DEUXIÈME PARTIE

LES MOTEURS HYDRAULIQUES

CHAPITRE PREMIER

LÉGISLATION DES COURS D'EAU

Toutes les fois que l'on dispose d'un cours d'eau dont le débit est suffisamment constant pendant toute l'année, on peut songer à l'utiliser pour se procurer la force motrice.

La première chose à faire est de s'assurer des conditions légales dans lesquelles cet emploi du cours d'eau pourra être fait ; il s'agit d'obtenir l'autorisation préfectorale conformément à la loi sur le régime des eaux, qui est reproduite ci-après.

Il faut ensuite se rendre compte du *débit* du cours d'eau et de la *hauteur de chute* que l'on pourra obtenir ; avec ces deux éléments, on aura une indication certaine de la puissance motrice que ce cours d'eau peut fournir.

Nous allons indiquer des moyens simples pour déterminer ces renseignements, indispensables avant d'entreprendre des travaux quelconques.

Lois et Règlements sur la police des eaux.

CODE CIVIL

ART. 640. — Les fonds inférieurs sont assujettis envers ceux qui sont plus élevés, à recevoir les eaux qui en découlent naturellement, sans que la main de l'homme y ait contribué.

Le propriétaire inférieur ne peut point élever de digue qui empêche cet écoulement.

Le propriétaire supérieur ne peut rien faire qui aggrave la servitude du fonds inférieur.

LOI SUR LE RÉGIME DES EAUX
(8 avril 1898).

Titre premier

Eaux pluviales et sources.

Article premier. — Les articles 641, 642 et 643 du Code Civil sont remplacés par les dispositions suivantes :

Art. 641. — Tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds.

Si l'usage de ces eaux, ou la direction qui leur est donnée, aggrave la servitude naturelle d'écoulement établie par l'article 640, une indemnité est due au propriétaire du fonds inférieur.

La même disposition est applicable aux eaux des sources nées sur un fonds.

Lorsque par des sondages ou des travaux souterrains, un propriétaire fait surgir des eaux dans son fonds, les propriétaires des fonds inférieurs doivent les recevoir ; mais ils ont droit à une indemnité en cas de dommage résultant de leur écoulement.

Les maisons, cours, jardins, parcs et enclos attenant aux habitations, ne peuvent être assujettis à aucune aggravation de la servitude d'écoulement dans les cas prévus par les paragraphes précédents.

Les contestations auxquelles peuvent donner lieu l'établissement et l'exercice des servitudes prévues par ces paragraphes et le règlement, s'il y a lieu, des indemnités dues aux propriétaires des fonds inférieurs sont portées, en premier ressort, devant le juge de paix du canton, qui en prononçant, doit concilier les intérêts de l'agriculture et de l'industrie avec le respect dû à la propriété.

S'il y a lieu à expertise, il ne peut être nommé qu'un expert.

Art. 642. — Celui qui a une source dans son fonds peut toujours user des eaux à sa volonté, dans les limites et pour les besoins de son héritage.

Le propriétaire d'une source ne peut plus en user au préjudice des propriétaires des fonds inférieurs qui, depuis plus de trente ans, ont fait et terminé, sur le fonds où jaillit la source, des ouvrages apparents et permanents destinés à utiliser les eaux ou à en faciliter le passage dans leur propriété.

Il ne peut pas non plus en user de manière à enlever aux habitants d'une commune, d'un village ou hameau, l'eau qui leur est nécessaire ; mais si les habitants n'en ont pas acquis ou prescrit l'usage, le propriétaire peut réclamer une indemnité, laquelle est réglée par experts.

Art. 643. — Si, dès la sortie des fonds où elles surgissent, les eaux de sources forment un cours d'eau offrant le caractère d'eaux publiques et courantes, le propriétaire ne peut les détourner de leur cours naturel au préjudice des usagers inférieurs.

Titre II

Cours d'eau non navigables et non flottables.

Chapitre premier.

Des droits des riverains.

Art. 2. — Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héritages que dans les limites déterminées par la loi.

Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, aux dispositions des règlements et des autorisations émanées de l'administration.

Art. 3. — Le lit des cours d'eau non navigables et non flottables appartient aux propriétaires des deux rives.

Si les deux rives appartiennent à des propriétaires différents, chacun d'eux a la propriété de la moitié du lit, suivant une ligne que l'on suppose tracée au milieu du cours d'eau, sauf titre ou prescription contraire.

Chaque riverain a le droit de prendre, dans la partie du lit qui lui appartient, tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres, à la condition de ne pas modifier le régime des eaux et d'en exécuter le curage conformément aux règles établies par le chapitre III du présent titre.

Sont et demeurent réservés les droits acquis par les riverains ou autres intéressés sur les parties des cours d'eau qui servent de voie d'exploitation pour la desserte de leurs fonds.

Art. 4. — Lorsque le lit d'un cours d'eau est abandonné soit naturellement, soit par suite de travaux légalement exécutés, chaque riverain en reprend la libre disposition suivant les limites déterminées par l'article précédent.

Art. 5. — Lorsqu'un cours d'eau non navigable et non flottable abandonne naturellement son lit, les propriétaires des fonds sur les-

quels le nouveau lit s'établit sont tenus de souffrir le passage des eaux sans indemnité.

Mais ils peuvent, dans l'année qui suit le changement de lit, prendre les mesures nécessaires pour rétablir l'ancien cours des eaux.

Les propriétaires, riverains du lit abandonné, jouissent de la même faculté et peuvent, dans l'année, poursuivre l'exécution des travaux nécessaires au rétablissement du cours primitif.

Art. 6. — Lorsque, par suite de travaux légalement ordonnés, il y a lieu d'élargir le lit ou d'en ouvrir un nouveau, les propriétaires des terrains occupés ont droit à une indemnité à titre de servitude de passage.

Pour la fixation de cette indemnité, il sera tenu compte de la situation respective de chacun des riverains par rapport à l'axe du niveau du lit, la limite des héritages demeurant fixée conformément aux dispositions du paragraphe 2 de l'article 3 ci-dessus, à moins de stipulations contraires.

Les bâtiments, cours et jardins attenants aux habitations sont exempts de la servitude de passage.

Les contestations auxquelles peuvent donner lieu l'application du paragraphe 2 du présent article et le règlement des indemnités sont jugés en premier ressort par le juge de paix du canton.

S'il y a lieu à expertise, il peut, dans tous les cas, n'être nommé qu'un seul expert.

Art. 7. — La propriété des alluvions, relais, atterrissements, îles et îlots qui se forment dans les cours d'eau non navigables et non flottables est et demeure régie par les dispositions des articles 556, 557, 559, 561 et 562 du Code civil.

Chapitre II

Police et conservation des eaux.

Art. 8. — L'autorité administrative est chargée de la conservation et de la police des cours d'eau non navigables et non flottables.

Art. 9. — Des décrets rendus après enquête dans la forme des règlements d'administration publique fixent, s'il y a lieu, le régime général de ces cours d'eau, de manière à concilier les intérêts de l'agriculture et de l'industrie avec le respect dû à la propriété et aux droits antérieurement établis.

Art. 10. — Le propriétaire riverain d'un cours d'eau non navigable et non flottable ne peut exécuter des travaux au-dessus de ce cours d'eau et le joignant qu'à la condition de ne pas préjudicier à l'écoulement et de ne causer aucun dommage aux propriétés voisines.

Art. 11. — Aucun barrage, aucun ouvrage destiné à l'établissement d'une prise d'eau, d'un moulin ou d'une usine ne peut être entrepris dans un cours d'eau non navigable et non flottable sans l'autorisation de l'administration.

Art. 12. — Les Préfets statuent après enquête sur les demandes ayant pour objet :

1° L'établissement d'ouvrages intéressant le régime ou le mode d'écoulement des eaux ;

2° La régularisation de l'existence des usines et ouvrages établis sans permission et n'ayant pas de titre légal ;

3° La révocation ou la modification des permissions précédemment accordées.

La forme de l'instruction qui doit précéder les arrêtés des préfets est déterminée par un règlement d'administration publique.

Art. 13. — S'il y a réclamation des parties intéressées contre l'arrêté du préfet, il est statué par un décret rendu sur l'avis du Conseil d'Etat, sans préjudice du recours contentieux en cas d'excès de pouvoir.

Art. 14. — Les permissions peuvent être révoquées ou modifiées sans indemnité, soit dans l'intérêt de la salubrité publique, soit pour prévenir ou faire cesser les inondations, soit enfin dans le cas de la réglementation générale, prévue par l'article 9.

Dans tous les autres cas, elles ne peuvent être révoquées ou modifiées que moyennant indemnité.

Art. 15. — Les propriétaires ou fermiers de moulins et usines, même autorisés et ayant une existence légale, sont garants des dommages causés aux chemins et aux propriétés.

Art. 16. — Les maires peuvent, sous l'autorité des préfets, prendre toutes les mesures nécessaires pour la police des cours d'eau.

Chapitre III

Curage, élargissements et redressements.

Art. 17. — Dans tous les cas, les droits des tiers sont et demeurent réservés.

Art. 18. — Le curage comprend tous les travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelles, sans préjudice de ce qui est réglé à l'égard des alluvions par les articles 556 et 557 du Code civil.

Art. 19. — Il est pourvu au curage des cours d'eau non navigables et non flottables et à l'entretien des ouvrages qui s'y rattachent, de la manière prescrite par les anciens règlements ou d'après les usages locaux.

Les préfets sont chargés, sous l'autorité du ministre compétent, de prendre les dispositions nécessaires pour l'exécution de ces règlements ou usages.

Art. 20. — A défaut d'anciens règlements ou usages locaux, ou si l'application des règlements et l'exécution du mode de curage consacré par l'usage présentent des difficultés, ou bien encore si les changements survenus exigent des dispositions nouvelles, il est procédé en conformité de la loi des 24 juin 1865, 22 décembre 1888 sur les associations syndicales.

Art. 21. — Dans le cas où les tentatives faites en vue d'arriver à la constitution d'une association syndicale libre ou autorisée n'aboutiraient pas, il est statué par un décret délibéré en Conseil d'Etat ; chaque décret est précédé d'une enquête et d'une instruction dont les formes sont déterminées par un règlement d'administration publique.

Art. 22. — Le décret règle le mode d'exécution des travaux, détermine la zone dans laquelle les propriétaires intéressés, riverains ou non riverains et usiniers peuvent être appelés à y contribuer, et arrête, s'il y a lieu, les bases générales de la répartition de la dépense d'après le degré d'intérêt de chacun à l'exécution des travaux.

Art. 23. — Dans tous les cas, les rôles de répartition des sommes nécessaires au paiement des travaux de curage ou d'entretien des ouvrages sont dressés sous la surveillance du préfet et rendus exécutoires par lui.

Le recouvrement est fait dans les mêmes formes et avec les mêmes garanties qu'en matière de contributions directes.

Le privilège ainsi créé prendra rang immédiatement après celui du Trésor public.

Art. 24. — Toutes les contestations relatives à l'exécution des travaux, à la répartition de la dépense et aux demandes en réduction ou décharge formées par les imposés sont portées devant le conseil de préfecture, sauf recours au Conseil d'Etat.

Art. 25. — Les travaux d'élargissement, de régularisation et de redressement des cours d'eau non navigables et non flottables, qui seront jugés nécessaires pour compléter les travaux de curage, sont assimilés à ces derniers, et leur exécution est poursuivie en vertu des articles précédents.

Art. 26. — S'il s'agit de terrains exceptés de la servitude de passage et si, à défaut d'accord, il est nécessaire de recourir à l'expropriation, il est procédé à cette expropriation et au règlement des indemnités conformément aux dispositions combinées de la loi du 3 mai 1841 et des paragraphes 2 et suivants de l'article 16 de la loi du 21 mai 1836.

Art. 27. — Pendant la durée des travaux, les propriétaires sont tenus de laisser passer sur leurs terrains les fonctionnaires et agents chargés de la surveillance, ainsi que les entrepreneurs et ouvriers.

Ce droit devra s'exercer autant que possible en suivant la rive du cours d'eau.

Art. 28. — Si les travaux de curage, d'élargissement, de régularisation et de redressement intéressent la salubrité publique, le décret ou l'arrêté qui les ordonne peut, après avis du Conseil général et des Conseils municipaux intéressés, mettre une partie de la dépense à la charge des communes dont le territoire est assaini.

Dans ce cas, le décret ou l'arrêté détermine quelles sont les communes intéressées et fixe la part que chacune d'elles doit supporter dans la dépense.

Art. 29. — La loi du 14 floréal an XI est abrogée.

Titre III

Des rivières flottables à bûches perdues.

Art. 30. — Les rivières et cours d'eau flottables à bûches perdues sont soumis aux dispositions contenues dans le titre précédent et aux dispositions spéciales suivantes.

Art. 31. — Le flottage à bûches perdues ne peut être établi, sur les cours d'eau où il n'existe pas actuellement, que par un décret rendu après enquête et avis des conseils généraux des départements traversés par ces cours d'eau. Ce décret sera inséré au *Bulletin des lois*.

Le décret détermine les servitudes nécessaires pour l'exercice du flottage et règle les obligations respectives des propriétaires riverains, des usiniers et des flotteurs.

Art. 32. — L'indemnité due à raison de ces servitudes est fixée en premier ressort par le juge de paix du canton.

Il est tenu compte, dans le règlement de cette indemnité, des avantages qui peuvent résulter de l'établissement du flottage.

Art. 33. — Sont maintenus, tant qu'ils n'auront pas été revisés conformément aux articles 31 et 32 ci-dessus, tous les règlements spéciaux relatifs aux rivières et cours d'eau sur lesquels se pratiquent les flottages à bûches perdues.

Titre IV

Des fleuves et rivières navigables ou flottables.

Chapitre premier.

Des droits du domaine et des riverains.

Art. 34. — Les fleuves et les rivières navigables ou flottables avec

bateaux, trains ou radeaux, font partie du Domaine public depuis le point où ils commencent à être navigables ou flottables jusqu'à leur embouchure.

Font également partie du domaine public :

1° Les bras même non navigables et non flottables, lorsqu'ils prennent naissance au-dessous du point où les fleuves et rivières commencent à être navigables ou flottables.

2° Les noues et boires qui tirent leurs eaux des mêmes fleuves et rivières.

Art. 35. — Les dérivations ou prises d'eau artificielles établies dans des propriétés particulières ne font pas partie du domaine public, à moins qu'elles n'aient été pratiquées par l'Etat, dans l'intérêt de la navigation ou du flottage.

Ces dérivations sont régies par les dispositions des actes qui les ont autorisées.

Art. 36. — Des arrêtés préfectoraux, rendus après enquêtes, sous l'approbation du Ministre des Travaux publics, fixeront les limites des fleuves et rivières navigables et flottables, ces limites étant déterminées par la hauteur des eaux coulant à pleins bords avant de déborder.

Les arrêtés de délimitation pourront être l'objet d'un recours contentieux. Ils seront toujours pris sous la réserve des droits de propriétés.

Art. 37. — L'article 563 du Code civil est abrogé et remplacé par les dispositions suivantes :

« Art. 563. — Si un fleuve ou une rivière navigable ou flottable se forme un nouveau cours en abandonnant son ancien lit, les propriétaires riverains peuvent acquérir la propriété de cet ancien lit, chacun en droit soi, jusqu'à une ligne qu'on suppose tracée au milieu de la rivière. Le prix de l'ancien lit est fixé par des experts nommés par le président du tribunal de la situation des lieux, à la requête du Préfet du département.

« A défaut par les propriétaires riverains de déclarer, dans les trois mois de la notification qui leur sera faite par le Préfet, l'intention de faire l'acquisition aux prix fixés par les experts, il est procédé à l'aliénation de l'ancien lit selon les règles qui président aux aliénations du domaine de l'Etat.

« Le prix provenant de la vente est distribué aux propriétaires des fonds occupés par le nouveau lit, à titre d'indemnité dans la proportion de la valeur du terrain enlevé à chacun d'eux. »

Art. 38. — Lorsque, à la suite de travaux légalement exécutés, des portions de l'ancien lit cesseront de faire partie du domaine public, les propriétaires riverains pourront exercer le droit de préemption, conformément à l'article 37 qui précède.

Art. 39. — La propriété des alluvions, relais, atterrissements, îles et îlots qui se forment naturellement dans les fleuves et rivières, faisant partie du domaine public, est et demeure réglée par les dispositions des articles 556, 557, 560 et 562 du Code civil.

Chapitre II.

Des concessions et autorisations.

Art. 40. — Aucun travail ne peut être exécuté et aucune prise d'eau ne peut être pratiquée dans les fleuves et rivières navigables et flottables sans autorisation de l'Administration.

Art. 41. — Les préfets statuent, après enquête et sur l'avis des ingénieurs, et sauf recours au ministre, sur les demandes ayant pour objet de faire des prises d'eau au moyen de machines, lorsqu'il est constaté que, eu égard au volume des cours d'eau, elles n'auront pas pour effet d'en altérer le régime.

Art. 42. — Ils statuent également sur l'avis des ingénieurs, sauf recours au ministre, sur les demandes en autorisation d'établissements temporaires sur les cours d'eau navigables ou flottables, alors même que ces établissements auraient pour effet de modifier le régime ou le niveau des eaux.

Ils fixent, dans ces cas, la durée de l'autorisation, qui ne devra jamais dépasser deux ans.

Art. 43. — Toutes autres autorisations ne peuvent être accordées que par décrets rendus, après enquête, sur l'avis du Conseil d'Etat.

Art. 44. — Les concessionnaires sont assujettis à payer une redevance à l'Etat, d'après les bases qui seront fixées par un règlement d'administration publique.

Art. 45. — Les prises d'eau et autres établissements créés sur les cours d'eau navigables ou flottables, même avec autorisation, peuvent toujours être modifiés ou supprimés. Une indemnité n'est due que lorsque les prises d'eau ou établissements dont la modification ou la suppression est ordonnée ont une existence légale.

Toutefois, aucune suppression ou modification ne pourra être prononcée que suivant les formes et avec les garanties établies par les articles précédents.

Chapitre III.

Des servitudes.

Art. 46. — Les propriétaires riverains des fleuves ou rivières navi-

gables ou flottables sont tenus, dans l'intérêt du service de la navigation et partout où il existe un chemin de halage, de laisser le long des bords desdits fleuves et rivières, un espace libre de 7 m. 80 de largeur.

Ils ne peuvent planter d'arbres ni se clore par des haies ou autrement qu'à une distance de 9 m. 75 du côté où les bateaux se tirent et de 3 m. 25 sur le bord où il n'existe pas de chemins de halage.

Art. 47. — Lorsque l'intérêt du service de la navigation le permettra, les distances fixées par l'article précédent seront réduites par un arrêté ministériel.

Art. 48. — Les propriétaires riverains qui veulent faire des constructions, plantations ou clôtures, le long des fleuves ou rivières navigables ou flottables peuvent, au préalable, demander à l'administration de reconnaître la limite de la servitude.

Si, dans les trois mois à compter de la demande, l'administration n'a pas fixé la limite, les constructions, plantations ou clôtures faites par les riverains ne peuvent plus être supprimées que moyennant indemnité.

Art. 49. — Lorsqu'une rivière ou partie de rivière est rendue navigable ou flottable et que ce fait a été déclaré par un décret, les propriétaires riverains sont soumis aux servitudes établies par l'article 46 ; mais il leur est dû une indemnité proportionnée au dommage qu'ils éprouvent, en tenant compte des avantages que l'établissement de la navigation ou du flottage peut leur procurer.

Les propriétaires riverains d'une rivière navigable ou flottable auront également droit à une indemnité lorsque, pour les besoins de la navigation, la servitude de halage sera établie sur une rive où cette servitude n'existait pas.

Art. 50. — Les contestations relatives à l'indemnité due aux propriétaires, à raison de l'établissement de la servitude de halage, sont jugées en premier ressort par le juge de paix du canton.

S'il y a expertise, il ne peut être nommé qu'un seul expert.

Art. 51. — Dans le cas où l'administration juge que la servitude de halage est insuffisante et veut établir le long du fleuve ou de la rivière un chemin dans des conditions constantes de viabilité, elle doit, à défaut du consentement exprès des riverains, acquérir le terrain nécessaire à l'établissement du chemin, en se conformant aux lois sur l'expropriation pour cause d'utilité publique.

Art. 52. — Il est interdit d'extraire, sans autorisation spéciale, des terres, sables et autres matières à une distance moindre de 11 m. 70 de la limite des fleuves et rivières navigables ou flottables.

Le curage des cours d'eau navigables ou flottables et de leurs dépendances faisant partie du domaine public est à la charge de l'Etat. Néanmoins, un règlement d'administration publique peut, les parties intéressées entendues, appeler à contribuer au curage les communes, les usiniers, les concessionnaires des prises d'eau et les propriétaires voisins qui, par l'usage exceptionnel et spécial qu'ils font des eaux, rendent les frais du curage plus considérables.

L'utilisation des forces naturelles des cours d'eau est régie par la loi du 16 octobre 1919 insérée dans le *Journal officiel* du 18 octobre 1919.

CHAPITRE II

DÉTERMINATION DU DÉBIT D'EAU

1° **Par mesurage direct.** — Si le cours d'eau est très peu important, on peut évaluer approximativement son débit en mesurant combien de temps il met à remplir un vase de capacité connue, un tonneau de 220 l. par exemple.

Pour cela, il sera souvent nécessaire de barrer le cours d'eau et d'attendre que la chute, ainsi déterminée, ait acquis son débit normal, ce qui demandera plusieurs heures, surtout si la pente est faible et que le bief d'amont ait une grande surface. Quand on jugera que le bief d'amont formé par le barrage est bien rempli et que la chute d'eau correspond au débit ordinaire du cours d'eau, on fera le mesurage en plaçant le tonneau vide sous la chute et en comptant, avec une montre à trotteuse donnant le cinquième de seconde, le temps que le tonneau mettra pour s'emplir. On répétera plusieurs fois l'expérience et on fera la moyenne des résultats obtenus ; si le tonneau de 220 l. a mis sept secondes deux cinquièmes pour s'emplir, on en déduira que le débit par seconde est de :

$$\frac{220}{37} \times 5 = \text{environ 29 l. et demi par seconde}$$

(37 étant le nombre de cinquièmes de seconde de sept secondes deux cinquièmes).

On pourra aussi opérer en dérivant le cours d'eau par un petit canal latéral dans un tonneau enfoncé dans le sol, l'ouverture du canal de dérivation étant faite au moment même où l'on barrera le cours d'eau avec une planche ou des mottes de terre.

On voit que ces procédés ne sauraient s'appliquer dès que le débit dépasse quelques dizaines de litres par seconde.

Au-dessus de ces très petits débits, on emploiera l'une des méthodes suivantes :

2° **Jaugeage par flotteurs.** — On choisit une portion du cours d'eau dans laquelle la largeur et la profondeur sont aussi constantes que possible et on détermine, aussi exactement que l'on peut, la profondeur moyenne dans cette portion du lit, la largeur à la surface et la largeur au fond, de manière à pouvoir établir la surface ou aire d'une section de la nappe d'eau par un plan perpendiculaire à sa direction.

Supposons que l'on ait trouvé :
Profondeur moyenne 1 m. 50 ;
Largeur à la surface de l'eau 2 m. ;
Largeur au fond 1 m. 20 ;
On aura pour l'aire cherchée :

$$\frac{2 \text{ m.} + 1 \text{ m. } 20}{2} \times 1 \text{ m. } 50 = 2 \text{ m}^2\ 40.$$

Connaissant cette surface de 2 m² 40 dm², il nous suffira de connaître la vitesse du courant d'eau pour obtenir son débit en mètres cubes par seconde.

On prendra pour cela un flotteur, planche de sapin, liège ou bouteille vide que l'on abandonnera au fil de l'eau sur la longueur de la portion du cours d'eau choisie pour l'expérience et dont on aura mesuré soigneusement la longueur.

On comptera le nombre de secondes que le flotteur mettra pour parcourir la distance mesurée. Supposons que le flotteur ait mis 78 secondes pour parcourir 145 m.

$$145 : 78 = 1 \text{ m. } 86.$$

Etant donné que la vitesse de l'eau est moins grande sur les bords et au fond qu'à la surface, on prendra les trois quarts du résultat trouvé, pour obtenir **approximativement la vitesse moyenne** du cours d'eau, soit dans l'exemple ci-dessus :

$$\frac{1,86}{4} \times 3 = 1 \text{ m. } 39 \text{ par seconde.}$$

Nous trouverons le débit en mètres cubes par seconde en multipliant la vitesse de la masse liquide par la section du cours d'eau, soit 2 m. 40 × 1 m. 39 = 3 m³ 336 l.

On voit combien ce procédé est simple et facile à appliquer quand on peut expérimenter sur une assez grande longueur d'un cours d'eau et surtout quand les berges sont assez régulières.

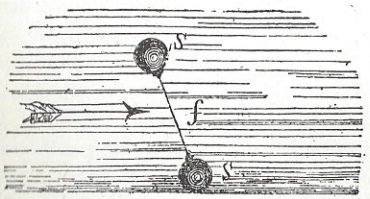


Fig. 41. — Jaugeage par flotteur.

Pour faire ce mesurage par flotteur subissant la vitesse du courant à la surface en même temps qu'en profondeur, on emploie un appareil composé de deux sphères creuses, figure 41, dont une est **lestée** de façon qu'il se tienne verticalement dans l'eau ; on a ainsi la vitesse moyenne de la nappe d'eau.

Le jaugeage par **ondes colorées** est un procédé dérivé de celui par flotteur : on verse en amont une liqueur colorante dans le cours d'eau (généralement de la fuchsine) et on attend en aval, à une distance mesurée d'avance, le passage de l'eau colorée ; du temps écoulé on déduit la vitesse du courant d'eau.

3° **Jaugeage par tubes de Pitot.** — Cet instrument est destiné à mesurer les vitesses des courants liquides.

Il se compose essentiellement de deux tubes de verre verticaux fixés sur une planchette de bois et communiquant entre eux à leurs parties supérieures par un tube métallique (figure 42).

Leurs parties inférieures, également métalliques, sont recourbées à 90° et terminées l'une par un **ajutage statique**, l'autre par un **ajutage dynamique**.

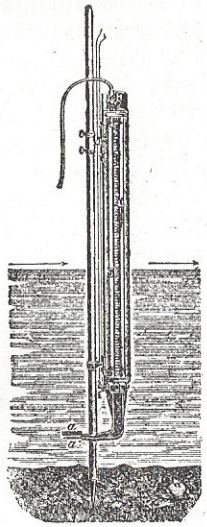


Fig. 42.
Tubes de Pitot.

L'instrument se fixe, pour les expériences, à une tige de fer autour de laquelle, grâce au système d'attache, il peut librement tourner. Il s'oriente ainsi de lui-même parallèlement au courant de sorte que les orifices inférieurs a et a' se présentent toujours face au fil de l'eau.

Les orifices des tubes de métal sont à quelque distance en avant de la tige, afin que le remous créé par celle-ci n'influence pas le courant à l'endroit des ajutages.

L'un de ceux-ci est ouvert perpendiculairement à la direction du courant, l'autre est, au contraire, ouvert

parallèlement à celui-ci. De plus, il est placé au milieu d'un petit manchon spécial assez long pour forcer les filets d'eau à passer parallèlement à l'orifice. Cette addition, due à Ritter, a pour effet d'éliminer les actions des filets obliques et par ce moyen de mesurer exactement la **pression statique** (voir *Volume XIV*).

La **pression dynamique**, ou pression vive, est donnée par l'ajutage qui recoit directement le courant.

Le niveau du liquide, dans le tube communiquant avec l'ajutage statique, est exactement celui du liquide dans lequel l'appareil est plongé, tandis que le niveau dans le tube correspondant à l'ajutage dynamique sera plus élevé par suite de l'action de la vitesse du courant.

Une échelle en cuivre, divisée en centimètres, est placée entre les deux tubes de façon à permettre la lecture des hauteurs de liquide dans chacun d'eux. C'est la différence de niveau dans les deux tubes qui sert à déterminer la vitesse du courant par application de la formule :

$$V = \sqrt{2gH}$$

dans laquelle g est l'intensité de la pesanteur (à Paris 9 m. 81) et H la différence de niveau observée.

Il est à remarquer que la formule ci-dessus est tirée de la formule générale de Toricelli :

$$V = K\sqrt{2gH}$$

dans laquelle la constante K est réduite à l'unité.

C'est la disposition spéciale de l'ajutage statique de Ritter qui permet cette simplification de calculs et qui évite la détermination toujours difficile du coefficient.

Cette propriété présente une grande importance, car elle permet d'utiliser le tube de Pitot ainsi modifié

comme un véritable étalon à l'aide duquel on peut tarer tous les autres instruments.

Pour déterminer la vitesse d'un courant, on fixe l'instrument à une tige de fer et on le descend dans l'eau jusqu'à ce que les orifices des tubes soient à la profondeur dont on désire connaître la vitesse.

L'appareil s'oriente alors parallèlement au courant. On ouvre le robinet E, en tirant l'un des cordons, l'eau prend alors son niveau dans les tubes ; lorsqu'il est bien établi, on tire le second cordon qui ferme le robinet et on retire l'instrument de l'eau.

On lit alors sur l'échelle, les hauteurs des deux colonnes liquides, soient, h et h'. La vitesse cherchée est alors facile à déterminer.

$$V = \sqrt{2g(h - h')}.$$

Application.

Soit : $h = 0{,}514$, $h' = 0{,}495$ } On en déduit : $H = 0{,}514 - 0{,}495 = 0{,}019$

d'où :

$$V = \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 0{,}019}.$$

Il arrive souvent que lorsqu'on veut déterminer la vitesse d'un courant, l'instrument doit être entièrement immergé dans l'eau. Il aurait fallu alors faire usage de tubes d'une très grande longueur, mais la modification due à *Darcy* y supplée en permettant de comprimer, par le robinet supérieur, de l'air dans les deux tubes.

Ces tubes communiquent entre eux par leur partie supérieure ; il en résulte que la différence de niveau dans les deux colonnes liquides n'est pas changée, malgré la

pression qui s'exerce au-dessus d'elles, puisque cette pression est la même dans les deux tubes.

La même difficulté se présente quand il s'agit de mesurer la vitesse de l'eau à sa surface : on aspire alors l'air contenu dans les tubes afin d'élever le niveau de l'eau au-dessus du robinet inférieur E.

4° **Jaugeage par moulinets hydrométriques.** — Lorsque

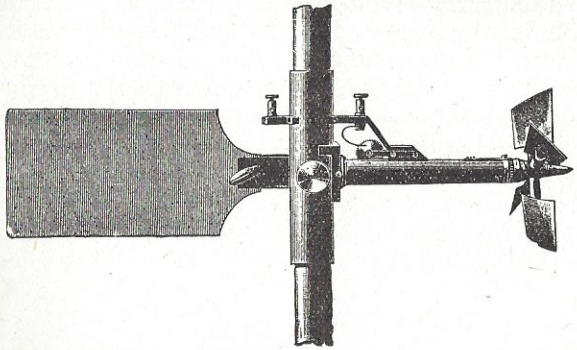


Fig. 43. — Moulinet de Woltmann.

les vitesses sont faibles, le tube de Pitot peut ne pas donner une exactitude suffisante parce que les dénivellations que l'on observe sont trop petites.

Il est alors préférable d'utiliser les **moulinets hydrométriques,** qui, au contraire, seraient d'un emploi difficile pour déterminer des grandes vitesses ou quand le courant entraîne des détritus, feuilles, etc., qui viendraient arrêter le mouvement des ailettes de l'instrument.

Le moulinet se compose d'une roue à ailettes actionnant un compteur et d'un gouvernail. Plongé dans l'eau, il s'oriente dans la direction du courant et donne sous

l'action de celui-ci la vitesse rotative proportionnelle à la vitesse du courant (fig. 43).

Dans les appareils à compteur mécanique on observe le nombre de tours que la roue à ailettes a fait pendant un temps donné : une minute par exemple. Dans les appareils à signal électrique on détermine le temps écoulé entre deux signaux, c'est-à-dire le temps nécessaire pour un nombre fixe de tours de la roue à ailettes.

Dans les deux cas, on obtient la vitesse du courant en reportant les chiffres obtenus dans une formule spéciale.

La vitesse du courant ainsi obtenue est la moyenne des vitesses pendant le temps de l'observation.

L'ancien *moulinet de Woltmann* n'avait que deux palettes inclinées ; le moulinet de *Baumgarten* a quatre palettes hélicoïdales.

Le **compteur est embrayé** au moyen d'une ficelle qui sert aussi à le débrayer après un temps donné d'observation ; on retire alors l'appareil de l'eau pour lire le nombre des tours faits par l'hélice.

L'expérience est renouvelée plusieurs fois au même endroit, mais au fond, au milieu et à la surface du liquide. On fait la moyenne des résultats ainsi obtenus sur une même tranche du cours d'eau et on prend ce chiffre pour la vitesse de l'eau à cet endroit. Cette vitesse, multipliée par la surface de la tranche liquide expérimentée, donne le débit du cours d'eau.

5° **Jaugeage par déversoir.** — On commencera par barrer le cours d'eau sur toute sa largeur au moyen d'un *bâtardeau* ou d'un barrage en madriers et en mottes de terre si la largeur et la profondeur sont peu importantes. Au sommet du barrage on disposera une planche offrant sur toute la longueur du barrage une arête vive parfaitement **horizontale,** par dessus laquelle l'eau se déversera en formant une petite chute. Les deux côtés

de la chute seront limités par des planches verticales, comme le montre la figure 44, de manière que la nappe d'eau qui s'écoulera par le déversoir ainsi formé ait une section bien rectangulaire. Le barrage devra être assez haut pour que le liquide soit refoulé dans le bief d'amont, de façon que sa surface soit horizontale à quelque dis-

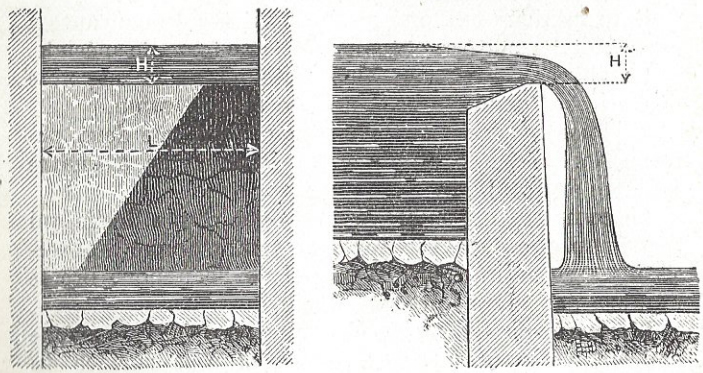


Fig. 44. — Jaugeage par déversoir.

tance en amont du déversoir : ceci est dit pour le cas où le cours d'eau a une pente assez rapide. Il s'agit maintenant de mesurer **la hauteur** de la nappe d'eau qui passe au-dessus du déversoir. Cette mesure devra se faire à 1 ou 2 m. en amont du déversoir et à l'endroit où l'eau est le plus tranquille. A cet effet, on aura disposé un pieu à la distance voulue en amont, le haut de ce pieu étant de niveau avec la crête du déversoir, comme l'indique la ligne horizontale. On mesurera alors avec un mètre, aussi exactement que possible, la hauteur H entre la tête du pieu et le niveau de l'eau pris à 1 m. au moins en

amont du déversoir. Le débit du cours d'eau par seconde est donné très approximativement par la formule :

$$Q = mLH\sqrt{2gh},$$

dans laquelle m est un coefficient qui varie de 0,42 à 0,51 selon la profondeur du bief d'amont, mais que l'on peut prendre dans la pratique égal à 0,45 (on trouvera les valeurs exactes de m dans *Notes et formules de l'ingénieur* par *De Laharpe*).

L est la largeur du déversoir ;

H la hauteur de la lame d'eau mesurée à au moins 1 m. du déversoir ;

g l'accélération de la pesanteur, environ 9,81.

Supposons que nous avons un déversoir de 1 m. 75 de largeur, une hauteur d'eau mesurée de 0 m. 15, nous aurons donc :

Quantité d'eau par seconde :

$$0{,}45 \times 1{,}75 \times 0{,}15 \times \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 0{,}15}$$

soit 200 l. par seconde pour le débit de ce cours d'eau.

Nous donnons ci-dessous une table des **vitesses théoriques de l'eau** correspondant aux différentes hauteurs de chutes, telles qu'elles résultent de la formule :

$$V = \sqrt{2gh}.$$

Le tableau ci-après donne instantanément ce débit ou **dépense d'eau.**

Exemple. — On a un déversoir dont la largeur L est égale à 3 m. 500, l'épaisseur H de la lame d'eau = 0,100.

Table des vitesses théoriques correspondant à différentes hauteurs de chute : $V = \sqrt{2\,gh}$.

Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes	Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes	Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes	Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes	Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes	Hauteurs de chute	Vitesses correspondantes
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
0,005	0,313	0,85	4,083	2,10	6,418	3,70	8,520	8,00	12,528	35	26,203
0,01	0,443	0,90	4,202	2,15	6,494	3,80	8,634	8,25	12,722	40	28,013
0,02	0,626	0,95	4,317	2,20	6,570	3,90	8,747	8,50	12,913	45	29,712
0,03	0,767	1,00	4,429	2,25	6,644	4,00	8,858	8,75	13,102	50	31,329
0,04	0,880	1,05	4,539	2,30	6,717	4,10	8,968	9,00	13,288	55	32,843
0,05	0,990	1,10	4,645	2,35	6,790	4,20	9,077	9,25	13,471	60	34,308
0,06	1,085	1,15	4,750	2,40	6,862	4,30	9,185	9,50	13,652	65	35,709
0,07	1,172	1,20	4,852	2,45	6,933	4,40	9,291	9,75	13,830	70	37,057
0,08	1,253	1,25	4,953	2,50	7,003	4,50	9,396	10,00	14,006	75	38,358
0,09	1,329	1,30	5,050	2,55	7,073	4,60	9,500	11,00	14,690	80	39,616
0,10	1,401	1,35	5,146	2,60	7,142	4,70	9,602	12,00	15,343	85	40,835
0,15	1,715	1,40	5,241	2,65	7,210	4,80	9,704	13,00	15,970	90	42,019
0,20	1,981	1,45	5,333	2,70	7,278	4,90	9,804	14,00	16,572	95	43,170
0,25	2,215	1,50	5,425	2,75	7,345	5,00	9,904	15,00	17,154	100	44,292
0,30	2,426	1,55	5,514	2,80	7,411	5,25	10,149	16,00	17,717	110	46,454
0,35	2,620	1,60	5,603	2,85	7,477	5,50	10,387	17,00	18,257	120	48,519
0,40	2,801	1,65	5,690	2,90	7,543	5,75	10,621	18,00	18,791	130	50,500
0,45	2,911	1,70	5,775	2,95	8,607	6,00	10,849	19,00	10,306	140	52,407
0,50	3,132	1,75	5,859	3,00	7,672	6,25	11,073	20,00	19,808	150	54,246
0,55	3,285	1,80	5,942	3,10	7,798	6,50	11,292	21,00	20,297	175	58,592
0,60	3,431	1,85	6,024	3,20	7,923	6,75	11,507	22,00	20,775	200	62,638
0,65	3,571	1,90	6,105	3,30	8,046	7,00	11,718	23,00	21,242	225	66,438
0,70	3,706	1,95	6,186	3,40	8,167	7,25	11,926	24,00	21,698	250	70,031
0,75	3,836	2,00	6,264	3,50	8,286	7,50	12,130	25,00	22,146	275	73,450
0,80	3,961	2,05	6,341	3,60	8,404	7,75	12,330	30,00	24,260	300	76,716

Table des débits en litres par seconde et par mètre de largeur d'un déversoir, selon les différentes valeurs de h, d'après la formule de Poncelet.

h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde	h Mètres	Litres par seconde
0.010	1.8	0.090	48.6	0.240	208	0.400	448	0.560	742	0.720	1.082	0.880	1.463	1.200	2.329
0.015	3.2	0.095	51	0.250	221	0.410	465	0.570	760	0.730	1.105	0.890	1.488	1.250	2.476
0.020	5	0.100	56	0.260	235	0.420	482	0.580	783	0.740	1.128	0.900	1.513	1.300	2.626
0.025	7.11	0.110	65	0.270	249	0.430	500	0.590	803	0.750	1.151	0.910	1.538	1.350	2.779
0.030	9.3	0.120	74	0.280	263	0.440	517	0.600	823	0.760	1.174	0.920	1.563	1.400	2.935
0.035	11.7	0.130	83	0.290	277	0.450	535	0.610	844	0.770	1.197	0.930	1 589	1.450	3.094
0.040	14	0.140	93	0.300	291	0.460	553	0.620	865	0.780	1.221	0.940	1.615	1.500	3.225
0.045	17	0.150	103	0.310	306	0.470	571	0.630	886	0.790	1.244	0.950	1 641	1 600	3.586
0.050	20	0.160	113	0.320	321	0.480	589	0.640	907	0.800	1.268	0.960	1.667	1 700	3.927
0.055	23	0.170	124	0.330	336	0.490	608	0.650	928	0.810	1.292	0 970	1.693	1 800	4.279
0.060	26	0.180	135	0.340	351	0.500	626	0.660	950	0.820	1.316	0.980	1.719	1.900	4.640
0.065	29	0.190	147	0.350	367	0.510	645	0.670	972	0.830	1.340	0.990	1.745	2.000	5.011
0.070	33	0.200	158	0.360	383	0.520	664	0.680	994	0.840	1 364	1.000	1.772	2.250	5.980
0.075	36.5	0.210	170	0.370	399	0.530	684	0.690	1.015	0.850	1.388	1.050	1.906	2.500	7 004
0.080	40	0.220	183	0.380	415	0 540	703	0 700	1.038	0.860	1 413	1.100	2.044	2.750	8.080
0.085	44	0.230	195	0.390	432	0.550	723	0.710	1.060	0.870	1.438	1.150	2.185	3 000	9.206

Nous voyons dans la première colonne en regard de 0 m. 100 le débit par mètre 56 l. Soit :

$$3 \text{ m. } 500 \times 56 = 196 \text{ l.}$$

Pour la mesure de H, on devra attendre que l'eau ait pris son niveau normal et son débit régulier après la confection du barrage tel qu'il est indiqué ci-dessus.

6° **Jaugeage par une vanne verticale** (**tête d'eau**). — Si le cours d'eau est muni d'un barrage avec une vanne,

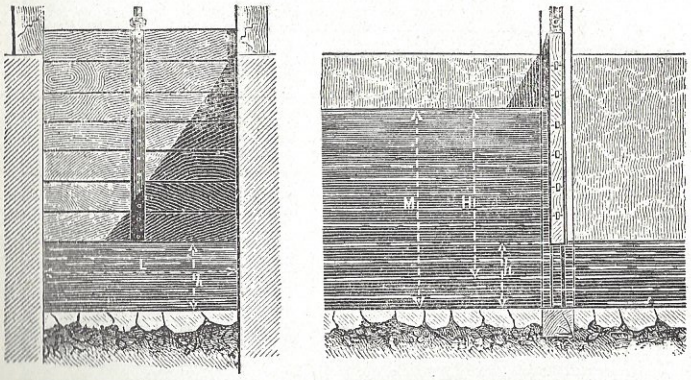


Fig. 45. — Jaugeage par vanne verticale.

on lèvera la vanne juste assez pour que l'eau de la rivière s'écoule aussi vite qu'elle arrive c'est-à-dire que le niveau de l'eau dans le bief d'amont doit rester constant, le débit de l'ouverture de la vanne étant égal à l'apport d'eau du cours d'eau.

On appliquera alors la formule $Q = mS\sqrt{2gh}$, dans laquelle H sera la hauteur de **la tête d'eau** prise depuis le *milieu* de l'ouverture d'écoulement jusqu'au niveau

du liquide à l'amont, soit $H = M - \frac{h}{2}$ selon les lettres sur la figure 45. S étant la **surface** de l'orifice d'écoulement, c'est-à-dire le produit L par h, largeur et hauteur de l'ouverture de la vanne. Dans ce cas, le coefficient m doit être pris approximativement de 0,62. (Il varie de 0,61 à 0,69 selons les hauteurs de l'orifice et la charge d'eau.)

Ce qui est dit ci-dessus suppose que l'écoulement de l'eau se fait librement par l'orifice de la vanne, sinon H serait mesurée à la différence des niveaux d'amont et d'aval (on aurait alors un **orifice noyé**).

Prenons, par exemple, une vanne de largeur

$$L = 1 \text{ m. } 600,$$

levée de 0 m. 40, la profondeur totale de l'eau M étant de 2 m. 200 jusqu'au fond de la vanne. Nous aurons pour H :

$$2 \text{ m. } 200 - \frac{0 \text{ m. } 400}{2} = 2 \text{ mètres.}$$

La formule nous donnera :

$$Q = 0{,}62 \times 1 \text{ m. } 600 \times 0 \text{ m. } 40 \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 2}$$

soit 2 508 l. par seconde environ.

Ce qui précède montre que la détermination *très approximative* du débit d'un cours d'eau est chose relativement facile par l'un des procédés pratiques indiqués ci-dessus ; on passera ensuite à l'examen de la manière d'aménager le cours d'eau pour obtenir la plus grande hauteur possible de chute de l'eau.

Tableau pour le calcul du débit d'eau par une vanne verticale.

Débits des vannes par orifice d'un mètre de largeur

Hauteurs de la charge d'eau H, *en mètres*

Hauteur h de l'Orifice	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	Hauteur h de l'Orifice
0.05	44	62	76	88	98	107	116	124	131	138	145	151	157	162	168	191	214	235	251	268	0.05
0.06	53	75	91	107	117	128	139	148	157	165	175	181	187	194	201	229	257	281	301	321	0.06
0.07	61	86	106	122	136	148	161	172	183	192	201	210	218	226	233	267	299	327	350	374	0.07
0.08	69	98	120	139	155	170	184	196	207	219	229	248	249	258	266	305	341	374	400	427	0.08
0.09	78	109	135	156	174	191	208	220	236	246	257	267	279	289	300	343	382	420	450	481	0.09
0.10	86	122	149	173	193	212	228	246	259	272	285	298	310	321	332	380	424	466	500	533	0.10
0.11	94	133	164	189	212	230	249	267	284	299	314	327	340	353	365	418	466	511	550	587	0.11
0.12	102	145	178	206	230	251	272	291	309	326	341	356	371	384	397	455	507	557	599	640	0.12
0.13	110	157	192	222	249	272	294	314	334	352	368	385	401	416	429	492	549	602	647	693	0.13
0.14	119	168	206	238	267	292	316	338	359	379	396	414	431	446	469	510	590	648	697	745	0.14
0.15	126	179	220	255	285	312	338	361	384	405	424	443	461	477	493	566	631	693	747	799	0.15
0.16	134	190	234	271	304	330	360	385	409	432	452	472	491	509	528	603	673	739	797	852	0.16
0.17	142	201	248	287	322	350	382	414	434	456	478	501	521	540	558	658	715	784	847	905	0.17
0.18	150	213	262	304	340	370	403	432	459	484	506	529	551	571	589	677	757	830	896	948	0.18
0.19	158	223	276	324	358	392	425	454	483	510	534	558	580	601	621	715	799	876	946	1011	0.19
0.20	167	235	291	337	377	414	447	485	509	536	562	586	610	627	654	753	841	922	996	1065	0.20
0.21	»	247	305	354	396	431	470	512	534	563	590	615	640	661	687	790	884	968	1046	1118	0.21
0.23	»	271	334	388	434	472	515	550	585	616	646	674	701	726	757	865	968	1060	1146	1224	0.23
0.27	»	318	392	454	509	559	594	645	688	724	758	791	823	853	883	1016	1136	1245	1345	1437	0.27
0.29	»	340	421	487	549	602	649	693	735	777	815	850	884	916	949	1092	1220	1337	1444	1544	0.29
0.31	»	364	449	521	583	635	694	741	787	831	871	909	945	980	1014	1167	1305	1429	1544	1650	0.31
0.33	»	388	477	555	622	676	737	789	839	884	927	969	1007	1043	1079	1242	1389	1521	1644	1756	0.33
0.35	»	415	507	588	659	717	782	837	889	938	983	1027	1067	1103	1145	1317	1473	1614	1743	1863	0.35
0.37	»	436	534	622	696	758	826	885	940	981	1040	1086	1128	1169	1210	1392	1557	1706	1843	1969	0.37
0.39	»	462	564	653	734	798	872	933	991	1045	1096	1145	1250	1232	1276	1468	1641	1798	1943	2076	0.39
0.41	»	»	591	688	772	840	915	981	1042	1097	1152	1203	1289	1298	1341	1543	1725	1890	2042	2182	0.41
0.43	»	»	620	722	809	881	961	1028	1093	1151	1208	1262	1311	1361	1407	1618	1809	1982	2142	2289	0.43
0.45	»	»	649	754	847	920	1005	1076	1144	1204	1265	1321	1372	1424	1472	1694	1894	2075	2241	2394	0.45
0.47	»	»	677	787	885	961	1050	1124	1194	1257	1321	1380	1433	1488	1537	1768	1978	2167	2341	2504	0.47
0.49	»	»	706	820	922	1002	1095	1172	1245	1311	1377	1438	1494	1551	1603	1845	2062	2259	2440	2614	0.49
0.50	»	»	733	853	940	1023	1115	1194	1271	1337	1405	1468	1525	1583	1635	1882	2104	2305	2490	2669	0.50

Reprenons l'exemple précédent, où L = 1 m. 600 :

On trouve dans la table en regard de 2 m. et dans la colonne correspondante à 0 m. 40, le débit de 1 506 l. par mètre de largeur, soit :

$$1\,506 \times 1.600 = 2\,409 \text{ l. par seconde.}$$

(0m40 n'est pas dans ce tableau, mais il y a 0,39 et 0,41 et nous prenons la moyenne des débits indiqués pour ces deux valeurs de *h*).

CHAPITRE III

MESURE DE LA CHUTE ET DE SA PUISSANCE

Détermination de la hauteur utilisable de chute. — Il est, dans certains cas, possible de produire la chute d'eau, d'une hauteur suffisante pour fournir la force motrice dont on a besoin, simplement en barrant le cours d'eau à un endroit où il se trouve profondément encaissé entre les berges de terres assez imperméables.

Ce cas est assez rare, car il faut que les berges soient assez hautes pour éviter l'inondation des terrains avoisinants par suite du barrage ; en outre, il est nécessaire que la nature des terres ou roches formant ces berges s'oppose à la filtration de l'eau et à sa déperdition en amont du barrage. Nous avons vu le cas de ruisseaux qui donnaient un bon débit à cours libre et qui, barrés sur 1 m. et demi de hauteur, ne donnaient presque plus rien, l'eau se perdant en amont dans des terres d'alluvions très perméables.

On sera donc souvent obligé de déterminer la chute d'eau en faisant un **canal de dérivation** en amont, qui amènera l'eau dans un endroit favorable à la chute d'où cette eau rejoindra ensuite la rivière en aval.

Il faudra procéder à des opérations de nivellement pour déterminer l'endroit où la prise d'eau sera faite et l'endroit où seront établies la chute et les machines. Ce sont ces opérations de nivellement qui détermineront la hauteur de la chute d'eau.

Nous n'entrerons pas ici dans le détail des procédés

employés pour le nivellement et la mesure des hauteurs des terres au moyen du **niveau d'eau** et de la **mire** ou encore des **cercles trigonométriques**. Ce sont des choses connues de tous les géomètres et architectes. Il y a lieu, dans ces travaux, de tenir compte de la topographie des lieux, pour le choix de l'emplacement de la chute, d'après les difficultés que l'on observera pour la construction du barrage ou du canal de dérivation ou **canal d'amenée** sur lequel nous reviendrons plus loin.

Puissance motrice disponible. — La puissance motrice d'une chute d'eau est obtenue **théoriquement** en multipliant son débit par seconde par la hauteur de chute ; on a ainsi le nombre de kilogrammètres qui, divisé par 75, donne la puissance de la chute en chevaux-vapeur.

Par exemple, une chute d'eau débitant 250 l. par seconde sous 4 m. de hauteur donnera :

$$\frac{250 \times 4}{75} = 13 \text{ chevaux } 33.$$

Cette puissance brute se trouve considérablement réduite par le **rendement** plus ou moins bon des appareils d'utilisation, rendement qui varie de 0,30 à 0,80 p. 100, selon les machines et selon les conditions dans lesquelles l'installation est faite.

CHAPITRE IV

AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU

Canal de dérivation ou canal d'amenée. — Lorsqu'il ne sera pas possible d'établir un barrage assez élevé dans la rivière même, pour les raisons que nous avons indiquées plus haut, ou bien à cause des exigences de la navigation, on choisira dans le cours d'eau le point le plus élevé possible pour l'origine du **canal d'amenée.** Le tracé de ce canal devra être fait de façon que sa pente varie entre deux et quatre dixièmes de millimètre par mètre, afin que la vitesse de l'eau y soit suffisante pour éviter les ensablements, mais qu'elle ne soit pas assez grande pour détériorer les berges ou le fond du canal, qui devront être en terre argileuse, aussi imperméables à l'eau que possible.

La section du canal d'amenée doit être suffisante pour que l'eau y circule à la vitesse de 0 m. 50 à 0 m. 60 par seconde lorsque le canal est à ciel ouvert ; on atteint la vitesse de 1 à 2 m., lorsqu'il s'agit de tuyaux fermés tels qu'on les emploie pour les hautes chutes, la pente de ces tuyaux étant quelquefois considérable, comme nous le verrons plus loin.

Un canal d'amenée ouvert, creusé à même le sol, devra donc suivre à peu près la courbe de niveau horizontale qui passe par son point d'origine dans la rivière, il arrivera ainsi jusqu'à l'emplacement des machines qui sera déterminé selon la topographie du sol et à l'endroit où la chute d'eau sera suffisante ; souvent une partie de ce canal se trouve en aqueduc (fig. 46 et 47).

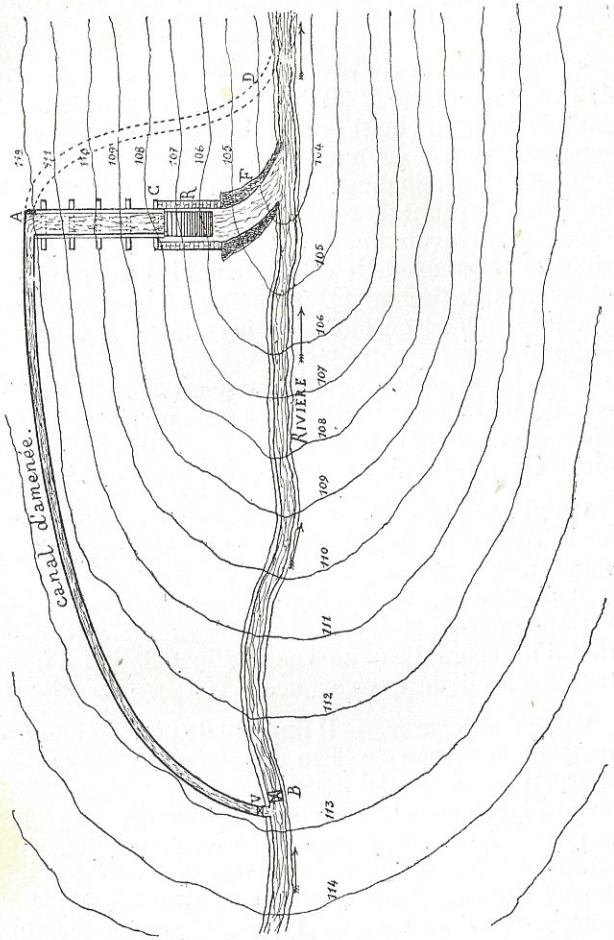


Fig. 46. — Installation d'un moteur hydraulique en dérivation sur une rivière.

B Barrage de la rivière avec vannes et même s'il y a lieu, écluse pour les bateaux ; V vanne du canal d'amenée en dérivation ; AC coulotte en bois ou en maçonnerie, horizontale ou avec pente très faible; R roue hydraulique ou turbine ; F canal de fuite ; AD canal de décharge (facultatif) avec vanne en A.

Les courbes et les cotes de niveau déterminent la topographie de la vallée de la rivière.

On voit que la rivière est barrée à la cote de niveau 112,75 et que le canal d'amenée suit la ligne horizontale jusqu'à l'endroit choisi pour établir une coulotte sur échafaudage, comme le montre la figure 47, suivie d'une tranchée profonde dans laquelle se fera une chute d'eau de 8 m. ; le **canal de fuite** F est au fond de cette tranchée, il doit avoir une bonne pente et va rejoindre la rivière au-dessous de la cote de niveau 104. Une vanne A et **un canal de décharge** D permettent d'assécher le canal d'amenée quand on le désire, pour le nettoyage ou les réparations.

Dans le cas où le canal d'amenée est constitué par une canalisation fermée où l'eau est sous pression, on a une bien plus grande latitude pour le choix de l'emplacement des machines, cela se conçoit facilement.

Canal de fuite. — Le canal de fuite F conduit en aval de la rivière l'eau qui a servi à faire tourner les machines ; les règles exposées pour le canal d'amenée lui sont applicables, mais on augmente à volonté la pente.

Les figures 46 et 47 montrent des exemples de dérivation d'un cours d'eau en vue de l'installation d'un moteur hydraulique quelconque.

Canal de décharge. — Il importe de pouvoir maintenir constant le niveau de l'eau dans le canal d'amenée ; si ce canal est creusé en dérivation de la rivière, cela est facile au moyen de la manœuvre des vannes qui séparent la rivière du canal d'amenée dérivé ; mais, lorsque les machines sont installées dans le lit même de la rivière, il est indispensable de creuser un **canal de décharge** qui relie, par un large vannage, le bief d'amont au bief d'aval ou au canal de fuite. Ce canal de décharge a, aussi bien, son utilité relative, dans le cas d'un canal d'amenée en dérivation, pour les asséchements et réparations aux machines.

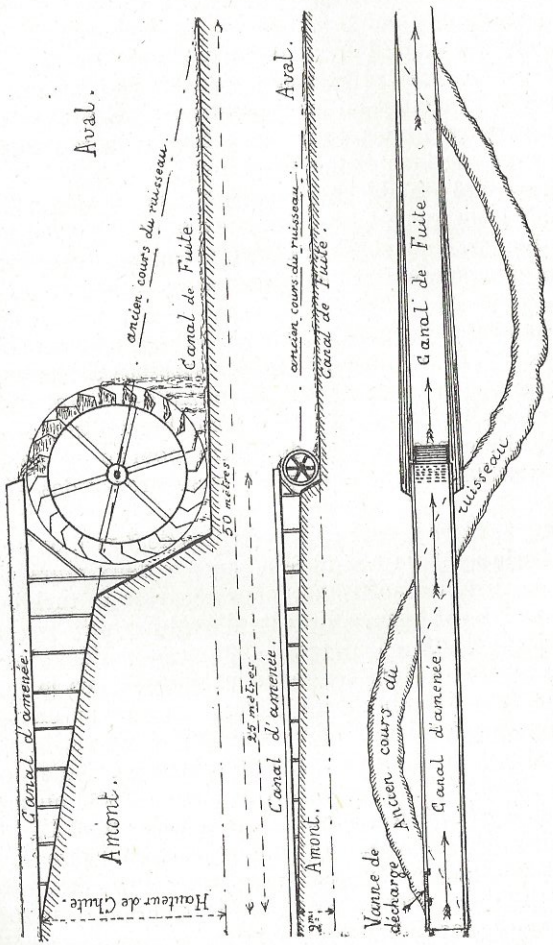


Fig. 47. — Création d'une chute d'eau sur un ruisseau.

Par la manœuvre convenable des vannes interposées entre le bief d'amont et le canal de décharge, on pourra se débarrasser de l'excès d'eau pendant les crues de la rivière, ou mettre complètement à sec les chambres d'eau des turbines ou les maçonneries qui supportent les roues hydrauliques pour l'entretien et la réparation de ces constructions et des machines.

Le canal de décharge présente souvent une pente rapide ; son fond et ses berges devront donc être protégés par des enrochements ou **perrés** en pierres convenablement disposées pour éviter l'entraînement des terres par l'eau.

Chambres d'eau. — Dans le cas des basses chutes (moins de 6 m.) on emploie des **turbines à axe vertical** placées sur le plancher d'une **chambre** en maçonnerie dans laquelle l'eau atteint le même niveau que celui du canal d'amenée, lequel doit être pourvu des **sabliers** et des **grillages** dont nous parlerons à propos des *vannes*, figure 53.

Pour les très basses chutes (moins de 3 m.), on constitue quelquefois la chambre d'eau par deux murs parallèles, à distance suffisante pour recevoir la turbine, et la chambre est fermée, du côté d'aval par un barrage en **madriers jointifs** encastrés à chaque bout dans des rainures réservées dans les murs latéraux ; mais le mieux est de faire les chambres d'eau entièrement en **béton armé** ; on peut leur donner une forme cylindrique, ce qui permet de diminuer considérablement leurs épaisseurs de parois ; on les construit aussi en tôle ou même en bois cerclé de fer, comme une grande cuve. Le plancher destiné à recevoir la turbine se fait en solives de fer à I et voûtains en briques avec, au milieu, l'ouverture circulaire du diamètre de l'orifice de décharge de la turbine ; dans le cas de grandes portées, on soutient ce plancher en dessous par des piles en maçonnerie ou des colonnes en fonte reposant sur le fond du canal de fuite.

La construction des chambres d'eau en maçonnerie étant toujours très onéreuse, on a généralement avantage à installer la **turbine en bâche** en tôle sur des murettes construites sur le fond du canal de fuite (voir le chapitre *Turbines*) figures 89 à 95, 101 à 113.

Tuyauterie des turbines en bâche et hautes chutes. — Lorsque la turbine est disposée en bâche, l'eau y est amenée par une tuyauterie qui peut être établie **en bois,** en **tôle,** en **ciment** ou en **fonte.**

Les préférences actuelles se portent sur les tuyauteries en tôle ou en ciment ; les premières donnent des avantages tant au point de vue de la résistance que du poids et du prix ; les tuyaux bois et ciment nécessitent toujours un raccord en tôle avec la bâche de la turbine; ceux en bois ne peuvent convenir qu'à de très faibles pressions.

La section des tuyaux d'amenée d'eau doit être la plus grande possible, et leurs parois intérieures très lisses, pour permettre la conservation de la **chute effective** et réduire la vitesse de l'eau qui doit s'y mouvoir lentement jusqu'au bas de la conduite, car la chute **est diminuée** d'une hauteur égale à la **pression nécessaire pour compenser le frottement** contre les parois et produire le déplacement de la masse liquide dans toute sa longueur ; ce frottement est d'autant moindre que la vitesse est réduite. (Voir tableau ci-après des pertes de charge dans les conduites.)

Cependant, lorsque l'eau est en abondance, on peut, par mesure d'économie, réduire le diamètre des tuyaux et admettre une perte de charge plus grande que si l'on voulait utiliser toute la chute mais, dans les installations courantes, nous ne conseillons pas de dépasser une vitesse supérieure à 1 m. 500 à la seconde.

Diamètre intérieur des tuyaux	VITESSE DE L'EAU A LA SECONDE												POIDS approximatif par mètre — ÉPAISSEUR de la tôle.		
	0,800		1,000		1,250		1,500		1,750		2,000				
	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	Débit en litres	Perte de charge	4 m/m	5 m/m	6 m/m
m.		m.		m.		m.		m.		m.		m.	k.	k.	k.
0,200	25	0,00724	31	0,01114	39	0,01763	47	0,01560	55	0,03505	62	0,04455	25	31	37
0,250	39	0,00564	49	0,00890	61	0,01380	73	0,01977	85	0,02680	98	0,03646	32	40	48
0,300	56	0,00460	70	0,00719	88	0,01136	106	0,01649	123	0,02221	141	0,02918	40	47	57
0,350	77	0,00397	96	0,00617	120	0,00965	144	0,01539	168	0,01891	192	0,02470	46	56	66
0,400	100	0,00340	125	0,00532	157	0,00840	198	0,01204	219	0,01634	251	0,02147	50	60	75
0,450	127	0,00302	159	0,00474	198	0,00735	238	0,01062	278	0,01449	318	0,01897	55	70	85
0,500	157	0,00271	196	0,00423	245	0,00662	294	0,00953	343	0,01297	392	0,01694	65	80	95
0,550	190	0,00246	237	0,00388	296	0,00588	356	0,00865	415	0,01176	475	0,01541	70	85	105
0,600	226	0,00224	282	0,00349	353	0,00548	424	0,00790	494	0,01073	565	0,01403	80	95	115
0,650	266	0,00207	332	0,00323	415	0,00504	497	0,00723	580	0,00985	663	0,01287	85	105	125
0,700	308	0,00191	385	0,00299	487	0,00467	577	0,00673	672	0,00913	770	0,01198	95	115	135
0,750	354	0,00178	442	0,00278	552	0,00434	662	0,00624	773	0,00850	883	0,01110	100	120	145
0,800	402	0,00167	502	0,00260	628	0,00407	753	0,00586	879	0,00798	1005	0,01044	105	130	155
0,850	454	0,00157	567	0,00245	709	0,00383	850	0,00550	991	0,00748	1135	0,00981	110	135	160
0,900	509	0,00148	636	0,00231	795	0,00361	954	0,00520	1113	0,00708	1272	0,00924	120	145	170
0,950	567	0,00140	708	0,00218	885	0,00341	1062	0,00491	1240	0,00670	1417	0,00875	125	150	180
1,000	628	0,00132	785	0,00207	981	0,00324	1177	0,00466	1374	0,00635	1570	0,00829	130	160	190
1,050	693	0,00126	866	0,00197	1082	0,00309	1298	0,00444	1514	0,00605	1731	0,00791	140	170	200
1,100	760	0,00120	950	0,00188	1187	0,00294	1425	0,00424	1663	0,00578	1900	0,00754	145	180	205
1,150	830	0,00115	1038	0,00179	1297	0,00280	1557	0,00404	1816	0,00550	2077	0,00720	150	190	215
1,200	905	0,00110	1131	0,00172	1414	0,00269	1696	0,00387	1980	0,00528	2262	0,00689	155	200	225
1,300	1062	0,00101	1327	0,00159	1658	0,00248	1990	0,00357	2321	0,00486	2654	0,00635	175	215	255
1,400	1231	0,00094	1539	0,00147	1924	0,00230	2309	0,00331	2693	0,00451	3078	0,00589	190	230	275
1,500	1414	0,00088	1767	0,00137	2208	0,00214	2650	0,00309	3092	0,00420	3534	0,00549	205	250	290
1,600	1608	0,00082	2010	0,00128	2513	0,00200	3015	0,00289	3518	0,00393	4021	0,00514	215	260	310
1,700	1816	0,00076	2270	0,00121	2837	0,00189	3405	0,00272	3972	0,00370	4540	0,00484	225	270	320
1,800	2036	0,00073	2545	0,00114	3180	0,00178	3817	0,00257	4453	0,00349	5089	0,00456	235	290	340
1,900	2268	0,00069	2835	0,00108	3544	0,00168	4252	0,00243	4960	0,00379	5670	0,00432	250	300	360
2,000	2513	0,00065	3141	0,00102	3926	0,00160	4712	0,00230	5497	0,00367	6283	0,00410	270	320	380

Les **coudes** et surtout la **nature des parois** peuvent augmenter considérablement la perte de charge (un coude arrondi = 5 m. de tuyau droit).

Le tableau ci-contre donne des renseignements utiles à ce sujet ; nous conseillons, toutefois, d'augmenter un peu ces chiffres, en raison de la perte supplémentaire qui peut se produire dans des tuyaux en service.

Calcul des conduites forcées. — Une tuyauterie de turbine doit résister aux efforts résultant : 1° de la **pression intérieure ;** 2° du **vide** qui peut se produire intérieurement ; 3° de la flexion latérale des parois, à craindre seulement dans les conduites de très grands diamètres ; 4° de la flexion longitudinale ; 5° des variations de température, dilatation et contraction.

On calcule d'abord l'épaisseur pour résister à la pression intérieure, puis on vérifie si cette épaisseur suffit pour résister aux autres causes.

Voici, d'après la *Société dauphinoise d'Etudes et de Montage*, comment il faut procéder :

La **pression intérieure** P se compose de la **pression statique** H augmentée de la **surpression maximum** B, au même point, provenant du fonctionnement des turbines et de leurs organes.

$$P = H + B = 1{,}25\ H\ ;$$

H se détermine en mètres d'eau au-dessus du point considéré.

L'épaisseur correspondante est donnée par la formule :

$$e = \frac{PD}{2kR},$$

dans laquelle :

P = pression intérieure ci-dessus, en mètres d'eau ;
D = diamètre intérieur en mètres (pour les tuyaux

rivés composés de viroles successives, on prend le diamètre de la plus grande virole) ;

R = résistance pratique admise pour le métal, en kgr. par mm² ; maximum 8 kgr. admis par la *Société Hydro-Technique de France*.

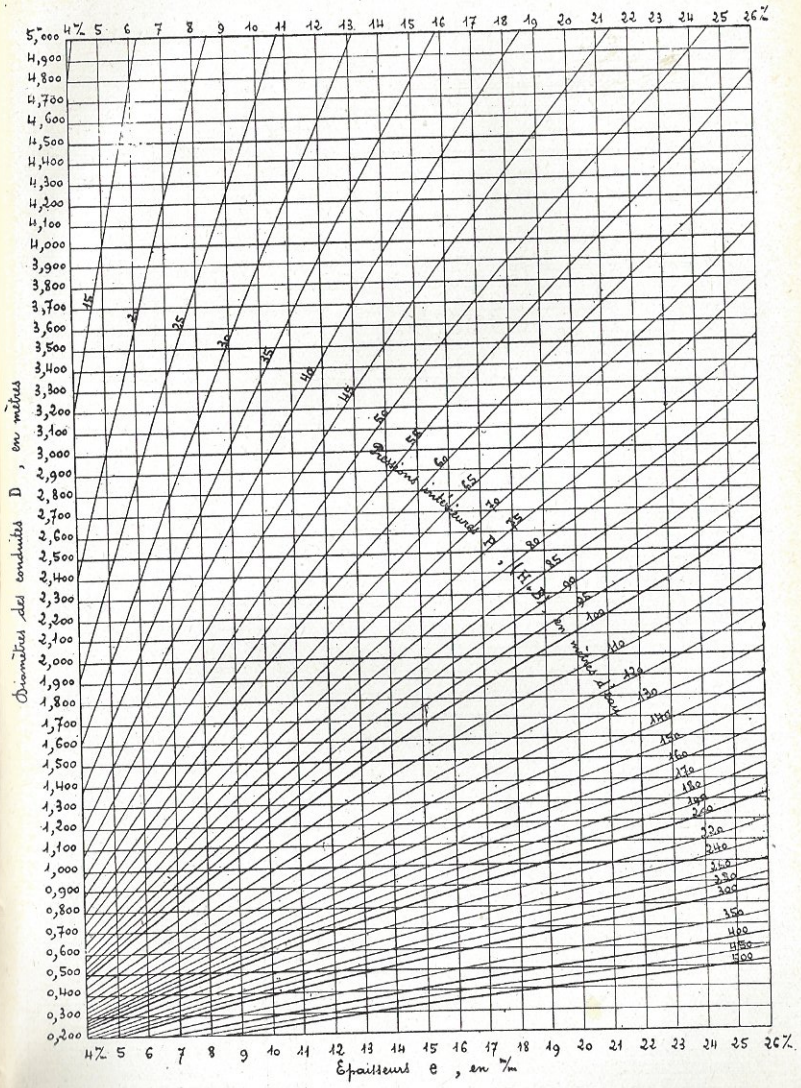
k = coefficient variable avec la nature des tuyaux : c'est le rapport entre la **section nette** (trous déduits) et la section brute de la tôle ; le tableau ci-après donne les valeurs de k selon les diamètres des tuyaux.

Épaisseur des tôles en millim.	VALEURS DE k — Tuyaux rivés à clins, simple ou double rivure	Rivure spéciale à 4 rangs de rivets en quinconce	Tuyaux soudés à la soudure autogène
4 à 7	0,75	0,875	1,00
8 à 10	0,735	»	»
11	0,725	»	»
12 et 13	0,71	»	»
14 et 15	0,70	»	»
16 et 17	0,685	»	»
18	0,675	»	»
19 et 20	0,66	»	»
21 et 22	0,65	»	»
23 et au-dessus..	0,64	»	»

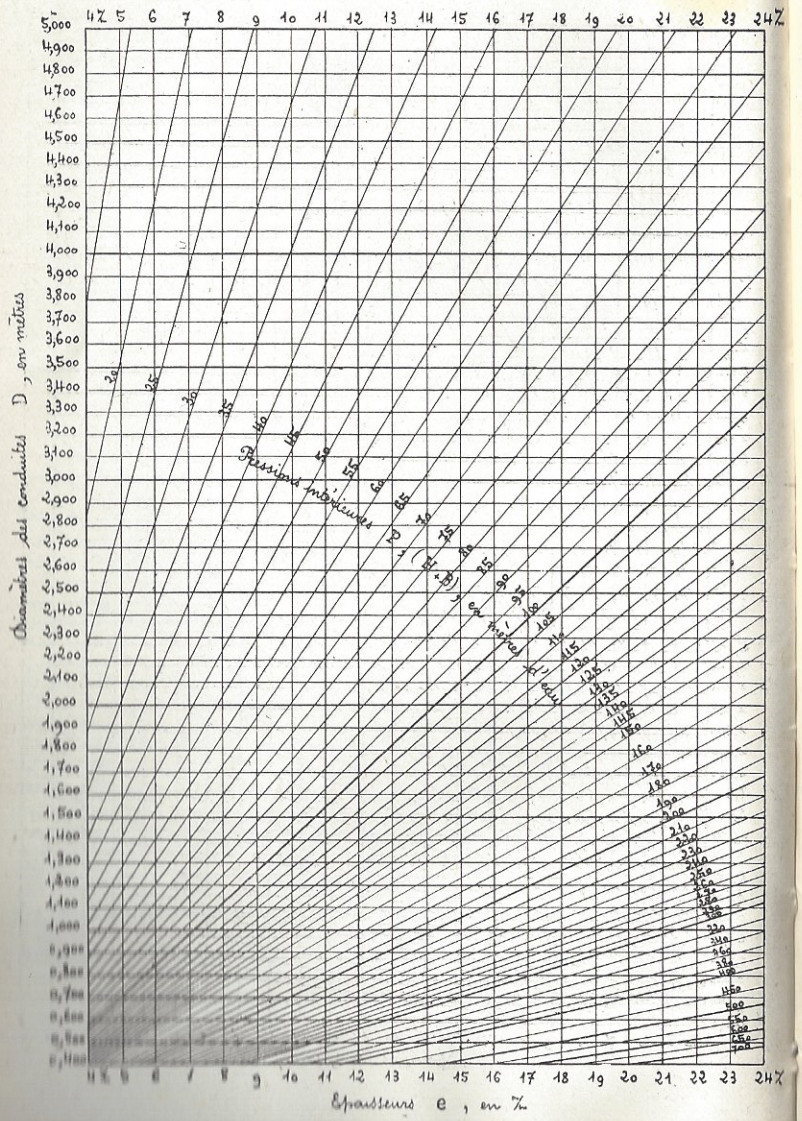
La *Société Dauphinoise* a établi des abaques donnant le calcul de ces trois sortes de tuyaux pour pressions jusqu'à 1 500 m. d'eau (voir sa notice 1927) ; nous les reproduisons ci-après avec son autorisation.

L'épaisseur résistant au vide est calculée d'après la formule d'*Alliési*, mais il suffit de multiplier par 8 le diamètre en mètres du tuyau pour obtenir l'épaisseur en millimètres capable de résister au vide intérieur ; par exemple, une conduite de 1 m. 55 devra avoir une épaisseur de 1,55 × 8 = 12,4, soit 13 mm. ; si cette épaisseur est **supérieure** à celle trouvée pour la pression intérieure, il faudra renforcer le tuyau par des cercles rivés

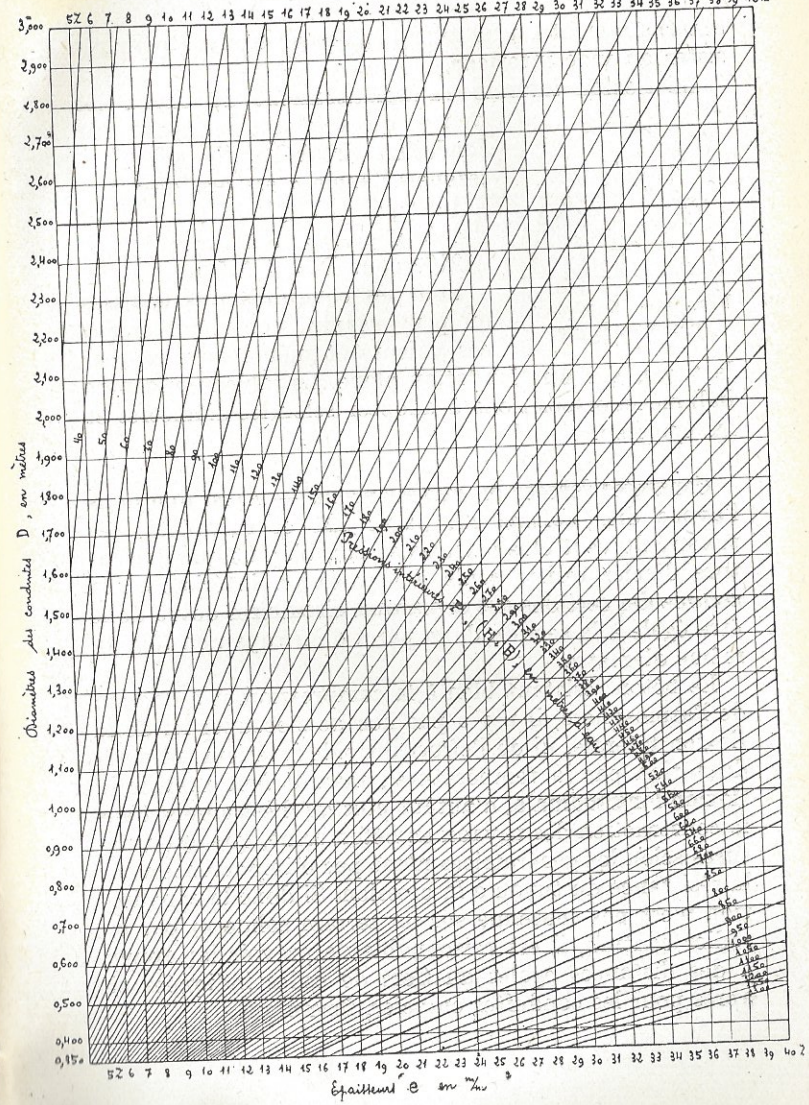
Tuyaux rivés à clouures ordinaires



Tuyaux rivés à clouure spéciale



Tuyaux soudés au gaz à l'eau



extérieurement ou adopter l'épaisseur trouvée pour résister au vide intérieur.

La flexion latérale ou aplatissement du tuyau est évitée en employant des **appuis sur fondation circulaire,** fig. 48, dans lesquels l'angle α est pris de :

120° pour D < 3 m. ;
180° pour D = 3 à 4 m. ;
210° pour D = 4 à 5 m.

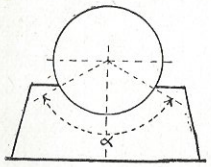


Fig. 48. — Support de conduite forcée.

Pour les conduites très épaisses on peut réduire considérablement ces valeurs et même faire reposer le tuyau sur une fondation plane. Le tableau ci-contre indique les dispositions à adopter selon les diamètres et les épaisseurs.

Conduites forcées en ciment armé. — Ainsi que nous l'avons dit, *Volume II*, pages 221 et suivantes, ces tuyaux doivent être calculés en considérant que l'armature d'acier résiste seule à la pression intérieure : la **somme des sections des armatures circulaires** devra donc être égale à la section de la paroi d'un tuyau en tôle du même diamètre.

Le béton résistant bien à la compression et à l'action de l'atmosphère, il n'y a pas lieu de s'occuper ici de la flexion latérale, ni de l'effort du vide intérieur, ni de la dilatation par la température ; mais il faut prévoir la **flexion longitudinale,** d'autant plus qu'il est admis, dans la construction des tuyaux en béton armé, que les armatures selon les génératrices n'ont pas d'importance pour la résistance du tuyau à la pression. Si donc la canalisation n'est pas soutenue sur un terrain solide ni par un radier continu, il est raisonnable de prévoir les appuis à des distances égales **au tiers** de celles indiquées ci-après pour les conduites en acier, formule E.

Épaisseurs des tuyaux en tôle d'acier et genre de fondation à faire selon cette épaisseur, figure 48.

DIAMÈTRE INTÉRIEUR en mètres	FONDATION PLANE $\alpha = 0$	FONDATION CIRCULAIRE $\alpha = 120°$	$\alpha = 180°$	$\alpha = 210°$	EPAISSEUR MINIMA pratiquement adoptée
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
0,600	4	2	1		4
0,700	5	2	1		5
0,800	6	3	1		5
0,900	7	3	1		5
1,000	8	4	2		5
1,100	9	4	2		6
1,200	10	5	3		6
1,300	12	5	3		6
1,400	14	6	3	2	6
1,500	16	7	3	2	7
1,600	18	7	4	3	7
1,700	20	8	4	3	7
1,800	22	9	4	3	7
1,900	24	9	4	3	8
2,000	26	10	5	3	8
2,200	30	12	5	4	8
2,400	34	13	6	4	9
2,600	38	15	7	5	9
2,800		17	8	5	10
3,000		19	8	6	10
3,200		21	9	6	10
3,400		23	10	7	10
3,600		25	12	8	10
3,800		27	12	8	10
4,000		29	13	9	10
4,200		32	14	10	11
4,400		34	15	11	11
4,600		36	16	11	12
4,800		39	17	12	12
5,000		41	18	12	12

D'après tout ceci, on voit que le prix de revient d'une conduite en béton pour eau forcée sera considérablement supérieur à celui d'une conduite en acier non enrobé, mais les dépenses d'entretien seront nulles et la durée certainement beaucoup plus longue.

Écartement des appuis, figure 48.

L'effort de flexion dans le sens de la longueur de la canalisation est d'autant plus grand que la distance est plus grande entre les appuis ; cet effort *s'ajoute* à l'effort de la pression **dans le sens de l'axe** du tuyau, il convient donc de le prendre peu important.

D'après la *Société Dauphinoise*, l'**écartement entre les appuis** d'une conduite forcée en acier doit être calculé par la formule :

$$L = \sqrt{12{,}5\ R\ \frac{(D + 2e)^4 - D^4}{D(D + 2e)(D + 32e)}}$$

dans laquelle R est le taux du travail à la flexion au point le plus fatigué, en kilogrammes par millimètre carré, que l'on fait R = 1 kgr. D est le diamètre intérieur en centimètres ; *e* l'épaisseur en centimètres.

Si l'on veut obtenir la portée L′ pour un taux de travail R′ du métal, il suffit de multiplier le résultat donné par la formule ci-dessus par $\sqrt{R'}$.

Les **efforts dus à la dilatation** ou à la contraction par variation de température ne sont pas à considérer quand la conduite est en service, car l'eau est sensiblement toujours à la même température ; on doit seulement, quand on fait les raccordements au montage, opérer à une température aussi voisine que possible de celle de l'eau qui doit remplir la conduite. En Suisse, on prévoit des *joints de dilatation* à glissement et presse-étoupes ; en France on s'arrange pour disposer certains **coudes libres** entre les massifs d'ancrage, ce qui n'est pas toujours possible.

L'effort F dû aux variations de température est donné par l'expression $F = E\alpha tS$, dans laquelle F est l'effort total en kilogrammes appliqué sur la section de la conduite par millimètre carré.

E, le coefficient d'élasticité = 20 000 kgr. pour l'acier ;

α, le coefficient de dilatation = 0,0000116 pour l'acier;

t, l'écart maximum de température en plus ou en moins avec la température à laquelle est faite le raccordement : pour *t* en plus on a une compression et pour *t* en moins on a une traction.

S, la section transversale du métal en millimètres carrés.

Pratiquement, on prend $t = \pm 30^o$, alors, le facteur $E\alpha t = 6$ kgr. 950.

Si l'effort F n'excède pas 14 kgr., le travail est bon, sinon il faut modifier en conséquence la position des massifs d'ancrage.

Construction des conduites forcées. — La figure 49

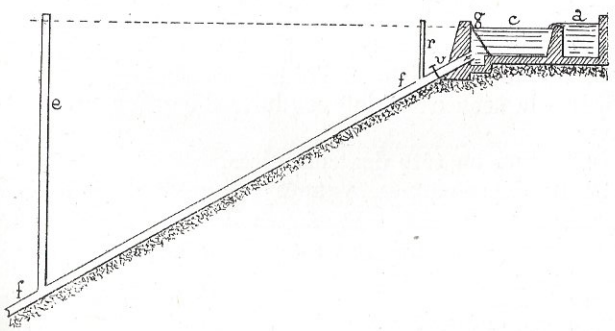


Fig. 49. — Schéma de conduite forcée.

montre le principe d'établissement d'une conduite forcée : le **canal d'amenée** *a* déverse l'eau dans la **chambre de mise en charge** *c* munie d'une grille *g* pour arrêter les corps étrangers et d'un sablier.

Au départ, la conduite est pourvue d'une **vanne d'arrêt** *v* qui est immédiatement suivie d'une **ventouse** ou d'une **cheminée d'air** *r* destinée à laisser entrer librement l'air dans la conduite quand on vide celle-ci. La **cheminée d'équilibre** *e* placée à une certaine distance, est destinée à empêcher les **coups de bélier** pouvant provenir d'un arrêt dans le mouvement de l'eau ou de variations de pressions dues au fonctionnement des turbines. Les cheminées *c* et *r* montent jusqu'au-dessus du niveau de l'eau en *c*.

L'épaisseur des tuyaux formant la conduite va **en augmentant** depuis le haut jusqu'en bas, proportionnellement aux pressions croissantes qu'ils supportent ; la présence de la cheminée *r* ou d'une **ventouse** très sûre est donc absolument nécessaire pour empêcher l'**aplatissement** des tuyaux minces, formant le haut de la conduite, sous le vide que produit la vidange de celle-ci.

Accessoires des conduites forcées. — Nous donnons pour mémoire la liste et l'objet des accessoires nécessaires à la sécurité d'une conduite d'eau à haute pression :

1° Vannes en tête des conduites.

2° Robinets-vannes, vannes à papillon, robinets à

Légende de la figure 50.

FIG. 50. — Canalisations pour chutes d'eau.

1 Tuyaux rivés à clins, un rang de rivets ; 2 tuyaux rivés à clins, deux rangs de rivets ; 3 tuyaux à rivures spéciales brevetées (*Société Dauphinoise*) ; 4 tuyaux multiondes frettés brevetés (*Société Dauphinoise*) ; 5 détails du tuyau multiondes fretté ; 6 tuyau soudé longitudinalement ; 7 rivure simple matée ; 8 rivure double à recouvrement ; 9 rivure à couvre-joint ou virole ; 10 à 14 diverses manières de souder les tuyaux ; 15 joint à cornières rivées ; 16 joint en cornières soudées 17 joint pour très haute pression, brides rivées ; 18 joint pour très haute pression, brides soudées ; 19 joint élastique ou de dilatation ; 20 double joint élastique.

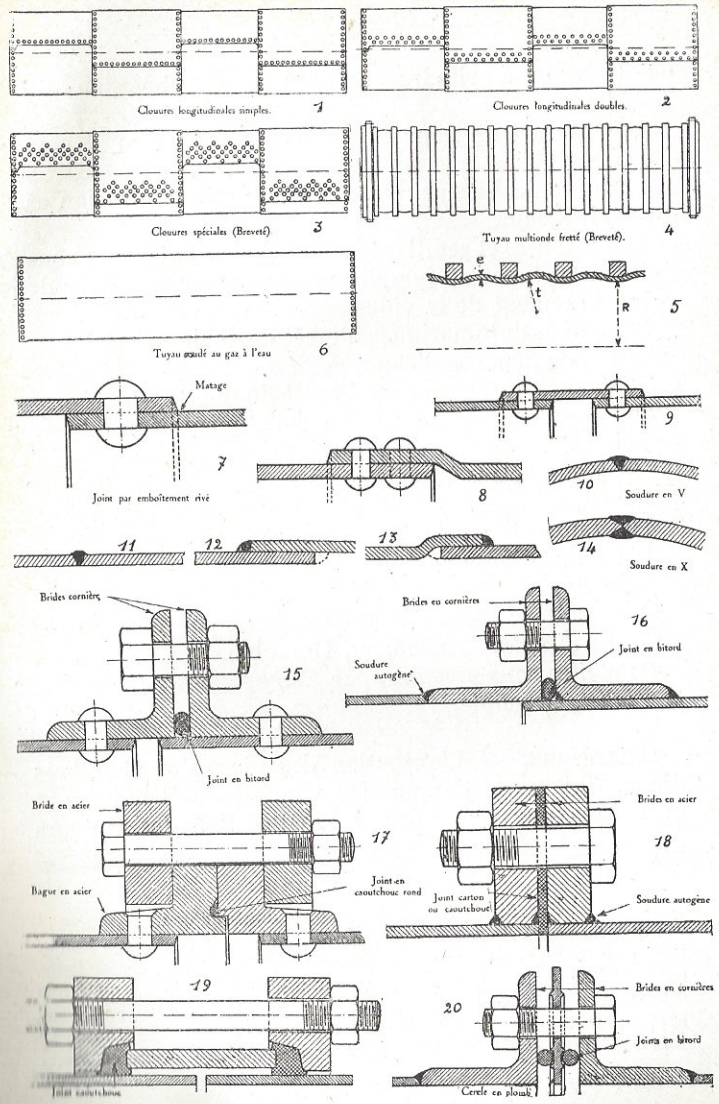


FIG. 50.

pointeaux ou à cylindre équilibré pour l'admission aux machines.

3° Obturateurs pour isoler les conduites au départ d'un collecteur.

4° Tubes de Venturi pour la mesure de la pression et du débit d'eau.

5° Ventouses et reniflards pour évacuer l'air de la conduite au moment du remplissage et assurer la rentrée de l'air au moment de la vidange (éviter le vide intérieur).

6° Siphons automatiques d'arrêt de débit en cas d'exagération de dépense d'eau.

7° Vannes automatiques d'arrêt de débit.

8° Détendeurs de pression pour l'alimentation à basse pression des services divers de l'usine.

9° Manomètres enregistreurs.

10° Cheminées d'équilibre contre les coups de bélier.

11° Vannes compensatrices contre les coups de bélier.

12° Trous d'homme pour visiter les tuyaux.

Voir figures 50 et 51.

A consulter : **Conduites forcées,** 1927, par *Société Dauphinoise d'études et montages*, Grenoble.

Conduites sous pression, par *Etablissements Bouchayer et Viallet*, Grenoble.

Bâtardeaux. — L'exécution des murs des chambres d'eau, des murs d'appui des vannes, des barrages et autres travaux nécessaires à l'installation des moteurs

Légende de la figure 51.

FIG. 51. — Canalisations pour chutes d'eau.

1 à 3 Supports de tuyaux ; 4 ancrage en maçonnerie avec scellements ; 5 manière de faire les coudes par rivure ou soudure de tronçons droits ; 6 tubulure en dérivation ; 7 et 8 tampons ou trous d'homme ; 9 siphon d'arrêt automatique breveté (*Bouchayer et Viallet*) ; 10 et 11 départ de conduite avec robinet-vanne et ventouse ; 12 traversée d'une vallée en siphon ; 13 traversée d'une rivière en arc.

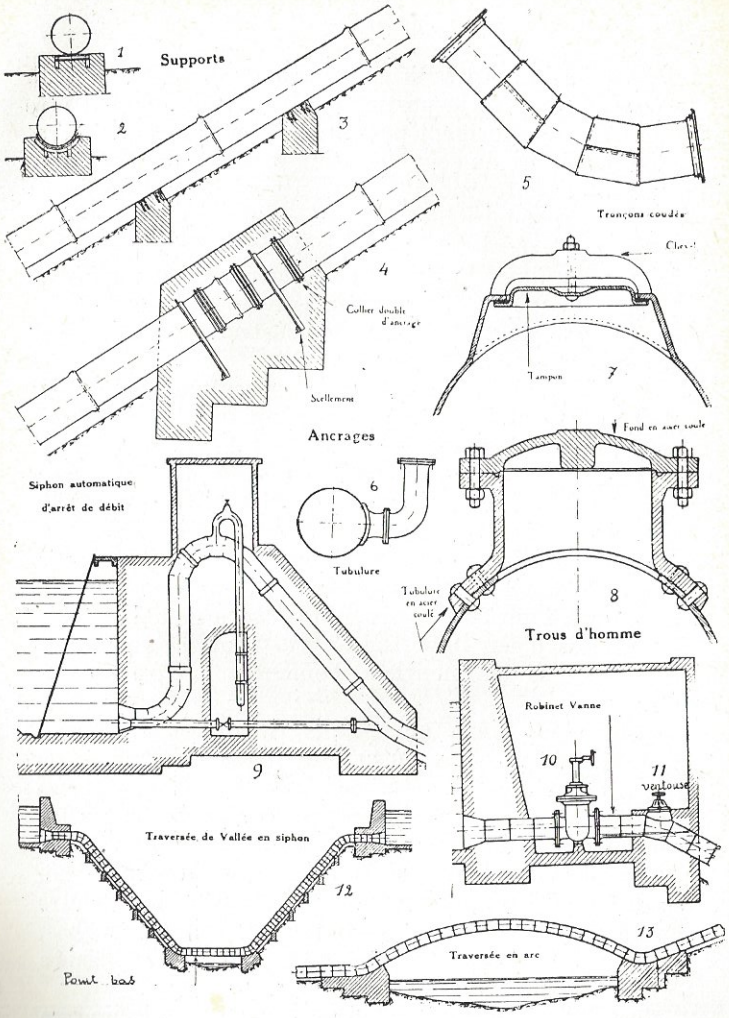


FIG. 51.

hydrauliques, nécessite généralement l'asséchement du cours d'eau dans la partie où ces travaux doivent être faits. Cet asséchement peut être obtenu par une dérivation provisoire du cours des eaux par le creusement d'un canal qui contourne d'amont en aval la portion du lit où doivent se faire les travaux ; on peut aussi, dans certains cas, exécuter la maçonnerie en deux fois dans la largeur du lit de la rivière en forçant ses eaux à passer dans la moitié du lit où l'on ne travaille pas.

Ces opérations nécessitent la construction de barrages provisoires appelés *bâtardeaux*.

Pour construire un bâtardeau, on enfonce dans le lit du cours d'eau deux rangées de pieux ou pilotis en bois, soit à la masse quand les pieux sont de petit diamètre, soit au moyen d'un **mouton** ou **sonnette** mû à bras ou à vapeur, quand il s'agit de gros pilotis destinés à retenir une grande élévation de liquide. Ces pieux sont enfoncés à 0 m. 50 de distance les uns des autres, les deux rangées étant distantes, selon la charge d'eau à arrêter, de 0 m. 75 à 1 m. 50 ou même davantage quand il s'agit de charges d'eau importantes. On peut les réunir par une traverse en madriers boulonnés contre chaque pieu.

Contre ces pieux on installe des cloisons ou palplanches, en planches ou en madriers sur champ et on remplit l'intérieur du bâtardeau avec de la terre argileuse que l'on comprime le plus possible de manière à arrêter complètement le passage de l'eau.

Quand il ne s'agit que de retenir une hauteur d'eau assez faible, 1 m. par exemple, le bâtardeau peut n'être formé que d'une seule rangée de pieux garnis de planches, en amont desquelles on amasse une quantité suffisante de terre argileuse.

C'est à l'abri du bâtardeau ou barrage provisoire que seront exécutés tous les travaux d'installation ; le bâtardeau sera ensuite démoli par arrachage des pieux et dragage des terres qui le garnissent.

Barrages. — Les barrages établis soit dans le lit d'un cours d'eau pour y créer une chute, soit pour faciliter l'alimentation d'un canal de dérivation, se font en terre, en bois, en maçonnerie ou en béton de ciment armé ; on doit les munir de vannes ou écluses pour permettre le passage des bateaux ou bien l'écoulement rapide des eaux en cas de crue, ces vannes de décharge étant indépendantes des vannes de service des machines hydrauliques.

On constitue quelquefois les barrages de grande longueur par des ouvrages en fer appelés **barrages à aiguilles** ou **barrages à hausses mobiles** qui permettent de dégager complètement le cours d'eau en cas de forte crue (**Barrages de Suresnes**).

Souvent les barrages permettent de constituer en amont une assez grande réserve d'eau ; ceci est intéressant lorsqu'on n'a qu'un trop faible débit d'eau ; on fait alors marcher les machines par intermittences.

Les dimensions à donner aux barrages en raison de la charge d'eau qu'ils ont à supporter doivent être calculées par un ingénieur compétent, surtout quand il s'agit d'ouvrages considérables. Nous ne pourrons donner ici que des indications très approximatives sur les épaisseurs à donner aux barrages de divers matériaux selon la hauteur du liquide qui les charge.

Les barrages doivent être établis sur un fond de roche ou, tout au moins, de sol non ébouleux ni glissant. Il y a, en effet, à redouter que la pression de l'eau ne détermine un glissement des terrains au-dessous du fond de la rivière, auquel cas le barrage serait entraîné par les eaux. Dans nombre de cas semblables, on a dû fonder un mur en pierres et ciment dans les terrains formant le

fond de la rivière pour éviter toute chance d'affouillement des eaux et de glissement successif de l'ouvrage.

Barrages en bois. — On ne les emploie que pour des retenues de 2 ou 3 m. d'eau et ils sont constitués par de fortes poutres en chêne enfoncées dans le sol avec le mouton ou sonnette. Ces poutres ou pieux sont assemblés par des traverses horizontales et des boulons, puis on fait vers l'amont un revêtement en planches de chêne ou **palplanches**. Le tout est goudronné au moins une fois par an. (Voir ce qui a été dit pour les **Bâtardeaux**.)

Souvent les barrages en bois sont établis entre deux piles en maçonnerie distantes seulement de quelques mètres à l'endroit où se trouvent les vannes d'admission d'eau. En raison de l'entretien qu'ils nécessitent, on emploie le moins possible les barrages en bois.

Barrages en terre. — S'emploient pour des retenues atteignant 10 et 12 m. de hauteur, quand on dispose d'une grande quantité de terre argileuse suffisamment imperméable à l'eau.

On doit donner à ces barrages une grande épaisseur au pied pour que leurs pentes soient assez douces pour éviter le glissement des terres qui tend à se produire, surtout du côté de l'amont où elles sont recouvertes constamment d'eau.

Il faut compter, à partir et de chaque côté de la verticale, une base de 3 à 4 m. pour 1 m. de hauteur, c'est-à-dire, en tout, 6 à 8 m. de base pour une hauteur de 1 m.

Souvent, au sommet du barrage on ménage un chemin ou route d'une largeur de 3 à 6 m. dont la largeur est à ajouter à celle indiquée ci-dessus pour la base.

Le barrage devra être assez élevé au-dessus du niveau des eaux pour que les vagues ne puissent pas détériorer son sommet en passant par dessus ; on pourra le protéger vers l'amont par un parapet en pierres.

La terre est amenée par couches successivement pilonnées et damées ; le talus d'amont est recouvert d'un perré en pierres sèches ou cimentées, celui d'aval ou extérieur est gazonné.

Les prises d'eau, déversoirs, décharges, etc., doivent être, autant que possible, reportés en dehors du barrage en terre, de façon à éviter que l'afflux d'eau en vitesse ne provoque des entraînements de terres et des dégradations.

Barrages en maçonnerie. — Les fondations doivent être faites sur terrain parfaitement solide ou sur pilotis sur terrains inconsistants. L'épaisseur à donner au barrage dépend de la qualité des matériaux, moellons et ciment, tout autant que de la hauteur d'eau à retenir et de la largeur du lit. On peut admettre qu'elle doit être à la base, selon la résistance des pierres et du ciment, entre les deux tiers et les six cinquièmes de la hauteur de retenue d'eau. On donne au barrage une légère convexité vers l'amont, le mur d'amont a une pente ou **fruit** de un dixième, celui d'aval est en pente plus douce, pour résister à la poussée du liquide et à l'écrasement.

On peut, pour plus de solidité, **armer** le mur de barrage en noyant dans la maconnerie des poutres en fer ou des tirants, reliés aux culées, qui s'enfoncent dans les berges de la rivière.

Comme exemple d'un barrage en maçonnerie de grande hauteur, citons celui du Furens, dont la hauteur est de 50 m., l'épaisseur à la base 49 m. et l'épaisseur en couronne 5 m. 70. Il est en forme d'arc de cercle, convexe vers l'amont, de 252 m. de rayon, la largeur en ligne droite est de 100 m.

Barrages en béton de ciment ou en ciment armé. — Les dimensions d'épaisseur à donner à ces ouvrages

dépendent essentiellement de la résistance des ciments employés et de la qualité des sables et graviers qui serviront à confectionner le béton.

Les dimensions minima que nous avons indiquées pour les barrages en pierres à bain de ciment peuvent s'appliquer aux barrages en béton de ciment Portland fortement damé par couches successives de 15 à 20 cm. d'épaisseur.

L'emploi du ciment armé pemret de réduire l'épaisseur à la base jusqu'à moitié de la hauteur totale, lorsque les fondations et les berges sont en roches compactes et permettent d'assurer l'accrochage efficace des armatures métalliques qui seront noyées ensuite dans le béton.

Le calcul et la confection de ces derniers ouvrages demandent l'étude d'un ingénieur spécialiste ; il en est de même des barrages constitués par des piles réunies par des voussures et arc-boutées de contreforts, dont les plans et calculs sont des plus délicats à exécuter pour réaliser la solidité et l'économie des matériaux.

Grilles et vannes. — L'admission de l'eau au canal d'adduction à la roue hydraulique, ou à la chambre d'eau des turbines, se fait par son passage à travers une grille destinée à retenir les morceaux de bois ou autres corps étrangers qui peuvent flotter à la surface (fig. 53).

Cette grille est généralement formée d'un grand nombre de barreaux de fer plus ou moins gros selon leur longueur (15 à 30 mm. de diamètre pour 1 à 3 m. de longueur) et distants de 3 cm. au plus, les uns des autres, ou en **fer plat** de 80 × 4 placés **sur champ** à 4 ou 5 cm. d'axe en axe.

Il faut, en effet, retenir les objets étrangers, même de petit diamètre, surtout s'il s'agit de l'alimentation d'une turbine qui peut être gravement détériorée par l'introduction d'un morceau de bois dur, par exemple, dans ses aubes tournant à grande vitesse.

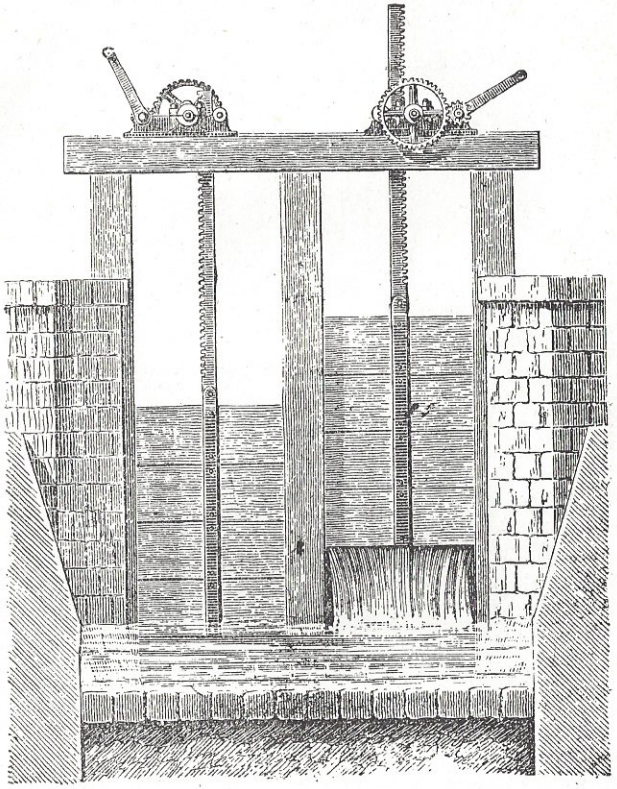


Fig. 52. — Vannes à coulisse.

La grille est installée en amont et contre le barrage où sont les vannes d'admission, de façon à occuper toute la

largeur du canal et à protéger efficacement les vannes de tout corps solide. On incline généralement la grille d'amont en aval, ce qui facilite le glissement des corps flottant entre deux eaux au sommet et favorise le nettoyage.

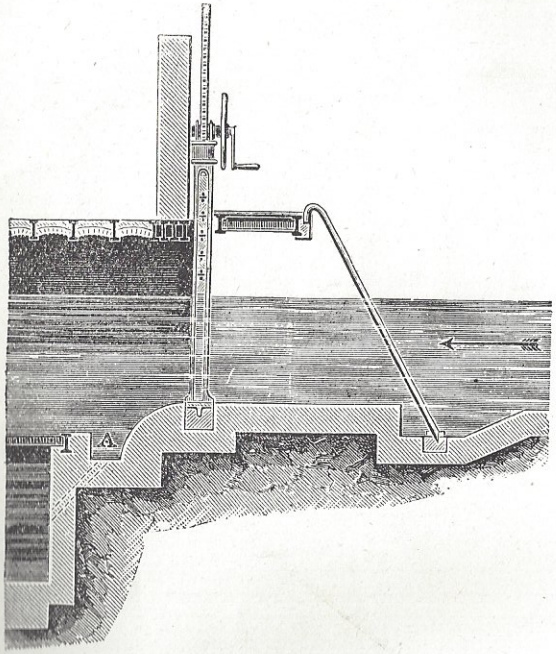


Fig. 53. — Caniveau et grille en amont d'une vanne.

On peut rendre l'action de la grille plus efficace en disposant sur les barreaux en fer des cadres garnis de treillages en fil de fer galvanisé. Ces cadres retiennent les plus petits objets et doivent pouvoir se retirer facilement pour être nettoyés des feuilles et branches qu'ils arrêtent.

Entre la grille et le barrage qui porte les vannes on établit une **passerelle de service** qui permet de nettoyer facilement la grille et de manœuvrer les vannes.

Le radier de fond est coupé par des **caniveaux** ou **sabliers** destinés à arrêter le sable et les petites pierres ; on en voit un exemple sous la grille et en A, dans la figure 53.

Les **vannes** sont constituées par des volets mobiles en bois de chêne ou en tôle, fig. 52, coulissant dans des rainures pratiquées dans les murs du vannage. La manœuvre des vannes se fait soit par l'action de leviers à main sur les tiges prolongeant la vanne, soit, pour les grandes vannes, au moyen d'une crémaillère et d'un pignon à manivelle, analogues à un cric dont la figure 54 montre les détails de construction. On construit aussi des vannes cylindriques ou tournantes, spécialement employées pour les très grandes pressions d'eau ; la figure 55 montre une vanne pour conduite en tôle ou ciment armé pour alimentation de turbine.

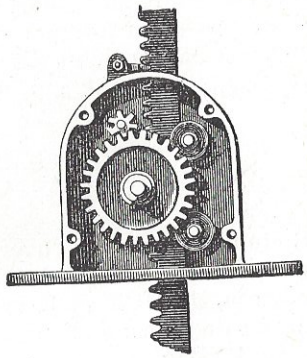


Fig. 54. — Cric de vanne.

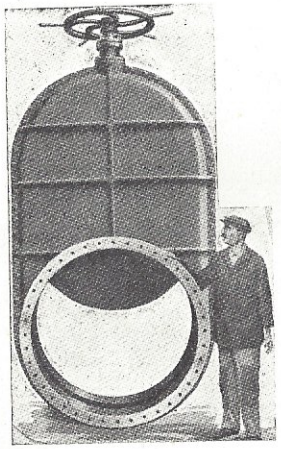


Fig. 55. — Vanne pour conduite forcée.

L'ouverture de la vanne doit être calculée en **surface**, pour répondre au volume d'eau à débiter. On se servira pour cela de la formule que nous avons indiquée pour le jaugeage du débit d'un cours d'eau par une vanne verticale : $Q = mS\sqrt{2gH}$, que l'on écrira :

$$S = \frac{Q}{m\sqrt{2gH}}$$

S étant la surface d'ouverture de la vanne, Q étant la quantité d'eau à écouler, m un coefficient égal à 0,62 environ, $g = 9{,}81$ et H la hauteur d'eau en amont au-dessus du milieu de l'ouverture de la vanne.

Le tableau page 80 permet de déterminer instantanément la surface d'ouverture d'une vanne, selon la charge d'eau jusqu'à 4 m. de hauteur.

CHAPITRE V

MOTEURS HYDRAULIQUES. GÉNÉRALITÉS

La chaleur solaire transforme l'eau des mers et des vallées en vapeur qui se condense sur les montagnes où elle forme des réserves d'eau inépuisables ; en descendant, cette eau produit un travail égal à son poids multiplié par la hauteur mesurée entre son point de départ et son point d'arrivée, ce produit étant diminué des frottements ou **pertes de charge** de l'eau contre les canalisations qui la dirigent. Les progrès des moteurs hydrauliques modernes sont dus aux efforts des ingénieurs qui ont cherché par tous les moyens possibles à supprimer les causes de diminution du **rendement**, c'est-à-dire à améliorer les canalisations de l'eau, à la transporter et utiliser sans **remous** ni **perte de niveau** ; le souci de ne pas diminuer le rendement ne paraît pas avoir beaucoup préoccupé les Anciens qui ont utilisé la force de l'eau dans de très mauvaises conditions : il en est autrement avec les moteurs hydrauliques actuels dans lesquels aucune parcelle de la pression, de la vitesse ou de la force vive de l'eau n'est perdue.

Nous mentionnerons rapidement les moteurs hydrauliques d'ancienne conception et décrirons surtout les moteurs perfectionnés seuls employés aujourd'hui.

Les moteurs hydrauliques peuvent être actionnés : 1° par le **poids** de l'eau tombant d'une hauteur constante : 2° par la **pression** de l'eau ; 3° par la force vive de l'eau ; pour que l'utilisation soit faite dans les meilleures

conditions il faut que dans les cas 1 et 2, les vitesses d'arrivée et de sortie du fluide soient aussi faibles que possible et, dans le cas 3, que la vitesse d'arrivée soit maximum et la vitesse de sortie minimum ; dans certains cas, l'eau agit d'abord par force vive et ensuite par son poids pendant une partie de la marche du moteur ; une classification rigoureuse des moteurs hydrauliques est donc assez délicate à établir ; nous étudierons successivement les roues hydrauliques, les turbines, les roues genre Pelton et les moteurs à eau de conception toute particulière.

CHAPITRE VI

ROUES HYDRAULIQUES

Roues utilisant la force vive de l'eau. Roues pendantes et flottantes. — Appelées aussi **roues de rivière** et **roues de bateau,** ce sont de grandes roues à palettes, ayant de 4 à 6 m. de diamètre et 2 à 3 m. de longueur ou davantage, sur lesquelles le courant du cours d'eau agit par sa vitesse naturelle ; quand elles sont installées sur un bateau amarré à la rive, elles suivent naturellement les mouvements de crue et décrue du cours d'eau dans lequel elles ne plongent que par leurs palettes ; si on les monte sur un échafaudage fixe ou sous une pile de pont, il faut que leur arbre soit porté par un mécanisme tel que l'on puisse monter ou descendre la roue selon le niveau de l'eau : la figure 56 montre une de ces roues portée par des bras *b*, articulés en *a* sur un point fixe d'échafaudage ; *a* est l'axe du pignon *e* qui est ainsi constamment en prise avec l'engrenage calé sur la roue pendante que l'on équilibre par des contrepoids, de façon que la manœuvre du treuil de montée et descente soit aisée.

Quelquefois, afin d'augmenter l'action du courant d'eau, on suspend **un coursier** au-dessous de la roue ; on fait les pales selon les rayons, comme figure 56 ou **inclinées** dans le sens de l'amont, comme figure 57 ; si l'immersion de la pale ne dépasse pas 0 m. 20, on fait l'angle *xyz* de 30 degrés ; si l'immersion atteint 0 m. 50 on ne le fait que de 15 degrés.

Généralement les pales sont en bois ; on leur donne comme largeur un quart à un cinquième du rayon de la roue et on les espace, sur la circonférence, de 0 m. 50 à 1 m. On a utilisé ces roues sur la Seine où le courant est très faible et surtout sur les fleuves rapides tels que le

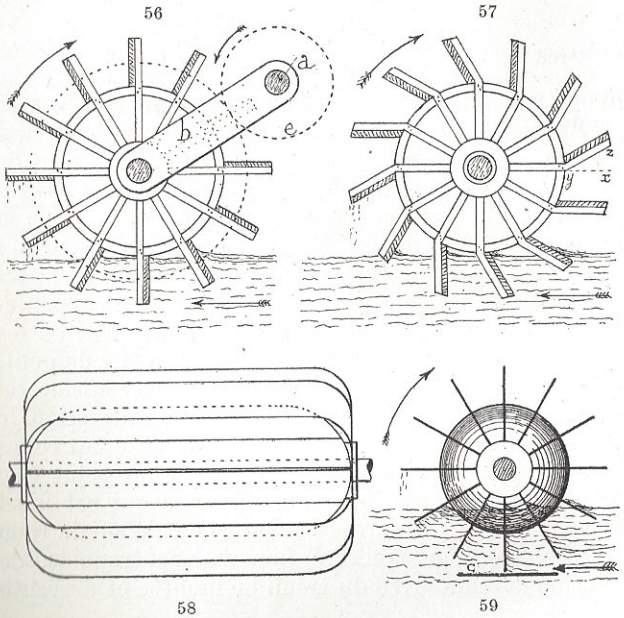


Fig. 56. — Roue pendante à aubes droites.
Fig. 57. — Roue pendante à aubes inclinées.
Fig. 58 et 59. — Roue pendante Colladon.

Rhône. Le rendement n'est que 0,25 environ du travail réel fourni par le courant d'eau ; le travail utile T est donné par la formule :

$$T = 10SV^3,$$

dans laquelle S est la surface immergée d'une aube et V la vitesse du courant ; la vitesse circonférentielle de la roue est environ 0,4 V.

Roue flottante Colladon. — L'ingénieur suisse *Colladon* a construit une roue flottante, figures 58 et 59, composée d'un cylindre en tôle fermé à ses deux extrémités par des demi-sphères et parfaitement étanche pour flotter constamment sur l'eau ; les palettes sont fixées tout autour de cette sorte de tonneau qui est disposé sur deux bras articulés, comme figure 56. On place un coursier C en dessous et le rendement peut, dit-on, atteindre 35 p. 100 du travail théorique, d'où $T = 17SV^3$, environ.

Chapelets ou norias. — Employés habituellement pour puiser l'eau à toutes profondeurs, ces appareils, dont nous parlerons amplement dans notre *volume XIX*, peuvent fournir la force motrice, comme le montre la figure 60, en faisant arriver un courant d'eau **à très faible vitesse** au sommet de la chaîne des godets et en disposant le canal de fuite *f* de façon que les godets n'y **patouillent** pas ; les **norias à tube,** dans lequel se meuvent des boules ou des pistons reliés par une chaîne peuvent être utilisés de la même manière pour produire la force motrice.

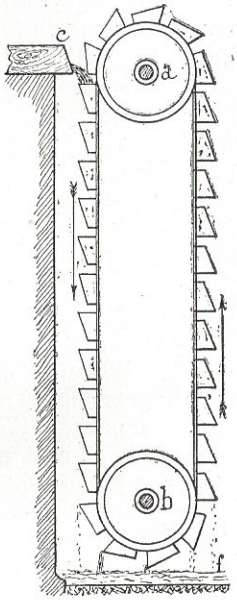


Fig. 60. — Noria motrice.

Le rendement théorique est très bon, car les godets ne se vident qu'à proximité du canal de fuite, vu le peu de diamètre des tambours *a* et *b*, mais l'ensemble du mécanisme est sujet à usure rapide et la contenance limitée des godets ne peut donner qu'une faible puissance. Avec certaines chaînes à godets on peut supprimer le tambour inférieur *b*, ainsi que nous le verrons au *volume XIX*, ce qui permet de faire fonctionner une chaîne à godets dans un puits profond, le mécanisme étant à l'orifice du puits seulement et accessible.

Ceci présente un certain intérêt pour l'obtention de force motrice si l'on dispose d'un ruisseau et d'un puits profond : on sait, en effet, qu'un puits peut absorber une grande quantité d'eau qui s'écoule par les nappes souterraines ; si donc nous posons une chaîne à godets dans un puits et que nous alimentions cette chaîne par un ruisseau à l'orifice du puits, nous aurons un moteur hydraulique peu coûteux et facile à installer ; avec un ruisseau fournissant seulement 3 l. par seconde et un puits de 30 m. de profondeur, nous obtiendrions ainsi 90 kilogrammètres théoriques, soit, pratiquement un cheval-vapeur de 75 kilogrammètres ; une telle puissance jour et nuit permettrait de charger une batterie d'accumulateurs intéressante, car elle fournirait au moins 12 kilowatts-heure par jour (à 1 fr. 25 le kilowatt = 15 fr. par jour).

Roue utilisant la force vive de l'eau.

Roue en dessous à aubes planes ou roue à choc. — Cette roue, simple et facile à installer, est très ancienne ; elle porte, comme le montre la figure 61, un grand nombre de palettes selon les rayons, sur lesquelles agit un courant d'eau **très rapide** produit par un **vannage à tête d'eau** *a* ; elle est enserrée par un **coursier** circulaire en

dessous et deux murs *m* aussi rapprochés que possible des joues de la roue ; l'eau reflue à partir du point *b* et s'écoule en aval ; la hauteur *h* permet de calculer le travail fourni par l'eau, mais celui donné par la roue ne dépasse pas 0,25 à 0,30 du travail théorique de l'eau ; le diamètre de la roue est de 2 à 8 m., largeur 0 m. 50 à 2 m., hauteur des aubes 0 m. 30 à 0 m. 40 séparées par

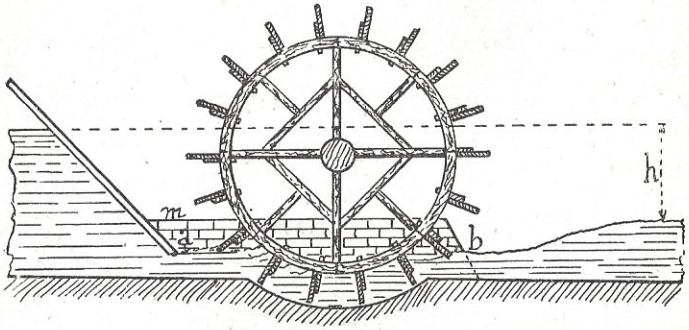


Fig. 61. — Roue en dessous à aubes planes.

un intervalle égal à leur hauteur. L'effet maximum de la roue a lieu quand sa vitesse est entre deux tiers et moitié de celle du courant d'eau ; le diamètre de la roue est indifférent, cependant la vitesse circonférentielle ne doit pas être moindre de 1 m. ni supérieure à 1 m. 30 par seconde, sinon le rendement diminue considérablement ; ces indications suffisent pour calculer les éléments de ces roues. Ces roues ne sont guère employées maintenant, on en trouvera une théorie complète dans le *Manuel de l'Ingénieur* de *Debauve*, fascicule 8, pages 297 et suivantes.

Roue Poncelet. — Perfectionnement des précédentes,

ces roues, dont les figures 63 et 64 montrent une application, doivent réaliser, selon l'inventeur : **que l'eau n'exerce aucun choc à son entrée dans la roue ni dans son intérieur et la quitte sans conserver de vitesse sen-**

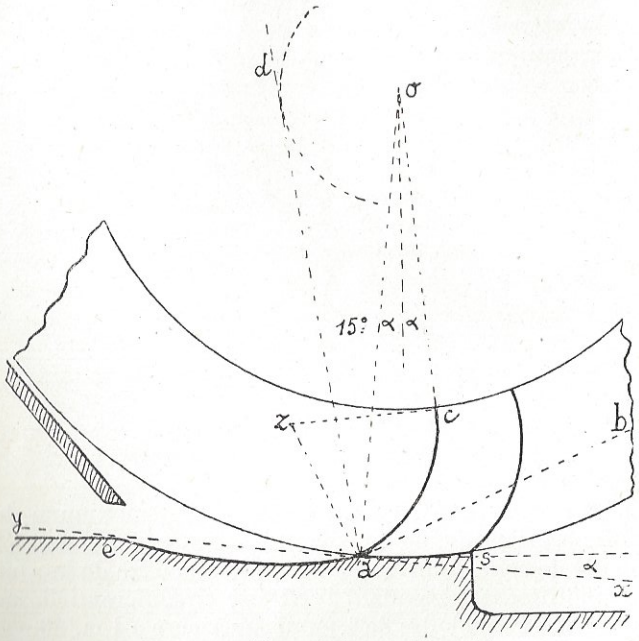


Fig. 62. — Epure de la roue Poncelet.

sible ; les aubes sont **courbes** et tracées comme l'indique la figure 62 : la courbe *ac* est normale en *c* à la circonférence intérieure de la couronne et fait un angle de 25 à 30 degrés avec la circonférence extérieure de la roue : angle *bax* = 30° dans notre dessin ; leur écartement est de 0 m. 25 à 0 m. 35 ; la courbure des aubes est com-

mandée par l'angle α que fait la ligne *ao* avec la verticale et la ligne *oc* qui fait ce même angle α avec la verticale, α étant l'angle que fait la direction du coursier rectiligne *yx* avec l'horizontale ; la courbe est un arc de cercle dont le centre *z* est à la rencontre des perpendiculaires aux tangentes *ab* et *oc*. Au début, Poncelet faisait un coursier rectiligne incliné à la pente de 5 à 10 p. 100 sur l'horizontale, avec une partie circulaire *as* ayant pour longueur la distance entre deux aubes : la ligne *yx* indique ce coursier rectiligne ; mais il reconnut que, pour éviter les remous, l'eau doit suivre une **développante de cercle** *ea* tracée de la manière suivante : au point *a* on mène une ligne *ad* faisant avec *ao* un angle égal à la moitié de l'angle *bax*, soit ici 30° divisé par 2 = 15° ; du point central *o*, on trace un cercle tangent à *ad* et la courbe *ae* est une partie de la développante de ce cercle ; on raccorde cette courbe par un arrondi de grand rayon avec le seuil de la vanne en *e* ; le général Morin a remplacé la développante par une portion de spirale.

Le **seuil de la roue** en *s* est déterminé par la distance *as* égale à l'écartement entre deux aubes.

L'eau sortant de la vanne à grande vitesse **monte** le long des aubes de la roue et y perd sa vitesse ; le rendement est de 55 à 65 p. 100 du travail théorique de l'eau. Les roues Poncelet conviennent bien à des chutes de 0 m. 80 à 1 m., mais peuvent utiliser celles jusqu'à 2 m. On a employé avec succès une roue Poncelet de 2 m. de diamètre et de 1 m. 60 de largeur sur une chute de 0 m. 22 seulement, débitant 200 à 300 l. par seconde.

La vitesse circonférentielle des roues Poncelet est un peu plus de la moitié de la vitesse de la lame d'eau qui frappe les palettes de la roue ; l'épaisseur de cette lame d'eau varie de 20 à 40 cm. ; le diamètre de la roue est calculé de manière que la vitesse circonférentielle de

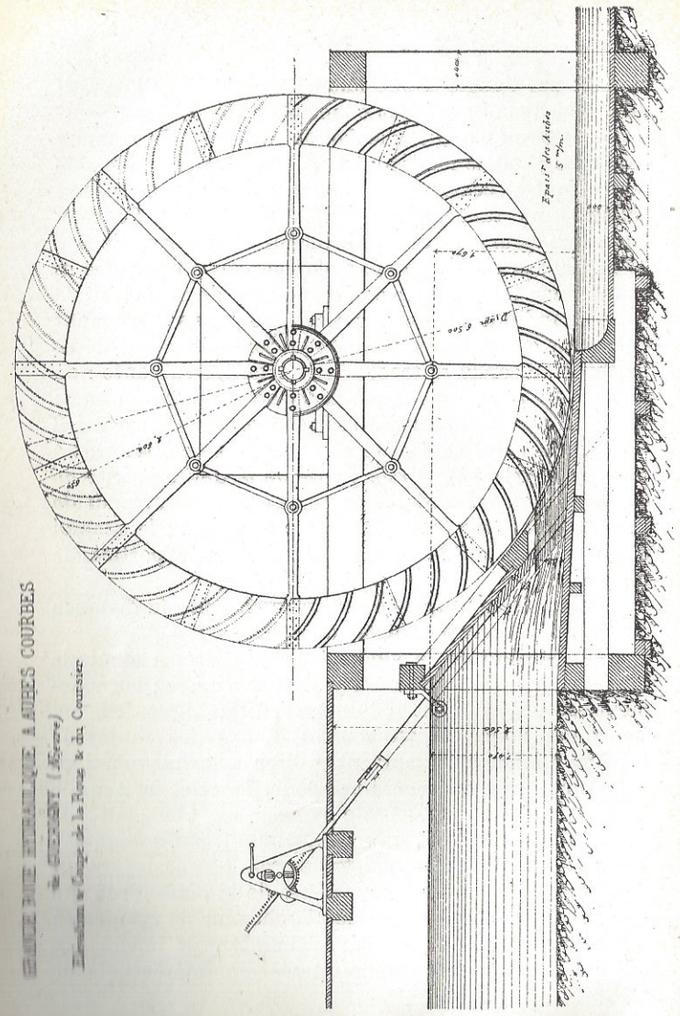


Fig. 63. — Roue Poncelet vue de profil.

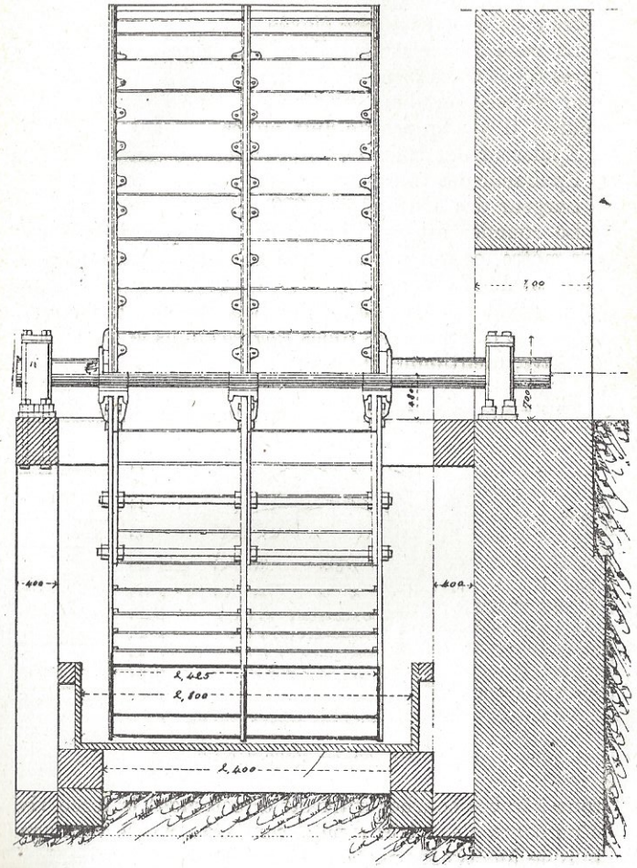


Fig. 64. — Roue Poncelet vue de face.

la roue soit entre 1 m. 60 et 2 m. 20 par seconde ; ces roues sont donc à vitesse élevée.

La roue Poncelet installée à Guérigny, en 1858, figures 63 et 64, a 6 m. 50 de diamètre et 2 m. 85 de largeur divisée en deux parties par une couronne intérieure ; il y a quarante-huit aubes.

Epaisseur des tôles des couronnes : 9 mm.

Epaisseur des tôles des aubes : 5 mm. ;

Largeur des couronnes : 650 mm.

Le coursier est rectiligne avec une pente de 5 cm. par mètre, ce qui est défectueux ; la puissance de cette roue est de 37 CV. ; elle eût atteint 40 CV. avec un coursier à développante comme décrit ci-dessus. On trouvera la théorie complète des roues *Poncelet* dans le fascicule 8, *Debauve*, mentionné ci-dessus.

Utilisation des torrents. — La figure 65 représente une

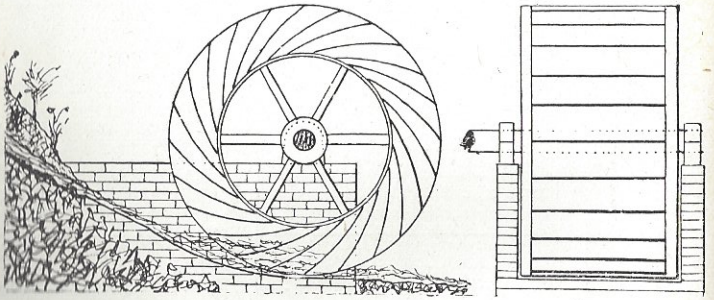


Fig. 65. — Roue à choc.

roue à aubes courbes utilisant directement la force vive d'un cours d'eau très rapide, sans travaux de vannage : la roue fonctionne un peu comme la roue Poncelet, mais les aubes sont inclinées de telle sorte qu'elles se présen-

tent **parallèlement** à la direction des filets d'eau ; leur tracé dépend donc de la pente du torrent. Un coursier courbe et deux murs enserrent la roue. L'établissement de cette roue est peu coûteux et trouve son application dans les pays montagneux.

Roues utilisant surtout le poids de l'eau.

Roue de côté à aubes planes ou courbes. — Représentée figure 66 vue de profil et figure 67 vue en long, cette roue

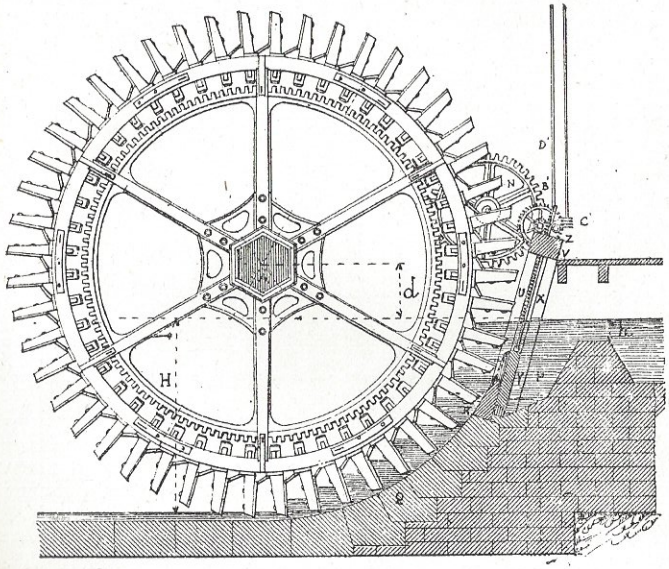


Fig. 66. — Roue de côté à aubes planes (profil).

a des aubes planes suivant les rayons ; on les renforce par une partie en pente à 45° au fond de l'aube, qui a

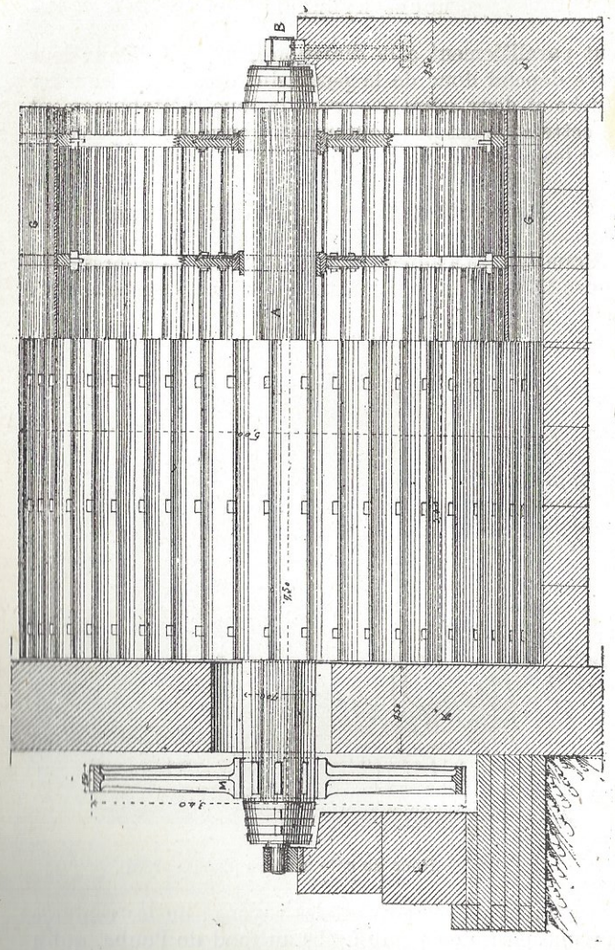


Fig. 67. — Roue de côté à aubes planes (face).

pour effet d'amortir le choc de l'eau à son entrée ; la base de la roue est enfermée dans un coursier circulaire et enserrée entre deux murs de telle sorte que l'eau ne peut s'écouler que par le mouvement des aubages. Le rendement varie de 0,70 pour une chute de 2 m. 50 à 0,50 pour une chute de 1 m. 20 ; vitesse circonférentielle 1 m. à 1 m. 50 par seconde. La largeur de la vanne égale à la longueur de la roue, figure 67, peut aller jusqu'à 6 m. ; mais, si la roue est longue, il faut la constituer avec des couronnes intermédiaires distantes d'environ 1 m. 50 les unes des autres, comme on le voit figure 67.

1° **Alimentation sans tête d'eau,** fig. 66. — L'eau arrive **en déversoir :** si h est l'épaisseur de la lame d'eau (0 m. 18 à 0 m. 30), la vitesse du filet moyen est :

Pour mince paroi : $V = \sqrt{2g \times 0{,}57h}$.

Pour paroi épaisse : $V = \sqrt{2g \times \frac{h}{3}}$.

Le débit $q = 0{,}45\ h\sqrt{2gh} \times l$, l étant la longueur de la vanne.

On met le centre de la roue à une hauteur d entre 0 m. 50 et 1 m. au-dessus du niveau du bief amont et le diamètre de la roue peut être de 3 m. 50 à 7 m. : H étant la hauteur de chute on a $D = 2(d + H + 1{,}5\ h)$.

2° **Alimentation par vanne avec tête d'eau.** — La hauteur h de la tête d'eau est en proportion de la hauteur H de la chute, comme suit :

H =	1 m.	1 m. 50	2 m.	2 m. 50
h =	0,60 à 0,70	0,70 à 0,80	0,80 à 0,90	0,90 à 1 m.

Diamètre et longueur de la roue comme ci-dessus, d étant pris au-dessus de l'orifice du vannage.

L'épaisseur E de la levée de vanne est de 0 m. 15 à 0 m. 40. Nous avons donné ci-dessus des tableaux de débits d'eau pour les déversoirs et pour les vannes à orifice chargé.

Profondeur des aubages. — Soient R le rayon de la roue ;
r le rayon au fond des aubages ;
Q le volume d'eau à absorber par seconde ;
l la longueur de la roue ;
r sera donné par la formule :

$$r = \sqrt{R^2 \frac{2RQ}{\varphi k l}}.$$

Dans cette expression, φ est un coefficient relatif à

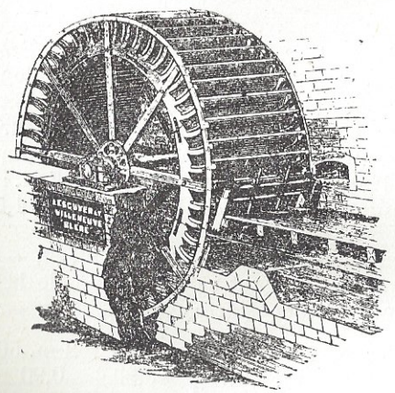


Fig. 68. — Roue de côté à aubes courbes.

l'espace occupé par l'épaisseur des aubes, soit 0,90 à 0,95 selon qu'elles sont épaisses ou minces ; k est le

coefficient de remplissage, de 0,3 à 0,5, selon que le volume à dépenser est plus grand.

La profondeur des aubages est R — r.

L'espacement entre les aubes est 0 m. 30 à 0 m. 50.

Les roues à aubes planes conviennent à des chutes

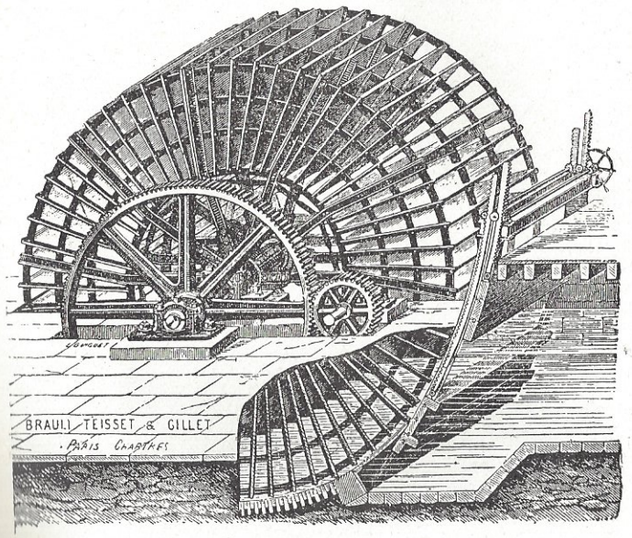


Fig. 69. — Roue Sagebien, en fer et tôle

entre 1 m. et 2 m. 60 ; lorsque le niveau amont est à peu près constant, on emploie le vannage sans tête d'eau et, si le débit et le niveau sont très variables, on prend le vannage avec tête d'eau, de même si le volume d'eau disponible est très grand et surabondant ou si la puissance exigée par l'usine est très variable. Certains cons-

tructeurs font les **aubes courbes,** ce qui est facile avec la tôle d'acier, comme le montre la figure 68, roue *Teisset et Rose-Brault.*

Roue Sagebien. — Important perfectionnement de la

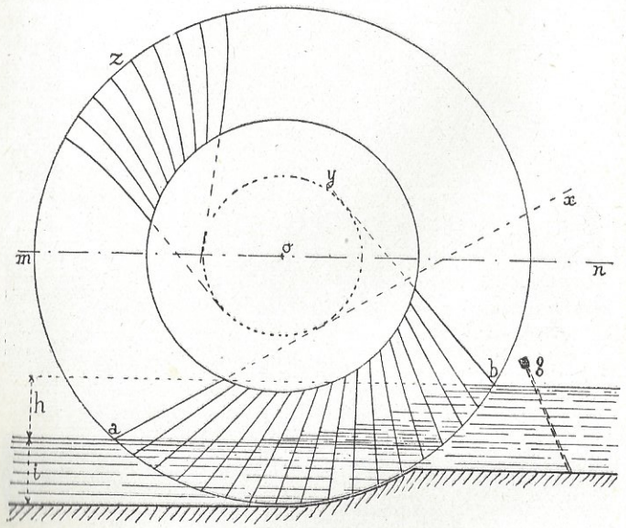


Fig. 70. — Epure de roues Sagebien et Zuppinger.

roue de côté à aubes planes, elle comporte, comme le montre la figure 69, un grand nombre de **pales planes inclinées** sur les rayons de la roue dans le sens de l'arrivée d'eau. Cette roue appelée aussi **roue vanne** a un excellent rendement de 80 à 90 p. 100, mais sa vitesse circonférentielle ne dépasse pas 60 à 70 cm. par seconde ;

les aubes, très hautes, plongent en grande partie dans le canal de fuite et absorbent ainsi toute la vitesse de l'eau qui doit arriver à une vitesse très faible dans le canal d'amenée qui est disposé, à cet effet, large et profond ; la roue vanne peut dépenser jusqu'à 1 500 l. d'eau par

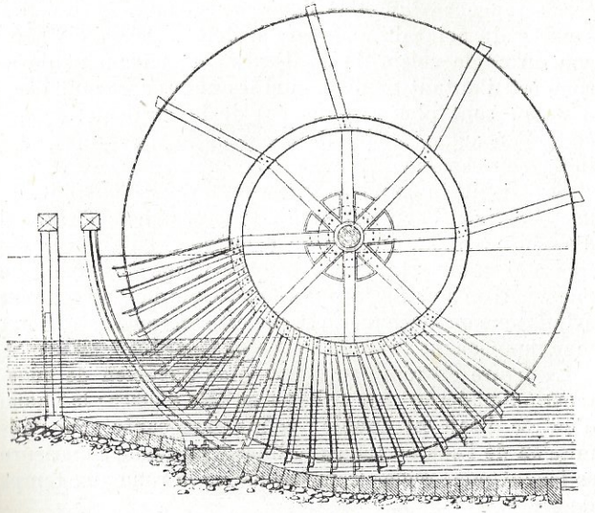


Fig. 71. — Roue Sagebien à vannage circulaire.

seconde et par mètre de longueur et donner de grandes puissances avec de très basses chutes à partir de 0 m. 50 et jusqu'à 3 m.

Le tracé de la roue Sagebien se fait selon l'épure figure 70 : le diamètre est sept à huit fois la hauteur de la chute d'eau, soit 6 à 12 m. ; la hauteur des aubages doit être suffisante pour que l'eau ne pénètre pas dans le

milieu de la roue, soit $i + \frac{h}{2}$ au minimum, i étant la profondeur de l'eau en aval et h la hauteur de chute.

Ayant tracé le cercle de la roue de centre o, on mène au point d'émersion a une ligne ax faisant un angle d'au moins 30° avec l'horizontale ; du centre o, on trace un cercle tangent à ax et la ligne by, tangente à ce cercle à partir du point d'immersion b, doit faire avec l'horizon un angle voisin de 45 degrés ; le rendement de la roue est d'autant meilleur que les aubes recevant l'eau d'amont sont plus rapprochées de la verticale, ce qui conduit à augmenter le diamètre de la roue pour améliorer son rendement.

Si le débit du cours d'eau est à peu près constant, on laisse arriver l'eau sur toute la profondeur du canal d'amenée ; sinon, on met un **vannage circulaire** comme figure 71 qui montre la construction d'une ancienne roue Sagebien ; on voit que la roue est contenue dans un **coursier cylindrique** en maçonnerie et elle est enfermée entre deux murs empêchant l'eau de s'échapper par les côtés.

La figure 69 représente une roue Sagebien de construction moderne avec aubages en tôle d'acier ; la vanne d'entrée d'eau est double : vanne plongeante pour l'admission de l'eau en temps ordinaire et vanne supérieure se levant pour régler la puissance de la roue aux temps de crues.

La distance d'une pale à l'autre, sur la circonférence (**pas des aubes**) doit être entre 0 m. 30 et 0 m. 45 ; on adopte généralement 0 m. 40.

Vitesse des roues Sagebien. — 1,5 à 2 tours par minute.

Roue Zuppinger. — Dans cette roue, les aubes analogues à celles de la roue Sagebien sont relevées en arc de cercle comme on le voit en z, figure 70, de sorte que

l'aube présente un angle de 70 à 75° avec l'horizon au moment où elle quitte l'eau d'aval en a ; cette forme courbée des aubes avait, du reste, été adoptée par Sagebien qui lui trouvait l'avantage de diminuer les chocs de l'eau à son entrée dans la roue et de faciliter le passage de la roue dans le coursier circulaire, au cas où quelque corps étranger y aurait pénétré, malgré les grillages disposés en amont de l'entrée d'eau, en g.

Roues à augets. — Cette roue est composée de deux

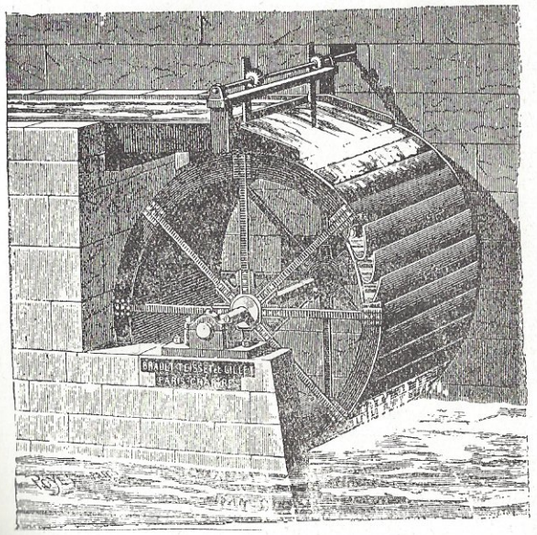


Fig. 72. — Roue à augets sans tête d'eau.

couronnes réunies par une **fonçure** circulaire, entre les-

quelles sont disposés des **augets** dont ladite fonçure forme un des côtés ; dans les **roues en bois,** on donne aux augets diverses formes représentées figure 73 :

De 1 à 2, augets dont le fond a moins de la moitié de la largeur de la couronne et qui viennent **en recouvrement**

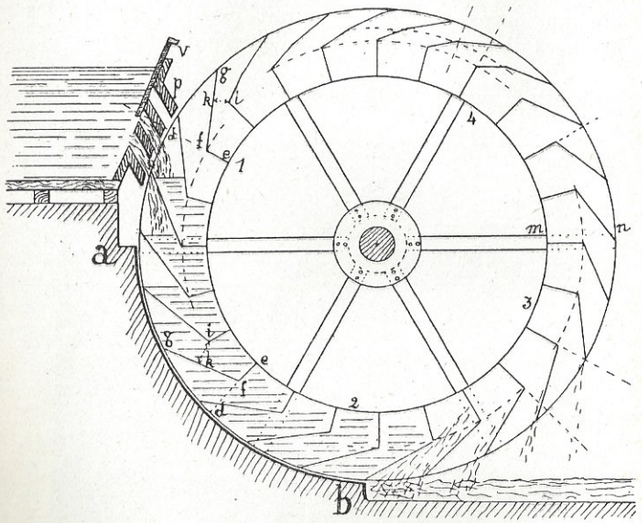


FIG. 73. — Roue à augets avec vannage à persiennes.

l'un sur l'autre, ce qui retarde l'échappement de l'eau et améliore le rendement de la roue.

De 2 à 3, augets dont le fond a la moitié de la largeur de la couronne, se recouvrant l'un l'autre.

De 3 à 4, augets dont le fond a la moitié de la hauteur de la couronne, mais qui n'empiètent pas les uns sur les

autres ; cette forme facilite l'entrée de l'eau, mais la conserve moins longtemps ; elle convient aux roues qui sont munies d'un coursier comme figures 73 et 74.

De 4 à 1, figure 73, augets dont le flanc antérieur est formé de deux parties planes, ce qui, avec le fond ayant une grande largeur, leur donne un maximum de contenance et leur permet de conserver l'eau le plus longtemps possible.

Les roues en tôle ont les augets comme figures 72 et 74, formés d'une seule feuille de tôle courbée.

D'après *Aubuisson*, il faut faire $ef = \frac{ed}{3}$ (fig. 73), et l'angle efg = 110 à 118 degrés, la plus petite distance ik entre deux aubes consécutives étant égale à l'épaisseur de la lame d'eau augmentée d'un centimètre, soit 10 à 12 cm. ; ainsi, les aubes se recouvrent mutuellement comme de 1 à 2, figure 73.

Les deux couronnes des roues à augets, bois ou fer, sont réunies par un certain nombre de **tirants-entretoises** en fer rond avec écrous, indiqués figure 74.

Le **pas** ou écartement des augets sur la circonférence de la roue se prend entre 0,75 et 1 de la largeur de la couronne : $(R - r) \times 0{,}75$ à 1, soit environ 0 m. 30.

La largeur de la couronne $(R - r)$ ne dépasse pas 0 m. 30. La quantité d'eau admise par mètre de longueur de la vanne et par auget ne doit pas dépasser 100 l. par seconde et il faut donner à la roue une longueur suffisante pour recevoir le débit normal du canal d'amenée.

Le rendement des roues à augets bien construites et **tournant lentement,** munies d'un **poitrail** ou **col de cygne** retenant l'eau dans les augets à la partie inférieure de la roue, comme figures 73 et 74, atteint 75 à 85 p. 100 du travail théorique de l'eau, mais ce rendement élevé s'abaisse rapidement à 50 ou 60 p. 100 avec les roues

à rotation rapide ; la vitesse circonférentielle doit être entre 1 m. et 1 m. 30 (pas moins d'un mètre par seconde) pour les entrées sans tête d'eau (fig. 72) et 1 m. 50 à 2 m.

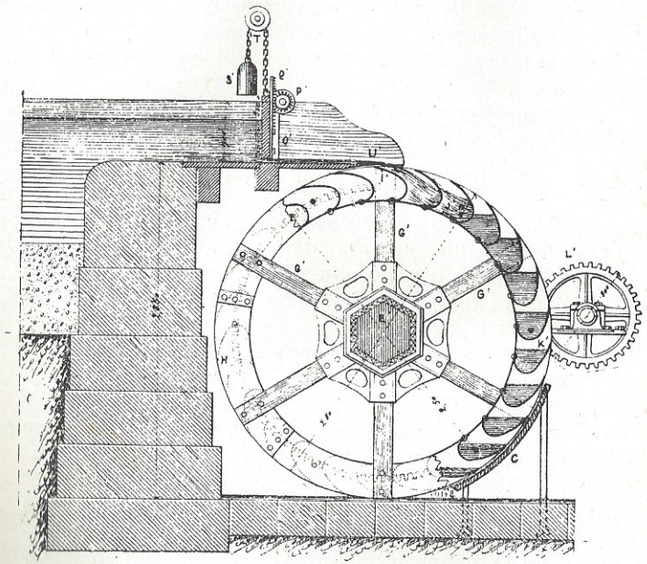


Fig. 74. — Roue à augets à tête d'eau et col de cygne.

dans le cas d'arrivée d'eau avec tête d'eau, comme figure 74.

Calcul des dimensions des augets. — Soient l la longueur d'un auget, n le nombre des augets, Q le débit du cours d'eau par seconde, v la vitesse circonférentielle de

la roue et R son rayon : un auget occupe sur la circonférence un arc égal à $\frac{2\pi R}{n}$; le nombre d'augets qui passe par seconde est $\frac{v}{\frac{2\pi R}{n}} = \frac{vn}{2\pi R}$ et ces augets doivent ab-

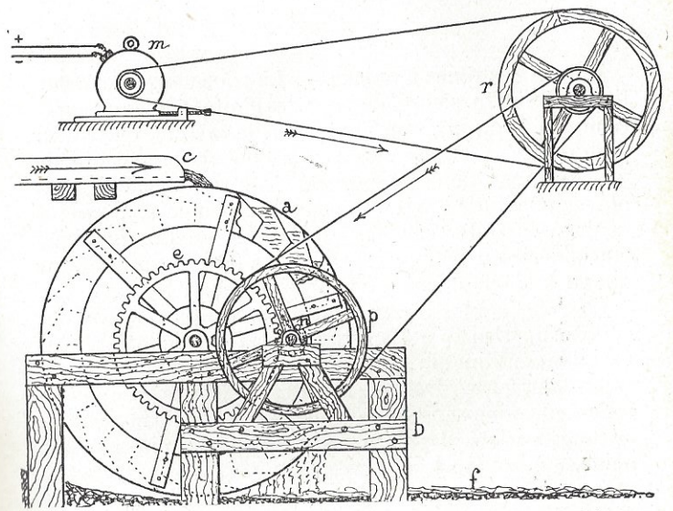


Fig. 75. — Transmission entre roue hydraulique et dynamo.

sorber Q sur une longueur l ; la quantité d'eau à recevoir dans chaque auget est donc :

$$\frac{Q}{l\frac{vn}{2\pi R}} = \frac{2\pi RQ}{lvn}.$$

Cette expression est, en mètres carrés, la superficie **minima** de la section d'un auget.

Généralement, on détermine d'avance le profil de l'auget sur l'épure de la roue et on n'a à calculer que la longueur de la roue ; si S est la surface adoptée pour un auget, on a :

$$l = \frac{2\pi RQ}{n\rho S}.$$

Emploi des roues à augets. — La roue **sans tête d'eau,** figures 72 et 75, s'emploie pour des chutes égales ou supérieures à 3 m., mais on peut, dans le cas où l'on ne dispose que d'une basse chute et si l'on n'a besoin que de peu de force, pour pomper de l'eau par exemple, employer une petite roue à augets qui est peu coûteuse et facile à installer sur des charpentes ou des murs en maçonnerie ou béton ; la roue sans tête d'eau convient quand le débit d'eau est peu variable.

La roue **à tête d'eau,** figure 74, convient pour des chutes supérieures à 4 m., toutes les fois que le débit est variable ou que la puissance exigée par l'usine est sujette aussi à variations ; sa vitesse est plus grande que celle de la roue sans tête d'eau, parce que l'eau agit sur les augets d'abord par sa force vive et ensuite par son poids.

Les roues à augets ont ceci de particulier que si le débit d'eau augmente, l'eau passe par dessus la roue et est perdue comme force motrice, mais la puissance de la roue n'augmente pas, non plus que sa vitesse.

Roues à augets étagées. — Les chutes au-dessus de 8 à 10 m. entraîneraient la construction de roues à augets très lourdes et coûteuses ; on emploie alors le dispositif indiqué schématiquement par la figure 76 de

deux ou trois roues superposées, l'inférieure recevant l'eau d'aval de la roue qui est en dessus d'elle ; mais, en ce cas, on préfère généralement installer une **turbine en bâche** (*voir chapitre suivant*).

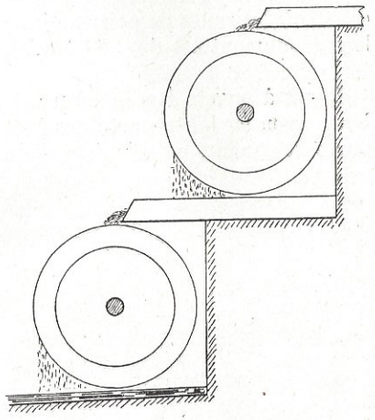


Fig. 76. — Roues étagées.

Roues à augets dites de poitrine. — Lorsqu'une chute d'eau a moins de 3 m., on peut employer la roue à augets en faisant arriver l'eau au-dessus du diamètre passant par le centre de la roue et en entourant la partie basse par un coursier circulaire *ab*, figure 73 ; en ce cas, l'arrivée d'eau se fait avantageusement par un **vannage à persiennes,** tel que représenté en *p*, figure 73 ; les lames d'eau sont dirigées de façon à pénétrer parallèlement aux flancs des augets ; on ouvre, au moyen de la vanne v une ou plusieurs persiennes, selon le débit d'eau et la puissance exigée.

On donne à la tête d'eau une hauteur de 0 m. 30 à 0 m. 60 au-dessus de la persienne la plus basse et on fait les persiennes de 0 m. 02 à 0 m. 04 d'ouverture ; le nombre des orifices et la somme de leurs surfaces d'écoulement doivent être suffisants pour écouler largement la quantité d'eau disponible ; on a toujours la facilité de baisser plus ou moins la vanne. On peut donc calculer la

somme de la surface des persiennes comme un déversoir par vanne à tête d'eau, en prenant la hauteur de l'eau au-dessus de la hauteur moyenne des persiennes. On construit les roues de poitrine jusqu'à 6 m. de longueur ; leur rendement est de 0,60 à 0,70.

Roues à augets à admission par côté ou intérieure. — Un moyeu en fonte porte des bras et une couronne qui porte des augets en tôle débordant **de chaque côté de la**

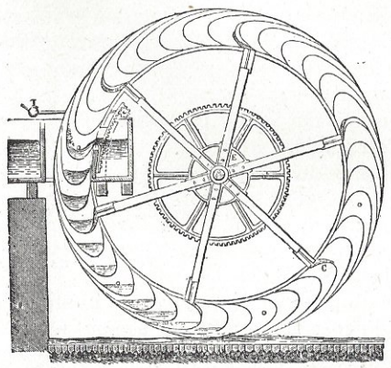


Fig. 77. — Roue à augets dite de côté.

couronne et alimentés par le côté ou par l'intérieur, comme le montre la figure 77. Cette roue ne peut convenir qu'à de petits débits, car la longueur des augets est forcément très limitée, puisqu'ils ne sont supportés que par leur partie médiane.

Construction des roues hydrauliques. — L'**arbre** chargé d'un poids considérable : poids de la roue plus poids de l'eau, se faisait jadis en bois de fort diamètre avec tou-

rillons en fer rapportés à chaque bout ; on le ferait maintenant en acier creux ou plein : voir le *volume IX* : arbres chargés. Sur cet arbre sont calés deux ou plusieurs **tourteaux** ou moyeux en fonte sur lesquels sont rivés ou boulonnés les bras en fer ⊔ ou en bois ; on voit sur nos gravures divers modèles de ces tourteaux qui comportent autant de **rainures** ou **encastrements** en forme de gaines dans lesquels sont pris les bras ; on leur donne, pour roues à bras en bois, un diamètre de 1/5 à 1/4 D et, pour bras en fer, 1/7 à 1/5 D. Dans les grandes roues, on relie les bras par des entretoises polygonales, comme figure 62 ; on met six à huit bras selon le diamètre de la roue.

Si la roue doit passer entre murs (*roues Poncelet, Sagebien*, etc.), il faut que les couronnes extérieures affleurent les bras, ce que l'on réalise en ajoutant des épaisseurs ou **fourrures entre les bras.**

En tous cas, la roue doit tourner **parfaitement rond** et être **bien équilibrée,** ce que l'on réalise au besoin par l'adjonction de masselottes en fonte aux endroits voulus. Les roues en bois, **pendant les périodes d'arrêt**, perdent du poids dans la partie non immergée, ce qui les déséquilibre complètement et constitue un grave défaut ; aussi ne doit-on pas laisser ces roues longtemps arrêtées au même point et, si l'arrêt doit être prolongé, il faut les faire tourner d'un demi-tour de temps en temps, sinon il est très difficile de les remettre en marche dans de bonnes conditions.

Forme du bec de la huche amenant l'eau sur la roue. — Dans les **roues en dessus,** l'eau doit arriver **sans former chute ;** le **bec du canal d'amenée** doit donc être formé d'une partie en tôle tangente à la roue à l'aplomb du centre de celle-ci.

Transmissions pour roues hydrauliques. — La vitesse très lente de ces roues, un à quatre ou cinq tours par minute, oblige à les munir de grandes roues dentées avec dentures en bois dites **alluchons** (*voir volume V*), qui attaquent un pignon en fonte de petit diamètre ; on voit ces roues figures 66, 74, 75-77 et 69. Quelquefois, la roue dentée n'a pas un diamètre moindre que celui de la roue hydraulique ; on arrive ainsi à obtenir sur l'arbre premier moteur de l'usine une vitesse de vingt à quarante tours par minute et l'on peut alors employer des transmissions par courroies pour multiplier la vitesse.

Les machines modernes d'utilisation tournent en général à vitesses élevées ; pour obtenir, **en peu de place**, une augmentation considérable de vitesse, on peut avoir recours aux **enrouleurs de courroie** : nous avons décrit ces appareils dans notre *volume III*.

La figure 75 montre l'application d'une roue hydraulique à la commande d'une dynamo d'éclairage avec double transmission par courroie à partir de l'arbre qui est entraîné par le grand engrenage de la roue.

CHAPITRE VII

LES TURBINES

Le nom est dû à *Burdin*, ingénieur des Mines, qui inventa en 1824, sous le nom de **turbine hydraulique**, uu appareil à grande vitesse de rotation dans lequel l'eau agit, par son poids en même temps que par sa vitesse, sur toute la surface d'une roue, de sorte qu'on obtient le maximum de puissance avec le minimum d'encombrement et de poids de la machine ; chose curieuse, les anciens auteurs reprochaient à la turbine de tourner trop vite, ce qui fait justement l'affaire des machines électriques actuelles.

Fourneyron, qui avait travaillé avec *Burdin*, perfectionna l'invention et eut l'idée d'enfermer la turbine dans une **enveloppe close**, en tôle, alimentée par un tuyau ; il fut ainsi le véritable créateur de la turbine moderne et réalisa en 1835 une turbine de 60 chevaux sous chute de 108 m. avec conduite forcée de 500 m. de longueur. La roue n'avait que 0 m. 316 de diamètre ; il est l'inventeur de nombreux perfectionnements.

Avant ces inventions décisives, de nombreux savants avaient travaillé la question depuis les Romains jusqu'à nos jours ; on trouvera le résumé de ces travaux dans le livre intitulé l'*Invention de la turbine* par *Marcel Crozet-Fourneyron*.

La turbine se compose toujours d'une partie fixe, **directrice** des courants d'eau et d'une partie mobile, motrice ou **rotor**.

Classification des turbines. — Quand l'eau arrive par le centre de la roue et s'échappe par la circonférence, la turbine est dite **centrifuge** ; elle a l'inconvénient que sa dépense **augmente** avec sa vitesse de rotation, la force centrifuge formant comme une aspiration de l'eau.

Quand l'eau arrive par la circonférence et s'échappe par le centre de la roue, la turbine est dite **centripète** ; elle a l'avantage que son débit d'eau **diminue** quand sa vitesse augmente, la force centrifuge s'opposant au passage de l'eau, ce qui augmente le rendement et facilite le réglage.

Ces deux classes se divisent chacune comme suit :

1° **Turbines radiales** : les deux roues, **directrice** fixe et **motrice** ou rotor, sont concentriques et l'eau agit dans un plan perpendiculaire à l'axe de la turbine.

2° **Turbines axiales** ou parallèles : les deux roues sont superposées ; l'eau agit selon un cylindre parallèlement à l'axe de la turbine.

3° **Turbines mixtes.** — L'eau entre parallèlement à l'axe et sort perpendiculairement ou, inversement, entre perpendiculairement et sort parallèlement à l'axe de la turbine.

On divise encore les turbines en :

1° **Turbines d'action** ou **d'impulsion,** dans lesquelles l'eau arrive à grande vitesse ; ces turbines peuvent fonctionner **à l'air**, c'est-à-dire **non noyées** et sont alors dites **à libre déviation** ; ou *noyées*, c'est-à-dire à **injection totale,** elles sont alors appelées turbines à **veine moulée** ou **limite.**

2° **Turbines à réaction** dans lesquelles l'eau arrive à faible vitesse, mais sous forte charge ; elles sont toujours **noyées** et leur rendement est généralement supérieur à celui des précédentes.

Dans l'installation d'une turbine, il faut considérer :

1° **La chambre d'eau** qui se fait en maçonnerie, ouverte

à l'air, pour les basses chutes, ou en **bâche** en tôle complètement close pour les moyennes et hautes chutes ;

2° Le **vannage,** c'est-à-dire le dispositif permettant l'admission et l'arrêt de l'eau ;

3° Le **pivot** ou l'**arbre** qui peut être lourdement chargé ;

4° Le **régulateur automatique** limitant les écarts de vitesse selon la puissance prise sur l'arbre de la turbine. Nous étudierons spécialement ces régulateurs dans un chapitre séparé, mais nous décrirons quelques turbines-types avec leurs chambres d'eau et leurs vannages.

Axe. — Les turbines de toutes catégories se font maintenant à axe **vertical** ou à axe **horizontal** ; dans ce dernier cas, la turbine est toujours noyée.

La turbine à axe vertical exige un pivot pouvant supporter une charge considérable, atteignant parfois 80 t. et plus, quand un rotor d'alternateur est monté directement sur l'arbre de la turbine ; la turbine à axe horizontal se prête très bien à la commande directe des machines, son arbre étant soutenu par deux paliers que l'on peut faire aussi résistants qu'il le faut et lubrifier abondamment ; elle est aussi plus facile à adapter aux très hautes chutes pour lesquelles on la préfère généralement.

Puissance des turbines. — A pleine admission, une bonne turbine a un rendement R de 80 à 85 p. 100 ; à admission réduite, ce rendement tombe vers 55 à 65 p. 100 ; la puissance est donnée par $P = QHR$, Q étant le débit d'eau et H la hauteur de chute, déduction faite des pertes de charge dans la conduite d'amenée.

Théorie de la turbine. Tracé des aubes. — Dans tout ce qui suivra, nous désignerons par :

r_0 le rayon des aubages fixes ou directeurs du côté de l'entrée d'eau ;

r le rayon commun au stator (couronne directrice) et au rotor (couronne mobile) de la turbine ;

r' le rayon du rotor du côté de la sortie d'eau ;

h la hauteur des aubages à l'entrée d'eau au rotor ;

h' la hauteur des aubages à la sortie d'eau du rotor ;

α l'angle de l'aubage du stator avec la tangente, à l'entrée d'eau dans le rotor ;

β l'angle de l'aubage du rotor avec la tangente, à la sortie de l'eau ;

γ l'angle de l'aubage du rotor avec la tangente à l'entrée de l'eau ;

H la hauteur de chute, déduction faite des pertes de charge dans la tuyauterie d'amenée ;

V la vitesse de l'eau à l'entrée de la couronne mobile (rotor) ;

v la vitesse circonférentielle du rotor à sa couronne intérieure ;

Q le débit d'eau par seconde ;

P la puissance en chevaux ;

R le rendement mécanique ;

n le nombre de tours par minute.

Turbines semblables. — On dit que deux turbines sont **géométriquement semblables** quand les angles α et β sont les mêmes et que les rapports $\frac{v}{V}$ et $\frac{h}{r}$ sont aussi les mêmes ; elles ont le même rendement théorique et toutes leurs dimensions sont proportionnelles. Si r est le rayon d'une turbine débitant Q sous une hauteur H et r' le rayon d'une turbine **géométriquement semblable** débitant Q′ sous une hauteur H′ on aura :

$$r' = \sqrt{\frac{Q'}{Q}}\sqrt{\frac{H}{H'}}.$$

Ceci permet d'établir une **turbine-type**, pour laquelle on expérimente si elle donne le **rendement** désiré, puis toutes les autres s'en déduisent par des règles de proportions, sauf les petites modifications résultant du nombre et des épaisseurs des aubages.

Nombre de tours, vitesse spécifique de rotation. — Connaissant la **hauteur de chute** H et **le débit** Q, il est possible de choisir, entre certaines limites, le nombre de tours le plus favorable à la construction, choix très important dont dépendent les frais d'installation et le rendement de la turbine ; les turbines rapides coûtent moins cher mais ont un rendement moindre que celles à rotation lente ; on détermine d'abord une valeur de la vitesse, pour un type donné de turbine, qui soit indépendante de la hauteur de chute et du diamètre de la couronne mobile.

Pour cela, on sait que, pour un type donné de turbine, et pour différentes hauteurs de chute, le débit, la vitesse de l'eau et le nombre de tours sont proportionnels à $\sqrt{H}$; les valeurs $Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}}$ et $n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}$ sont donc invariables pour une turbine donnée et peuvent être considérées comme **débit** et **vitesse de régime** sous une chute H = 1 m. ; ces valeurs Q_1 et n_1 suffisent pour le calcul des dimensions d'une turbine.

Pour diverses turbines **géométriquement semblables,** on a $2r_1 = k_1\sqrt{Q_1}$, c'est-à-dire que la **section est proportionnelle au débit,** k_1 étant un coefficient invariable ; on en déduit $n_1 = \frac{60v}{k_1\pi\sqrt{Q_1}} = \frac{kQ}{\sqrt{Q_1}}$; kQ est invariable pour toutes les turbines de même vitesse.

Mais on peut, à la place de Q_1, introduire la puissance en chevaux P_1 et on aura :

$$P_1 = 10Q_1 \frac{R}{0,75} \text{ (R étant le rendement mécanique),}$$

$$n_1 = \frac{60v}{k_1\pi} \times \sqrt{\frac{10R}{0,75}} \times \frac{1}{\sqrt{P_1}} = \frac{n_s}{\sqrt{P_1}}$$

ou :

$$n_s = n_1\sqrt{P_1} = \frac{n\sqrt{P}}{H\sqrt[4]{H}} = \frac{n\sqrt{P}}{\sqrt[4]{H^5}}$$

n_s est la mesure de la vitesse ou du nombre de tours par minute du type de turbine considéré ; c'est **le régime d'une turbine qui donne une puissance d'un cheval sous une chute d'un mètre ;** on nomme ce nombre de tours n_s : **vitesse spécifique** ou **nombre de tours spécifique** de la turbine considérée ; P_1 et Q_1 sont les valeurs à pleine admission.

Avec les turbines centripètes **genre Francis,** la vitesse spécifique minimum $n_s = 50$ tours par minute ; elle est de 150 à 200 pour les turbines à vitesse normale et d'environ 400 pour celles à marche rapide ; en mettant plusieurs roues parallèlement, on peut encore l'augmenter.

Avec les **roues Pelton,** la vitesse spécifique $n_s = 35$ environ avec un seul ajutage et augmente proportionnellement à la racine carrée du nombre des ajutages. Le nombre de tours peut toujours être diminué en donnant un plus grand diamètre à la roue.

Rendement. — On améliore le **rendement** des turbines en les faisant à marche plus lente, roues de plus grand diamètre ; en travaillant à pleine admission ; en employant des canalisations et des aubages **parfaitement polis** ; en faisant la sortie d'eau dans un tube vertical **légèrement évasé** (diffuseur) qui **aspire** l'eau à sa sortie

de la turbine : cette aspiration ne peut se faire dans de bonnes conditions que si ce tube a moins de 8 m. environ de hauteur (moindre que la pression atmosphérique, 10 m. 33) et s'il plonge dans l'eau d'aval (1) ; en ce cas, le rendement de la turbine est le même que si elle utilisait toute la hauteur de chute entre les niveaux d'amont et d'aval ; enfin en donnant à l'eau une très faible vitesse dans les conduites, 1 m. à 1 m. 50 par seconde. Le rendement des grandes turbines est meilleur que celui des petites.

Aubes. — Les aubes doivent avoir un **profil arrondi** du côté de l'entrée d'eau et **aminci** du côté de la sortie ; elles auront ainsi la **forme d'un poisson** (fig. 81) qui est la meilleure pour éviter les remous et tourbillons : la Nature a donné au poisson la meilleure forme pour fendre l'eau ; le jeu entre le rotor et le stator doit être aussi réduit que possible.

Le nombre des aubes détermine **l'épaisseur des lames d'eau** qui doivent être bien guidées pour produire leur maximum d'action : cette épaisseur des lames d'eau ou **espacement des aubes** est généralement comprise entre 20 et 80 mm. dans les turbines à faible débit ; dans celles à très grand débit, on arrive à 300 mm.

Le nombre des aubes motrices est généralement moins grand que celui des directrices.

Hauteur des couronnes. — La hauteur de la couronne (h_0 fig. 78 à 80) est calculée suivant le rayon r pour que l'eau s'écoule dans la couronne directrice avec une faible vitesse ; on donne, à h, 3 à 5 mm. de plus qu'à h_0 afin

(1) L'emploi de l'aspirateur permet de soustraire la turbine au reflux des eaux d'aval, qui se produit en cas de crue des rivières de la vallée où se trouve le canal de fuite ; ce gros inconvénient est ainsi facilement évité sans perte de hauteur de chute ni de puissance.

que l'eau ne jaillisse pas hors de l'entrée du rotor et on fait $h' = 1{,}5$ à 2 fois h_0.

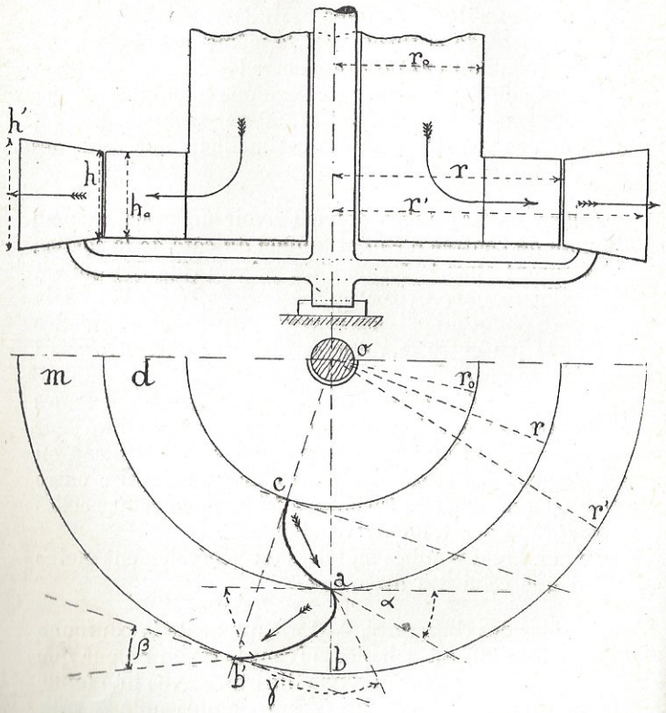


Fig. 78. — Schéma d'une turbine centrifuge.

Section et débit de la couronne directrice. — Cette section est : $s = 2\pi rh - n'e'$, n' étant le nombre des

cloisons directrices et e' leur épaisseur mesurée **paral-**

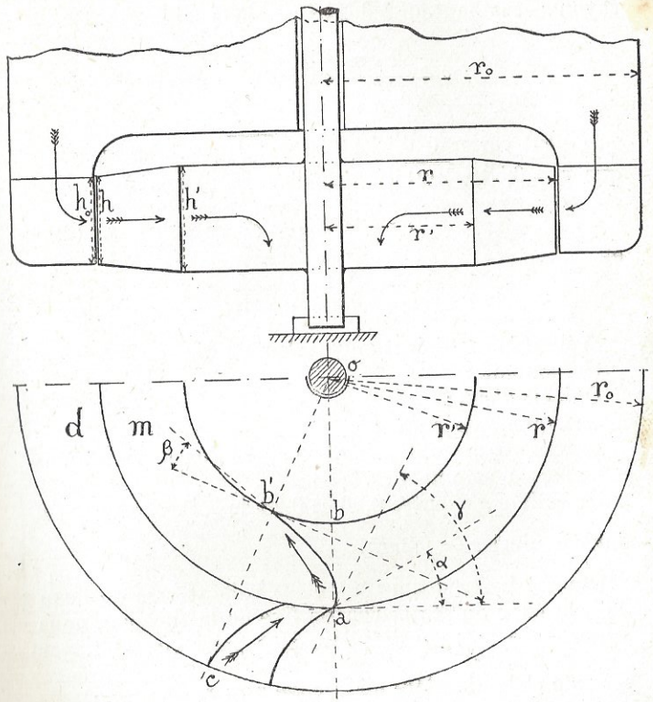


Fig. 79. — Schéma d'une turbine centripète ou mixte.

lèlement au plan de rotation ; si e est leur épaisseur réelle et α l'angle d'inclinaison, on a :

$$e' = \frac{e}{\sin \alpha}.$$

Dimensions de la couronne directrice. — On déduit le rayon r et la hauteur h des expressions suivantes :

$$v = \frac{2\pi rn}{60} = 0{,}50\sqrt{2gH} \qquad (1)$$

(v peut varier de 0,47 à 0,60 $\sqrt{2gH}$; M. *Rateau* estime que $v = 0{,}53\sqrt{2gH}$ est le meilleur rendement.)

$$s = 2\pi rh - n'e' \qquad (2)$$

et

$$Q = 0{,}85s\sqrt{2gH}, \qquad (3)$$

0,85 étant le coefficient moyen de réduction de la section.

On connaît :

Q débit d'eau ;

H hauteur de chute ;

n nombre de tours, que l'on fixe selon la nature des machines à commander.

On estime $n'e'$ entre 0,20 et 0,23 de s, l'expression (2) devient ainsi $s = \frac{4}{5}\,2\pi rh$.

D'autre part, si nous appelons u la vitesse de l'eau dans la cuve du stator (partie fixe de la turbine), nous aurons $Q = \pi r_0^2 u$; u doit être plus petit que 1 m. par seconde et le diamètre de la cuve sera $r_0 = \sqrt{\frac{Q}{\pi u}}$.

On fait généralement, figure 78 :

$$r = 1{,}20 \text{ à } 1{,}50\, r_0$$
$$r' = 1{,}20 \text{ à } 1{,}50\, r\,;$$

on adopte :

Pour grand débit et petite chute : 1,33.

Pour moyen débit et moyenne chute : 1,35.

Pour grand débit et grande chute : 1,38.

On fait aussi :

$$h_0 = 0{,}5 \text{ à } 0{,}10\, r$$

et

$$h' = h + 5 \text{ mm}.$$

La vitesse de l'eau dans la couronne mobile est

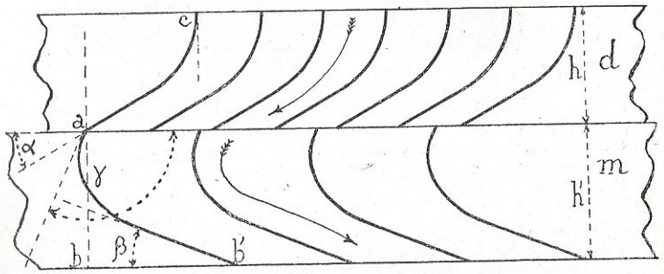


Fig. 80. — Schéma d'une turbine axiale.

$u' = 0{,}85\sqrt{2gH}$, elle atteint $u' = 0{,}90\sqrt{2gH}$ avec des aubages très polis et dans les turbines centrifuges.

Le nombre de tours par minute :

$$n = \frac{60\sqrt{2gH}}{4\pi r\cos\alpha} \times 0{,}9.$$

Tracé des aubages. — L'eau traverse avec une faible vitesse la couronne directrice ; elle jaillit dans la couronne mobile où sa vitesse se transforme en travail. Nous ne ferons pas ici la théorie de cette transformation et nous nous bornerons à donner des indications pratiques sur la forme des aubages dans les trois types principaux de turbines (fig. 78 à 80).

1° **Aubages directeurs.** — La courbe part du point *c* tangentiellement au rayon *oc*, figures 78 et 79 (turbines radiales), ou perpendiculairement au plan de la couronne, figure 80 (turbine axiale) ; elle atteint la circonférence

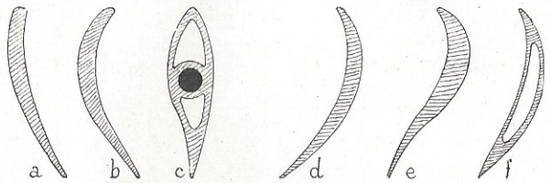


Fig. 81. — Sections d'aubages de turbines.
a, *b*, aubages directeurs fixes ; *c*, aube directrice mobile autour d'un axe ; *d*, *e*, *f*, aubages de couronne mobile, renflés au milieu pour augmenter la contraction de l'eau ; quand ces aubages sont très importants et épais, on les allège par un vide intérieur, comme en *f*.

commune aux deux couronnes en *a*, figures 78 et 79, sous un angle α avec la tangente dont la valeur doit être comprise entre 15 et 30 degrés pour les turbines à petite vitesse et entre 30 et 60 degrés pour celles à grande vitesse ; pour les turbines axiales, figure 80, l'angle α est celui fait par la tangente à la courbe avec le plan de la couronne.

2° **Aubages mobiles.** — La courbe part du point *a* en faisant avec la tangente un angle γ qui, pour le **meilleur rendement**, doit être de 90 degrés ; mais pour **grandes vitesses de rotation,** on fait, dans les turbines centrifuges et axiales, $\gamma = 90° + \alpha$ (fig. 78 et 80) et, dans les turbines centripètes $\gamma = 90° - \alpha$ (fig. 79), la valeur de α ne dépassant pas 25 à 30 degrés ; on a donc :

γ compris entre $90° + 1$ à $30°$ pour les turbines centrifuges et axiales.

Et γ compris entre $90 - 1$ à $30°$ pour les turbines centripètes.

La courbe de l'aubage mobile aboutit en *b* sous un angle β avec la tangente, qui varie de 20 degrés à 30 degrés ; le rendement est meilleur quand β est petit, mais cela suppose une rotation lente et, pour une rotation rapide, on est obligé de donner à cet angle une valeur suffisante pour l'écoulement rapide de l'eau.

Nota. — Les courbes directrices et mobiles sont, selon les constructeurs, des arcs de cercle ou de parabole ; les aubes ont le plus souvent une forme hélicoïdale facilitant la sortie de l'eau ; on prolonge les aubes par une partie rectiligne pour que l'eau prenne bien la direction des angles.

Turbine Fontaine. — C'est une turbine axiale parallèle représentée démontée et installée dans une chambre

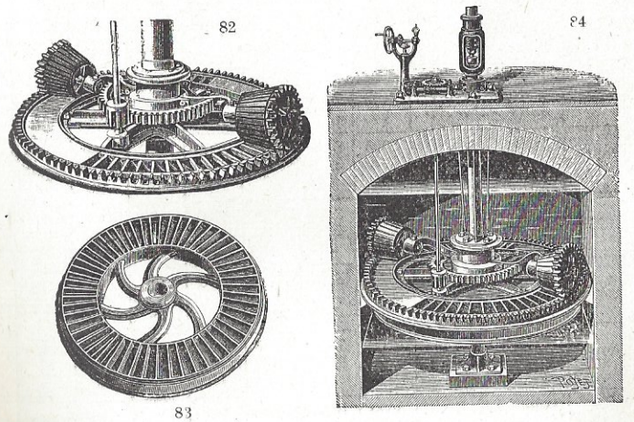


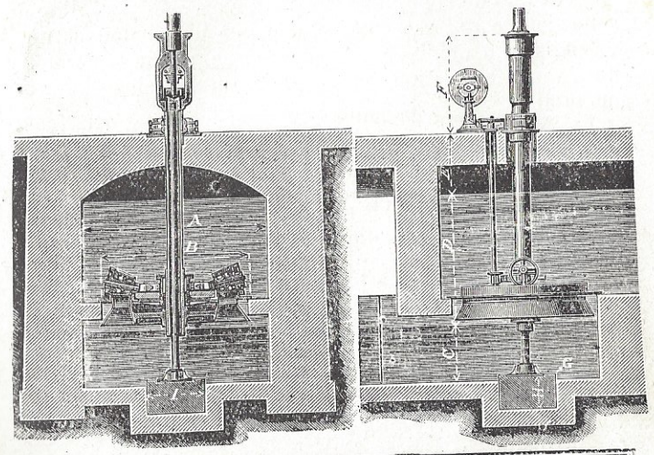
Fig. 82, 83 et 84. — Turbine Fontaine.

d'eau en maçonnerie, figures 82 à 84 ; ces turbines se mettent aussi en **bâche** close en tôle ;

Tableau indiquant les débits d'eau par seconde, la puissance en chevaux et la vitesse en tours par minute des *Turbines Fontaine* pour chutes de 1 à 4 mètres.

Numéros des turbines	CHUTES	1m000	1m500	2m000	2m500	3m000	3m500	4m000
30	Débit	»	»	108	125	140	153	165
	Chevaux	»	»	2.00	2.90	3.90	5.00	6.15
	Tours	»	»	53	62	68	75	80
31	Débit	400	476	525	630	705	772	834
	Chevaux	3.20	6.65	9.10	16.70	19.75	25.20	31.15
	Tours	28	32	35	40	45	49	53
32	Débit	814	967	1108	1280	1433	1560	1690
	Chevaux	6.50	13.55	20.70	29.85	40.10	51.00	63.00
	Tours	26	29	32	36	41	43	47
33	Débit	1208	1436	1645	1900	2120	2330	2510
	Chevaux	9.65	20.10	30.70	44.35	59.00	76.00	93.00
	Tours	24	27	29	34	38	41	44
34	Débit	1590	1890	2165	2500	2800	3060	3310
	Chevaux	12.45	26.45	40.00	58.00	78.00	100.00	123.00
	Tours	22	25	27	32	36	39	42
35	Débit	2098	2494	2857	3300	3690	4040	4360
	Chevaux	16.70	34.90	53.00	77.00	100.00	130.00	160.00
	Tours	20	23	25	29	32	35	38
36	Débit	2798	3320	3810	4400	4920	5390	5820
	Chevaux	22.40	46.50	70.00	100.00	130.00	170.00	210.00
	Tours	18	20	22	25	29	31	34
37	Débit	4890	5820	6660	7700	8620	»	»
	Chevaux	39.00	80.00	120.00	170.00	240.00	»	»
	Tours	16	18	20	22	24	»	»
38	Débit	6500	7600	8700	9800	11300	»	»
	Chevaux	52.00	92.00	140.00	200.00	280.00	»	»
	Tours	14	16	18	20	22	»	»
39	Débit	8000	9500	10800	12000	»	»	»
	Chevaux	64.00	112.00	175.00	240.00	»	»	»
	Tours	12	14	16	18	»	»	»
40	Débit	10000	11800	13500	15000	»	»	»
	Chevaux	80.00	140.00	220.00	300.00	»	»	»
	Tours	10	12	14	16	»	»	»

La turbine Fontaine se compose d'un disque à aubes directrices (fig. 82) traversé en son centre par l'arbre



Numéros des Turbines	A	B	C	D	E	F	G	H	I
30	1.500	1.260	»	Chute	0.500	0.600	0.050	0.400	0.500
31	2.200	1.770	»	»	0.500	0.800	0.100	0.400	0.500
32	2.700	2.020	»	»	0.500	0.800	0 100	0.500	0.600
33	3.000	2.180	»	»	0.600	0.900	0.100	0.500	0.600
34	4.000	2.330	»	»	0.600	1 000	0.100	0.600	0.700
35	5.000	2.540	»	»	0.700	1.200	0.100	0.600	0.800
36	6.000	2.820	»	»	0.700	1.400	0.150	0.600	0.800
37	7.000	3.435	»	»	0 800	1.500	0.150	0.700	1.000
38	8.000	3.700	»	»	0.800	1.600	0.200	0.800	1.000
39	9.000	4.200	»	»	0.900	1.700	0.200	0.900	1.100
40	10.000	5.000	»	»	1.000	1.800	0.250	1.000	1.250

Fig. 85. — Installation et dimensions de la turbine Fontaine.

du disque moteur (fig. 83) qui est en dessous du premier.

Le vannage est constitué par deux **tabliers** en cuir hydrofuge armé de palettes en tôle, qui s'enroulent sur deux troncs de cône, fous sur deux axes solidaires d'une roue dentée qui est commandée par un pignon et un mécanisme à manivelle, figure 85 ; ce vannage permet de donner admission partielle ou totale selon l'effort nécessaire.

Le **pivot** peut être sous l'eau ou hors de l'eau, des modèles représentés figures 91 et 92.

Ces turbines sont intéressantes dans le cas de basses chutes, 1 à 4 m., à débit et hauteur de chute variables ; elles sont d'un grand diamètre et tournent très lentement ; les tableaux ci-après en donnent les dimensions caractéristiques.

Dimensions des turbines Fontaine et de leurs chambres d'eau. — La hauteur C variant pour chaque cas, suivant la hauteur de chute et le débit correspondant, ne peut être fixée sur ce tableau. Mais on peut l'obtenir par la formule suivante : $C = \frac{Q}{A \times V}$ dans laquelle Q représente le débit d'eau à la seconde, A la largeur de la chambre indiquée au tableau, et V la vitesse de l'eau qui doit être de 0,500 à 0,700.

Exemple : On a comme chute 1 m. 500 et comme débit Q = 1436 litres, ce qui correspond à la turbine n° 33. Sur le tableau, la largeur de la chambre A indiquée est de 3 m., on a donc en adoptant la vitesse V = 0,500, la plus favorable, une profondeur :

$$C = \frac{1,436}{3,000 \times 0,500} = 0 \text{ m. } 957.$$

Dans le cas où l'on se trouve gêné par des murs existants ou par des considérations importantes, on peut prendre la vitesse V = 0,800 comme limite extrême.

Les turbines *Jonval*, *Jonval-Kœchlin*, *Girard*, *Schavaber*, sont des axiales parallèles à axe vertical ; on peut les faire fonctionner en **siphon,** c'est-à-dire en bâche avec **diffuseur aspirateur** d'eau quand la turbine doit être installée au-dessus du niveau d'aval.

Rendement. — Il atteint 85 p. 100 quand les aubes sont bien polies et que la turbine fonctionne noyée ; mais, à admission réduite, le rendement s'abaisse entre 70 et 75 p. 100.

On construit ces turbines en bâche jusqu'à 50 m. de chute.

Turbines mixtes dites américaines, centripètes. — Ces appareils conviennent aux basses et moyennes chutes, on les fait en chambres d'eau en maçonnerie pour basses chutes et en bâche avec conduites forcées pour chutes jusqu'à 50 m.

Le rotor comporte, selon sa hauteur, une ou plusieurs couronnes d'aubes dans lesquelles l'eau entre par la circonférence et sort parallèlement à l'axe ; les directrices forment une couronne concentrique enveloppant le rotor et le vannage est constitué par un cylindre F, figure 91, qui descend à l'intérieur des aubages directeurs ; ce cylindre est soutenu par deux crémaillères I mues par un mécanisme à main avec contrepoids d'équilibrage. La figure 86 montre l'ensemble d'une de ces turbines et les figures 91 et 92 les coupes de deux modèles, l'un avec **pivot sous l'eau** et l'autre avec **pivot hors de l'eau.** Le pivot **sous l'eau** tourne sur un bloc B en bois de gaïac ; le pivot **hors de l'eau** comporte un arbre creux E, figure 91, qui repose par le pivot P sur un grain en bronze à bain d'huile contenue dans un **gobelot.**

La figure 88 montre la couronne directrice et la figure 87 le rotor, démontés.

Dans les turbines *Laurent-Collot*, le vannage cylindrique est extérieur aux aubes directrices.

Ces turbines se construisent maintenant avec **directrices mobiles** autour d'axes verticaux, comme représenté figures 96 et 97 ; l'ouverture et la fermeture des volets formant les aubes directrices se fait au moyen de biellettes articulées sur une grande couronne commandée

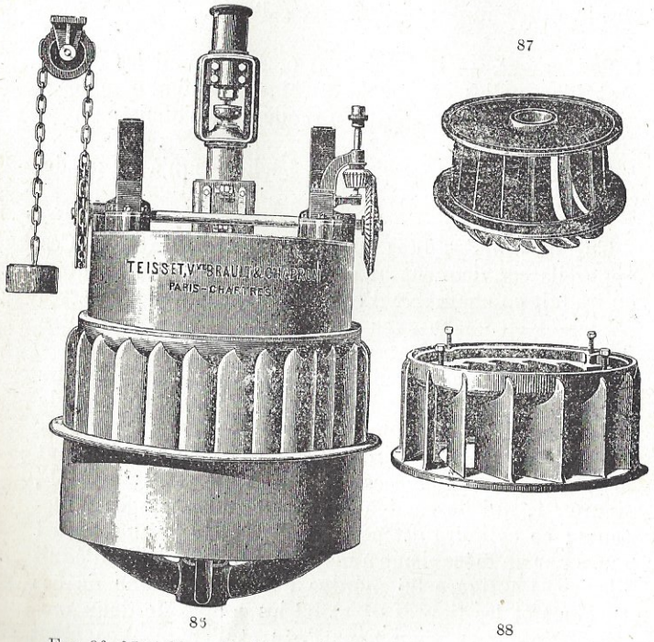
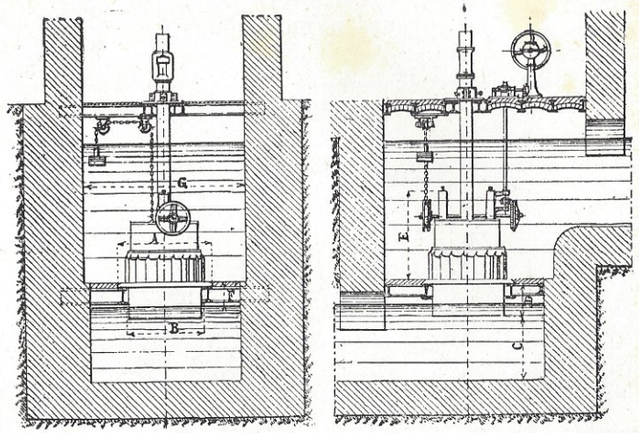
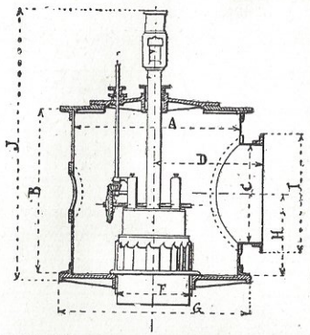


Fig. 86, 87 et 88. — Turbine américaine centripète et ses aubages.



Numéros de Séries des Turbines	DIMENSIONS DES TURBINES						
	A	B	C	D	E	F	G
0	580	430	450	220	320	30	900
1	580	430	450	220	340	30	900
2	630	470	500	250	470	40	1.000
3	730	580	550	270	840	50	1.200
4	850	700	600	270	980	60	1.400
5	950	780	650	325	1.090	70	1.600
6	1.050	880	700	350	1.240	80	1.800
7	1.150	980	770	375	1.320	90	2.000
8	1.230	1.080	850	400	1.430	100	2.200
9	1.330	1.180	925	425	1.530	110	2.400
10	1.450	1.280	1.000	450	1.660	120	2.600
11	1.550	1.380	1.070	475	1.740	130	2.800
12	1.650	1.480	1.150	500	1.940	140	3.000
13	1.750	1.580	1.220	525	2.100	160	3.200
14	1.850	1.680	1.300	550	2.180	180	3.400
15	1.950	1.780	1.370	575	2.180	200	3.600
16	2.050	1.880	1.450	600	2.230	220	3.800
17	2.170	1.980	1.520	625	2.260	240	4.000
18	2.300	2.080	1.600	650	2.340	260	4.200
20	2.580	2.350	1.750	680	2.650	300	4.700
22	2.900	2.680	1.900	720	2.900	340	5.000

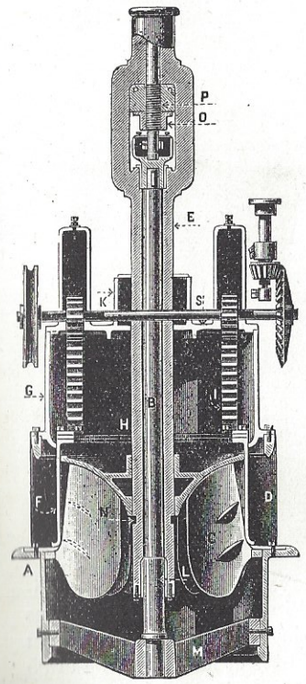
Fig. 89. — Turbine américaine ; proportions des chambres d'eau, selon le diamètre B de la turbine.



Numéros de Séries des turbines	DIMENSIONS PRINCIPALES									POIDS APPROXIMATIFS
	A	B	C	D	F	G	H	I	J	
										kil.
0	840	1.100	500	625	400	1.050	560	670	1.500	600
1	850	1.100	550	625	430	1.050	560	720	1.600	650
2	950	1.200	600	700	450	1.200	600	770	1.700	800
3	1.350	1.300	700	880	550	1.500	650	870	2.250	1100
4	1.350	1.500	850	880	650	1.500	750	920	2.500	1550
5	1.550	1.700	1.000	1.000	750	1.750	850	1.170	2.750	2000
6	1.650	1.850	1.150	1.050	850	1.850	925	1.320	2.900	2500
7	1 750	2.000	1.300	1.100	950	1.950	1.000	1.470	3.100	3000
8	1.850	2.100	1.400	1.150	1.050	2.050	1.050	1.570	3.200	3500
9	1.950	2.150	1.500	1.200	1.150	2.150	1.075	1.670	3.300	4000
10	2.050	2.200	1.600	1.250	1.250	2.250	1.100	1.770	3.400	4500
11	2.150	2.250	1.700	1.300	1.350	2.350	1.125	1.870	3.500	5000

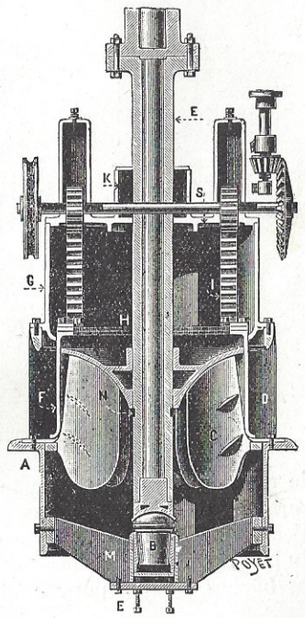
Fig. 90. — Turbine en bâche ; proportions de la bâche selon le diamètre F de la turbine.

par un engrenage qui peut être mû à la main ou mis sous la dépendance d'un régulateur automatique.



91

Fig. 91. — Pivot hors de l'eau.



92

Fig. 92. — Pivot sous l'eau.

On fait aussi des turbines de ce système à axe horizontal, à **bâche en spirale** comme on le voit figure 98 et

99 ; on les emploie pour les hautes chutes. Le tableau ci-après donne les caractéristiques de quelques-unes de ces turbines à moyenne vitesse pour chutes jusqu'à 15 m., d'après MM. *Teisset* et *Rose-Brault*. Le rendement

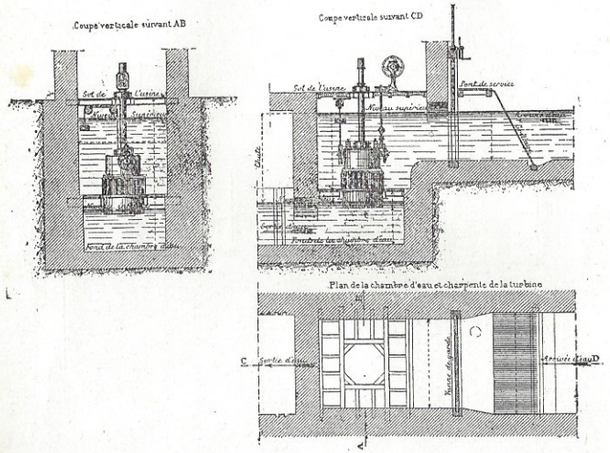


Fig. 93. — Turbine en chambre d'eau pour basse chute.

de ces turbines atteint en moyenne 80 p. 100. Les figures 93, 100 et 101 montrent l'installation des chambres d'eau pour turbines à axe vertical et horizontal à niveau du bief d'amont pour basses chutes et les figures 94 et 95 les bâches en tôle pour hautes chutes.

Turbine Francis. — Ce genre de turbine, généralement préféré, est du type centripète à réaction, injection totale, admission radiale et sortie plus ou moins axiale ; le réglage se fait au moyen d'**aubages distributeurs**

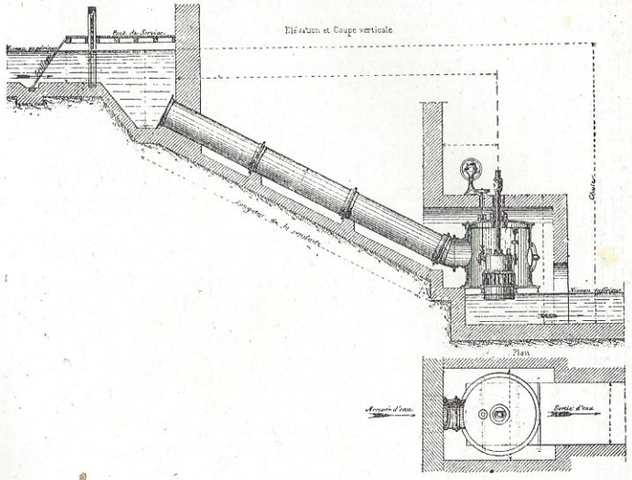


Fig. 94. — Turbine en bâche pour haute chute.

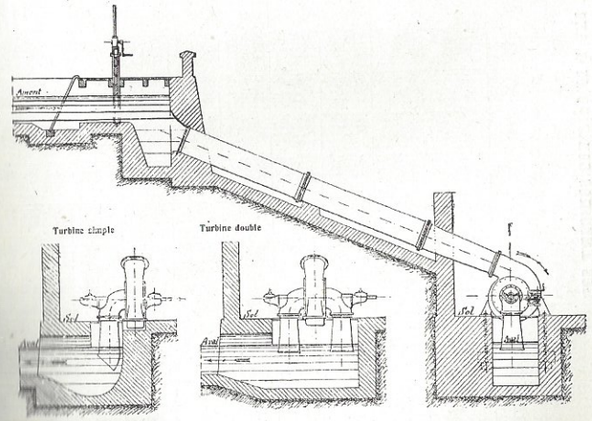


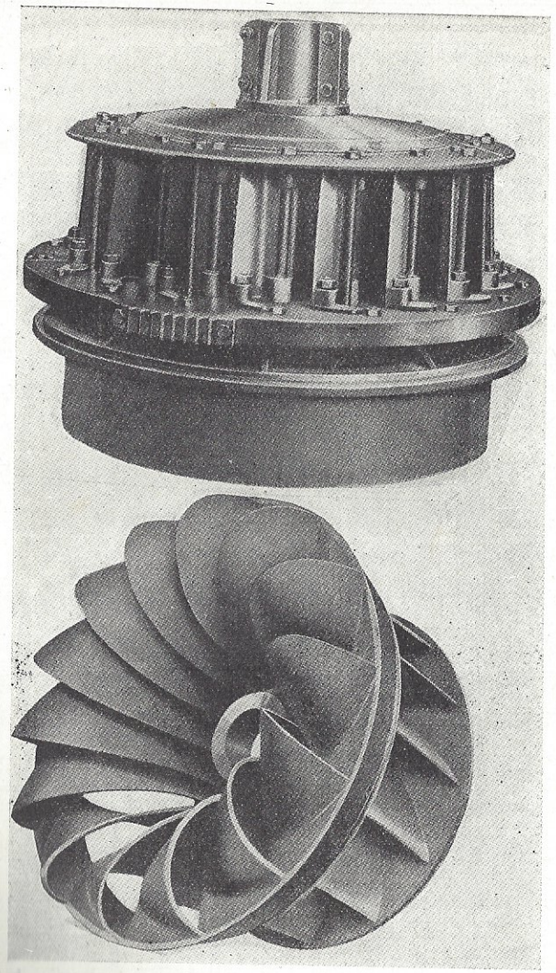
Fig. 95. — Turbine horizontale centripète pour haute chute.

Tableau des débits d'eau par seconde, de la puissance en chevaux et du nombre de tours par minute, des Turbines centripètes à axe vertical G. V. de MM. Teisset et Rose-Brault.

Chutes		45 r	45	55 r	55	65 r	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215
0,800	Débit..	228	321	375	486	571	698	934	1200	1492	1815	2185	2650	3090	3570	4070	4610	5190	5810	6450	7140	7850
	Force..	1,88	2,66	3,11	4,02	4,72	5,78	7,75	9,96	12,35	15,05	18,05	22,00	25,60	29,60	33,80	38,25	43,00	48,20	53,60	59,25	65,00
	Vitesse.	134	134	108	108	92	92	80	71	63	57	52	48	44	41	39	35	34	32	30	29	28
1,000	Débit..	255	360	420	545	640	780	1045	1340	1670	2030	2450	2970	3460	4000	4560	5180	5820	6500	7210	8000	8780
	Force..	2,65	3,74	4,36	5,66	6,66	8,00	10,86	13,93	17,38	21,15	25,50	30,90	36,00	41,60	47,50	53,90	60,50	67,60	75,00	83,10	91,30
	Vitesse.	150	150	122	122	103	103	90	79	71	64	58	54	50	46	43	41	38	36	34,5	33	31
1,250	Débit..	286	402	470	608	717	870	1165	1500	1860	2265	2740	3320	3870	4470	5100	5790	6510	7270	8080	8950	9800
	Force..	3,72	5,23	6,12	7,90	9,31	11,33	15,15	19,50	24,20	29,50	35,60	43,20	50,30	58,15	66,20	75,10	84,60	94,40	104,80	116,25	127,40
	Vitesse.	168	168	137	135	116	116	100	89	79	72	65	60	56	52	48	45	43	40	38	36	35
1,500	Débit..	312	440	513	665	783	955	1285	1640	2045	2470	3000	3630	4240	4900	5590	6320	7130	7960	8830	9790	10760
	Force..	4,87	6,88	8,02	10,35	12,25	14,92	20,10	25,65	31,80	38,50	46,90	56,75	66,10	76,70	87,20	98,80	111,50	124,25	138,10	153	168
	Vitesse.	183	183	150	150	126	126	110	97	87	79	72	66	61	57	53	50	47	44	42	40	38
1,750	Débit..	338	475	555	720	848	1035	1380	1775	2210	2680	3240	3930	4580	5300	6040	6840	7700	8610	9550	10600	11620
	Force..	6,15	8,63	10,10	13,10	15,40	18,80	25,15	32,25	40,20	48,70	59,00	71,60	83,20	96,30	110,00	124,60	140,00	156,50	173,80	193	212
	Vitesse.	198	198	162	162	135	135	119	105	94	85	78	71	65	61	57	54	51	48	45	43	41
2,000	Débit..	361	508	593	770	905	1100	1480	1895	2360	2870	3460	4200	4900	5640	6450	7310	8240	9200	10200	11300	12420
	Force..	7,50	10,58	12,30	16,00	18,90	22,90	30,75	39,40	49,20	59,50	71,90	87,20	102,00	117,00	134,00	152,00	171,25	191,00	211,50	235	258
	Vitesse.	212	212	173	173	143	143	127	112	100	91	83	76	71	67	61	58	54	51	48	46	44
2,250	Débit..	382	540	630	818	960	1170	1570	2010	2510	3050	3680	4450	5190	6000	6840	7770	8730	9750	10820	12000	13170
	Force..	8,94	12,62	14,75	19,10	22,45	27,30	36,75	47,00	58,60	71,30	86,00	104,25	121,50	140,00	160,00	181,50	204,50	228	253	281	308
	Vitesse.	225	225	183	183	155	155	135	119	106	95	88	81	75	70	65	61	58	54	51	49	47
2,500	Débit..	404	570	665	862	1015	1235	1655	2125	2640	3220	3880	4690	5480	6320	7210	8200	9200	10270	11400	12620	13870
	Force..	10,50	14,80	17,25	22,40	26,40	32,00	43,00	55,30	68,50	83,60	101,00	122,00	142,20	164,00	187,50	213	239	267	296	328	361
	Vitesse.	237	237	193	193	164	164	143	125	112	101	93	85	79	73	69	64	61	57	54	52	50
3,000	Débit..	442	623	728	940	1110	1350	1810	2320	2880	3510	4250	5140	6000	6920	7900	8940	10050	11250	12500	13830	15200
	Force..	13,80	19,45	22,60	29,30	34,60	42,20	56,60	72,70	90,00	109,80	132,60	160,00	187,00	216,00	246,50	279	313	351	390	431	475
	Vitesse.	260	260	212	212	180	180	156	137	123	111	102	93	87	82	75	71	67	63	59	57	54
3,500	Débit..	478	672	785	1020	1200	1455	1950	2510	3130	3790	4580	5550	6480	7490	8520	9700	10870	12180	13480	14960	16400
	Force..	17,40	24,45	28,55	37,10	43,60	53,00	71,00	91,30	113,50	138,00	167,00	201,50	235,50	272	310	353	395	442	490	544	597
	Vitesse.	281	281	229	229	193	193	168	149	133	120	110	101	94	87	81	77	72	68	64	61	59

Chutes		4,000	4,500	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000	11,000	12,000	13,000	14,000	15,000
0,800	Débit..	508	541	572	624	676	722	764	808	846	884	920	956	988
	Force..	21,20	25,30	29,76	39,00	49,20	60,00	71,50	84,00	96,70	110,50	124,50	139,25	154
	Vitesse.	300	318	336	366	396	424	450	474	498	520	542	562	580
1,000	Débit..	720	762	804	880	950	1015	1080	1140	1195	1245	1300	1350	1395
	Force..	29,92	35,70	41,84	55,00	69,05	84,60	101,00	118,40	137,00	156,00	175,75	195,50	217
	Vitesse.	300	318	336	366	396	424	450	474	498	520	542	562	580
1,250	Débit..	840	890	940	1026	1110	1185	1260	1330	1390	1450	1520	1575	1625
	Force..	34,88	41,60	49,00	64,15	80,80	98,50	118,00	138,00	159,00	181	205	229,00	253
	Vitesse.	245	260	274	300	324	346	366	386	405	424	442	458	475
1,500	Débit..	1090	1155	1215	1330	1440	1540	1635	1725	1805	1880	1960	2040	2110
	Force..	45,28	53,90	63,20	82,80	104,85	128,00	152,80	179,25	207	235	265	297	329
	Vitesse.	245	269	274	300	324	346	366	386	405	424	442	458	475
1,750	Débit..	1280	1355	1435	1565	1695	1810	1920	2030	2120	2220	2305	2400	2480
	Force..	53,30	63,20	74,50	98,00	123,25	150,00	179,60	211,00	243	277	312	349	386
	Vitesse.	207	220	232	252	270	286	310	328	344	360	374	386	401
2,000	Débit..	1520	1655	1740	1910	2070	2200	2340	2470	2590	2700	2810	2920	3020
	Force..	64,00	77,25	90,50	119,40	150,50	183,20	218,50	256	296	337,50	380	424	471
	Vitesse.	207	220	232	252	270	290	310	328	344	360	374	386	401
2,250	Débit..	1790	1950	2330	2570	2760	2960	3140	3310	3470	3620	3770	3900	4030
	Force..	86,90	103,80	121,00	160,80	201,20	246,00	293	344	397	452	511	568	629
	Vitesse.	180	191	200	220	238	254	270	284	288	312	325	336	349
2,500	Débit..	2680	2840	3000	3280	3550	3790	4020	4250	4450	4640	4830	5020	5200
	Force..	111,44	133	156	205	258	315	376	442	510	581	654	730	811
	Vitesse.	159	169	178	194	210	224	238	250	262	274	287	288	308
3,000	Débit..	3340	3550	3720	4090	4420	4720	5020	5280	5550	5780	6030	6260	6480
	Force..	139,00	166	193	254	321	393	468	548	633	720	815	908	1010
	Vitesse.	142	150	158	174	188	200	212	224	235	246	256	266	275
3,500	Débit..	4060	4310	4530	4940	5360	5740	6100	6440	6750	7020	7330	7580	7830
	Force..	169,20	201	236	308	389	476	570	668	772	878	990	1105	1222
	Vitesse.	128	137	144	158	170	182	192	202	212	222	232	240	250
4,000	Débit..	4900	5200	5480	6000	6480	6920	7360	7760	8150	8500	8830	9160	9490
	Force..	204,00	243	285	375	472	575	688	808	932	1060	1193	1335	1480
	Vitesse.	117	125	131	143	155	166	175	186	196	203	213	219	228
4,500	Débit..	5940	6310	6640	7260	7860	8400	8900	9380	9860	10280	10700	11100	11490
	Force..	247	295	345	454	573	698	834	976	1127	1280	1445	1612	1790
	Vitesse.	108	115	120	132	142	152	162	170	180	187	196	202	210
5,000	Débit..	6920	7350	7740	8480	9160	9800	10380	10960	11440	12000	12480	12960	13400
	Force..	288	343	402	529	666	816	972	1138	1310	1496	1688	1885	2090
	Vitesse.	100	106	112	122	132	141	150	158	166	173	181	187	194
6,000	Débit..	8000	8490	8940	9800	10600	11300	12000	12640	13280	13840	14420	14980	15500
	Force..	332	396	466	613	770	936	1122	1312	1517	1730	1950	2170	2415
	Vitesse.	99	99	104	114	123	132	140	147	155	161	168	174	180
7,000	Débit..	9120	9680	10200	11180	12080	12900	13680	14420	15120	15800	16420	17040	17650
	Force..	380	452	530	698	880	1072	1281	1500	1732	1972	2225	2485	2655
	Vitesse.	87	92	97	107	115	123	131	138	145	151	157	167	169
8,000	Débit..	10360	11000	11580	12640	13680	14620	15540	16400	17190	17880	18620	19400	20100
	Force..	431	513	601	790	997	1216	1452	1700	1963	2232	2520	2820	3140
	Vitesse.	82	87	92	100	108	116	123	130	136	142	148	153	159
9,000	Débit..	11640	12390	13020	14260	15403	16480	17460	18400	19300	20100	20950	21750	22550
	Force..	484	579	678	892	1120	1370	1635	1912	2210	2515	2830	3170	3530
	Vitesse.	77	82	86	94	102	109	116	122	128	134	140	144	150
10,000	Débit..	13000	13800	14540	15920	17220	18400	19500	20540	21550	22500	23450	24350	25200
	Force..	541	645	755	994	1252	1528	1826	2136	2460	2803	3165	3535	3930
	Vitesse.	73	77	81	89	96	103	110	115	121	126	132	136	141
11,000	Débit..	14420	15300	16160	17660	19100	20400	21640	22800	23950	25000	26000	26950	27900
	Force..	600	715	838	1105	1390	1692	2028	2370	2740	3120	3515	3920	4350
	Vitesse.	69	73	77	84	91	98	104	109	114	120	124	129	134
12,000	Débit..	16000	16980	17900	19580	21200	22600	24000	25240	26500	27650	28800	29920	31000
	Force..	663	791	930	1224	1543	1880	2246	2620	2900	3450	3890	4350	4820
	Vitesse.	66	70	74	81	87	93	99	104	110	114	119	123	128
13,000	Débit..	17560	18620	19600	21520	23240	24840	26340	27740	29100	30400	31600	32800	34000
	Force..	730	870	1019	1344	1696	2064	2468	2890	3335	3800	4275	4780	5310
	Vitesse.	63	67	70	77	83	89	94	100	104	109	114	118	122

96



97

Fig. 96 et 97. —Couronne directrice et aubage d'une turbine Laurent-Collot.

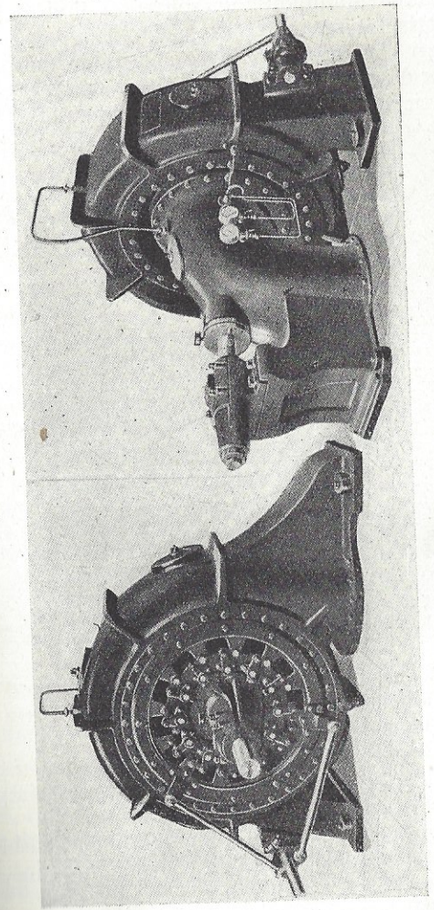
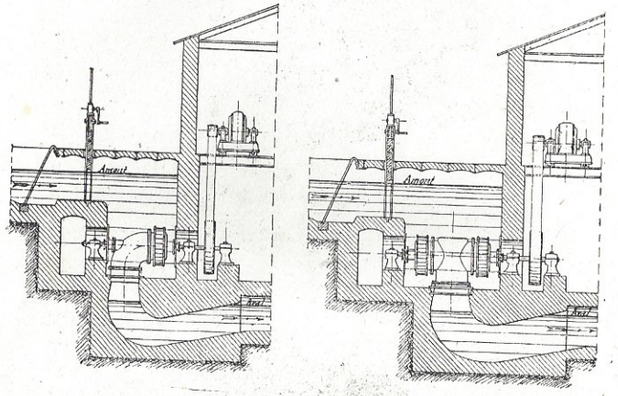


Fig. 98. — Vue côté mouvement des directrices.
Fig. 99. — Vue côté de la sortie d'eau.
Fig. 98 et 99. — Turbine horizontale pour hautes chutes.

mobiles autour de pivots tous solidaires d'une couronne qui les **oriente, ouvre** ou **ferme** l'admission d'eau au rotor aussi bien par manœuvre à la main que par un **régulateur à servo-moteur** à huile ; ces turbines se font à axe vertical ou à axe horizontal pour hautes et basses chutes et grandes vitesses de rotation. La bâche qui



100 101

Fig. 100. — Turbine horizontale pour basse chute.
Fig. 101. — Deux turbines horizontales conjuguées pour basse chute.

amène l'eau aux aubages distributeurs a la forme d'une spirale (coquille d'escargot) comme on le voit figures 102 et 104.

Nous décrirons, d'après les *Etablissements Leflaive* et *les Ateliers de Vevey*, trois installations-types, importantes, de ces turbines :

1° Aux usines de *la Jogne* (Fribourg, Suisse) 4 turbines *Francis* à axe vertical de 6 000 chevaux chacune, figures 102 et 103.

Hauteur de chute : variable de 95 à 118 m.
Puissance : variable de 6 000 à 7 300 chevaux.
Vitesse : 500 tours par minute.
Diamètre du rotor : 1 200 mm.
Diamètre de l'entrée de la bâche spiraloïde : 1 100 mm.

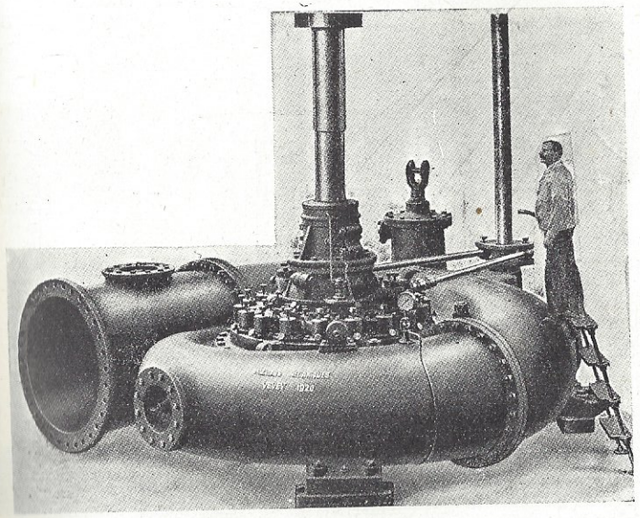


Fig. 102. — Turbine Francis de 6 000 CV., 500 t. p. m., chute 105 m.

Diamètre de l'entrée de l'aspirateur diffuseur à la sortie de l'eau : 1 000 mm.

Un alternateur est monté en haut de l'arbre de la turbine, ce qui charge le **palier de butée** supportant l'arbre, par sa partie supérieure, de 31 000 kilogrammes.

La bâche spirale, en fonte, est en deux pièces ; le **distributeur** est formé de deux fonds ou couvercles bou-

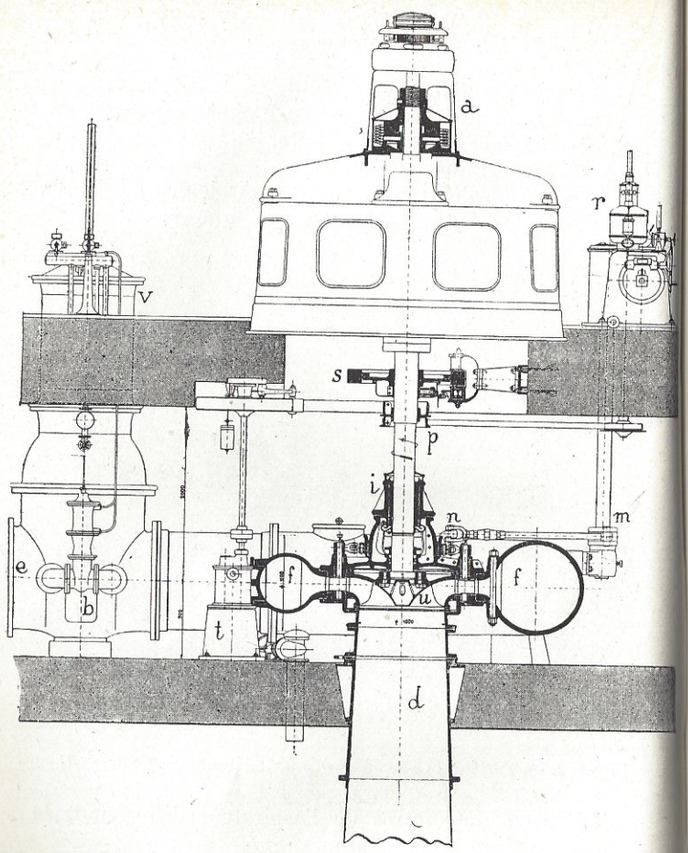


Fig. 103. — Turbine Francis de 6 000 chevaux.

a, palier de butée ; *r*, régulateur à servo-moteur ; *s*, frein à sabot ; *p*, poulies actionnant le régulateur ; *i*, palier-boîtard ; *m*, *n*, bielle actionnant les aubes directrices ; *ff*, bâche spirale ; *u*, roue motrice ; *d*, aspirateur-diffuseur ; *t*, roue Pelton actionnant la pompe à huile du régulateur ; *e*, arrivée d'eau forcée ; *b*, by-pass sur la conduite forcée ; *v*, vanne d'arrêt de la conduite forcée.

lonnés des deux côtés de la bâche et les aubes directrices pivotent entre ces deux couvercles ; elles sont en acier coulé venues de fonte avec leurs tourillons et actionnées par des biellettes qui ont une certaine élasticité pour pouvoir se déformer si un corps étranger s'introduisait entre les aubes au moment de la fermeture.

La roue motrice est en acier coulé ; des dispositifs de graissage par huile sous pression et d'étanchéité par cuirs emboutis sont prévus partout où il est nécessaire.

2° Aux *Usines de Sainte-Tulle* (Basses-Alpes), 4 turbines *Francis* à axe horizontal de 10 000 chevaux chacune ; chaque turbine comporte deux rotors en deux bâches, calés sur un même arbre, soit deux turbines jumelées (fig. 104 et 105).

Hauteur de chute	33 m.
Débit	27 m³ par seconde.
Puissance	10 000 chevaux.
Vitesse	300 tours par minute.
Diamètre des roues	1 m. 700

Le réglage se fait par tachymètre à servo-moteur à huile ; l'arbre est accouplé directement à un alternateur ; les figures 104 et 105 montrent ces turbines jumelées qui ont un canal de fuite commune formant aspirateur, de 2 m. 600 de diamètre.

3° Aux *Usines de Manzac* (France), turbines *Francis* pour *basse chute* à axe vertical de 2 700 chevaux chacune alimentées par la rivière Dordogne (fig. 106, 107 et 108).

Hauteur de chute	4 m. 30
Débit	54 m³ par seconde.
Puissance	2 700 chevaux.
Vitesse	55 tours 1/2 par minute.
Diamètre des roues	5 m. 06
Poids d'une roue	31 000 kgr.

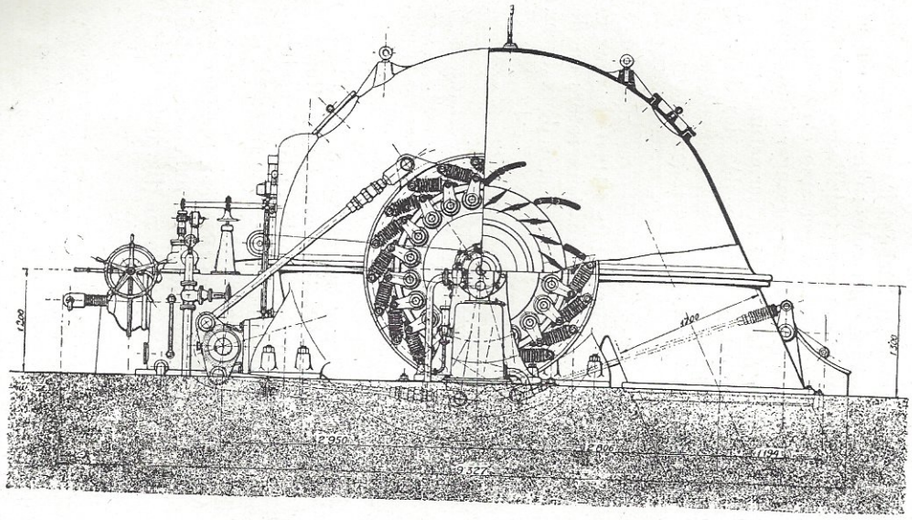
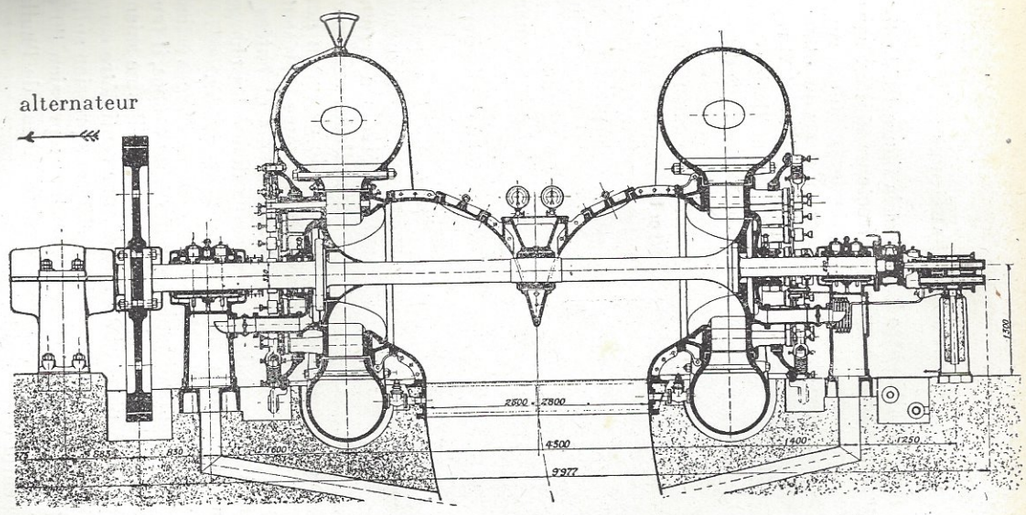


Fig. 104



105

Fig. 104 et 105. — Turbines Francis de 10 000 CV., usine de Sainte-Tulle.

La figure 106 montre la roue et la figure 107 le distributeur **sans bâche,** à aubages directeurs mobiles sous la dépendance d'un régulateur à servo-moteur à huile ; la figure 108 représente l'installation complète en chambre d'eau en maçonnerie, l'eau pénétrant directement dans les directrices du stator.

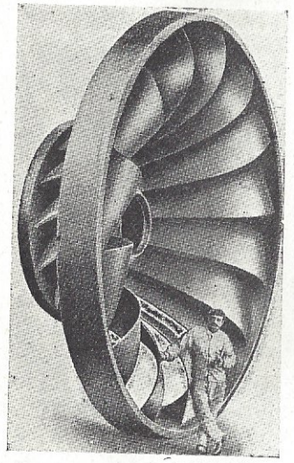


Fig. 106. — Roue Francis de 5 m. 06 de diamètre (Mauzac).

Les rendements sont :

84 p. 100 à pleine charge.

85 p. 100 à sept huitièmes de charge ;

83 p. 100 à trois quarts de charge.

76 p. 100 à demi-charge.

Pivots. — Les petites turbines verticales se montent sur pivots à crapaudine **sous l'eau,** roulement sur bois de gaïac, ou **hors de l'eau** comme représenté figures 91 et 92, ou encore sur **roulements et butées à billes ou à rouleaux** dont nous avons donné les charges pratiques au *volume IX* de cette *Encyclopédie.*

Mais pour les grandes turbines dont l'axe vertical supporte plusieurs dizaines de milliers de tonnes, il faut concevoir des surfaces de portée telles qu'elles ne soient pas chargées à plus de 50 à 60 kgr. par centimètre carré à condition que l'huile y soit refoulée sous pression suffisante pour s'insinuer entre les portées : pression 20 à 60 kgr. par centimètre carré, refroidissement de l'huile par serpentin d'eau froide.

Les Etablissements Leflaive et les Ateliers de Vevey emploient pour leurs grandes turbines à axe vertical le pivot représenté par la figure 110 : un moyeu *a* est muni d'une série de segments *b* qui s'appuient sur des anneaux flexibles *c* ; un de ces segments est représenté en plan en 1 et en élévation en 2 ; quand la turbine

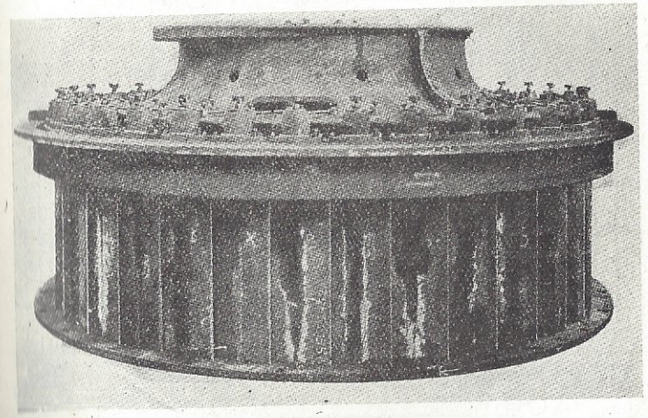


Fig. 107. — Distributeur sans bâche de 5 m. 06 intérieur.

commence à tourner, les segments s'inclinent légèrement et l'huile est forcée de passer entre eux et la lentille inférieure *d* ; on obtient ainsi un graissage constant sous pression artificielle d'huile. Les forces agissant sur un pivot de turbine sont :

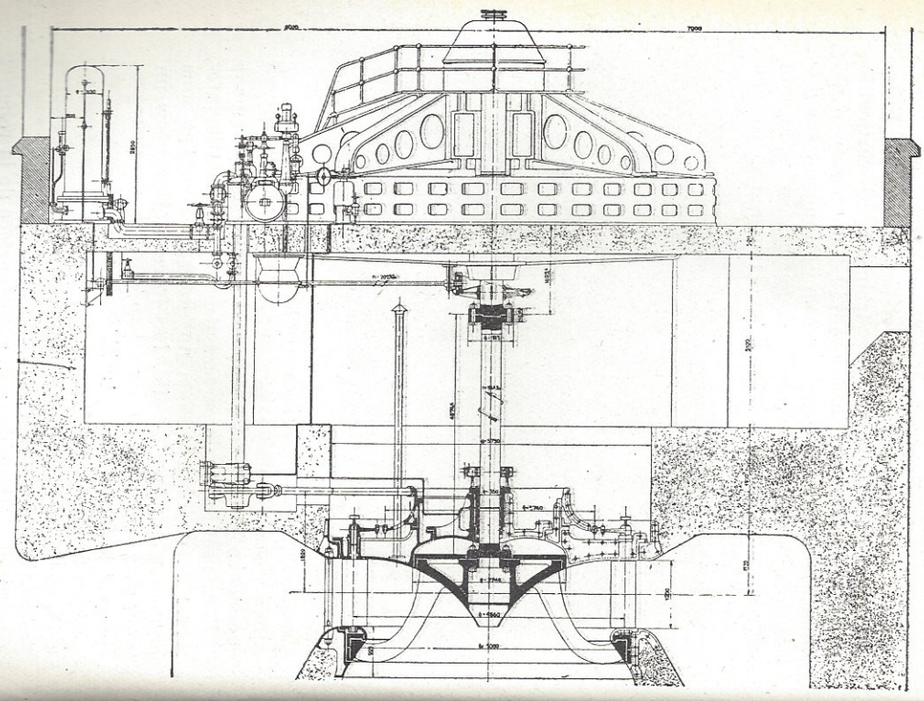
Poids de la roue de la turbine.

Poids propre de l'arbre.

Poids du rotor d'alternateur, s'il y a lieu.

Poids de l'eau que renferme la roue.

Pression statique de l'eau sur la surface de la roue.



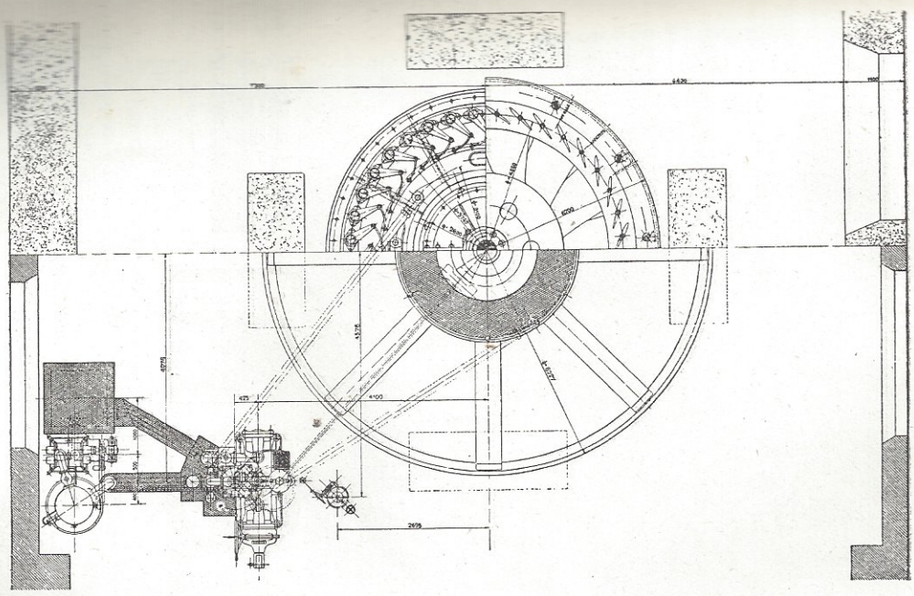


Fig. 108. — Turbine Francis en chambre d'eau, 2 700 CV., chute 4 m. 30, vitesse 55 t. p. m.

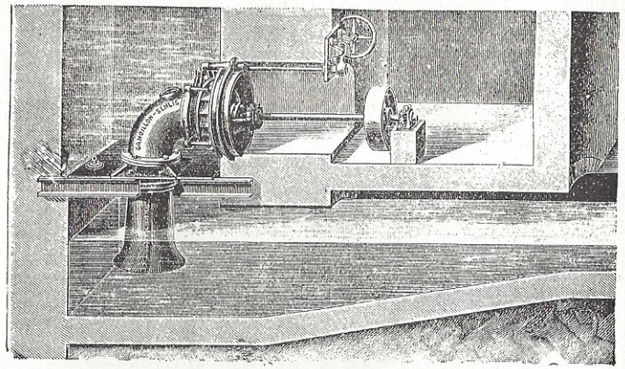


FIG. 109. — Installation d'une petite turbine à directrices mobiles en chambre d'eau ouverte avec aspirateur (jusqu'à 10 m. de hauteur de chute), *Gandillon, Senlis.*

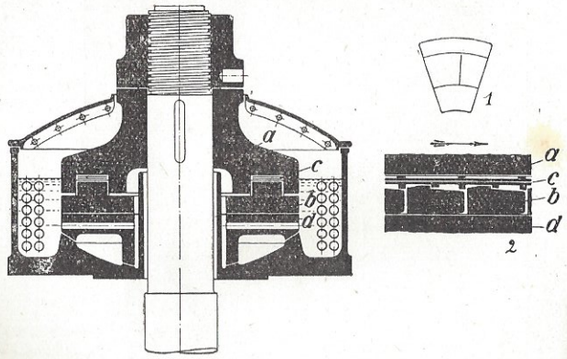


FIG. 110. — Pivot de turbine Leflaive,

Poids dynamique résultant de l'accélération dans le sens de l'axe.

Pression d'engrenages s'il y a lieu.

On doit calculer et tenir compte de ces diverses charges dans l'établissement du pivot et aussi dans le calcul de l'arbre.

Turbines à hélice. — L'idée d'employer une **hélice** analogue à celle d'un navire, pour former le rotor d'une

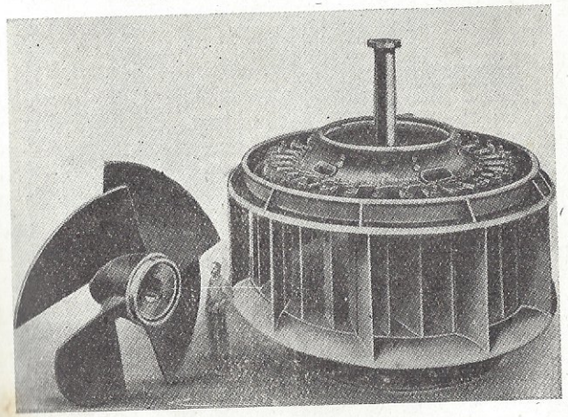


FIG. 111. — Turbine à hélice le Wynau.

turbine, est fort ancienne ; elle fut appliquée par *Jouval*, puis brevetée en 1860 par l'américain *Truax* qui employait une hélice à 4 aubes sans couronne extérieure ; *Horton* et *Williams*, *Nagler* à Milwaukee et le Docteur *Haplan* à Brunn ont perfectionné ce genre de turbines.

La figure 111 en montre une de 3 m. 50 de diamètre au rotor construite par les *Ateliers de Vevey* (Suisse) donnant 2 700 chevaux à 107 tours par minute sous une chute d'eau variant de 2 m. 4 à 5 m. 2, **basse chute**, par

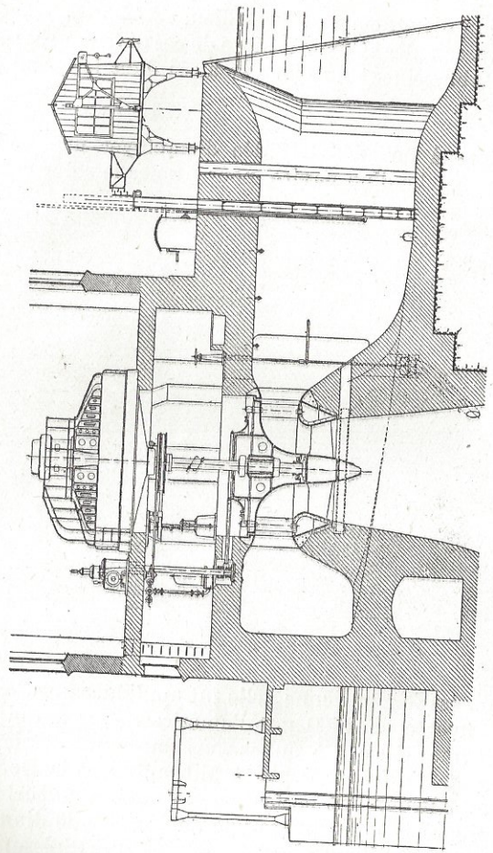


FIG. 112. — Turbine à hélice de Wynau, installation générale.

conséquent ; cette turbine, à axe vertical, entraîne directement un alternateur, comme on le voit figure 112.

Elle est à **action centripète, radiale** à **directrices mobiles.**

L'eau est amenée au distributeur par une bâche spirale en béton dont l'entrée a été disposée en vue de faciliter, par l'élimination des remous, le jaugeage du débit au moyen du moulinet. Le bâti de la turbine, composé de deux anneaux de scellement en fonte reliés par dix colonnes venues de fonderie avec eux, supporte la turbine, l'alternateur, une partie du plancher ainsi que la charge provenant du pivot.

La forme à donner au **tube d'aspiration** a été l'objet d'une attention spéciale en raison de la vitesse très considérable que l'eau possède encore à la sortie de la roue motrice et qui correspond à un quart et même un tiers de l'énergie totale. L'**aspirateur** (diffuseur) permet de récupérer la plus grande partie de cette énergie résiduelle par transformation graduelle de la vitesse en dépression à la sortie de la roue. La roue motrice d'une seule pièce, en acier coulé, est constituée par un moyeu portant quatre aubes sans couronne extérieure. Elle a la forme d'une **hélice de navire**. En vue de réduire la vitesse de l'eau à sa sortie, le diamètre de la roue est plus grand à la sortie qu'à l'entrée. Les aubes sont relativement longues pour améliorer le guidage de la veine liquide et prévenir les remous nuisibles. La roue, boulonnée sur le plateau d'accouplement venu de forge avec l'arbre de turbine, tourne dans une enveloppe en fonte facilement démontable.

Le **distributeur**, d'une construction semblable à celui d'une turbine Francis, est formé d'un anneau inférieur portant l'enveloppe conique de la roue motrice, d'un couvercle supérieur et de trente aubes pivotantes en acier coulé.

Le pivot et les coussinets de guidage sont à graissage par huile sous pression, fournie par une pompe.

La régulation se fait comme celle d'une turbine ordinaire.

Les turbines à hélice conviennent spécialement bien pour utiliser avec le minimum de frais la puissance disponible dans les rivières de plaine donnant de gros débits sous faibles chutes. Par rapport aux turbines Francis leurs avantages sont les suivants :

1° Nombre de tours très grand, donc coût et encombrement de l'alternateur réduits. Salle des machines moins large.

2° Rendements élevés pour des régimes compris entre trois quarts et quatre quarts de la charge. Le rendement des alternateurs est aussi plus élevé par suite de leur plus grande vitesse angulaire.

3° La puissance s'abaisse moins que ce n'est le cas pour les turbines Francis lorsque la chute diminue, les turbines à hélice sont donc particulièrement bien adaptées à l'aménagement des chutes de hauteur variable.

4° La roue n'ayant qu'un petit nombre d'aubes, la distance entre celles-ci est au moins trois fois plus grande que pour les turbines Francis, ce qui exclut toute possibilité d'obstruction. De plus, l'écartement des barreaux des grilles peut être augmenté, ce qui réalise une économie sur le coût de ces grilles, une diminution des pertes de charge à travers ces appareils et une réduction de la dépense de nettoyage.

5° L'alternateur est moins lourd, le pont roulant moins puissant, donc les murs du bâtiment moins épais.

6° La roue n'étant munie que d'un petit nombre d'aubes et coulées d'une seule pièce avec le moyeu est plus robuste que la roue Francis.

Rendement. — Sous la chute maximum de 5 m., le rendement est de 89 p. 100 et de 85 p. 100 sous chute de 4 m.

Turbines Négri. — Ces turbines sont du type axial

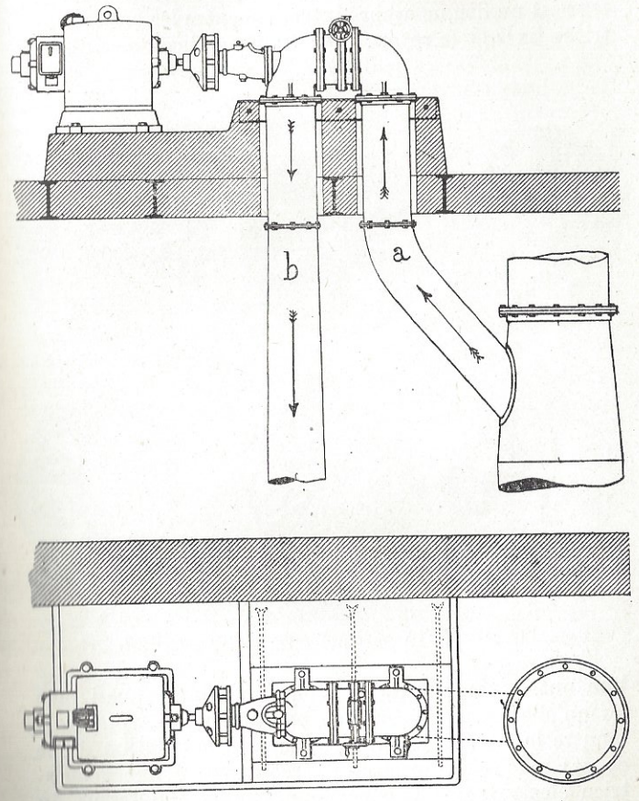
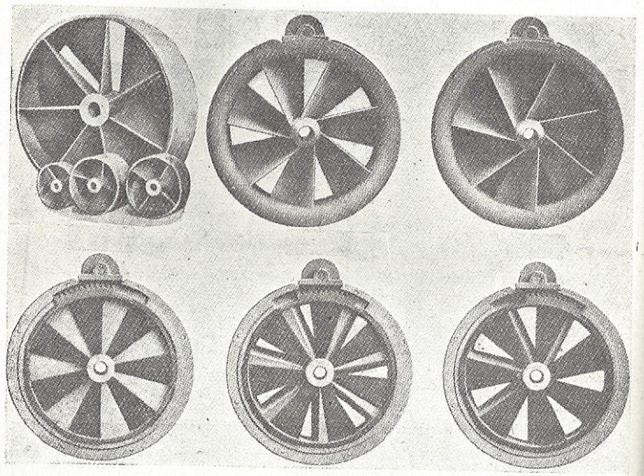


Fig. 113. — Turbine à hélice Négri.

ou parallèle, avec cette particularité que le rotor est

formé d'une roue à quatre, six ou huit surfaces hélicoïdales, selon l'importance de la machine et que l'**obturateur** est un disque ajouré interposé entre les aubes directrices fixes et le rotor ; ces turbines hélicoïdales **à réac-**

114 115 116



117 118 119

Fig. 114 à 119. — Détails de la turbine Négri.

tion ont l'avantage de pouvoir fonctionner aussi bien lorsqu'elles sont noyées que **par aspiration,** comme le montre la figure 113 qui représente l'installation d'une de ces machines, accouplée directement à une génératrice électrique, à une certaine hauteur au-dessus du niveau du canal de fuite : l'aspiration causée dans le tuyau de fuite *b* s'ajoute à la charge d'eau dans le tuyau

d'amenée *a* et la puissance totale de l'eau est récupérée par la turbine.

Un autre avantage est le large passage que le rotor et les directrices laissent à l'eau et aux détritus qu'elle peut contenir ; les feuilles, brindilles, ni même les galets, ne peuvent s'arrêter dans le mécanisme ; celui-ci est simple, tient peu de place et s'applique aussi bien à des turbines à axe vertical qu'à axe horizontal.

Les figures 114 à 119 montrent les pièces composant ces turbines à hélice :

Figure 114. — Roue ayant de quatre à huit pales hélicoïdales réunies par une couronne cylindrique extérieure, fondue d'une seule pièce ;

Figure 115. — Distributeur ayant autant de surfaces hélicoïdales directrices qu'il y en a à la roue ; vue **ouvert** à pleine admission.

Figure 116. — Distributeur fermé par le diaphragme interposé entre lui et le rotor ;

Figures 117, 118, 119. — Le distributeur vu du côté du rotor, fermé, à demi-ouvert et ouvert ; la manœuvre se fait par un secteur denté actionné par une vis sans fin et un volant à main.

Les vitesses des turbines *Négri* peuvent atteindre pour certains types plus de 3 000 tours par minute et se construisent depuis les plus petites puissances jusqu'à 2 000 chevaux pour des chutes de 1 à 50 m. en conduites forcées. Rendement 80 p. 100 au minimum à pleine charge.

CHAPITRE VIII

ROUES A CUILLERS. TURBINES PELTON

Vers l'année 1830, les moulins construits sur les affluents de l'Isère et du Rhône étaient mus par des roues horizontales d'environ 2 m. de diamètre, formées d'un grand nombre de palettes creuses, ou **cuillers,** ou **coquilles,** qui recevaient le **choc** d'un rapide courant d'eau (fig. 120) ; on utilise encore ces roues dans les Pyrénées et chez les Arabes ; leur rendement, très faible, ne dépasse pas 25 p. 100 ; cependant la roue à cuillers est l'origine des **roues-turbines Pelton,** qui sont des **turbines tangentielles à impulsion** utilisant la force vive de l'eau, qui agit sur elles par choc et dont le rendement, à pleine charge, atteint 85 p. 100 et ne descend pas à moins de 75 p. 100 à demi-charge.

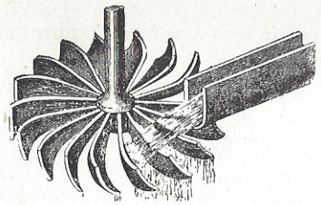


Fig. 120. — Ancienne roue à cuillers.

Les roues Pelton conviennent surtout à l'utilisation des très hautes chutes, 500 m. et plus ; elles ont été d'abord employées dans les Montagnes des Etats-Unis d'Amérique. On les construit maintenant en France pour des puissances allant à plus de 7 000 chevaux pour une seule roue ; un de leurs avantages est leur

grande vitesse de rotation, 500 tours et plus par minute, qui se prête bien à l'attaque directe des génératrices d'électricité ; on les construit généralement à arbre **horizontal** avec un, deux, trois et même quatre injecteurs d'eau.

La roue Pelton est moins coûteuse qu'une turbine ordinaire, elle s'installe avec moins de frais et l'usure n'affecte pas sensiblement son rendement ; les aubes ou coquilles en acier sont, du reste, facilement remplaçables.

En principe, la roue Pelton est constituée par une roue sur la jante de laquelle sont boulonnées les coquilles ou **augets,** qui recevront le choc de l'eau, et un ou plusieurs **injecteurs** terminés par une buse en forme de **lance à section circulaire ;** on avait essayé des ajutages de forme rectangulaire aplatie, mais le jet circulaire moins coûteux à réaliser donne de meilleurs résultats.

La roue Pelton doit toujours être munie d'un **régulateur** qui prévient les **emballements** susceptibles de causer l'éclatement de la roue par efforts centrifuges.

Nous allons étudier les différents organes de ces intéressantes turbines.

La **vitesse circonférentielle** extérieure des augets est égale à la moitié de la vitesse v du jet d'eau ; cette dernière est donné par $v = \sqrt{2gH}$, H étant la hauteur de chute déduction faite des pertes de charge dans les tuyaux d'amenée qui doivent être de diamètre suffisant pour que la vitesse du courant d'eau n'y excède pas 1 m. 50 environ par seconde ; nous avons donné plus haut les tableaux des valeurs de $\sqrt{2gH}$ et des pertes de charge dans les conduites.

Ayant fixé la vitesse angulaire de la roue, n tours par minute, on déduira le **rayon** R de la formule

$$\frac{2\pi Rn}{60} = \frac{v}{2}$$

d'où :

$$R = \frac{15v}{\pi n}.$$

Le **diamètre de l'injecteur** détermine la quantité d'eau dépensée : soit s la section **en mètres carrés** de la buse, on a $s = \frac{\pi d^2}{4}$, d étant ce diamètre.

Le **débit d'eau** par seconde est vs en mètres cubes ; si l'on fixe la puissance P à obtenir en chevaux-vapeur sous une hauteur de chute H on écrira :

$$P = \frac{vsH \times 1\,000 \times k}{75},$$

k étant le coefficient de rendement de la roue, 0,8 environ, d'où :

$$s = \frac{75P}{1\,000vHk}.$$

Les **augets** reconnus les meilleurs (fig. 121) sont com-

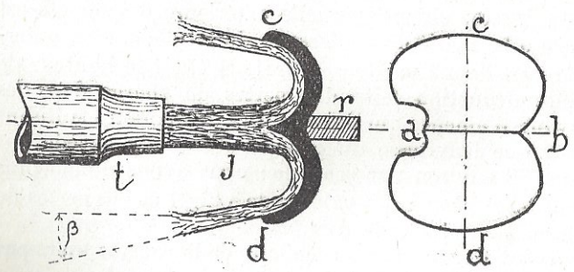


Fig. 121. — Schéma d'auget Pelton.

posés de deux coquilles séparées par un tranchant aigu, telles que l'angle β formé par la tangente à la courbe

au point de sortie des filets d'eau fasse avec la parallèle à l'axe de la tuyère un angle de 10° environ ; la **longueur** du couteau ab qui sépare les deux parties de l'auget est de deux à trois fois le diamètre d du jet d'eau J à sa sortie de la buse t ; la **largeur** intérieure cd de l'auget est environ $7d$; la **profondeur** des coquilles environ 1,2 à 1,5d ; ainsi qu'on le voit sur la figure 121, les augets sont **échancrés du côté extérieur** en a, ce qui permet le passage du jet d'un auget à l'autre.

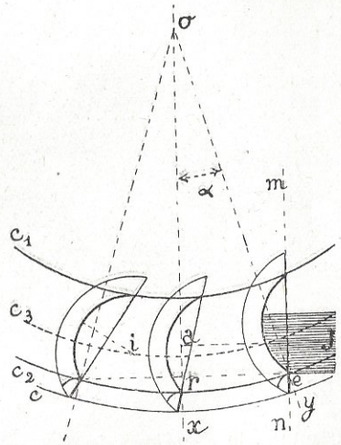


Fig. 122. — Epure de la roue Pelton.

La **position des augets** sur la jante de la roue est déterminée par l'épure figure 122 : au rayon ox on élève une perpendiculaire aJ au point a qui est au milieu de la couronne formée par les couteaux des augets ; cette perpendiculaire passe par l'axe du jet d'eau J ; on trace un rayon oy par le point e où les filets extérieurs du jet rencontrent la circonférence c_2 et on mène par ce point e une parallèle à ox, ce qui détermine l'angle meo que doit faire le couteau de l'auget avec le rayon oy de la roue.

Le **nombre** n **des augets** peut être déterminé par la formule $n = \frac{2\pi}{\sin \alpha}$, l'angle α étant égal à l'angle meo ; il y a évidemment intérêt à multiplier le nombre des

augets, mais ils ne doivent cependant être trop rapprochés, de façon à ce qu'un auget ne vienne pas couper le jet avant qu'il n'ait agi sur l'auget qui lui est perpendiculaire ; c'est ici que l'on voit l'utilité de l'**échancrure** faite à la partie extérieure des augets : elle doit avoir

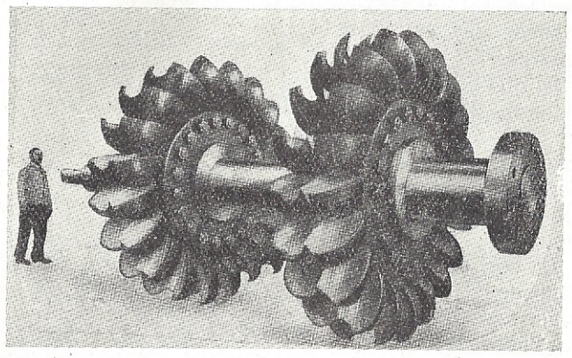


Fig. 123. — Grandes roues Pelton jumelées des turbines de l'usine d'Amsteg.

au moins le diamètre du jet qu'elle laisse passer d'un auget au suivant.

La figure 123 montre deux roues Pelton accouplées sur un même arbre horizontal ; ces roues sont celles des turbines représentées figures 124 et 125, d'après la *Société Leflaive* et les *Ateliers de Vevey ;* elles ont 1 m. 860 de diamètre et fonctionnent à *l'usine hydro-électrique d'Amsteg-Uri* (Suisse) dans les conditions suivantes :

Hauteur nette de chute.....	275 m.
Débit par seconde	4 750 l.
Nombre de tours, par minute.....	333,3

Diamètre du jet d'eau	215 mm.
Puissance par roue	7 150 chevaux.
Puissance des deux roues sur l'arbre..	14 300 chevaux.
Diamètre de la tubulure alimentant une seule roue Pelton.....	650 mm.
Nombre des aubes d'une roue	20

Ces aubes sont démontables une à une sans démonter

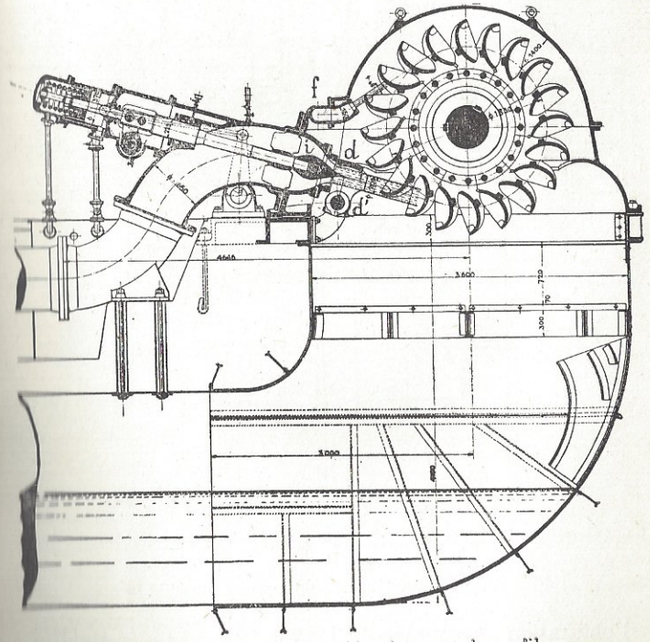


Fig. 124. — Roue Pelton d'Amsteg, vue de profil.

la roue. Chaque aube reçoit, par minute, 333 chocs de 17 tonnes et demie.

La figure 124, qui représente en coupe verticale une de ces roues, montre la disposition des **injecteurs** actuellement employés par la généralité des constructeurs :

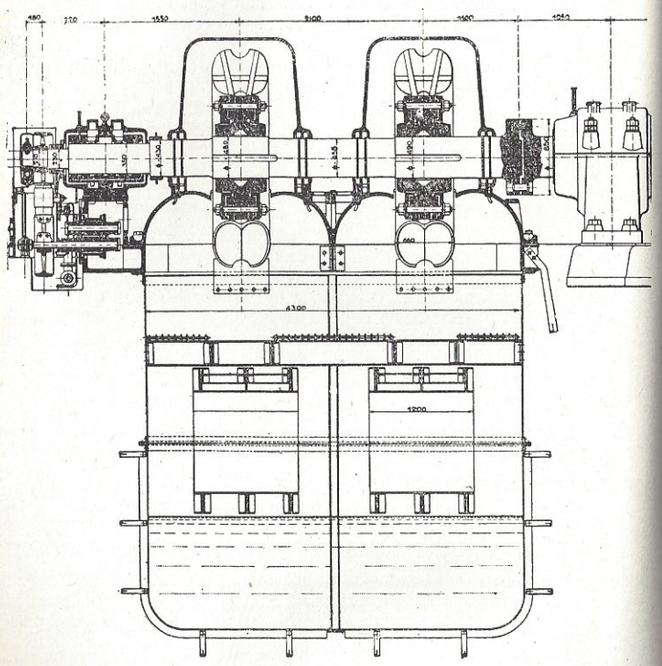


Fig. 125. — Roues jumelées d'Amsteg, vues de face.

l'**obturation progressive** du jet est faite par une **aiguille** de forme **ovoïde pointue** *i* soumise directement à l'action du régulateur automatique, mais pouvant être manœuvrée aussi à la main (aiguille de Hett) ; pour détourner

rapidement le jet d'eau hors des aubes un **déflecteur** *d* articulé en *d'* est aussi soumis à l'action du régulateur automatique qui sera décrit plus loin ; enfin, un **jet auxiliaire** *f* agissant sur la face convexe des aubes permet de **freiner hydrauliquement** la roue quand on veut obtenir son arrêt instantané.

L'aiguille obturatrice *i* a un **frein à huile** destiné à

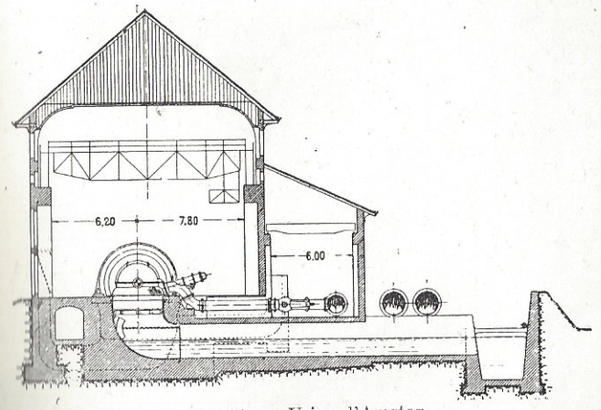


Fig. 126. — Usine d'Amsteg.

empêcher une fermeture brusque susceptible de former coup de bélier dans les conduites d'amenée ; il nous est impossible de donner ici la description détaillée de tous ces mécanismes délicats ; nous signalerons seulement que les coquilles-aubes sont en acier poli intérieurement pour éviter les remous d'eau ; on en voit le mode de fixation sur la figure 125 qui représente la vue en coupe verticale selon l'axe de la double turbine d'Amsteg, dont la figure 126 montre une vue générale avec les tuyaux d'amenée et le canal de fuite (*l'usine d'Amsteg* qui fournit

le courant au *chemin de fer du Saint-Gothard*, comporte cinq turbines Pelton à deux roues chacune, en tout 71 500 chevaux).

Dans le but de diminuer les dimensions et, par suite, le poids des augets, on construit des roues Pelton à

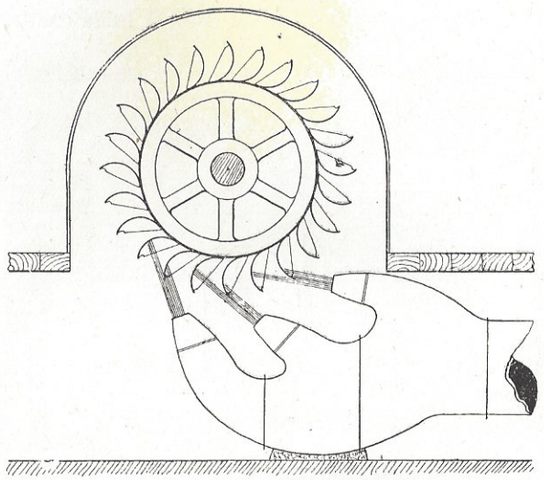


FIG. 127. — Schéma de roue Pelton à trois injecteurs.

plusieurs injecteurs, de deux à cinq, répartis sur toute la circonférence de la roue ; la figure 127 montre, en principe, le mode d'action de ces injecteurs multiples auxquels l'eau est amenée par une grosse **tête nourrice** et qui sont disposés pour envoyer les jets tangentiellement à la roue et perpendiculairement aux augets ; la figure 128 fait voir une roue Pelton de la firme *Teisset* et *Rose-Brault* à trois injecteurs avec son

Caractéristiques de quelques roues Pelton d'après MM. Laurent et Coltot

CHUTE en mètres	Débit, forces et vitesses							
10	Litres/sec.	1,04	4,1	9,25	26	50	84	125
	Chevaux	0,11	0,43	0,98	2,75	5,35	8,9	13,3
	Tours p. min.	900	297	225	149	112	90	75
20	L	1,45	5,8	13	36,5	71	118	176
	HP	0,31	1,23	2,77	7,75	15	25	37,4
	T	1270	424	318	212	159	127	106
30	L	1,78	7,15	16	44,5	87	144	216
	HP	0,57	2,30	5,1	14,2	27,8	46	69
	T	1540	514	385	257	192	154	128
40	L	2,06	8,3	18,6	52	102	168	251
	HP	0,88	3,52	7,9	22	43,4	71	106
	T	1800	600	450	300	225	180	150
50	L	2,3	9,10	20,5	57,2	112	185	277
	HP	1,22	4,87	11	30,5	60	100	148
	T	2000	670	500	335	250	200	167
60	L	2,5	10,1	22,5	63	123	205	305
	HP	1,6	6,5	14,4	40	78,5	131	196
	T	2190	730	547	315	274	219	157
70	L	2,71	11	24,6	68,5	134	223	332
	HP	2,02	8,2	18,4	51	100	166	248
	T	2300	790	590	395	295	236	197
80	L	2,9	11,6	26,2	73	142	235	352
	HP	2,46	9,9	22,2	62	121	200	300
	T	2540	845	635	423	318	254	212
90	L	3,07	12,4	27,8	77,5	151	252	375
	HP	2,95	11,9	26,5	74	145	242	360
	T	2700	900	670	450	335	270	225
100	L	3,25	13	29,2	81	159	262	394
	HP	3,4	13,9	31,2	86,5	170	280	420
	T	2820	940	705	470	353	282	235
120	L	3,55	14,2	32	89	174	288	431
	HP	4,55	18,2	41	114	222	367	552
	T	3100	1030	775	515	387	310	257
140	L	3,84	15,4	34,7	96,5	189	313	466
	HP	5,8	23	52	144	282	467	695
	T	3350	1120	838	560	419	335	280
150	L	4	16	36	100	195	322	484
	HP	6,4	25,6	58	168	316	520	780
	T	3470	1160	867	580	433	347	290
160	L	4,1	16,4	37	103	200	330	495
	HP	7	28	63	176	340	561	840
	T	3550	1180	887	590	443	355	295
180	L	4,38	17,7	39	110	215	350	530
	HP	8,3	34	75	210	410	670	1020
	T	3900	1260	975	630	487	390	315
200	L	4,7	18,5	41,2	116	226	370	560
	HP	10	39,5	88	246	480	785	1290
	T	4100	1340	1025	670	512	410	335

régulateur à servo-moteur à huile qui agit simultanément sur les trois injecteurs.

Le tableau ci-dessus donne, d'après MM. *Laurent* et *Collot* les caractéristiques de quelques roues Pelton :

L = débit en litres par seconde.
H = puissance en chevaux-vapeur.
T = tours par minute.

Turbines modernes. — La turbine centrifuge ne s'em-

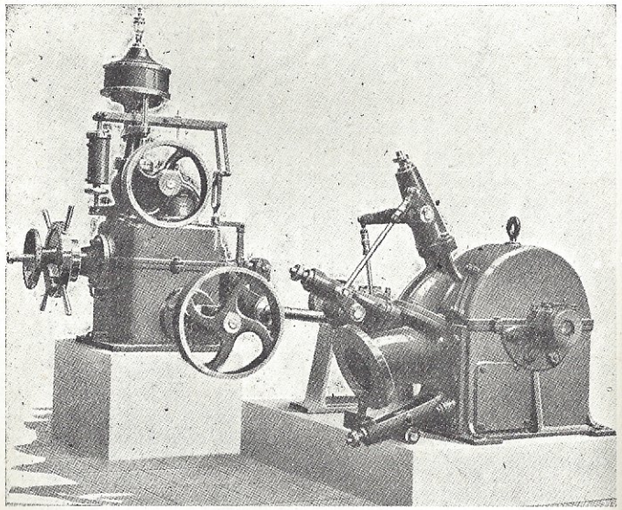


Fig. 128. — Roue Pelton à trois injecteurs et régulateur à huile.

ploie plus et celle centripète à admission tangentielle (turbine d'action) tend à disparaître, car son rendement est inférieur à celui des turbines à réaction mixte ; on

adopte maintenant, pour chutes de : 0 m. 80 à 15 m., les **turbines à hélice ;** de 10 m. à 300 m., les turbines **Francis** ou similaires ; de 50 m. à 1 600 m. et au-dessus, les roues **Pelton.**

Bibliographie. — Professeur *Rateau*, *Traité des turbomachines.* — *L. Guillot*, *Cours de mécanique*, vol. II et complément à ce volume, 1927.