPUS

Professeur émérite,
ancien directeur des Laboratoires d'essais des constructions
du génie civil et d'hydraulique fluviale
de l'Université de Liège.

Premier élément de l'emmagasinement : la capacité

Le problème de l'emmagasinement est un problème très général de l'hydraulique; on le rencontre dans toutes les exploitations hydrauliques organisées d'une manière ordonnée et économique. Les principes en sont les mêmes pour toutes ces exploitations. Il n'existe entre leurs applications que des différences de modalités et d'ordres de grandeur. Encore peut-il se produire, pour un type d'exploitation, que tous les ordres de grandeur soient possibles. C'est précisément le cas des distributions d'eau, pour lesquelles les capacités des réservoirs vont de plusieurs dizaines de millions de mètres cubes ou davantage encore, dans les lacs artificiels constitués par les grands barrages, jusqu'à quelques mètres cubes seulement pour les petits châteaux d'eau. D'autre part, la nature commune du problème et des solutions pour des exploitations hydrauliques de diverses natures a conduit à l'emploi de grands réservoirs mixtes, qui n'est certes pas neuf, mais qui bénéficie d'une notoriété assez récente, notamment aux Etats-Unis d'Amérique du Nord.

Le problème de l'emmagasinement comporte deux facteurs essentiels, la capacité et le niveau, qui ne sont pas toujours

dépendants l'un de l'autre. Il convient, pour cette dernière raison, de considérer d'abord la capacité.

La capacité est entièrement déterminée par la compensation, pendant une durée définie, de l'alimentation et de la consommation.

L'alimentation est caractérisée par le débit entrant dans le réservoir, appelé débit d'amont, Q . La consommation est définie par le débit sortant du réservoir, appelé débit d'aval, Q' . Ces deux débits sont variables en fonction du temps, soit d'une manière naturelle et, par conséquent aléatoire (débit d'une rivière, d'une source, d'une précipitation atmosphérique), soit d'une manière artificielle et commandée (pompage automatique ou non, consommation domestique et industrielle). Il en résulte un phénomène de continuité exprimé le mieux par l'équation différentielle élémentaire $(Q - Q') dt = dV$ (1), dans laquelle dt représente une durée infiniment petite et dV la variation infinitésimale correspondante de volume.

Cette équation exprime que si le débit entrant dépasse les besoins de la consommation pendant un certain temps, il y a un volume d'eau en excès pendant cette durée, susceptible d'être emmagasiné. A défaut de capacité pour le contenir, l'égalité des débits entrants et sortants est imposée et ce qui sort en excès des besoins de la consommation est une pure perte.

Inversement, si le débit entrant est inférieur aux besoins de la consommation pendant un certain temps, un volume d'eau fait défaut pendant cette durée et si ce volume ne peut être obtenu aux dépens d'une réserve, l'égalité imposée de ce fait entre le débit sortant et le débit entrant signifie qu'il y aura pénurie d'eau; les besoins de la consommation ne pourront être assurés.

On sait depuis longtemps qu'à l'échelle terrestre il n'y a que relativement peu d'eau à la surface du globe. Le développement des exploitations hydrauliques depuis le début du siècle fait progressivement apparaître qu'il y a aussi relativement peu d'eau par rapport aux besoins croissants des hommes. On se rend compte de plus en plus du caractère précieux de cette matière et,

bien qu'elle ait l'avantage remarquable de ne pas être détruite par sa consommation et de se conserver, toutes les exploitations hydrauliques deviennent de plus en plus ménagères des ressources en eau. C'est certainement le cas pour les eaux de distribution, eaux nobles et coûteuses généralement. On évitera autant que possible d'en perdre.

La consommation croissante tend à multiplier les périodes de pénuries, mais celles-ci peuvent résulter aussi de l'irrégularité de la consommation, qui peut engendrer également des pertes. Cette irrégularité est généralement beaucoup plus grande que celle de l'alimentation et, en outre, sans rapport direct de cause à effet avec elle. Il s'agit, en fin de compte, de deux variations aléatoires indépendantes, même dans le cas du pompage automatique. Car si une pompe commandée automatiquement par la variation du niveau de l'eau dans un château d'eau doit être capable de suivre d'une manière parfaite les à-coups de la consommation qui font varier ce niveau, il faut pour cela qu'elle puise elle-même dans une capacité suffisante pour satisfaire à chaque instant, sans pénurie, à la relation (1).

Le problème d'emmagasinement peut être déplacé ou étagé, mais ceci n'a rien qui doive surprendre et constitue seulement, pour les hydrauliciens, le signe du caractère universel de la loi de continuité, qu'il faut appliquer autant de fois qu'il est nécessaire à la succession des opérations hydrauliques qui interviennent dans un phénomène ou dans une exploitation.

C'est ainsi que l'équation (1) s'applique en particulier au problème de l'emmagasinement des eaux de distribution, abstraction faite de ses incidences antérieures sur le débit entrant et de ses incidences postérieures sur le débit sortant. Les problèmes d'emmagasinement ou de capacité sont ainsi à traiter par opérations séparées définies, diverses opérations successives étant liées entre elles par le fait que le débit sortant d'une opération devient un débit entrant total ou partiel dans la suivante.

Il est difficile de définir d'une manière unique le problème de l'emmagasinement des eaux de distribution, précisément parce que leurs capacités comportent tous les ordres de grandeur et que

la compensation entre l'alimentation et la consommation se fait pour tous les ordres de durées. On n'emploie pas, en matière de distribution d'eau, la terminologie parlante de l'exploitation de l'énergie hydro-électrique, qui comporte les réservoirs saisonniers, hebdomadaires, journaliers et même horaires. Il semble cependant que les distributeurs d'eau devront progressivement penser à des termes analogues, dans une économie hydraulique de plus en plus organisée.

Dès lors, il convient de considérer le problème dans sa généralité, sans s'arrêter à des hypothèses particulières.

Détermination de la capacité d'après les débits entrants et sortants

En matière de distribution d'eau, le problème consistera tout d'abord et principalement à rechercher la capacité nécessaire, du moins pour les réservoirs de distribution et les châteaux d'eau, dans lesquels les fluctuations de niveau sont limitées et guère caractéristiques. Ce problème se résoudra par voie d'intégration numérique ou graphique. Il faudra pour cela que l'on puisse estimer, d'une manière satisfaisante, les valeurs des débits entrants et des débits sortants en fonction du temps. Les périodes seront, selon le cas, d'une fraction de jour, d'un jour ou d'une semaine et il sera très désirable de pouvoir considérer les valeurs extrêmes et moyennes des débits, tant entrants que sortants, par exemple en période d'été et en période d'hiver. Il est difficile de donner sur ce point des indications générales concrètes. L'estimation des débits entrants dépendra des études hydrologiques suffisamment prolongées. Celle des débits sortants dépendra des caractères démographiques et économiques de la région desservie, mais elle devra tenir compte des accroissements à prévoir pendant une période raisonnable, par exemple de 30 à 50 ans.

On conçoit qu'une telle étude de la capacité des réservoirs et châteaux d'eau, basée sur une recherche préalable consciencieuse et approfondie, est beaucoup plus sûre et plus conforme à des principes d'économie que le choix, souvent arbitraire et mal

défini, de la capacité selon les conditions générales d'alimentation et d'installation. Comment concilier, par exemple, les indications suivantes, assez classiques? En cas d'alimentation naturelle par longs aqueducs, à débit peu variable, la capacité doit être égale à la consommation journalière moyenne, ou même maximum. En cas d'élévation mécanique effectuée pendant le jour seulement, la demi-capacité journalière peut suffire. Elle peut être abaissée au tiers lorsque le pompage s'effectue jour et nuit. Lorsque l'installation de pompage est automatique et puissante, les conduites de refoulement étant doublées, la capacité peut être réduite au double de la consommation horaire maximum. Ce sont là des limites inférieures conditionnées uniquement par l'alimentation et son adaptation plus ou moins approximative à la consommation. Elles supposent, notamment en cas de pompage, des garanties réelles et des réserves de toutes natures excluant toute interruption prolongée d'alimentation. Il en résulte des investissements et des dépenses d'exploitation et d'entretien bien définies.

Si l'on envisage la question du point de vue des réserves minima en fonction des chances d'avarie et des durées probables de réparation, les réservoirs alimentés par pompage doivent avoir éventuellement une capacité supérieure à celle des réservoirs alimentés naturellement et correspondant parfois à la consommation de plusieurs journées.

C'est ainsi que pour la grande distribution apulienne, la réserve minimum est de 30 heures pour les localités alimentées par la gravité à partir de l'aqueduc et de 54 heures pour celles qui sont alimentées par pompage. Ces durées sont portées à 48 heures et à 72 heures pour les réservoirs très éloignées de l'aqueduc.

Par de telles considérations, qui sont les plus usitées, on se base sur des probabilités extrêmes, telles que l'interruption complète d'alimentation pendant une durée définie T . L'équation (1) est alors simplifiée et devient $-Q' dt = dV$, ce qui conduit à la capacité $V = \int_0^T -Q' dt$. Encore faut-il supposer la capacité pleine lorsque l'interruption commence, c'est-à-dire que les con-

ditions initiales compliquent tout de même le problème et que la probabilité extrême ne garantit pas complètement la sécurité qu'on lui attribue. En toute hypothèse, des considérations aussi globales ne sont justifiées que pour des réserves générales. Dans l'appréciation de ces réserves générales, on perd souvent de vue les volumes d'eau appréciables contenus dans les aqueducs et les canalisations. C'est ainsi que dans l'aqueduc apulien, long de 290 km, une réserve d'eau de 400.000 m³ peut être constituée par des serremments. Cet emmagasinement considérable dans les aqueducs de grande longueur n'influe pas seulement directement sur la capacité des réservoirs, mais aussi indirectement, dans la mesure où il diminue la probabilité ou la durée probable d'une interruption d'alimentation. Pour des aqueducs courts, le dédoublement assure les mêmes effets favorables d'un emmagasinement dans les aqueducs et de la diminution de probabilité ou de la durée probable d'une interruption d'alimentation. Le cas échéant, la solution peut aussi être influencée par l'existence de réserves importantes dans des décanteurs, des filtres, des réservoirs correcteurs ou épurateurs, etc...

Pour des réservoirs secondaires ou de passage, plus généralement des réservoirs de distribution, il y aura intérêt à envisager des probabilités analytiques, portant directement sur les variations concrètes de Q et Q' . Cette méthode paraît même préférable aussi pour les réservoirs généraux ou d'accumulation; elle demande à coup sûr une analyse plus approfondie.

L'application ne présente aucune difficulté. Ayant établi les fonctions de Q et Q' en fonction de t , on trace une courbe de $(Q-Q')$ en fonction de t et on l'intègre graphiquement. La capacité minimum nécessaire C est donnée, à l'échelle des volumes $V = \int (Q - Q') dt$, par l'ordonnée maximum interceptée entre les tangentes horizontales extrêmes supérieure et inférieure à la courbe intégrale (fig. 1). L'intégration peut aussi être faite numériquement à l'aide d'ordinateurs. Pour la clarté de l'exposé, il a paru utile de recourir à une représentation graphique.

Il ressort de la figure 1 que la capacité minimum est indépendante des conditions initiales, mais dépend uniquement de la courbe de variation de $Q-Q'$.

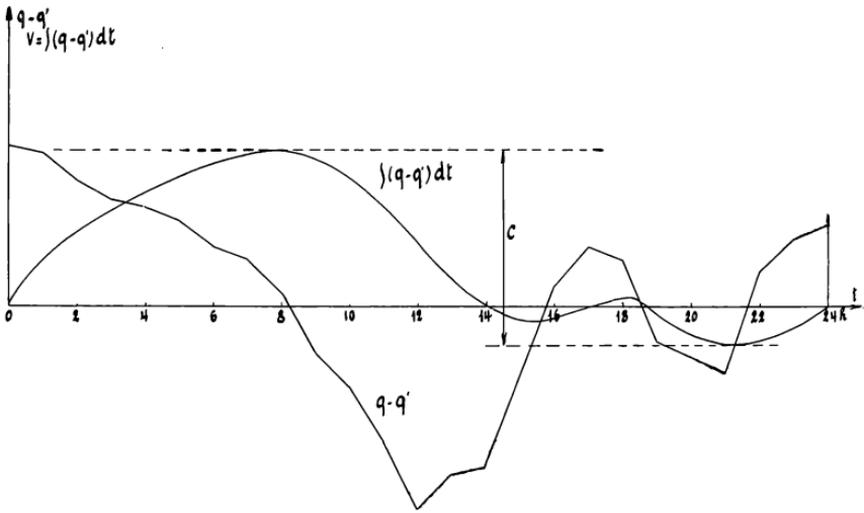


Fig. 1.

Cette opération doit être faite dans diverses hypothèses plausibles, extrêmes et moyennes, et la plus grande des capacités ainsi trouvée doit être retenue. Il faut y ajouter la réserve d'incendie qui doit être de 18 m^3 par bouche d'incendie de 5 litres par seconde pour une heure de service.

Il ne faudra pas oublier d'inclure les pertes du réseau dans le débit sortant Q' , aussi bien les pertes payées que les pertes non payées, qui ne se distinguent pas entre elles au point de vue de l'emmagasinement. Ces pertes peuvent atteindre 25 % de la consommation journalière et davantage, dans les régions d'affaissements miniers et dans les sols corrodants, par exemple, ceux contenant des eaux chargées de gaz carbonique ou des eaux saumâtres. Elles dépendent de l'état d'entretien et de renouvellement des installations. Elles peuvent être mesurées en arrêtant l'alimentation et la consommation, de telle sorte que $Q = 0$ et le débit des pertes est $Q' = - \frac{dV}{dt}$.

Il faut insister sur l'importance que présentent les conditions initiales pour l'interprétation des calculs. Par exemple, le schéma

de la figure 1 correspond au cas où le réservoir est initialement vide. On y constate que, même si la capacité est suffisante, il y a pénurie après 14 heures. Il est facile de mesurer sur la figure le volume minimum de remplissage requis au temps 0 pour qu'il ne se produise pas de pénurie pendant la période de 24 heures envisagée.

Ces conditions initiales doivent bien entendu répondre à des circonstances réellement possibles. Il faut donc accorder une grande attention à ces conditions initiales pour faire choix des dispositions des réservoirs et de celles de l'alimentation, essentielles pour la sécurité. La sécurité n'est en effet pas assurée du fait que l'on décide arbitrairement que la capacité du réservoir sera égale à tant de fois la consommation journalière. Encore faudra-t-il s'assurer que le réservoir sera plein et non pas, par hasard ou accident, vide au moment où l'alimentation sera interrompue. L'hypothèse du réservoir vide n'est pas à exclure si des précautions ne sont pas prises pour la rendre impossible. On voit que ceci conduira par exemple à diviser les réservoirs au moins en deux parties égales dont on aura soin de garder l'une des deux entièrement remplie. Seulement, dès lors, la durée permise d'interruption de service est réduite de moitié. Faut-il, dans ces conditions, doubler la capacité totale d'emmagasinement ? On pourrait économiquement envisager une division plus poussée de la réserve entre un plus grand nombre de réservoirs plus petits, dont tous moins un seraient remplis et constitueraient la réserve ultime de sécurité, correspondant à la capacité minimum résultant de l'intégration de $(Q - Q') dt = dV$ dans les circonstances les plus défavorables, correspondant par exemple à une interruption complète d'alimentation pendant la plus grande durée probable. Quant à la capacité des réservoirs partiels, elle correspondrait à la capacité normale répondant aux fluctuations normales des débits entrants et sortants pendant une période appropriée aux circonstances, ne dépassant pas une journée pour les petites distributions et moindre pour les grandes. Le nombre des réservoirs partiels serait égal au quotient des capacités ainsi définies, augmenté d'une unité. Ces réservoirs seraient naturellement interconnectés et exploités d'une manière combinée de manière à ne pas laisser l'eau

stagnante. Il faut encore tenir compte, dans ces considérations, de la réserve d'incendie et de l'éventualité de la mise hors service d'un réservoir pour des raisons d'exploitation ou d'entretien (ce qui a une incidence sur les conditions initiales à prévoir). Le fractionnement des réserves est donc certes un principe utile et rationnel, bien entendu dans les limites économiques. Mais celles-ci peuvent être favorablement influencées par un choix judicieux du mode de construction. Un autre exemple, bien connu, de l'incidence des conditions initiales est le suivant. Pour une courbe donnée de variation journalière des débits sortants Q' en fonction du temps, la capacité minimum nécessaire d'un réservoir peut varier du simple au quintuple en cas d'alimentation par pompage pendant un nombre déterminé d'heures par jour, selon la durée totale de pompage, la distribution des heures de pompage pendant la journée et le fait que la durée de pompage est ou non fractionnée. La capacité pourrait être réduite davantage encore par le pompage automatique, sous réserve de ce qui sera indiqué plus loin.

L'analyse approfondie des solutions de l'équation (1) en rapport avec les conditions initiales doit conduire à établir des réservoirs de capacité à la fois suffisante et pas excessive. Par raison d'économie, on cherchera à réaliser autant que possible la réserve générale d'ultime sécurité en dehors des réservoirs de distribution, dans la mesure du possible dans la nappe même, sans négliger les capacités des galeries de captage et d'adduction, organisées par des serrements appropriés. On pourrait à ce propos distinguer des réserves de distribution, correspondant à l'intégration de l'équation (1) pour des durées allant d'un jour à une semaine, et des réservoirs d'accumulation, relatifs à des durées beaucoup plus grandes, non seulement annuelles mais même séculaires éventuellement.

On sait que le mouvement de l'eau dans les réservoirs de barrages est régi par la même équation(1), quelles que soit l'utilisation particulière ou mixte des eaux utilisées. Mais la même équation s'applique à toutes les collections d'eau, également souterraines, qu'elles soient naturelles ou surélevées par des barrages souterrains.

Deuxième élément de l'emmagasinement : le niveau

Dans tout ce qui précède, la capacité a été seule envisagée, non le niveau de l'eau et ses fluctuations. Le niveau de l'eau, qui définit la ligne piézométrique dans le réseau de distribution, est cependant essentiel et les réservoirs de distribution sont disposés pour que les variations de ce niveau soient assez faibles, de quelques mètres à peine, pour atténuer les variations de pression dans le réseau. On connaît la condition usuelle d'avoir en bout de réseau ou au point le plus haut une pression encore suffisante non seulement pour desservir les immeubles à l'étage le plus élevé, mais encore pour pouvoir combattre les incendies. La question du niveau des réservoirs présente ainsi un caractère absolu, imposé par la topographie de la région à desservir et par le réseau de distribution, indépendamment de la capacité et des fluctuations de l'emmagasinement. Il correspond à un deuxième rôle important des réservoirs de distribution, celui de centre de distribution à potentiel quasi constant, analogue à celui des centres de distribution des réseaux de distribution d'énergie électrique. Ce rôle de centre de distribution pose non seulement un problème de niveau, mais aussi d'emplacement. On sait que l'économie d'établissement du réseau et d'exploitation (réduction des pertes de charge, donc diminution du niveau) indique comme emplacement optimum le centre de gravité de consommation du secteur desservi par le centre de distribution, c'est-à-dire par le réservoir. Cet emplacement idéal pourra être effectivement choisi s'il est topographiquement favorable, c'est-à-dire assez élevé pour permettre la construction d'un réservoir assis sur le sol ou de préférence enterré, ce qui correspond à un hasard favorable. Il en est de même si l'emplacement est indépendant des circonstances topographiques, c'est-à-dire si le réservoir doit être artificiellement surélevé, quel que soit l'emplacement choisi. Mais l'avantage de recourir à un réservoir assis sur le sol, ou mieux encore enterré, fera souvent choisir, si l'occasion s'en présente, un emplacement topographiquement favorable plus ou moins écarté de la position idéale. C'est une question dont la solution doit être examinée dans chaque cas concret, à divers points de vue et pas seulement en fonction de l'économie, mais en vue d'obtenir le meilleur résultat d'ensemble,

tenant compte, d'une manière pondérée, de tous les facteurs à considérer.

Dispositions des réservoirs

Tous les ouvrages traitant de distribution d'eau exposent les caractères bien connus des réservoirs d'amont, des réservoirs centraux et des réservoirs d'aval ou d'extrémité, mais ceci principalement au point de vue de la ligne piézométrique. Au point de vue des capacités, il faut appliquer à chacun de ces types de réservoirs, l'intégration de l'équation (1), selon les hypothèses de conditions initiales qui correspondent aux circonstances, c'est-à-dire aux dispositifs d'alimentation et de construction. Les réservoirs d'amont et centraux seront le plus souvent des réservoirs de passage d'assez grande capacité, s'ils sont uniques. Si un réservoir central est conjugué avec un réservoir d'amont, il peut être un réservoir tampon de moindre capacité, ou encore mixte, si l'on veut réserver la possibilité de constituer des réserves exceptionnelles. Enfin un réservoir d'extrémité est toujours un réservoir tampon, souvent de faible capacité, mais auquel des raisons de sécurité peuvent faire attribuer une capacité notable, en cas d'alimentation précaire et si les possibilités d'avaries du réseau sont grandes. On connaît le grand intérêt des réservoirs d'extrémité, tant pour l'économie d'établissement et d'exploitation des réseaux que pour la sécurité

Une autre disposition classique dans les régions accidentées est celle des réservoirs étagés, alimentés en cascade par la gravité en cas d'alimentation naturelle, ou par élévation étagée en cas d'alimentation par pompage. Somme toute, ces réservoirs étagés font office de coupe-pression et leur capacité individuelle sera déterminée par intégration de l'équation (1).

Bien entendu, il ne faut pas perdre de vue que Q et Q' sont des grandeurs aléatoires et que les calculs sont faits au moyen de valeurs extrêmes, ou moyennes ou probables. Il peut donc y avoir des écarts. On évitera les pénuries en ajoutant éventuellement une marge de sécurité à la capacité, mais cela n'est pas indispensa-

ble si la capacité a été convenablement calculée à partir de l'équation (1), c'est-à-dire en tenant compte raisonnablement du danger de pénurie et en envisageant tous les moyens économiques d'y parer.

On ne peut se prémunir contre les excès que par des dispositifs de trop-plein, qui peuvent être dimensionnés en vertu de l'équation (1), pour des hypothèses exceptionnelles.

Fluctuations du niveau de l'eau dans les réservoirs

Dans ce qui précède il n'a été question des fluctuations de niveau que pour mentionner leur limitation. Elles ne jouent donc pas un grand rôle dans l'étude précédemment exposée, qui envisage les capacités indépendamment des niveaux. C'est en fait un expédient, car cela revient à supposer, dans l'intégration de l'équation (1), que le réservoir est toujours initialement vide, que toute la capacité est libre. Or, la capacité disponible varie avec le niveau initial et celui-ci peut changer d'un jour à l'autre. Par exemple, il sera plus élevé le lundi que le dimanche matin, à cause de la consommation réduite du dimanche. Ceci peut entraîner des pertes importantes d'eau par le trop-plein. Incidemment, il sera utile de tenir compte des fluctuations hebdomadaires de la consommation, soit en agissant sur l'alimentation selon les consommations journalières de la semaine, soit en calculant les capacités en conséquence, créant ainsi de véritables réservoirs hebdomadaires. Mais ceci peut entraîner des majorations considérables de capacité et de dépense.

Les fluctuations de niveau de l'eau dans les réservoirs peuvent être étudiées en transformant légèrement l'équation (1). On se base sur la remarque déjà faite que les variations aléatoires de l'alimentation et de la consommation font varier le niveau de l'eau. Cela s'exprime par la relation :

$$dV = S dh \quad (2),$$

dans laquelle dh représente la variation du niveau par rapport à un plan d'eau libre horizontal dont la superficie est S . La com-

binaison de (1) et de (2) conduit à l'équation bien connue du mouvement de l'eau dans les réservoirs :

$$(Q - Q') dt = S dh \quad (3).$$

La résolution de cette équation est plus complexe que celle de l'équation (1), parce qu'elle introduit une condition initiale de plus, celle de la hauteur initiale h_0 et de la superficie correspondante S_0 . Mais elle a l'avantage de rendre mieux compte de la réalité et de permettre d'agir sur les niveaux.

Cependant, il sera exceptionnel que l'on applique cette équation aux réservoirs de distribution, sauf les plus grands. En général, on ne fera usage de cette équation que pour les réservoirs d'accumulation, tels que les lacs artificiels de barrages, dont les fluctuations de niveau peuvent être considérables. On n'oubliera pas d'apprécier les pertes par infiltration et évaporation, à assimiler à des débits sortant.

En fait, il peut arriver dans ce cas que l'on se servira plutôt de l'équation (3) sous la forme

$$Q = Q' + S \frac{dh}{dt}$$

permettant de déterminer les débits entrants par la connaissance des débits Q' sortants contrôlés, de la topographie du réservoir, qui donne les valeur de S , et en disposant d'un enregistrement limnigraphique, qui donne $\frac{dh}{dt}$. On déterminera ainsi le débit Q diminué des pertes non controlées.

Le mouvement de l'eau dans les réservoirs aura de l'importance pour ceux dont l'alimentation par pompage automatique est commandée par les fluctuations du niveau. Cette commande automatique, si elle est pourvue de toutes les sécurités nécessaires pour parer aux défaillances de l'automatisme, permet une adaptation très étroite de l'alimentation à la consommation et, par conséquent, une extrême réduction de la capacité, susceptible de compenser plus ou moins le coût d'un automatisme peu faillible. Seulement, il faut rechercher alors, par l'équation (3), s'il n'en

résultera pas des démarrages automatiques trop fréquents, assez promptement nuisibles au fonctionnement. Dans la pratique, la capacité est finalement déterminée par la considération d'un intervalle de temps suffisant entre les démarrages, ce qui peut conduire à des capacités plusieurs fois plus grandes. Dès lors, il y a lieu d'examiner si l'automatisme reste économiquement intéressant et quelles sont les modalités les plus appropriées de la commande des pompes.

La résolution de l'équation (3) peut se faire par intégration. On trace la courbe de $(Q - Q')$ en fonction de t et son intégrale $\int (Q - Q') dt$, à partir d'un temps t_0 . On trace le diagramme des variations de S en fonction de h , l'axe des h étant dans le prolongement de celui des t . On trace l'intégrale $V = \int S dh$, de manière que $\int (Q - Q') dt$ et V aient la même valeur pour t_0 et h_0 , conditions initiales correspondantes. Les valeurs conjuguées et de t et h s'obtiennent dès lors simplement pour des valeurs égales des ordonnées $\int (Q - Q') dt$ et V (fig. 2).

Cette méthode graphique n'est pas très précise. La méthode des isoclines est préférable lorsqu'elle est applicable. Les isoclines sont, dans un système d'axes (h, t) , des courbes d'égales valeurs de

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q - Q'}{S}.$$

La méthode n'est aisée que si le réservoir est prismatique ou cylindrique, ce qui est généralement le cas des réservoirs de distribution. Alors S est constant et les isoclines sont, dans un plan de coordonnées $(Q - Q')$, t , des droites parallèles d'égales valeurs de $Q - Q'$. D'ailleurs, on obtient la courbe de h directement par l'intégration graphique ou numérique $h = \frac{1}{S} \int (Q - Q') dt$ (fig. 3). De nouveau, le résultat sera très fortement influencé par les conditions initiales; en l'occurrence par la valeur initiale de h . Des hypothèses plausibles, favorables et défavorables, devront être faites à ce sujet. En cas de pompage, la courbe des débits sortants Q' étant connue, on peut déterminer par cette méthode les conditions de pompage les plus favorables en cas

de commande non automatique ou, de proche en proche, le régime de pompage automatique, les niveaux d'enclenchement et de déclenchement étant fixés.

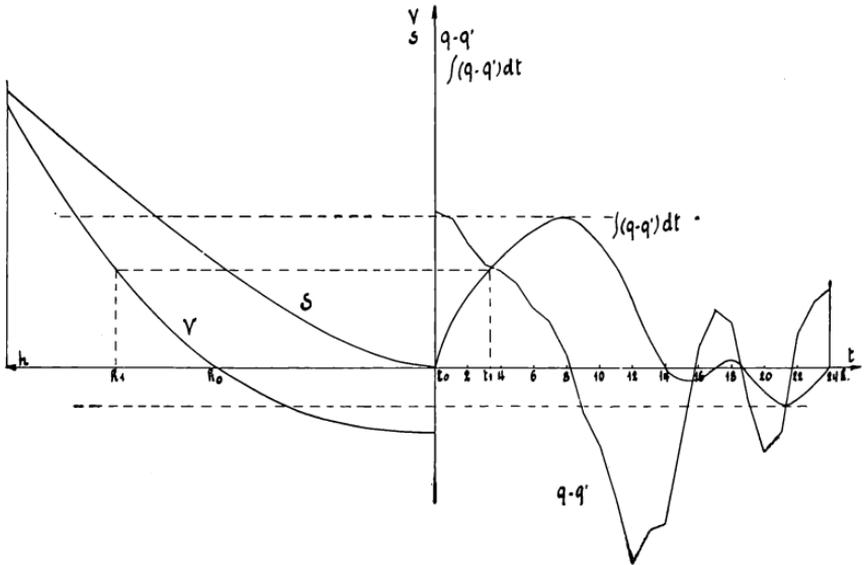


Fig. 2.

En principe, les capacités économiques et efficaces des réservoirs ne peuvent donc être déterminées par des règles conventionnelles fixes et sommaires. Elles doivent être établies d'après une analyse approfondie de tous les éléments du problème concret et en tenant compte des dispositions adoptées, qui règlent les hypothèses de circonstances initiales et les conditions de sécurité. Cela ressort à suffisance du fait que, selon certains auteurs, le rapport de la capacité totale des réservoirs à la consommation moyenne quotidienne varie, selon les localités, de 1,14 à 0,04. On est donc loin, dans certains cas, des capacités généralement supérieures à une journée de consommation moyenne.

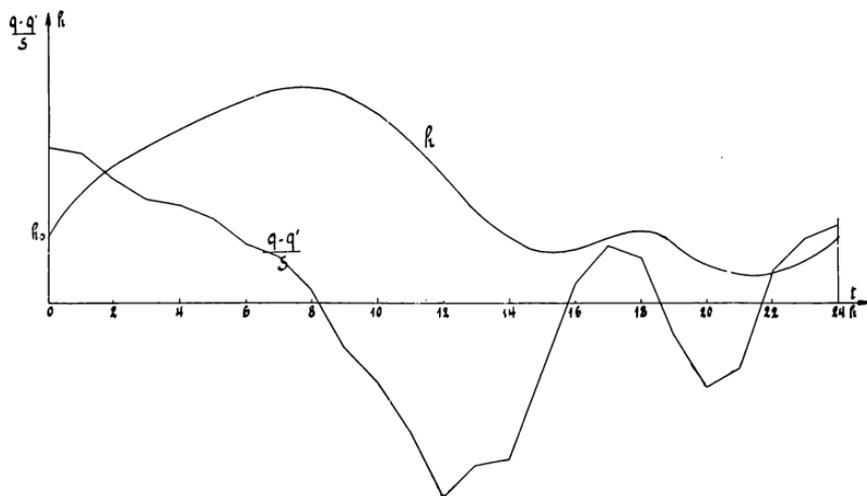


Fig. 3.

Principes de construction des réservoirs

En dehors des considérations de caractère hydraulique, il y a un problème de génie civil, c'est-à-dire de conception, de construction, de dispositions de service et d'exploitation, qui est trop important pour être développé ici. Il implique un ensemble de connaissances qui excèdent largement le problème des réservoirs. On se bornera à quelques principes généraux et à quelques remarques particulières.

Les réservoirs constitués par des barrages de vallées présentent de très grands avantages. Ils sont très répandus dans certains pays, tels que l'Angleterre. Ils ne le sont guère chez nous et ils pourraient l'être plus dans les parties du pays qui s'y prêtent et où la population est d'ailleurs la moins dense.

Les réservoirs formés de digues en terre ne sont aussi guère usités chez nous. Ils sont très répandus dans les pays anglo-saxons. Il en existe au voisinage de Londres pour l'alimentation de cette énorme agglomération urbaine. De même pour les grandes villes

américaines, telle New York. Un réservoir en remblai à ciel ouvert se trouve au centre de Manhattan, dans un parc public, le Central Park.

En Belgique, les réservoirs sont généralement couverts. Il est favorable qu'ils soient enterrés, c'est-à-dire construits sous le sol ou, s'ils sont construits au-dessus du sol, couverts d'un remblai.

Pour les réservoirs enterrés, si le sol est stable, la maçonnerie au mortier de ciment, rendue étanche par les enduits de ciment, peut parfaitement convenir. Il semble exister une tendance à recourir au béton armé, mais elle n'est peut-être pas toujours justifiée, du moins pour les réservoirs de dimensions médiocres. La maçonnerie voûtée se prête à un cloisonnement multiple qui peut réaliser la subdivision en réservoirs fractionnaires, favorable à la sécurité d'exploitation, dont il a été question plus haut. Il faut naturellement une liaison contrôlée par vannes de toutes les cellules et c'est un problème d'économie que de choisir la subdivision optimum.

Les réservoirs rectangulaires et carrés se prêtent plus facilement à la subdivision, quelle que soit leur nature, que les réservoirs cylindriques. La sollicitation avantageuse et économique de ceux-ci demande la subdivision par cloisons annulaires concentriques, qui est cependant incommode en certains points. La subdivision par cloisons diamétrales, plus simple, perturbe considérablement la sollicitation mécanique. Pour les réservoirs de grandes dimensions, enterrés ou non, le béton armé est très employé, mais le béton précontraint est un procédé de choix, parce qu'il introduit partout des compressions dans le béton et empêche ainsi la formation de fissures, de même que l'action de pressions interstitielles. On peut citer comme exemple à ce sujet les trois réservoirs surélevés, sur piliers, de 7.000 m³ de la Ville d'Orléans, réalisés en béton précontraint et de plan rectangulaire. Plus récemment, un réservoir enterré en béton précontraint de 200.000 m³ de capacité a été mis en exploitation en 1964, à la Porte des Lilas, pour l'alimentation en eau de la Ville de Paris. Il est également de plan général rectangulaire et formé de deux cuves comportant chacune deux compartiments superposés. Le radier géné-

ral en béton armé est creux, drainant et visitable. Pour les réservoirs surélevés et les châteaux d'eau, la question se pose de savoir si l'acier pourra résister à la concurrence du béton précontraint, tant au point de vue du prix d'établissement que de l'entretien et de l'amortissement. Cependant, pour les réservoirs et les châteaux d'eau en béton précontraint, il y a lieu d'être attentif à la durabilité, qui peut être compromise par la corrosion accélérée sous forte tension des armatures de précontrainte. Des mécomptes ont été enregistrés aux Etats-Unis. Il s'agit de réservoirs cylindriques posés sur le sol et précontraints par enroulement sous tension de fils d'acier extérieurs, qui n'ont pas été protégés de la corrosion par le revêtement de *gunite* (microbéton projeté par l'air comprimé) utilisé dans ce but.

En terrain instable, par exemple soumis à des affaissements miniers, de multiples solutions ont été appliquées. Les réservoirs d'Ans de la Ville de Liège ont été subdivisés en 8 réservoirs cylindriques, rendus facilement aptes à résister aux effets maxima des affaissements par leur résistance propre et en reportant, en toute hypothèse d'affaissement, le poids de l'eau sur le terrain, grâce à un radier souple, non solidaire de la cuve. La capacité totale des 8 réservoirs conjugués est de 3.500 m³.

Une solution toute différente, appliquée aux réservoirs de Lamine de la Compagnie intercommunale des eaux de l'agglomération liégeoise, consiste à rendre un réservoir de 2.750 m³, de plan rectangulaire, de 31 × 19 m env., apte à subir sans dommages les affaissements miniers, en lui assurant une résistance et une rigidité d'ensemble suffisantes par des poutres transversales internes, dont l'action s'ajoute à celle des parois extérieures. En somme, l'ossature du réservoir constitue comme un pont en caisson à longerons multiples. Les deux réalisations précitées sont en béton armé. Les réservoirs de Lamine ne sont pas subdivisés individuellement.

Une troisième solution serait possible et elle pourrait être plus économique que les précédentes, considérée dans son ensemble, notamment si le cloisonnement permettrait de réduire la capacité sans nuire à la sécurité d'exploitation. Le réservoir aurait

un plan carré, par raison d'économie, et serait subdivisé en quatre ou neuf cellules par des cloisons étanches portantes. C'est donc une solution mixte entre les deux précédentes. Il ne semble pas qu'elle ait été réalisée déjà, mais elle ne présente pas de difficultés considérables, notamment en béton précontraint. Cette solution pourrait d'ailleurs s'accommoder d'un radier souple. Elle permettrait une plus grande concentration que la solution des réservoirs partiels séparés, donc une moindre superficie et une disposition serrée. Par exemple, le cloisonnement triple dans les deux sens permettrait la disposition de huit réservoirs partiels avec une neuvième cellule centrale de commande.

Dispositifs de service et d'exploitation

Les dispositifs de service et d'exploitation sont trop connus, trop nombreux et divers aussi, pour pouvoir être pris en considération ici. Leurs aménagements ont été en grand progrès en Belgique depuis un quart de siècle, notamment en ce qui concerne les salles de commande des vannes. Faut-il rappeler l'opportunité des arrivées d'eaux par déversement libre, du dimensionnement convenable des trop-pleins, la nécessité de vannes de vidange et de by-pass. Peut-être faut-il insister davantage sur l'utilité, pour une exploitation attentive et informée, d'appareils enregistreurs de mesure des débits entrants et sortants, dont l'existence constitue non seulement un contrôle utile mais surtout donnerait à une exploitation en développement des bases statistiques sûres, permettant l'application, avec le minimum d'aléas, des méthodes indiquées plus haut pour la détermination des capacités des réservoirs nouveaux, à établir au fur et à mesure des besoins.

Ainsi, en matière de réservoirs d'emmagasinement des eaux de distribution, s'affirme aussi ce principe essentiel, dont la reconnaissance caractérise de plus en plus le génie civil moderne, d'une étroite collaboration de l'exploitant, maître de l'œuvre, de l'ingénieur, auteur du projet et de l'entrepreneur, en vue d'une réalisation entièrement adéquate au but de l'ouvrage, c'est-à-dire

d'une efficacité parfaite, sûre en exploitation et économique. Toutes ces qualités enfin ne pourront que bénéficier d'un aspect satisfaisant par surcroît. Ce dernier point n'est peut-être pas le plus facile à réaliser.
