

Les ouvrages du génie civil

par

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

Directeur des Laboratoires d'essais des constructions du génie civil
et d'hydraulique fluviale

FAIBLES OU BASSES CHUTES

Depuis des temps très anciens, des *roues hydrauliques* ont été utilisées pour actionner des moulins, des scieries, des forges ou d'autres manufactures. Une dénivellation motrice ou chute était créée dans un cours d'eau par un barrage souvent rudimentaire, retenant les eaux à l'amont à un niveau plus élevé qu'à l'aval. La roue n'était traversée que par une partie du débit et d'une manière intermittente. Des vannes réglaient le débit usinier ; l'excédent se déversait par dessus la crête du barrage, qui était généralement fixe. Il pouvait en résulter des relèvements importants du niveau des crues en amont ; les barrages pouvaient être mis ainsi en grand danger et parfois emportés. Il était peu fréquent que des vannes disposées dans le cours d'eau aient permis le passage des débits de crues sans remous excessif.

Depuis des temps très anciens aussi, des dispositions analogues ont été utilisées pour relever le plan d'eau d'étiage et rendre navigables les cours d'eau dont la profondeur naturelle était insuffisante. La rivière était divisée en biefs séparés par des chutes artificielles ; mais des chutes naturelles : rapides, cas-

cados, cataractes, pouvaient assurer le même effet d'une manière plus économique et plus sûre. La canalisation ainsi réalisée devait être accompagnée d'ouvrages permettant le franchissement des chutes par les esquifs. Le moyen le plus primitif consistait à transporter l'esquif et sa charge par terre d'un bief à l'autre. On a retrouvé des vestiges d'ouvrages moyennâgeux constituant des plans inclinés sur lesquels des treuils traînaient les nacelles chargées d'un bief dans l'autre à sec. Un tel dispositif (*overdracht*) a existé jusqu'en 1828 à Fintele en Flandre, pour le passage des barques du Canal de Loo dans l'Yser et vice-versa. Cet ouvrage aurait existé depuis l'époque de 1100. Le canal de Loo ne présentait alors qu'un mouillage de 0,50 m et les barques transportaient de 12 à 15 tonnes. Ces dispositifs permettaient le passage dans les deux sens dans des conditions peu différentes ; la remonte était à peine plus compliquée que la descente, en basses eaux s'entend. En hautes eaux, la navigation devait être dangereuse et probablement interrompue.

L'idée de passer à travers le barrage, par une passe spéciale éventuellement aménagée pour la navigation, n'est pas aussi ancienne qu'on pourrait le supposer, bien que l'idée pouvait en naître assez naturellement par la navigation dans les rapides. Elle a été appliquée en premier lieu sur l'Yonne, après 1834, par la première application des *barrages mobiles*. Cette navigation par lâchures ou bonds d'eau était encore pratiquée dans le troisième quart du siècle dernier sur l'Yonne et la Seine supérieure. Elle a aussi été pratiquée sur le Haut-Escaut en Belgique. La remonte était nécessairement plus difficile que la descente et sans doutes également dangereuse. Les chutes des ouvrages de retenue et le tonnage des nacelles devaient être nécessairement faibles. Cette disposition n'est plus usitée pour la navigation des bateaux, mais le principe en subsiste dans les passes de flottage ménagées dans les barrages modernes de certains pays d'Europe Orientale et Centrale pour le passage des trains de bois.

On fait remonter au XIII^{me} siècle en Hollande, au XV^{me} en Italie, l'invention de l'*écluse à sas*, qui est devenue la solution moderne pour le passage des bateaux dans les rivières canalisées et les canaux artificiels. Tout d'abord, les barrages sont restés fixes et les écluses ont été le plus souvent disposées dans des dérivations plus ou moins longues contournant ces barrages. La canalisation déclassée de l'Ourthe inférieure a laissé subsister les ouvrages : barrages fixes, dérivations et écluses à sas d'un tel aménagement, pour bateaux de faible tonnage.

*
**

L'invention des barrages mobiles, qui date du premier tiers du siècle dernier et qui a d'abord mis en œuvre des bouchures assez rudimentaires, telles que des poutrelles, des aiguilles et des petites vannes, a néanmoins jeté les bases d'un progrès décisif, non seulement pour la canalisation des rivières en vue de la navigation (*), mais aussi pour leur aménagement en vue de la production d'énergie. Ce sont là en effet les deux principaux aspects de la question, mais d'autres utilisations ont été faites de ces ouvrages de retenue de faible chute, notamment des prises d'eau pour l'irrigation, pour l'alimentation des canaux et même pour les distributions d'eau industrielle ou alimentaire. Toutes ces applications utilisent l'énergie de l'eau tant que son écoulement se produit par gravité.

Actuellement, on réalise des aménagements de cette nature de caractère gigantesque. Par exemple, l'aménagement du Rhône pour la navigation comme pour la force motrice, tant sur le territoire suisse (Chancy-Pougny, etc...) que sur le territoire français (Génissiat, Donzère-Mondragon, etc...). En Belgique, à l'échelle permise par les conditions géographiques, l'aménagement moderne de la Meuse est exemplaire. La clef en est le

(*) La canalisation de la Meuse en Belgique, qui fut commencée il y a à peine plus d'un siècle, a constitué la première grande canalisation moderne.

complexe de Monsin. Relevant la flottaison de la Meuse à la cote (60.00), il fixe en même temps la flottaison du bief supérieur du canal Albert jusqu'à l'écluse de Genck. Il relie ainsi par un bief unique de 58 km de longueur, le port de Genck du bassin charbonnier de Campine à tout le bassin industriel liégeois jusqu'à Ramet-Yvoz. Sa chute normale de 5,00 mètres actionne une centrale hydro-électrique de 20.000 kVA installés, capable de produire 68 millions de kWh par an. Une écluse à sas permet, par une dérivation assez courte, le passage des bateaux du bief amont de la Meuse dans le bief aval de l'ancien barrage éclusé d'Hermalle-sous-Argenteau, court-circuitant le court tronçon de la Meuse en aval du barrage de Monsin qui n'est pas rendu navigable par la canalisation.

L'établissement du plan d'eau à la cote (60.00) permet l'alimentation naturelle par la gravité du Canal Albert et des canaux campinois ; il fournit l'eau des irrigations de Campine, en provenance de la Meuse. Enfin, par la mise en service récente du canal de la Nèthe, reliant le Canal Albert au Rupel, il permet des prélèvements d'eau en provenance de la Meuse pour l'alimentation de la distribution d'Anvers.

L'élévation du plan d'eau dans la ville et le bassin de Liège permet d'ailleurs des prélèvements d'appoint d'eau alimentaire dans les alluvions perméables de la vallée (eau de gravier). Enfin, il contribue à la protection de la région liégeoise contre les inondations ; la cote (60.00) de retenue normale est, en effet, à peu de chose près, la cote rabattue de la crue séculaire maximum de 3.200 m³/sec au droit du barrage de Monsin. Le complexe de Monsin permet donc la réalisation simultanée de tous les effets possibles d'un tel ouvrage ; il constitue un aménagement non seulement de caractère mixte, mais vraiment complet, autant que peuvent le réaliser les ouvrages à objectifs les plus multiples de la fameuse T.V.A. (Tennessee Valley Authority).

CARACTERES DES AMENAGEMENTS DE BASSE CHUTE

Les aménagements de basse chute peuvent présenter des modalités très diverses, mais ils ont en commun les caractères suivants, à des degrés peu différents.

Ils ne permettent pas d'accumulation notable, parce que les fluctuations de niveau des biefs sont étroitement limitées. D'abord par l'escarpement des rives et le niveau des terrains riverains. Dans les vallées assez encaissées et peu habitées, les conditions topographiques et hydrographiques peuvent permettre des fluctuations notables, mais on se trouve généralement alors dans le cas des chutes moyennes. Sur des fleuves à navigation intense, comme la Meuse à Liège, les fluctuations permises sont très faibles, notamment pour éviter des courants trop vifs. Le niveau des quais et des ports, le tirant d'air sous les ponts, les niveaux des nappes phréatiques et des affluents, enfin le voisinage de terrains bas sont autant de circonstances qui contraignent à cette limitation. Il en est de même sur des rivières navigables plus encaissées, telles que le Neckar.

Il en résulte que si les barrages mobiles permettent une régulation éventuellement parfaite des niveaux, par contre aucune régulation du débit n'est permise. Les turbines sont mal utilisées en étiage ; elles sont naturellement insuffisantes en crue. Une question essentielle pour l'économie d'un aménagement hydroélectrique de basse chute est la détermination du débit de base. Il est souvent voisin, comme à la Centrale de Monsin près de Liège, du débit caractéristique de trois mois, c'est-à-dire qui est atteint ou dépassé en général pendant trois mois de l'année. L'utilisation idéale d'une telle centrale est celle consistant à produire à chaque époque toute l'énergie que permet le débit ou la puissance installée. C'est le fonctionnement en centrale de base, qui demande l'interconnection avec un grand réseau, dont la consommation excède à chaque instant la pro-

duction de la centrale considérée. Une telle centrale convient mal pour les pointes et ne peut guère fournir que des bases de pointe de courte durée, en cas de nécessité.

Un autre caractère général des centrales de basse chute est l'absence de conduite forcée. Après passage par les grilles et les vannes, l'eau passe directement du bief amont aux volutes des turbines et rejoint ensuite directement le bief aval par les diffuseurs. Les dispositifs hydrauliques sont donc réduits au minimum, ainsi que les pertes de charge, ce qui est très favorable en raison des faibles chutes. La chute nette est peu inférieure à la chute brute.

Par ailleurs, des dispositions très diverses sont possibles. La plus simple situe la centrale en rivière, généralement à une extrémité du barrage mobile, près d'une rive. En cas de navigation, l'écluse et la passe de flottage sont généralement près de l'autre rive, plus rarement voisines de la centrale. La rivière doit être élargie au droit du barrage pour éviter un remous excessif de crue.

Il est préférable, si possible, d'établir la centrale dans une courte *dérivation contournant le barrage*. Si cette dérivation sert aussi à la navigation, il faut y limiter les vitesses de courant et la centrale est alors généralement située dans la rive de la dérivation voisine de la rivière. Un canal de fuite, normal à la dérivation, rejoint le bief aval. Il est encore meilleur, s'il est possible économiquement, de ménager des dérivations distinctes pour la centrale et la navigation. A Monsin, sur la Meuse, l'écluse est située sur une dérivation particulière, se détachant de l'entrée du Canal Albert, disposition que les circonstances rendaient favorable. La centrale est située sur une courte dérivation séparée, disposée entre le barrage de Meuse et la dérivation de l'écluse. A Ramet-Yvoz, les écluses sont en Meuse, à la rive opposée à la courte dérivation de la centrale. L'entrée de ces dérivations est éventuellement pourvue de guideaux direc-

teurs, analogues à des aubages fixes, et obturée vers le plan d'eau par des poutres flottantes ou des cloisons légèrement noyées, pour retenir les corps flottants. Les dérivations sont souvent trop courtes que pour exercer un effet sur la hauteur de chute. Mais, dans certains aménagements plus complets et plus coûteux, les dérivations deviennent longues et on les calibre pour le débit de travail maximum de telle manière que leur pente soit sensiblement inférieure à celle de la rivière. Lorsque la longueur de la dérivation atteint quelque dix kilomètres ou davantage encore, la dénivellation à l'extrémité aval entre les niveaux de l'eau dans la dérivation et dans le cours d'eau atteint plusieurs mètres. Anciennement, une centrale a existé sur le Rhône, à Jonage, dont la chute provenait uniquement d'une longue dérivation. Dans la suite, cet aménagement a été complété par un barrage. A Donzère-Mondragon, sur le Rhône également, la centrale travaille sous une chute qui provient des effets cumulés du barrage et d'une longue dérivation. La longue dérivation a comme avantage que la chute ne s'annule pas lors des crues. Ces aménagements sont plus coûteux, mais les centrales sont plus éloignées. Pour tirer le parti maximum de la pente cumulée disponible, il est en effet souhaitable que le canal de fuite de chaque centrale aboutisse en aval de la limite du remous d'exhaussement de la centrale d'aval. Il y aura donc d'autant moins de centrales que les chutes seront plus fortes.

L'aboutissement du système des dérivations conduit au canal latéral, à objectif unique ou multiple. Le Grand Canal d'Alsace, latéral au Rhin entre Huningue et Strasbourg, sur territoire français, sert à la navigation et à la force motrice. Il comporte des centrales et des écluses étagées, mais un seul barrage mobile dans le Rhin, à Kembs, immédiatement en aval de l'embouchure amont du canal dans le Rhin.

La place fait défaut pour donner quelques indications sur les travaux importants et difficiles de génie civil hydraulique qu'exigent ces aménagements. Les plus particuliers sont ceux des

barrages mobiles. Actuellement les vannes levantes, les vannes à segments et les vannes à cylindres permettent d'obturer d'un seul tenant des pertuis de plusieurs dizaines de mètres, en permettant un réglage aisé et rapide (Ouverture des pertuis : 27,00 m à Monsin, 24,00 m à Ramet-Yvoz, 31,50 et 45,00 m à Donzère-Mondragon). Les usines de basse chute sont généralement équipées de turbines-hélices ou Kaplan.

CHUTES MOYENNES

Leur domaine n'est pas nettement défini et les limites en sont assez variables, comme dans tous les cas intermédiaires. Mais elles ont une caractéristique commune : *l'emploi de conduites forcées*. Pratiquement, les chutes peuvent varier de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres (par exemple jusqu'aux environs de 300 m). Les aménagements les plus simples et les plus économiques utilisent des chutes naturelles (Cataractes du Niagara, Centrales de Porjus et de Haarsprånget en Suède utilisant des chutes de la rivière Stora Luleälv, Centrales Francqui et Bia de la Sogéfor utilisant les Chutes Cornet et les Chutes Koni de la Lufira ; Centrale de Stanleyville, utilisant les chutes de la Tshopo ; Centrale de Zongo, utilisant les chutes de l'Inkisi, ces quatre dernières usines au Congo Belge). L'existence de chutes naturelles dispense en effet de l'établissement de barrages de retenue, partie souvent la plus coûteuse de l'aménagement, ou en réduit fortement les proportions. Il subsiste naturellement les ouvrages de prise et de réglage, l'adduction et la centrale ainsi que la restitution. Cependant, les chutes naturelles ne ménagent pas de capacités d'accumulation importante, même si elles sont situées à l'aval de grands lacs, comme les cataractes du Niagara. Mais elles peuvent éventuellement permettre une accumulation notable au prix d'ouvrages peu élevés et peu étendus, comme à la Centrale Francqui de la Sogéfor sur la Lufira au Congo Belge. Il en est de même à la Centrale de la Tshopo.

L'aménagement des chutes naturelles peut se faire de la manière la plus simple et la plus économique par une conduite forcée aussi courte que possible reliant les deux plans d'eau supérieur et inférieur. La chute brute est alors égale à celle de la cascade. Les premières centrales du Niagara ont été établies de la sorte et ont une chute brute de 40 à 43 m. Ce type d'aménagement convient bien aux centrales souterraines. Par le moyen de dérivation plus ou moins longues, la chute brute peut être augmentée. C'est ce qui a été fait pour les centrales plus récentes du Niagara. La chute brute a été portée à une soixantaine de mètres, puis à 93 m pour la centrale canadienne de Chippawa-Queenston. Un aménagement analogue peut être réalisé sur des rivières à forte pente, par le moyen d'un barrage de faible hauteur, qui peut être fixe, et d'une longue dérivation à faible pente, adduisant le débit usinier au château d'eau de la conduite forcée. Dans tous ces aménagements, la fluctuation permise du niveau de la retenue ne peut dépasser quelques mètres. Cette fluctuation permet une accumulation qui dépend entièrement de l'étendue du plan d'eau. Celui de la dérivation seul permet une régulation journalière, voire hebdomadaire, selon la longueur. Le lit du cours d'eau ou le lac supérieur permettront une régulation éventuellement plus poussée, selon l'importance du plan d'eau et celle de la fluctuation de niveau permise, qui sera éventuellement assez limitée si le lac connaît une navigation régulière et intense. Il existe des sites très favorables, par exemple sur des plateaux, qui permettent une accumulation très importante, à l'échelle saisonnière, au moyen d'ouvrages de retenue de faible hauteur, ne dépassant guère une dizaine de mètres.

Mais la régulation saisonnière (ou annuelle), davantage encore la régulation séculaire, exigent des volumes d'accumulation qui ne peuvent être réalisés qu'au prix de fluctuations de niveau considérables, de plusieurs dizaines de mètres. Il faut alors recourir à des ouvrages de retenue de grande hauteur,

appelés *barrages de réservoirs* ou *grands barrages*, dont la hauteur de retenue atteint et dépasse elle-même plusieurs dizaines de mètres. De telles fluctuations de niveau excluent l'emploi de dérivations à ciel ouvert ; l'adduction de l'eau du réservoir à l'usine se fait toujours en charge, par des *tunnels sous pression* et des conduites forcées.

Les réservoirs de barrages ou lacs artificiels sont utilisés déjà depuis l'Antiquité et le Moyen-Age pour l'irrigation. Dans les temps modernes, des barrages de réservoir ont été édifiés pour l'alimentation des canaux en France. Plus récemment encore pour l'alimentation urbaine en eau et la régularisation des rivières en vue de la navigabilité et de l'atténuation des crues. Dans les dernières décennies, le développement de l'énergie hydraulique a fait croître les dimensions des grands barrages d'une manière spectaculaire. Des ouvrages de près ou de plus de 300 m de hauteur sont actuellement en construction.

Il n'est pas possible de commenter ici, même d'une manière générale, les importants problèmes de génie civil que pose la construction de tels ouvrages. On se bornera à quelques remarques importantes. Le sol d'implantation du barrage doit être dans toute son étendue parfaitement résistant et étanche. Les défauts d'étanchéité sont obturés par des injections de lait de ciment, d'un mélange de ciment et d'argile ou de bitume. Les grands barrages sont exécutés fréquemment en béton ou en béton armé, voire précontraint. L'étanchéité du béton et sa durabilité, notamment sa résistance au gel (et aux intempéries), posent encore de sérieux problèmes. Le type de barrage qui a été le plus répandu est celui du *mur à gravité* résistant par son poids. Il n'est nullement suranné : un des plus grands barrages du monde, actuellement en construction en Suisse, est un barrage-poids. Mais le *barrage-voûte* est plus employé que jadis et on y recourt chaque fois que le profil encaissé de la vallée et la solidité des versants le permettent. On a allégé le barrage-

poids en l'évidant et, pour des ouvrages de hauteur moyenne sur des sols de qualité moyenne, on recourt aussi aux barrages élégis, à voûtes multiples ou en béton armé. Il faut prendre des précautions certaines pour éviter les infiltrations et les sous-pressions et assurer la sécurité au glissement autant que la sécurité au renversement.

La mise en œuvre de volumes de plusieurs dizaines, voire de centaines de milliers de mètres cubes de béton dans les grands barrages fait naître des questions importantes et difficiles d'extraction, de manutention, de production et de mise en place. Un point très particulier est celui de la dissipation de la chaleur de durcissement du béton, qui entraîne éventuellement l'emploi de réfrigérateurs à eau froide. On comprend aussi l'importance d'une étude approfondie et continue de la composition du béton non seulement en vue de la résistance, de l'étanchéité et de la durabilité, mais aussi de l'économie. La limite inférieure permise de la quantité de ciment par m³ de béton dépend non seulement de l'importance de l'ouvrage, mais aussi des matériaux inertes dont on dispose et du climat.

Depuis longtemps, on a édifié des grands barrages en terre, récemment on en a réalisé de très élevés. On effectue aussi des grands barrages en enrochements. Le barrage Le Marinel, en construction sur le Lualaba par les soins de l'U.M.H.K., est de ce type. Il aura 66,00 m de hauteur et desservira une centrale de 180,00 m de chute nette et d'une puissance totale de 276.000 kVA. Il comporte un tunnel d'adduction sous pression de 2,5 km de longueur.

Il est encore moins possible de s'étendre dans le cadre de ce chapitre sur les questions du génie civil relatives à ces barrages. Les ouvrages en terre peuvent être entièrement étanches par eux-mêmes. Les ouvrages en enrochements exigent naturellement des dispositifs spéciaux d'étanchement. Ces ouvrages exigent la mise en œuvre de cubes énormes de matériaux.

La chute brute de la centrale peut être sensiblement supérieure à celle permise par la hauteur du barrage. Comme ces ouvrages sont généralement édifiés sur des rivières à forte pente, il suffit d'une galerie sous pression de quelques kilomètres pour augmenter fortement la chute. La Centrale de Robertville sur la Warche a une chute nette d'environ 150 m, dont 50 m seulement proviennent du barrage, le restant d'une galerie d'amenée sous pression de 5,5 kilomètres de longueur totale. Mais il arrive que la centrale soit au pied du barrage, même dans le barrage, lorsque celui-ci est évidé. Cette disposition est l'analogue de la centrale en rivière accolée au barrage pour les basses chutes. L'adduction ne comporte même plus nécessairement une conduite forcée. Elle est dans tous les cas peu importante, de même que les pertes de charge. Mais la chute nette, pour voisine qu'elle soit de la chute brute, est beaucoup inférieure à celle que permettrait un aménagement plus étendu. Les centrales de moyenne chute sont généralement équipées de turbines Francis.

HAUTES CHUTES

Les centrales de haute chute sont généralement équipées de turbines Pelton. Les conduites forcées y prennent une importance essentielle. Les difficultés provenant des hautes pressions sont compensées par les faibles débits, qui permettent de plus petits diamètres. L'accumulation présente pour ces usines moins d'importance absolue, en raison des faibles débits. D'autre part, les chutes de plusieurs centaines de mètres provenant de la conduite forcée, les majorations à attendre d'une dérivation plus ou moins longue ont aussi moins d'importance. De telle sorte qu'en dehors de la conduite forcée et de la chambre de mise en charge, les aménagements sont généralement très simples et ne comportent guère plus qu'un simple ouvrage de prise réglable et un canal d'amenée à ciel ouvert. La prise se fait dans un lac élevé ou dans un torrent, éventuellement en amont d'un petit barrage fixe.

BILAN HYDRAULIQUE

Tout aménagement hydraulique comporte un bilan hydraulique, permanent ou périodique. Il traduit ce qu'on appelle en hydraulique l'équation ou la condition de continuité. Par exemple, pour une centrale de basse chute sans accumulation, le débit à l'amont de l'ouvrage est égal à la somme du débit turbiné, du débit des éclusages, du débit passant sur les déversoirs, enfin du débit de pertes. En cas de variation du niveau amont, il faut ajouter à cette somme le produit de la surface du plan d'eau par la dérivée de l'élévation du plan d'eau par rapport au temps.

Ce bilan est surtout important pour les lacs, aussi naturels, mais surtout artificiels. Dans ce cas, le débit d'amont doit s'entendre de l'ensemble des apports au lac, c'est-à-dire le produit du bassin versant par la hauteur de ruissellement ou le débit spécifique moyen par périodes ou instantané. Pour un lac artificiel, où l'on désire accumuler le plus d'eau possible, de manière à réduire la dépense par m^3 , il faut donc rechercher un grand bassin versant, mais aussi une grande hauteur de ruissellement. Il faut donc un bassin imperméable, à ruissellement rapide et à grande pluviosité. Si on ajoute à ces conditions celles relatives au site propre d'un barrage, essentielles pour son économie, on comprend comme le choix du site d'un barrage de réservoir est essentiel et combien la recherche en est importante et demande des prospections étendues et approfondies, géologiques et géotechniques.

Du côté des sorties, il importe de porter au maximum le débit turbiné. Il faut réduire le plus possible les pertes. On n'envisage pas ici surtout les pertes du barrage, qui doivent toujours être assez réduites, par raison de sécurité. Il est désirable qu'elles puissent s'exprimer en litres par seconde. Si elles atteignent l'ordre de grandeur de m^3 par sec, il est utile d'en

rechercher les causes, généralement localisées, et de chercher à y remédier, par des injections le plus souvent.

Mais il y a les pertes par évaporation du plan d'eau, qui dépendent du climat et les pertes par infiltration éventuelles par le terrain du réservoir. Il faut de toute évidence rechercher pour les réservoirs des terrains très imperméables. Par exemple, le niveau inférieur d'affleurements perméables limitera la retenue maximum, à moins que ces affleurements peu puissants et peu profonds puissent être recoupés par la fondation et les ancrages latéraux du barrage dans toute leur étendue. D'une manière générale, on peut dire que le barrage doit s'encastrier dans un terrain imperméable en recoupant toutes les couches perméables affleurant dans l'étendue du réservoir.

Il est superflu d'insister sur le caractère essentiel de ces questions. Il va de soi qu'avant de créer un lac artificiel, il faut s'assurer qu'il puisse être rempli.

Il y a cependant des cas d'alimentation insuffisante, surtout pour les centrales de haute chute, dont les bassins sont peu étendus. Dans ce cas, il arrive que l'on refoule par pompage dans le lac accumulateur des eaux de lacs ou de torrents voisins situés à un niveau inférieur. Ces débits de pompage s'ajoutent aux apports naturels, mais on comprend qu'ils compliquent le bilan hydraulique, car celui-ci interfère désormais avec le bilan énergétique ou électrique. On pourrait encore affecter ces débits de pompage d'un facteur de réduction dépendant de la hauteur nette de refoulement et de la hauteur nette de chute, mais ceci s'applique au bilan énergétique plutôt qu'un bilan hydraulique.

L'accumulation par pompage ne résultera pas seulement d'un manque d'eau, mais éventuellement d'un excès d'énergie d'une autre usine, par exemple d'une usine de basse chute, travaillant à toute époque au maximum de ses possibilités, même si elles

dépassent la consommation. L'excès disponible d'énergie est utilisé à élever de l'eau, de préférence dans le réservoir d'une usine de moyenne ou de haute chute interconnectée avec l'usine de base. Il y a donc en général un transport d'énergie à longue distance. Le rendement global de l'opération est assez médiocre, mais comme elle peut fournir de l'énergie de pointe, elle peut être rémunératrice. Il est exceptionnel que l'accumulation par pompage se fasse dans une installation spéciale. Une circonstance particulière, l'existence de deux petits lacs naturels étagés, a permis l'établissement d'une usine spéciale de 100.000 kVA au niveau du Lac Noir et qui refoule dans le Lac Blanc, par le moyen d'énergie excédentaire qui lui vient de la centrale de basse chute de Kembs (Haut-Rhin). La chute brute maximum entre les deux lacs est 128,00 m ; ils ne sont distants que d'un kilomètre. La chute peut descendre jusqu'à 91,00 m environ.

Le bilan permanent d'un lac correspond au problème du mouvement de l'eau dans les réservoirs. La solution grapho-analytique de ce problème a été exposée dans le Tome II (Les principes de l'emmagasinement des eaux de distribution) dans le cas où les débits sortants sont connus en fonction du temps. On peut considérer que ceci est réalisé lorsque les déversoirs ne fonctionnent pas.

Lorsque les déversoirs fonctionnent seuls et qu'ils sont libres, non réglés, le débit sortant est fonction du niveau du plan d'eau du lac. C'est aussi le cas d'un lac naturel sans ouvrage régulateur. Le problème peut recevoir alors une solution graphique différente, qui ne sera pas exposée, faute de place. Elle est d'ailleurs d'application peu fréquente, le problème pouvant généralement être considéré sous l'angle exposé dans le volume II (*).

(*) F. CAMPUS «Les principes de l'emmagasinement des eaux de distribution». LIVRE DE L'EAU, vol. II, pp. 135-214.

ORGANES HYDRAULIQUES

Outre les dispositifs d'adduction à la centrale : dérivations à ciel ouvert ou souterraines mais à niveau libre, galeries sous pression et conduites forcées, avec leurs cheminées d'équilibre ou châteaux d'eau, il y a lieu de considérer encore les déversoirs, les prises d'eau et les vidanges.

Les *déversoirs* sont des organes de sécurité indispensables pour éviter une élévation excessive de la retenue. Ils doivent être établis en vue de permettre l'écoulement du débit maximum possible en amont du barrage. L'efficacité du réglage du niveau sera améliorée par un déversoir profond contrôlé par une vanne automatique ou non, ou par des siphons auto-amorceurs. Des dispositions adéquates dissiperont l'énergie de l'eau déversée pour éviter les affouillements au pied de l'ouvrage ou bien le canal qui les contient aboutira assez loin en aval.

Les *ouvrages de prise d'eau* à niveau libre comportent un seuil supportant les grilles, puis les vannes de réglage, éventuellement un bassin décanteur avec trop-plein et pertuis de purge. Les prises d'eau en charge sont généralement profondes ; elles définissent le plan de niveau inférieur de la capacité utile. Elles peuvent comporter des grilles à l'extrémité amont, avec une fermeture de secours pourvue d'un by-pass d'équilibrage (et de remplissage). Ces organes sont au parement amont d'un barrage. La vanne de réglage est au parement aval et accessible.

Quant à la *vidange*, elle se trouve à la base d'un barrage et elle est commandée par une vanne accessible au parement aval. Un point important concerne la dissipation de l'énergie du jet.

ENGRAVEMENT, DEGRAVEMENT, DECANTATION

Le débit solide est très variable selon les circonstances hydrologiques, en quantité et en nature. L'engrèvement des lacs naturels et artificiels est plus ou moins rapide, mais inévitable à la longue. Les pertuis de chasse sont inopérants pour les grands barrages, peu efficaces mêmes pour les usines en rivière, où on les dispose dans le barrage en position contiguë à l'usine, précédés d'un long seuil saillant oblique.

Dans les rivières torrentielles sans barrage de réservoir, des bassins de dégrèvement peuvent être disposés en amont des prises d'eau. En aval, on établira encore des bassins de décantation ou des dessableurs. Ces dispositifs entraînent à la fois une perte de chute et une perte de débit ; leur dimensionnement exact n'est pas aisé et résultera finalement d'un compromis.
