

E. PACORET

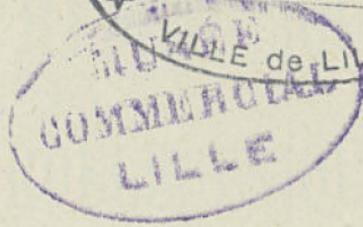
LES FORCES HYDRAULIQUES
ET LES
USINES HYDROÉLECTRIQUES

Librairie Delagrave

10.0

760

72-15
R-3



BMIC 34

LES FORCES HYDRAULIQUES
ET LES
USINES HYDROÉLECTRIQUES



LES FORCES HYDRAULIQUES

DE LA

USINE HYDROELECTRIQUE

N^o 3861671-401529

NOS RICHESSES NATIONALES

LES FORCES HYDRAULIQUES ET LES USINES HYDROÉLECTRIQUES

AMÉNAGEMENT DES CHUTES D'EAU
ET DES CENTRALES ÉLECTRIQUES

Hydraulique générale et Hydrologie.
Jaugeages. Barrages. Conduites forcées. Turbines.
Réservoirs naturels et artificiels.
Dynamos. Alternateurs. Moteurs. Transformateurs & convertisseurs.
Lignes de transport d'énergie. Réseaux d'interconnexion.
Usines thermiques. Centrales et supercentrales.
Traction électrique. Electrochimie et électrometallurgie.

PAR

ÉTIENNE PACORET

Ingénieur (A. et M.)

Lauréat de Sociétés savantes et Industrielles.



PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE

15, RUE SOUFFLOT, 15

1923

LES ÉDITIONS LILLIAD

LES ÉDITIONS LILLIAD

LES ÉDITIONS LILLIAD

LES ÉDITIONS LILLIAD

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

LES ÉDITIONS LILLIAD



LES ÉDITIONS LILLIAD

LES ÉDITIONS LILLIAD

PRÉFACE

Il a fallu la guerre pour que la France comprit l'immense importance de ses richesses en forces hydrauliques, aménagées par les moyens modernes, conséquence de l'ingéniosité et de la science de tant de techniciens au haut renom tant au point de vue hydraulique qu'au point de vue électrique, et grâce aussi à la confiance qu'ont montrée les capitalistes dans la mise en œuvre de nos ressources d'énergie naturelle. A la veille de la guerre, nous n'avions en exploitation qu'un dixième de la force hydraulique disponible sur notre territoire. Durant les premières années des hostilités, c'est-à-dire de 1915 à 1918, malgré des difficultés de toutes sortes concernant l'exécution des travaux, près de six cent mille chevaux surgirent de nos cours d'eau, apportant ainsi en un délai très court un appoint égal à tout ce que l'on avait auparavant mis près de vingt ans à réaliser. C'est qu'à ce moment les nécessités de la Défense Nationale primaient tout. Cependant cette impulsion bienfaisante s'est continuée jusqu'à nos jours; d'immenses travaux de captation ont été entrepris et poursuivis sans relâche, portant notre formidable cavalerie hydraulique à plus de 2 millions et demi de chevaux. Les pouvoirs publics, qui n'avaient pas, autrefois, soupçonné l'importance, vitale pour notre pays, si privilégié en chutes d'eau, de développer nos forces naturelles, se sont ressaisis, et on peut constater maintenant que non seulement ils y apportent une sollicitude soutenue, mais qu'ils se sont mis à la tête du mouvement, en encourageant cette industrie par tous les moyens dont ils peuvent disposer.

L'adduction de l'eau motrice depuis son lieu de captation jusqu'à l'usine génératrice est un problème qui comporte nombre

de solutions, selon les cas d'espèce. La technique les a abordées toutes avec la plus grande audace, récompensée toujours par des succès éclatants. Jamais d'ailleurs l'art de l'ingénieur hydraulicien n'avait été porté à un si haut point, soit dans l'aménagement proprement dit des chutes d'eau, soit dans la construction du matériel récepteur et régulateur.

On a pu édifier des usines dont la puissance dépasse 200 000 chevaux et en disposant d'unités mécaniques atteignant parfois 30 000 chevaux. Mais cette évolution surprenante et prodigieuse de l'art et de la science hydrauliques n'a été que la conséquence d'une autre évolution parallèle, mais plus merveilleuse encore, la science électrique avec tous ses domaines d'applications industrielles, et surtout celui qui les domine tous, l'utilisation au loin de l'énergie électrique, fille de l'énergie hydraulique. On est confondu d'admiration devant la puissance et l'étendue du génie humain quand on suit ce vaste et prestigieux cycle d'emmagasinement d'énergie qu'il a créé et qui commence par l'eau courante introduite à force dans un tube, actionnant des turbines au fonctionnement parfait, lesquelles font tourner des machines génératrices électriques ou alternateurs — émanation d'une science consommée — dont le courant est surtensionné dans des appareils transformateurs admirables, puis lancé dans des lignes de transport dont l'étude a été l'objet des travaux de savants les plus illustres, enfin recueilli dans des appareils transformateurs et des machines réceptrices électriques, le tout harmonieusement combiné et obéissant à un mot d'ordre idéal et pour ainsi dire divin.

Nous ne pouvons pas, dans ce court avant-propos, relater les phases par lesquelles est passée l'élaboration de toutes les machines, de tous les engins et appareils qui constituent l'armement d'une ligne de transport d'énergie. Il nous suffira de dire que nous avons la conviction que nulle autre émanation de l'esprit humain n'a coûté autant d'observations, d'expériences, d'efforts, d'études de haute science que cet ensemble concrétisé de découvertes, de recherches et d'inventions, que le concours de techniciens et de savants de toutes les parties du monde a porté à cette hauteur de perfection qui suscite l'admiration des peuples.

On ne compte plus les bienfaits que les réseaux de conducteurs électriques apportent aux populations en répandant par-

tout l'énergie électrique sous forme de lumière et de force motrice.

Les chutes d'eau sont en outre la clef d'autres applications importantes du courant électrique, telles que la traction électrique, l'électrochimie et l'électrometallurgie, en nous bornant à ne signaler que les plus conséquentes.

La voie est donc largement ouverte à toutes les améliorations et à toutes les expansions, car l'application du courant électrique a un champ infini ; le tout est de le produire de la façon la plus économique possible. Dans cet ordre d'idées, il importe plus que jamais que les pouvoirs publics organisent les services hydrauliques tant pour les travaux de régularisation des fleuves, rivières et torrents, que pour rassembler les données nécessaires aux études pour l'installation des usines hydrauliques d'exécution pratique et pour dresser un cadastre des eaux publiques répondant au criterium des exigences modernes quant aux avantages industriels à en tirer. Ainsi particulièrement convient-il d'encourager par tous les moyens les initiatives tendant à la substitution de l'énergie hydraulique à celle provenant du charbon.

L'extension de l'industrie des chutes d'eau doit rechercher les méthodes les plus économiques pour la captation de l'énergie que celles-ci renferment. A la naissance de cette industrie on avait à tort parcimonieusement limité la capacité des premières dérivations, sous prétexte de s'en tenir aux forces permanentes. On revient de cette erreur et on transforme même, là où c'est possible sans trop de frais, les anciens canaux de prise d'eau pour accroître leur capacité. Il y a lieu d'envisager nettement la mise en valeur des chutes d'eau qui demandent respectivement davantage de capitaux et plus de temps pour la période des travaux. Telles sont surtout les chutes d'eau à gros débit et de faible hauteur que l'on peut créer sur les fleuves et les rivières du domaine public. Là doivent être établies des usines de grande puissance comme celles en cours d'exécution ou projetées sur le Rhône, la Garonne, la Dordogne, la Durance et le Rhin.

Pour cela la question d'accumulation hydraulique doit entrer en jeu avec un caractère de grande envergure. Les réserves hydrauliques ne doivent plus être simplement un moyen de régularisation du débit des cours d'eau, mais comme un adjuvant

devant, sinon éviter totalement l'emploi des usines de secours ou de réserves thermiques, tout au moins réduire leur capacité au strict indispensable à l'effet d'économiser la consommation du charbon.

L'administration a si bien admis l'importance à accorder à l'emmagasinement des eaux motrices qu'elle a envisagé l'étude des réservoirs non plus limitée à un appareil commandant une chute isolée sur un cours d'eau donné, mais bien à tous les réservoirs susceptibles d'être accolés aux diverses chutes à créer sur ce même cours d'eau. Par extension, les réserves hydrauliques naturelles ou lacs commandant une ou plusieurs vallées sont l'objet d'études spéciales en vue de la régularisation qu'elles peuvent apporter dans le jeu des cours d'eau de la contrée et des chutes d'eau existantes ou à créer.

La mise en parallèle des usines hydroélectriques, bien comprise, doit avoir, dans tous les cas, une répercussion notable sur les réserves thermiques en améliorant leur durée saisonnière et journalière.

L'étude d'ensemble des réseaux d'énergie électrique existants et de ceux à créer ou projetés permettra de définir les centres d'exploitation les plus en rapport avec une distribution générale du pays au point de vue du meilleur rendement économique. C'est ainsi que l'on envisage la création de réseaux d'interconnexion et l'établissement de supercentrales. En même temps s'imposera l'unification des systèmes de distribution des courants à haute tension ainsi que leur mode d'exploitation pour arriver à répartir au mieux la main-d'œuvre, à assurer avec le moins de risques possible le fonctionnement des centrales et de leurs réseaux et à acheminer le plus rapidement qu'il se pourra notre pays vers l'utilisation complète de nos forces hydrauliques.

L'auteur de cet ouvrage a suivi pas à pas l'évolution de l'industrie des chutes d'eau depuis leur naissance jusqu'à ce jour. Il lui a consacré un travail très conséquent connu sous le nom de *La Technique de la Houille blanche et des Transports de l'énergie électrique* qui en est à sa 4^e édition, et qui a une réputation mondiale¹.

L'ouvrage qu'il présente ici, en parfait accord avec ses édi-

1. Dunod éditeur, Paris.

teurs, traite d'une façon élémentaire les questions primordiales faisant l'objet du travail signalé ci-avant, mais en élaguant autant que possible les théories et calculs qui sont plus spécialement recherchés par les techniciens spécialistes. En un mot, le présent volume ainsi compris a pour but de vulgariser les connaissances qui sont à la base de la science hydroélectrique et de faire apprécier le rôle de premier plan que joue dans notre industrie nationale l'utilisation de nos forces hydrauliques.

E. PACORET.



LES FORCES HYDRAULIQUES

ET LES

USINES HYDROÉLECTRIQUES

PREMIÈRE PARTIE

AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE GÉNÉRALE DES COURS D'EAU

Formes des profils des cours d'eau. — Classification des cours d'eau. — Caractères constitutifs des torrents. — Alimentation des cours d'eau. — Effets des glaciers. — Charrois et dépôts des eaux des cours d'eau torrentiels. — Détermination des hauteurs de pluies annuelles. — Effets des forêts. — Action des lacs. — Débits des cours d'eau. — Coefficients d'irrégularité des cours d'eau.

1. **Formes des profils des cours d'eau.** — La forme générale des cours d'eau est sinueuse; elle est subdivisée en une série de courbes et de contre-courbes qui se succèdent en sens inverse, réunies par des raccordements plus ou moins brusques. La profondeur varie dans le profil en travers, celle-ci étant plus accentuée dans les parties qui présentent le moins de résistance à l'entraînement. Le profil en long du thalweg n'offre ni une pente uniforme ni une pente continue. En dehors des parties constituant les pentes principales, on trouve une série de pentes et de contre-pentes formant une ligne sinueuse qui oscille, en s'y rapprochant plus ou moins, autour de la pente moyenne de la région.

La forme sinueuse ou en serpentement naturelle des rivières peut prendre une importance assez considérable quand les rives

sont peu résistantes. Les profils en travers ne présentent pas plus de régularité; de ce fait, le profil en long, tant du fond du lit que de la ligne d'eau, est déterminé par une succession de parties en pente relativement modérées correspondant aux courbes (fosses ou mouilles) et de rapides correspondant aux points d'inflexion (seuils, hauts-fonds ou maigres). On a ainsi un profil en long en gradins (fig. 1).

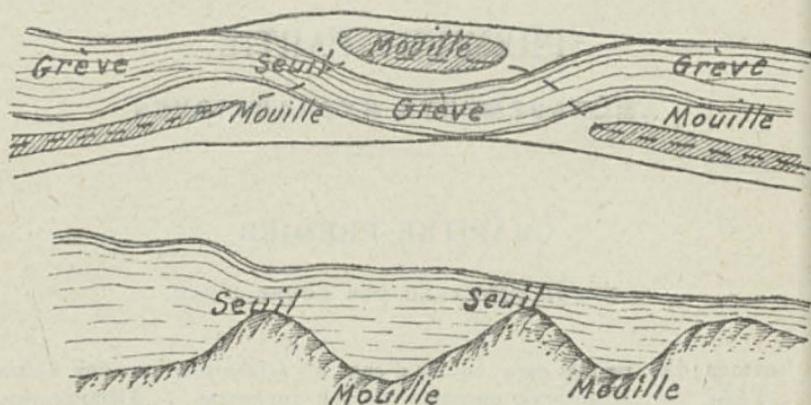


Fig. 1.

Le profil en travers d'une rivière présente, dans les gorges, une forme trapézoïdale, et, en plaine, le profil comporte un *lit mineur* ouvert dans les terrains d'alluvion et un *lit majeur* corrélatif aux eaux débordées. Le plafond tend à s'approfondir vers les points où le sol offre moins de résistance, et la position du thalweg dépend à la fois de la résistance du lit et des diverses circonstances qui font varier la force d'entraînement des matériaux charriés. Aux droites des courbes, le profil transversal affecte la forme d'un triangle avec, pour base, le plan d'eau, son sommet s'appuyant sur la ligne du thalweg.

La forme de la ligne d'eau se déduit des règles posées par Fargue qui s'énoncent comme suit.

a) *Loi du maigre*. — L'inflexion et la surflexion sont caractérisées par un maigre; le minimum de la courbure et le minimum de la profondeur sont deux faits corrélatifs; le maigre est reporté à une certaine distance en aval de l'extrémité aval des courbes. Pour avoir un bon chenal, le maigre doit être à une

distance de cette extrémité aval égale à environ un quart du développement de la courbe.

b) *Loi de la mouille.* — Le maximum de courbure au sommet de la courbe entraîne le maximum de la profondeur. La mouille est en aval du sommet, et l'écart pour un bon chenal est analogue à celui du maigre.

c) *Loi de l'angle.* — La profondeur moyenne du bief croît et décroît avec la courbure moyenne de la courbe correspondante, ou, en d'autres termes, à longueur égale, la profondeur moyenne d'un bief est d'autant plus grande que les deux tangentes extrêmes de la courbe forment un angle plus ouvert.

d) *Loi du développement.* — Dans l'intérêt de la profondeur tant maximum que moyenne, la courbe ne doit être ni trop longue, ni trop courte.

e) *Loi de continuité.* — Le profil en long du chenal ne présente de régularité qu'autant que la courbure varie de façon graduelle. Tout changement brusque de courbure amène une diminution brusque de la profondeur.

f) *Loi de la pente du fond.* — Si la courbure varie de façon continue, l'inclinaison de la tangente à la courbe des courbures détermine la pente de fond du chenal.

Pour corriger une rivière naturelle en vue d'y établir la navigation, on doit procéder à des améliorations du cours d'eau par la méthode du calibrage; par la création de digues longitudinales entre lesquelles on concentre les eaux de la rivière de façon à obtenir un profil normal correspondant par les forts débits à une certaine pente qui serait celle d'un canal creusé de main d'homme et écoulant le même débit, ou par un système basé sur les lois de Farguè, en cherchant à obtenir le plus grand tirant d'eau possible sur les mouilles et en réalisant un tracé rationnel du chenal.

2. **Classification des cours d'eau.** — On les divise en cinq catégories : les fleuves, les rivières ordinaires, les rivières torrentielles, les torrents et les ruisseaux.

Les cours d'eau de montagne ont de fortes pentes et sont alimentés en partie par la neige, dont la fonte progressive a pour effet de régulariser leur régime. Les rivières qui coulent dans les larges vallées ont un assez fort volume d'eau et des crues prolongées; leur pente constante sur de grandes lon-

guez n'excède pas 15 millimètres par mètre. Les rivières à régime torrentiel ont des variations de leur pente plus rapides, et celle-ci n'excède pas 60 millimètres par mètre. Ces cours d'eau produisent, dans des conditions favorables, une puissance constante et de réalisation peu coûteuse, bien qu'à la fonte des neiges ou à l'époque des grandes pluies ils se transforment en torrents parfois formidables.

Les torrents coulent dans des vallées très courtes; leur pente est supérieure à 60 millimètres par mètre sur la plus grande longueur de leur cours.

Les ruisseaux ont un petit volume d'eau et un faible parcours. En général ils n'affouillent pas les berges et ne charrient pas de matériaux.

Les fleuves ont un grand débit et une faible pente.

En résumé les cours d'eau tranquilles ont leur pente régulière et la forme de leur lit varie peu; l'eau n'est troublée par les pluies que pendant de courtes périodes, et leur maximum d'intensité ne se produit pas brusquement. Les cours d'eau torrentiels, au contraire, se caractérisent par une pente très forte et irrégulière; leur lit change fréquemment de forme et d'emplacement. Les troubles occasionnés par les crues sont très accusés et diminuent d'intensité à mesure qu'on s'éloigne de la source.

3. Caractères constitutifs des torrents: — On peut diviser les torrents en *torrents simples* avec ou sans bassin de réception, qui est lui-même simple ou formé par la réunion de ravins plus ou moins nombreux, et en *torrents composés*, formés par la réunion de plusieurs torrents simples aboutissant à une gorge unique ou à des gorges successives. Un torrent comporte trois parties que l'on dénomme : bassin de réception, canal d'écoulement et cône ou lit de déjection.

Le bassin de réception (fig. 2) emmagasine les eaux et fournit les matériaux qu'elles entraînent. Les formes de ce bassin dépendent essentiellement de la nature des parois qui encaissent les eaux. L'orifice d'échappement de ces dernières prend le nom de goulot.

Le canal d'écoulement, appelé parfois gorge, est constitué par des roches plus dures que celles du bassin de réception. Dans ce canal il ne se produit pas d'érosion, et les matériaux provenant du bassin de réception y passent sans arrêt. L'énergie

cinétique de l'eau est tout entière employée au transport des matières solides.

Le lit ou cône de déjection est le réceptacle des amas provenant des érosions ou affouillements produits par l'eau dans les régions précédentes. Ces dépôts affectent la forme d'un cône à base demi-circulaire dont le sommet est au débouché de la gorge, ce qui lui a fait donner le nom de cône de déjection. D'une manière générale, la pente des cônes de déjection est comprise entre 2 et 12°.



Fig. 2.

Dans le bassin de réception, le lit du torrent est dans un creux par rapport au sol environnant, et le lit de déjection, au contraire, est en relief. Dans la région du cône, l'énergie cinétique de l'eau est devenue ici insuffisante pour produire des affouillements ou entraîner des matériaux. Le lit d'écoulement sert de jonction entre la zone inférieure du lit de déjection et le thalweg de la vallée principale où se trouve la rivière réceptrice du canal du torrent. En cette partie basse de la vallée, le torrent s'encaisse lui-même et coule jusqu'à la rivière collectrice. Dans les vallées larges, les torrents ont tous un lit d'écoulement, tandis que dans les vallées étroites le lit d'écoulement n'existe pas.

Dans un torrent actif il y a creusement du lit et réduction simultanée de la pente en amont et augmentation dans la partie basse. Quand il ne se produit pas de dépôt, on dit que le torrent est éteint, c'est-à-dire que le cours d'eau a perdu son caractère dévastateur. Le torrent a ainsi passé par trois périodes correspondant à celle de l'érosion, celle de la divagation où il forme son cône de déjection, et à celle d'extinction ou de régime.

4. **Alimentation des cours d'eau.** — Un cours d'eau d'une vallée supérieure, dont le bassin est entièrement fourni par de très hautes montagnes, est alimenté principalement par la fonte des neiges et des glaciers, et l'influence de la pluie y est très faible. La fonte de la neige, qui est sensiblement nulle en hiver, croît avec la température et atteint son maximum en été. Les torrents d'origine glaciaire sont peu variables dans leur débit; ils ont, leurs eaux basses, moyennes et grosses, chaque année, aux mêmes époques, qui permettent une exploitation régulière des usines qui les utilisent. Les torrents, qui prennent naissance à de moyennes altitudes, et alimentés seulement par des eaux de pluie ou par des neiges temporaires, subissent les fluctuations des années pluvieuses et sèches et, par suite, donnent lieu à un régime irrégulier.

Quand la rivière a un bassin formé par des montagnes plus ou moins élevées avec ou sans glaciers, aux altitudes inférieures à 1800 ou 2000 mètres (qui est le cas le plus fréquent), les précipitations aqueuses fournissent la plus grande partie de l'alimentation du cours d'eau.

Les versants couverts de prairies et de forêts retardent l'écoulement et les cours d'eau ont alors un régime plus régulier, et les crues y sont moins fortes.

Dans les vallées supérieures, le débit des cours d'eau pendant les mois froids est très faible, et en avril, époque à laquelle commence la fonte des neiges et des glaciers, le torrent grossit progressivement, et les eaux atteignent leur maximum vers la mi-juillet, puis elles vont en s'atténuant jusqu'au mois d'octobre, par suite de la diminution des réserves de neige et de l'affaiblissement de la température. Le débit maximum (fin juillet) peut varier entre des limites très étendues, selon l'importance plus ou moins grande des amas de neige.

La période des basses eaux s'étendant d'octobre à avril, soit six à sept mois, durant la période complémentaire les débits croissent, puis diminuent avec des variations en sens inverse, brusques et accentuées.

Dans les régions à altitudes moyennes, le maximum de débit, qui se produit de mai en juillet, est encore dû à la fonte des neiges. Les périodes de basses eaux ou de creux ont lieu en hiver aussi; mais en automne il se produit une deuxième période

de basses eaux (août et septembre), et, en octobre, des crues provenant des pluies donnent une période de hautes eaux (fig. 3 et 4). Les pluies de printemps peuvent donner lieu à des crues plus ou moins fortes qui viennent se greffer sur la crue générale due à la fonte des neiges. En été et en hiver, les pluies sont presque sans influence sur le débit.

Les cours d'eau alimentés par des neiges et des glaciers ont aussi des variations diurnes; ainsi la Valloirette, à trois heures de l'après-midi, arrive à avoir un volume double de celui qu'elle a à six heures.

Sur la Mescla, affluent du Var, vers la fin du mois d'avril (fonte des neiges), le maximum se produit à sept heures du matin, et le minimum à neuf heures du soir. L'amplitude de

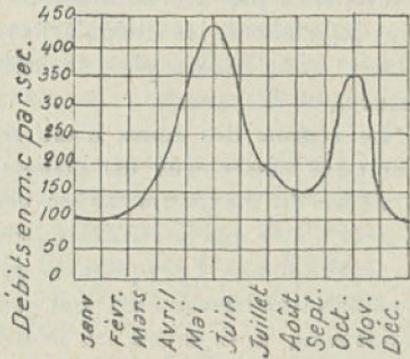


Fig. 3.

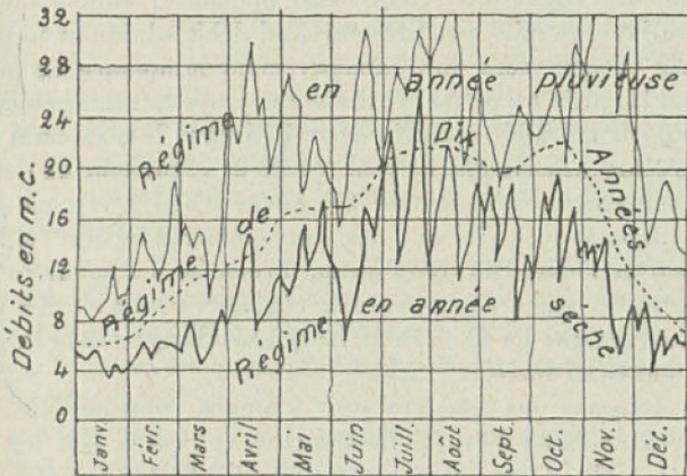


Fig. 4.

l'oscillation qui est de 0 m. 08 correspond à un écart de 4 à 5 mètres cubes autour de 40 à 55 mètres cubes.

Dans les régions de faibles altitudes, les mois froids sont

souvent moins pluvieux que les mois chauds, mais les pluies de mai à novembre ne profitent point aux cours d'eau. Les basses eaux ont lieu en été, et les fortes eaux en hiver, celles-ci constituées par des successions de crues. Aussi, dans les vallées inférieures, les irrégularités du régime, dues à l'action des pluies, sont encore plus sensibles que dans les vallées supérieures ou moyennes.

Le régime des cours d'eau alpestres est très variable; le débit des basses eaux est parfois le tiers du débit moyen et le dixième du maximum moyen des hautes eaux de printemps; il peut n'être que la centième partie du débit des grandes crues exceptionnelles. Lorsqu'on ne peut utiliser que le débit correspondant aux basses eaux, qui sont à peu près le quart des eaux moyennes, et si on est en présence d'une consommation très irrégulière, la moyenne étant le plus souvent inférieure à 40 p. 100 du maximum, on utilise donc à peine dans ce cas que $1/10^{\circ}$ du débit du cours d'eau.

5. **Effets des glaciers.** — Lorsque les cours d'eau sont à peu près exclusivement alimentés par des glaciers et que l'on possède des données sur leur débit pendant quelques années consécutives, on sait à peu près sur quel débit minimum on peut compter et quel sera approximativement le nombre de jours pendant lesquels on pourra réaliser une puissance minimum, en aménageant un débit compris entre l'étiage et le maximum des hautes eaux. Ainsi le glacier joue le rôle de régulateur du débit.

La supériorité industrielle des cours d'eau à régime glaciaire tient à ce qu'ils ont des eaux abondantes en été, au moment de l'étiage du cours d'eau, directement alimentées par les pluies, et leurs débits varient régulièrement avec les saisons suivant une loi de périodicité qui ne change pas beaucoup d'une année à l'autre.

Les volumes des glaciers sont toujours considérables par rapport au volume d'eau qu'ils débitent, et c'est ce qui les fait jouer le rôle d'immenses réservoirs. Le Rhône supérieur a 316 glaciers, le Rhin 71 dans sa haute vallée, et les Pyrénées en possèdent 51.

Les glaciers, loin d'être immuables dans leurs dimensions, sont soumis à des changements considérables, se traduisant tantôt par des crues, tantôt par des réductions notables. Cer-

tains glaciers sont en décrue, et on prévoit leur disparition complète dans un avenir peu éloigné. Beaucoup d'autres sont en recul sensible.

Pour sauver nos glaciers, il faudrait relever nos forêts aux plus hauts niveaux avec des essences feuillues, d'autant plus que les forêts apportent aux usines des eaux claires assurant leur régime de chevaux permanents et le passage du régime d'hiver à celui d'été.

La régression des glaciers et la perte notable de glaciation qui s'ensuit doivent être envisagées avec le plus haut intérêt, d'autant plus que des angoisses se sont produites à la suite de la pénurie de débit que l'industrie alpestre des forces hydrauliques vient de subir péniblement en raison de la sécheresse exceptionnelle de l'été de l'année 1921.

6. Charrois et dépôts des eaux des cours d'eau torrentiels.

— Tous les cours d'eau torrentiels charrient des quantités plus ou moins grandes de matières solides : blocs, cailloux, graviers, sables, limons, en raison de la puissance d'entraînement très élevée qu'acquière les eaux dans leur parcours aux très fortes pentes. Et cet entraînement des matériaux, soit par roulement sur le fond du lit, soit par suspension dans l'eau, ne se produit pas sans enlever au courant une certaine quantité de force vive, et par suite sans en diminuer la vitesse.

La pente moyenne du dépôt des gros blocs varie de 5° à 8° ; après ceux-ci viennent les galets, dont l'inclinaison varie de 2° 5 à 5° ; puis les cailloux et les graviers, au delà desquels les boues viennent s'étaler.

En dehors de l'érosion, les matériaux libres qui se trouvent au fond du lit des cours d'eau se déplacent, par la force d'entraînement de l'eau et par la composante de la pesanteur dirigée parallèlement à la pente du lit, et par suite proportionnellement à cette pente.

Buat a indiqué les limites au-dessous desquelles les corps cessent d'être entraînés :

Argile brune à poterie.....	0 ^m ,08
Sable de cette argile.....	0 ^m ,16
Gros sable anguleux.....	0 ^m ,22
Gravier gros comme un grain d'anis.....	0 ^m ,10
Gravier gros comme un pois.....	0 ^m ,18
Gravier gros comme une fève.....	0 ^m ,32

Galets de mer arrondis (0 ^m ,025).....	0 ^m ,65
Silex anguleux gros comme un œuf de poule.....	1 ^m ,00

On conçoit que pour se débarrasser des dépôts, on doit peu à peu réduire la vitesse de l'eau, réduction d'autant plus caractérisée que l'on désire un degré d'épuration plus élevé.

Quant à la quantité de matériaux déposés, elle présente sur certains cours d'eau un obstacle des plus sérieux à la bonne marche des usines hydrauliques. Ainsi la Durance roule 11 millions de mètres cubes de matériaux par an, le Var autant, le Rhône 21 millions, le Danube 60 millions.

En hiver, dans les grands froids, les cours d'eau charrient des glaçons qui, à un certain moment, se soudent; quelquefois l'accumulation des glaces forme des embâcles qui se mettent tout à coup en mouvement lorsque la masse commence à fondre, produisant des débâcles aux effets redoutables.

Si Q est le débit moyen d'une rivière, q le volume moyen de gravier qu'elle entraîne annuellement et I sa pente, la formule ci-après permet de se rendre compte, comme première approximation, de la quantité de gravier charriée :

$$q = 523 QI,$$

Q et q en mètres cubes et I en millimètres par mètre.

La proportion des sables en dissolution dans l'eau des torrents varie dans le cours d'une journée d'une façon notable, parfois dans le rapport de 1 à 64 en 6 heures et demie (0^{gr}, 042 de trouble par litre à 2^{gr}, 660, torrent de l'Arve).

Nous mentionnons, d'après les observations de MM. A. Muntz et E. Lainé, sur divers cours d'eau alpestres et pyrénéens, les résultats qu'ils ont consignés. La Garonne ne porte que 5 à 50 grammes de limon par mètre cube. Au moment des fortes crues exceptionnelles, elle en porte 1^{kg}, 500, ce qui représente 52.000 tonnes charriées par vingt-quatre heures, le débit étant alors de 400 mètres cubes à la seconde. La Neste porte 13 à 16 kg. de matériaux par mètre cube, mais l'Adour ne dépasse pas 50 grammes par mètre cube; l'Agly ne charrie, par les plus fortes crues, que 38 kg. de limon par mètre cube.

Les eaux des Alpes sont incomparablement plus chargées de limon, et la plus limoneuse des rivières alpines est l'Isère. Dans son cours supérieur la proportion des dépôts atteint à peine 2 kg. par mètre cube, mais déjà dans son cours moyen

elle passe à 150 et même 260 kg. Le débit de la rivière étant alors de 380 mètres cubes par seconde, la quantité de limon charriée en vingt-quatre heures atteint 4 millions de tonnes. Sur la Durance, à Mirabeau, on a constaté 11^k,435 par mètre cube au début d'une crue; le débit étant alors de 375 mètres cubes à la seconde, la proportion de limon charriée en vingt-quatre heures est de 370.000 tonnes.

Les rivières des Pyrénées, où les glaciers sont absents ou peu importants, ont un régime différent. Les eaux sont claires en toutes saisons, sauf au moment des crues provoquées par des orages ou des pluies abondantes et qui peuvent survenir à une époque quelconque de l'année.

Il résulte donc de l'ensemble de ces observations qu'il ne faut entreprendre, sur les cours d'eau des Alpes, la construction des barrages-réservoirs qu'avec beaucoup de prudence, car un envasement très rapide est à craindre. Sous ce rapport, les rivières des Pyrénées présentent moins d'inconvénient.

7. Détermination des hauteurs d'eau de pluie annuelles.

— En raison de l'évaporation, l'eau qui tombe à la surface des continents sous forme de pluie ou de brouillard est restituée à l'atmosphère dans un laps de temps plus ou moins long.

La quantité de pluie augmente avec l'altitude, et la hauteur de pluie est en moyenne de 12 à 15 p. 100 plus grande en forêt qu'en plaine ou en plein champ. La hauteur annuelle des chutes de neige sur les sommets élevés est très variable; elle oscille de 5 à 10 mètres au mont Saint-Bernard et a atteint jusqu'à 17 mètres au Grimsel.

Dans la chaîne des Pyrénées, la pluviosité est en général supérieure à 1 mètre de hauteur, et dans les Alpes on a constaté jusqu'à 2^m,50 (bassin du Doron).

La hauteur moyenne de pluie annuelle tombée sur la surface de la France est d'environ 0^m,75, représentant 7800 mètres cubes environ par hectare et par an. Le nombre de jours de pluie est de 146 dans le Nord et 91 dans le Midi, et la quantité de pluie tombée dépasse 400 milliards de mètres cubes, et le volume d'eau évacué en moyenne à la mer par nos fleuves est d'environ de 180 milliards de mètres cubes par an, lesquels représentent l'équivalent de 12 millions de chevaux-vapeur.

Les pluviomètres utilisés pour mesurer les quantités de pluie

qui tombent là où ces instruments sont placés doivent être disposés de telle sorte que leur orifice supérieur soit dans un plan horizontal et leur contenu être noté chaque jour. Les appareils enregistreurs permettent de déterminer les averses ainsi que leur intensité.

On mesure l'intensité d'une pluie au moyen de la hauteur qu'occupe l'eau tombée pendant une heure sans trouver aucun écoulement : ainsi une pluie de 30 millimètres correspond à une hauteur d'eau de 30 millimètres sur un sol imperméable pour une durée de une heure.

La quantité annuelle d'eau tombée Q , en litres, par kilomètre carré de bassin de montagne, est voisine de 30 litres pour les Alpes septentrionales, ce qui correspond à une hauteur d'eau annuelle H de 1^m,20 et à un coefficient de ruissellement $\alpha = 0,80$. On a, en effet :

$$Q \text{ (en litres par km}^2\text{)} = \frac{H\alpha \times 1000}{86,4 \times 365} = 0,0317 H\alpha,$$

H en millimètres.

Pour les Alpes méridionales, on relève $Q = 21$; pour les Pyrénées, il varie de 69 à 47 et, pour le Massif central, il est compris entre 15 et 30 litres.

8. Effets des forêts. — La forêt constitue un organe perpétuel de houille blanche, aussi le reboisement et le gazonnement des régions élevées sont-ils au premier plan des moyens dont on dispose pour lutter contre le ruissellement torrentiel et les inondations qui en sont la conséquence; ils sont en outre les meilleurs agents régulateurs de cours d'eau pour les réserves naturelles qu'ils déterminent.

Le reboisement de nos forêts offre un intérêt capital pour la bonne utilisation de nos richesses hydrauliques.

Les relevés des jaugeages du service des Grandes Forces hydrauliques montrent que les valeurs moyennes des débits des cours d'eau vont en s'affaiblissant chaque année, ce qui est une aggravation inquiétante de leur irrégularité. Un tel état de choses ne peut qu'être très préjudiciable, car on est menacé de voir s'allonger les périodes de basses eaux et se multiplier les crues.

Quand on envisage l'action du reboisement au point de vue de l'atténuation des inondations, on cherche à réduire le débit

maximum, et quand on considère l'industrie de la houille blanche, on a pour objectif l'augmentation du débit minimum.

Logiquement, les forêts sont appelées à dominer toute la question de l'aménagement des forces hydrauliques, car elles sont destinées, dans l'avenir, à remplacer l'action des lacs et des glaciers qui tendent à disparaître.

9. **Action des lacs.** — Lorsqu'une force motrice est alimentée par un cours d'eau et un lac peu important, c'est-à-dire insuffisant pour capter en toute saison toutes les eaux pluviales de son bassin hydrographique, cette force motrice n'est que partiellement régularisée. Mais si elle est tributaire de un ou plusieurs lacs assez profonds et assez grands pour pouvoir emmagasiner chaque année et en toute saison toutes les eaux pluviales, en ne débitant celles-ci qu'au fur et à mesure des besoins de l'exploitation, sans en laisser perdre aucune quantité, on se trouve en présence d'une force régularisable.

Lorsque les lacs ont un bassin de réception considérable par rapport à leur surface, la quantité d'eau de pluie qu'ils reçoivent sur cette surface est négligeable par rapport à l'eau qui leur est fournie par leurs affluents, qui peuvent être superficiels ou sous-lacustres, ou les deux à la fois. Les lacs n'ont généralement qu'un émissaire, et celui-ci peut parfois devenir affluent.

Les lacs à déversoir superficiel constituent un régulateur de niveau plus puissant que ceux à déversoirs sous-lacustres, s'il ne s'agit que de maintenir le niveau constant.

Les crues des lacs sont généralement occasionnées par la fonte des neiges ou par des pluies diluviennes, ou par ces deux actions combinées. Les basses eaux sont dues à la sécheresse de l'été ou à la congélation hivernale, qui donnent lieu à des minima en automne et en hiver.

La superficie d'un lac étant connue, ainsi que les graphiques de débit de la rivière, on peut déterminer la surélévation à donner au lac pour, en emmagasinant à l'époque des hautes eaux une partie du débit qui sera restituée à la chute au moment des eaux basses, obtenir le maximum de puissance à peu près constante. Ainsi le lac aménagé peut à chaque instant faire office d'accumulateur, rendant à la chute, aux heures de travail, le débit non absorbé lors des périodes d'arrêt ou de faible activité des usines. Il s'ensuit que, quel que soit le

mode d'utilisation, continu ou intermittent, du travail de l'eau qu'on se propose, on obtient par l'intermédiaire des lacs la meilleure utilisation possible de l'énergie de la rivière.

Les lacs sont en outre des bassins de décantation tout indiqués, car les eaux, en y pénétrant, y amortissent leur vitesse tout d'un coup, laissant déposer les matières entraînées.

Les lacs non réglementés subissent dans leur écoulement des oscillations de niveau naturelles d'amplitude généralement faible, alors que les lacs réglementés éprouvent des variations beaucoup plus fortes, soit par l'abaissement et le relèvement alternatifs ou sériels de déversoirs, soit par la manœuvre méthodique de vannes noyées. La tranche d'eau circonscrite par l'oscillation de niveau constitue un volant précieux pour la régularisation du débit. Les usines inférieures peuvent ainsi disposer d'un volume bien supérieur à l'étiage naturel des affluents. Ainsi en faisant subir au plan d'eau du lac de Genève une augmentation de 1 mètre environ, on a pu doubler l'étiage du Rhône à la sortie du lac.

La régularisation des chutes d'eau par accumulation naturelle ou artificielle est d'une grande importance; c'est là une question que nous aborderons souvent au cours de cet ouvrage.

Débits des cours d'eau.

10. **Débits d'étiage.** — On distingue les débits d'étiage en débit d'*étiage d'hiver* et en débit d'*étiage d'été*.

Le premier dépend surtout de la température ou du climat moyen du bassin à cette saison, et le second, des quantités de neige qui peuvent subsister en août et en septembre. Dans les vallées supérieures, le débit des cours d'eau est très faible en hiver, de décembre à mars, et le maximum des eaux se produit vers la fin du mois de juillet. Lorsque le bassin est formé de montagnes d'une hauteur moyenne, l'hiver est encore une période de basses eaux, mais il y a aussi une saison de creux en automne (août et septembre), et le maximum des hautes eaux a lieu dans les premiers jours de juillet. Les cours d'eau à régime alpestre ont un étiage d'hiver régulier.

D'une façon générale, l'appellation « étiage » désigne bien une époque de « basses eaux »; mais il y a lieu de préciser à

quelle saison cette période a lieu et pour quelle durée. Pour les cours d'eau alpestres, on a proposé d'appeler du nom de « débit d'étiage normal » le débit moyen réalisé pendant les mois de janvier et février, lorsque l'hiver est moyennement froid et que le bassin est recouvert en totalité ou en partie par la neige tombée en novembre et en décembre. Le débit d'étiage *minimum* est alors inférieur de 20 ou 25 p. 100 au débit d'étiage normal.

On appelle *débit caractéristique d'étiage* « celui au-dessous duquel le cours d'eau n'est pas descendu, durant l'année considérée, plus de dix jours consécutifs ou non ». On n'est plus là en présence d'un étiage minimum, mais bien d'un état particulier de la rivière en rapport avec son utilisation industrielle. On peut en déterminer la valeur en prenant la moyenne des trente plus bas débits de l'année. Il résulte d'observations de longue durée que le débit d'étiage d'une rivière de montagne peut être évalué de 5 à 10 litres par seconde et par kilomètre carré de surface du bassin versant, suivant que le climat de la vallée est plus ou moins rigoureux.

11. Débits moyens. — Les incertitudes quant à une définition rigoureuse du débit moyen existent comme pour le débit d'étiage. D'une façon très générale on admet que le débit moyen est double de celui d'étiage.

On appelait *débit caractéristique moyen* celui au-dessous duquel le cours descend, année moyenne, pendant six mois par an au plus, et au-dessus duquel, par conséquent, il se maintient pendant la période complémentaire des six autres mois; mais si on rapproche ces données de celles renfermées dans la définition du débit caractéristique d'étiage, on voit que la puissance moyenne d'un cours d'eau, correspondant à l'année tout entière, se trouverait en appliquant le maximum du débit à une période de neuf mois. On a donc remplacé cette définition par celle de *débit minimum semi-permanent*, puisqu'il ne s'agit pas d'une moyenne quelconque, mais du minimum sur lequel on peut compter sur 180 jours environ, consécutifs ou non. Le débit moyen absolu est désigné sous l'appellation de *module*, et le *débit caractéristique maximum* est celui qui est dépassé pendant 10 jours par an, ou le débit obtenu en prenant la moyenne des trente plus forts débits de l'année.

Les figures 5 et 6 ont trait à des graphiques relevés sur la Durance et sur le Rhône. On remarquera que, dans le premier, le débit de la moyenne des années de 1890 à 1899 (73 mètres cubes) est un peu plus élevé que la valeur de la moyenne des années de crues et de sécheresse (68^m3,35).

Au point de vue de l'utilisation des forces hydrauliques, il y a intérêt à fixer les limites entre lesquelles doit osciller le volume d'alimentation de l'usine à créer, dans l'hypothèse d'un cours d'eau non régularisé par apport d'eau ou de machines

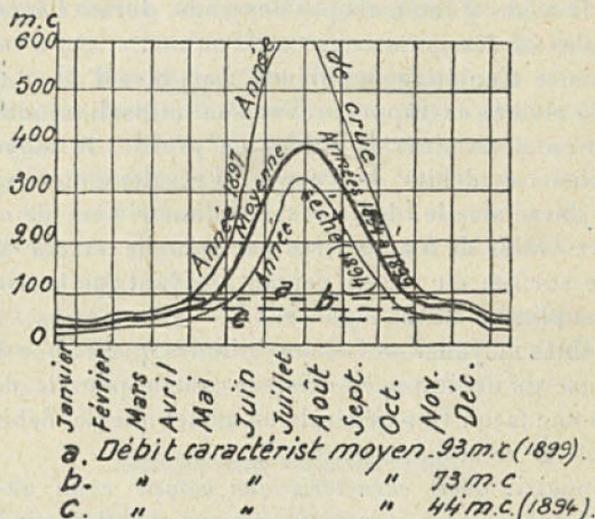


Fig. 5.

thermiques. S'il ne s'agit que d'un service public, on devra s'en tenir au débit minimum, *minimorum*. Si on veut utiliser toute la puissance du cours d'eau, pour l'appliquer à d'autres utilisations, on fera appel au débit maximum, c'est-à-dire celui donnant, en plus du débit minimum, *minimorum*, une puissance variable caractérisant la limite d'utilisation de la puissance variable du cours d'eau pendant au moins 200 jours consécutifs en année sèche.

Le débit moyen d'un cours d'eau de régime alpestre varie entre 15 et 30 litres par kilomètre carré du bassin versant.

12. Coefficients d'irrégularité des cours d'eau. — On peut, en résumé, caractériser d'une manière suffisamment approchée

le régime d'un cours d'eau au moyen des trois données suivantes :

a) le débit moyen absolu ou module; b) le degré ou coefficient d'irrégularité; c) le débit minimum d'étiage.

Le degré d'irrégularité se présente sous diverses formes, telles que le rapport du débit maximum au débit minimum, le rapport du débit moyen au débit maximum, le rapport du débit maximum au débit moyen et enfin le rapport du débit semi-permanent au débit minimum. Dans le premier cas, comme le débit maximum varie souvent beaucoup d'une année à l'autre,

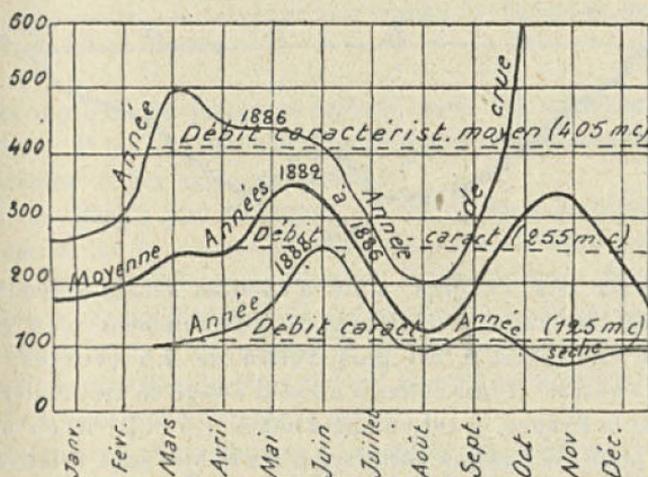


Fig. 6.

ce rapport est trop variable, et d'autre part le débit maximum est en général mal connu, étant difficile à mesurer, par suite il ne peut caractériser sortablement le régime d'une rivière.

M. l'ingénieur A. Coutagne a proposé un coefficient n qui tient plus suffisamment compte de tous les débits, ce coefficient étant le degré parabolique de la courbe de régime de la rivière, et l'irrégularité d'un cours d'eau pouvant être considérée comme caractérisée par la plus ou moins grande courbure de cette courbe.

Ce coefficient est essentiellement fonction de la durée des basses eaux; il est d'autant plus élevé que la période d'étiage est plus longue, cet étiage étant dû soit aux grands froids de l'hiver, soit aux grandes sécheresses de l'été, soit à ces deux

causes à la fois. Pour les rivières de montagne (étiage principal, celui d'hiver), le coefficient n varie de 5 à 2,5; il diminue à mesure qu'on descend dans la plaine, l'hiver étant de moins en moins rigoureux.

Pour les rivières de plaine (étiage principal, celui d'été), le coefficient n varie à peu près dans les mêmes conditions; il est d'autant plus faible que le bassin est plus méridional.

Pour les rivières à régime mixte, le coefficient participe plus ou moins des deux régimes ci-avant, suivant le point de leur cours où on les considère.

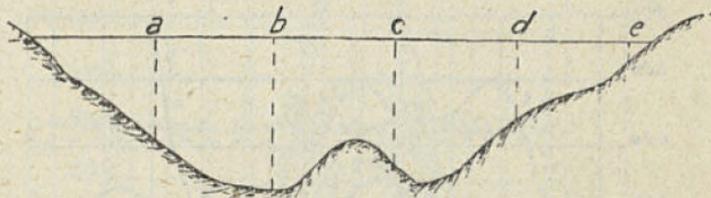


Fig. 7.

Lorsque les rivières sont à double étiage (rivières de moyenne montagne), celui d'été est généralement plus accentué; le coefficient n est plus voisin de 2,5 (Vosges, Jura, Massif central). Pour celles à un seul étiage en été, rivières du nord de la France, n est compris entre 1,5 et 2; il en est de même pour les bassins côtiers, où les débits sont relativement variables. Pour le débit minimum d'étiage, il est avantageux de prendre le rapport n' du débit moyen au débit minimum.

Se basant sur ce que n et n' varient dans le même sens, on peut, pour les bassins à régime glaciaire d'altitude moyenne, admettre la relation simple :

$$n' = n + 1.$$

M. A. Coutagne a traduit les formules générales en abaques qui relient graphiquement entre eux les différents éléments ou courbes caractéristiques d'un cours d'eau. En particulier l'un de ces abaques permet de tracer rapidement la courbe des débits moyens industriels¹.

1. Voir : *Technique de la houille blanche et des transports de l'énergie électrique* (4^e édition), par E. Pacoret, Dunod, éditeur, Paris.

CHAPITRE II

JEAUGEAGE DES COURS D'EAU

Jaugeage par flotteurs. — Échelles hydrométriques. — Jaugeage au moyen des hydromètres. — Tarage des moulinets. — Jaugeage par déversoirs. — Jaugeage par vannes. — Jaugeage des débits des conduites forcées.

Les moyens de jaugeage utilisés sont les suivants : 1° les flotteurs ; 2° les appareils hydrométriques ; 3° les orifices ; 4° les déversoirs ; 5° les capacités définies.

13. **Jaugeage par flotteurs.** — Le moyen le plus simple de déterminer la vitesse de l'eau dans les rivières ou canaux découverts est celui par flotteurs. L'usage des « flotteurs de surface » permet d'obtenir la vitesse de l'eau à la surface, et les « flotteurs lestés » fournissent la vitesse moyenne. Connaissant la section transversale de la rivière, il suffit de multiplier celle-ci par la vitesse pour obtenir le débit.

On utilise comme flotteur un système de sphères creuses en cuivre mince que l'on peut lester à volonté, par l'introduction d'une certaine quantité d'eau. Pour déterminer la vitesse à la surface, on immerge une sphère à moitié dans l'eau, et quand on veut obtenir une vitesse moyenne, on attache les deux sphères par une corde plus ou moins longue ; on en leste une pour qu'elle plonge, tandis que l'autre reste à la surface à moitié immergée. On donne aux flotteurs lestés une longueur égale aux $\frac{9}{10}$ de la profondeur du cours d'eau, ce qui permet d'avoir d'un seul coup la vitesse moyenne. Si la profondeur est faible, on peut opérer avec une tige rigide. On peut obtenir une précision de l'ordre de 0,5 à 0,25 p. 100. On peut aussi mesurer une profondeur en immergeant un manomètre à maximum. Mais en raison des nombreux facteurs qui concourent à altérer les résultats des sondages, la méthode de jaugeage par flotteurs n'est guère employée que pour les gros débits et les crues.

Pour opérer un jaugeage, on choisit une partie de la rivière qui soit droite, régulière en largeur et en profondeur, et on procède au relevé de ses dimensions. On fait les sondages à des intervalles égaux a, b, c, d, e (fig. 7), perpendiculairement à la direction du courant, puis on planimètre les aires comprises entre deux verticales successives, et en totalisant ces surfaces on obtient celle du profil. On place ensuite deux cordes en travers de la rivière à une certaine distance de la ligne de sondage et on relève la vitesse de l'eau, à l'aide des flotteurs, entre les deux cordes. On sait que le débit de la rivière est le produit de la section du cours d'eau par la vitesse mesurée.

La détermination directe de la pente de surface permet d'établir expérimentalement la relation qui existe entre elle et la vitesse moyenne ou le débit par l'application de la formule de Bazin :

$$b + \frac{a}{R} = \frac{Ri}{U^2};$$

U vitesse moyenne. On a un moyen facile de trouver les coefficients a et b , pour le cas spécial du lit lorsqu'on a mesuré pour divers états du cours d'eau les pentes i ainsi que U.

L étant la largeur d'un cours d'eau, P_m sa profondeur moyenne, Ω sa section mouillée, χ son paramètre mouillé; pour les cours d'eau beaucoup plus larges que profonds, on peut, en admettant $\chi = L$, $R = P_m$, écrire :

$$U = 50 \sqrt{i} P_m^{\frac{4}{3}}; \quad \Omega = L P_m \quad \text{et} \quad Q = 50 L \sqrt{i} P_m^{\frac{4}{3}}.$$

Ces mêmes formules, en fonction de la profondeur p maximum mesurée au point le plus bas de la section mouillée, deviennent :

$$U = K p^{\frac{2}{3}}; \quad \Omega = C p^m; \quad Q = K C p^{\frac{2m+1}{2}};$$

lesquelles sont traduites graphiquement par les courbes de la figure 8.

Dans ces formules, K et C sont des constantes et m un exposant qui peut, suivant l'inclinaison des rives, être égal à 1 (rives verticales), compris entre 1 et 2 (rives concaves) et supérieur

à 2 (rives convexes). Ces formules supposent que la pente superficielle i de l'eau est constante, quelle que soit la profondeur p de l'eau, c'est-à-dire que la pente du lit est elle-même constante.

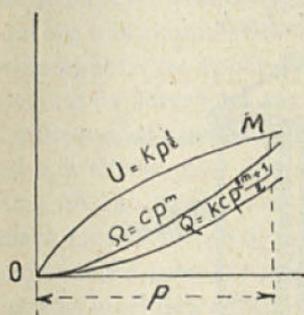


Fig. 8.

d'eau par un orifice noyé assez étroit pour amortir les oscillations. Le plus souvent on installe des indicateurs de niveau de manière à les rendre enregistreurs; ces indicateurs de niveau ont reçu les appellations de limnigraphes et de limnimètres (fig. 9 et 10).

Dans une opération de jaugeage, on relève la section transversale du lit jusqu'au niveau de l'eau et même au-dessus. Ce relevé donne la valeur de p ; en même temps on lit, à l'échelle de la station, une certaine hauteur h au-dessus d'un zéro correspondant au débit d'étiage et situé à une certaine hauteur p_0 au-dessus du fond du lit. Alors :

$$p = h + p_0.$$

On peut calculer une série de hauteurs d'eau successives inférieures ou supérieures à p , la section mouillée correspondante, et construire ainsi la courbe Ω jusqu'au point M du jaugeage (voir fig. 8) et au delà.

L'opération du jaugeage détermine les valeurs de U et de Q (en mètres cubes par seconde) correspondantes à la valeur d'eau : $h = p - p_0$ lue à l'échelle au moment du jaugeage.

Le relevé des variations de niveau de l'eau, qui fait l'objet des observations hydrométriques, constitue un élément impor-

LILLE

14. Echelles hydrométriques. —

Pour mesurer les variations de niveau de l'eau dans un cours d'eau donné, on emploie des échelles placées soit sur le bord de la rivière, soit dans un puits communi-

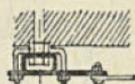
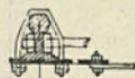
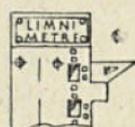


Fig. 9.

tant de l'étude des cours d'eau. Les observations sont, en temps normal, simplement quotidiennes. Pendant les crues on

Vue d'Ensemble

Coupe Verticale

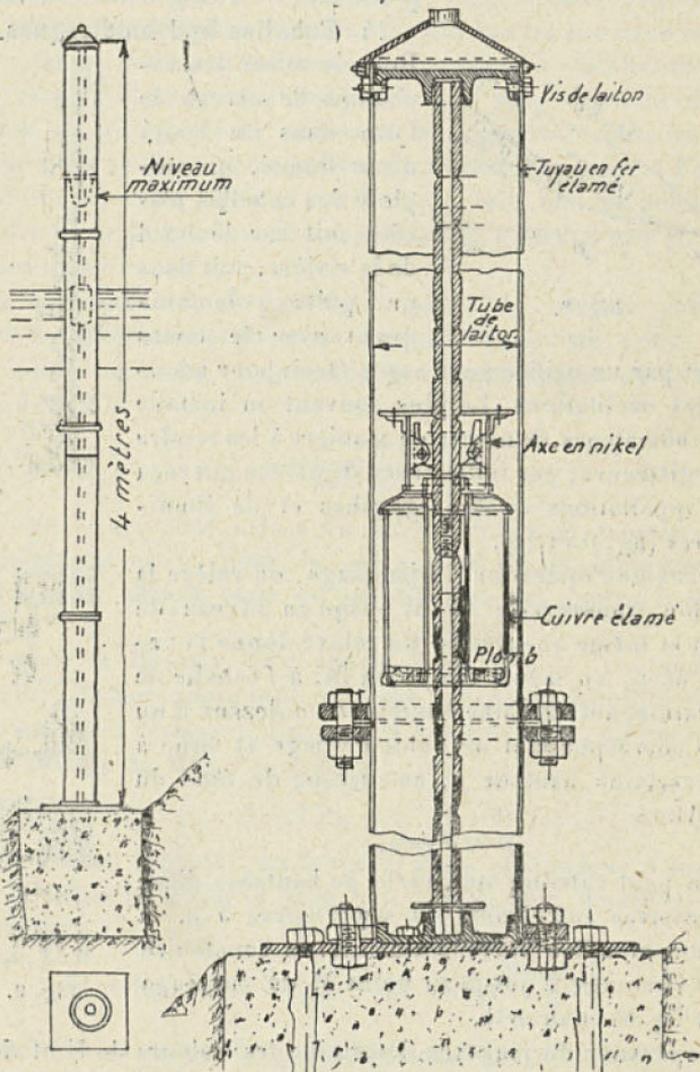


Fig. 10.

fait des relevés trois fois par jour, et pendant les grandes crues on observe toutes les heures sur les rivières torrentielles.

Les échelles hydrométriques se font actuellement en lave émaillée, et le zéro de l'échelle se place généralement au niveau de l'étiage conventionnel. Quelquefois on dispose aux points qui ont une importance exceptionnelle des appareils dits « fluviographes » ou appareils flotteurs avec enregistreurs qui permettent de suivre les variations du niveau de l'eau.

Chaque station de jaugeage a pour but de déterminer la loi qui existe entre les débits et les hauteurs d'eau à l'échelle. Une fois en possession de cette loi, on la traduit graphiquement sous la forme d'une courbe caractéristique de la station, puis numériquement sous la forme d'un tableau constituant un barème local des débits en fonction des hauteurs. Si le lit de la rivière est fixe, l'évaluation du débit résulte d'une simple lecture de l'échelle. Pour les lits à cours mobile, on doit refaire souvent les jaugeages pour suivre les variations entre les côtes et les débits pour établir la loi, quand cela est possible.

Pour déduire les débits, puisqu'on ne connaît que la vitesse par les jaugeages, on divise la section transversale par deux réseaux de coordonnées rectangulaires, et sur chaque ordonnée on mesure la vitesse le plus près possible du fond de la surface et en des points régulièrement espacés.

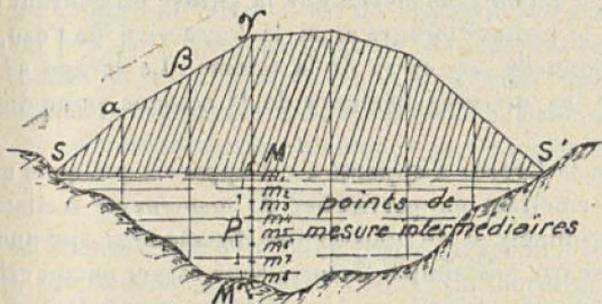


Fig. 11.

Soient (fig. 11) p la profondeur sur une ordonnée MM' et u la vitesse moyenne sur cette verticale; le produit ($p \times u$) représente le débit élémentaire q d'une tranche infiniment mince se confondant avec l'ordonnée MM' . On porte $q = p \times u$ à une échelle choisie au-dessus de l'horizontale de surface SS' . Les extrémités α , β , γ , etc., de la ligne ainsi obtenue forment un polygone dont l'aire est égale à la somme des débits élémen-

taires, et le débit total est : $Q = \Sigma pu$. Il suffit de le mesurer au planimètre.

15. **Jaugeage au moyen des hydromètres.** — Ces appareils donnent des indications plus exactes que les flotteurs et permettent de mesurer la profondeur du cours d'eau à la profondeur que l'on se détermine. On relève la section transversale de la rivière et on la divise en divers compartiments dont on détermine les aires et au centre desquels on vient plonger successivement l'appareil, qui donne la vitesse en ce point.

Les instruments employés sont désignés sous le nom générique de « moulinets ». Les plus utilisés sont les suivants.

Le tube de Pitot, tel qu'il se construit de nos jours, se compose essentiellement de deux tubes de verre verticaux fixés sur une planchette de bois et communiquant entre eux à leur partie inférieure par un tube métallique. Ces parties inférieures, également métalliques, sont recourbées à 90° et terminées l'une par un ajutage statique et l'autre par un ajutage dynamique. Ritter y a apporté une modification pour éliminer les actions des filets obliques et par ce moyen mesurer exactement la pression statique. La pression dynamique est donnée par l'ajutage qui reçoit directement le courant. L'ascension de l'eau dans le tube est d'autant plus élevée que la vitesse du courant est plus grande ; la hauteur mesure ainsi la force vive de l'eau, qui est proportionnelle au carré de la vitesse. Le tarage se fait en relevant les diverses hauteurs de la colonne pour différentes vitesses.

M. de la Brosse a apporté à cet appareil quelques modifications permettant en particulier de manœuvrer à distance les divers robinets et de pouvoir lire directement sur une échelle la vitesse par une simple lecture, sans exiger aucun calcul.

Ce genre d'appareil, qui ne convient pas à la mesure des faibles vitesses, n'est réellement pratique que pour les cours d'eau peu profonds et lorsque la vitesse est considérable.

Les *moulinets hydrométriques* sont utilisés pour la mesure des faibles vitesses. En principe ces instruments se composent d'une roue à ailettes actionnant un compteur et d'un gouvernail plongé dans l'eau ; ils s'orientent dans la direction du courant et donnent sous l'action de celui-ci la vitesse rotative proportionnelle à la vitesse du courant. Dans les appareils à comp-

teur mécanique, on observe le nombre de tours que la roue à ailettes a faits pendant un temps donné. Dans les appareils à signal électrique, on compte 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 simple donnée avec chaque appareil. La vitesse du courant ainsi obtenue est la moyenne des vitesses pendant le temps de l'observation.

Le « moulinet de Voltmann », le premier en date, a reçu des modifications successives de Harlacher et de Baumgarten permettant de faire des lectures à chaque instant, sans être obligé de retirer l'instrument hors de l'eau, et d'avoir un meilleur rendement mécanique.

Le « moulinet électrique de Ritter » est renfermé dans un manchon qui soustrait les hélices de Baumgarten aux courants latéraux. L'instrument porte un appareil de tarage qui consiste en un ajutage statique et en un ajutage dynamique reliés à un manomètre à deux colonnes.

Un appareil dont on fait un grand usage est le « moulinet de Ott », qui n'a pas besoin d'être retiré de l'eau pour une lecture du nombre de tours. C'est un appareil intégrateur qui donne non pas la vitesse instantanée du courant en un seul point, comme le tube Pitot-Darcy, mais bien une vitesse moyenne dans la région qui fait face à l'hélice, pour un temps donné. Cette vitesse moyenne est calculée par la formule linéaire

$$v = a + bn;$$

a et b coefficients qu'on détermine par le tarage et n le nombre de tours par seconde de l'hélice mobile. Ce dernier s'obtient en comptant, par exemple, le temps qui se passe entre deux appels successifs de la sonnerie électrique.

Le « moulinet Richard », établi avec le concours de M. l'ingénieur de Folin, a été créé en vue d'éliminer le type Ott. Il comporte six ailes découpées dans une hélice au pas de un mètre. L'appareil est disposé de telle façon que son axe se trouve toujours horizontalement dans la direction du courant. Sur ce même axe est monté un système de contact électrique qui a l'avantage de n'introduire que des résistances négligeables.

Les enregistreurs le plus souvent employés avec ce modèle de moulinet sont le chronographe totalisateur, le chronographe universel et électro-cinémographe. Ce dernier est commandé par les contacts émis par le moulinet, soit à raison de un contact par tour ou par mètre, soit à raison de vingt contacts par tour. L'enregistreur donne ainsi par une simple lecture la vitesse relative de l'eau par seconde, ou le chemin parcouru, ou la vitesse moyenne.

Le « moulinet Price » qui est un dérivé du moulinet de Ott, en diffère en ce que la tige rigide peut être remplacée par un câble métallique de longueur indéterminée. Ensuite, à l'hélice

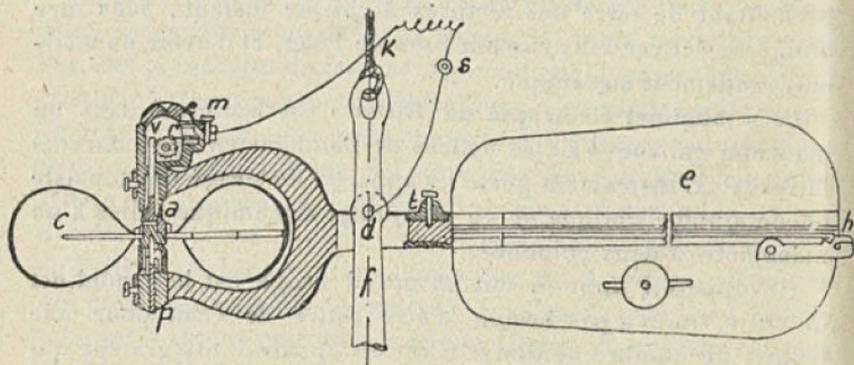


Fig. 12.

du moulinet de Ott il a été substitué (fig. 12) une couronne de cônes C. Entre deux contacts successifs de la sonnerie, la couronne fait cinq tours, et un barème établi à la suite d'un tarage donne les vitesses de l'eau correspondant aux divers intervalles de temps pendant lesquels se produisent des nombres déterminés d'appels de sonnerie. Au lieu d'une sonnerie on peut utiliser un microphone. Une tige horizontale prolonge l'appareil et porte deux gouvernails, l'un vertical e et l'autre horizontal h. Le câble de suspension K s'enroule sur le tambour d'un treuil porté par une potence. Pour opérer, on accroche la potence au parapet d'un pont, par exemple, au point correspondant à l'ordonnée choisie, et l'on descend l'appareil jusqu'à la surface de l'eau, et dès qu'elle est immergée, la couronne de cônes se met à tourner. L'opérateur chronomètre alors le temps mis pour entendre un certain nombre d'appels de son-

nerie, et le barème lui donne la vitesse: On descend ensuite l'appareil et on mesure la vitesse en ce nouveau point, et on continue jusqu'au fond et de la même façon pour toutes les ordonnées successivement.

Moulinets intégrateurs. — Avec les moulinets ordinaires, il est nécessaire de prendre des mesures en plusieurs points sur la même verticale et sur différentes verticales, savoir à la surface, près du fond, à mi-profondeur, ainsi que vers les $3/10$ et les $6/10$ de la profondeur, ces derniers correspondant l'un à la vitesse maximum sur la verticale considérée et l'autre à la vitesse moyenne. La méthode par intégration, qui consiste à faire mouvoir l'instrument avec une vitesse uniforme connue, évite les nombreux déplacements de l'appareil. La vitesse qu'on obtient est la résultante des vitesses de l'eau et de l'appareil; elle est ainsi plus grande que la valeur réelle.

Ce genre de moulinet monte ou descend le long d'un tube vertical en fer, son mouvement étant guidé par un fil enroulé autour d'un tambour et d'une poulie supportée par une console; le moulinet ainsi guidé prend de lui-même la direction du courant au point où on l'immerge, et la profondeur est enregistrée sur un cadran.

L'« hydromètre Izart » (fig. 13) est un appareil à amplification directe enregistrant immédiatement sur le diagramme la hauteur h d'écoulement au-dessus d'un orifice ou d'un déversoir sans aucun organe intermédiaire entre le niveau à enregistrer et la plume enregistreuse. Le zéro du diagramme est réglé en faisant affleurer l'eau au niveau du seuil du déversoir; le flotteur, en s'élevant et en s'abaissant, enregistre les hauteurs de h . Pour obtenir l'inscription

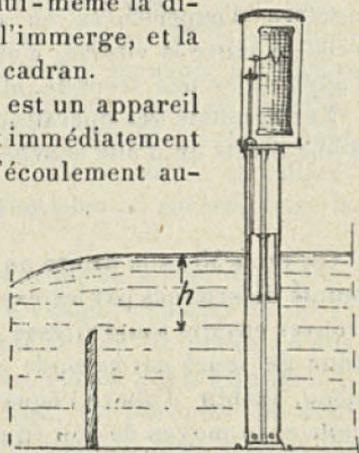


Fig. 13.

sur le diagramme, directement, des débits en mètres cubes par seconde, on emploie des flotteurs paraboloides dont le volume déplacé est proportionnel à h .

Cet appareil permet aussi de se rendre compte de la variation du débit en fonction du temps.

16. **Tarage des moulinets.**— Nous avons (§ 15) donné la formule :

$$v = a + bn,$$

et nous avons dit que les coefficients a et b devaient être déterminés par le tarage. Pour chaque expérience de tarage, on obtient une équation; on applique à ce système d'équation la méthode dite « des moindres carrés » pour en déduire les valeurs de a et b , et qui consiste à multiplier chaque équation de condition par le coefficient de l'inconnue cherchée dans cette équation et à additionner ensuite membre à membre.

Pour procéder à une opération de tarage, on fait mouvoir le moulinet avec une vitesse uniforme à une certaine profondeur dans l'eau; on lui fait parcourir une distance plusieurs fois, tant en avant qu'en arrière, et avec une vitesse dont la valeur se rapproche autant que possible de celles qu'on a en vue de mesurer. On doit pouvoir évaluer le temps à un dixième de seconde et la vitesse à un dixième des tours au moyen d'un chronographe enregistreur. Avec les résultats d'un certain nombre d'expériences, on établit, une fois pour toutes, la relation entre la vitesse, c'est-à-dire ici l'espace parcouru par l'appareil en une seconde, et le nombre de tours du moulinet.

Les résultats des opérations peuvent conduire à l'obtention d'une droite ou d'une courbe. Dans le cas d'une courbe, on a :

$$v = a + bn + cn^2.$$

On trace alors la droite ou la courbe passant par ou près des points déterminés par les expériences directes; cela permet de trouver ensuite toute vitesse correspondant à un nombre déterminé de tours par seconde du moulinet. On peut, d'une autre façon, établir d'abord l'équation de la courbe et tracer ensuite celle-ci au moyen de son équation.

On recommande parfois de prendre pour abscisses, au lieu des valeurs de n et de v , celles de n et $\frac{v}{n}$, parce que ce dernier rapport varie rapidement quand n augmente, ce qui rend les lectures plus exactes que dans le cas d'une ligne presque droite. D'après le principe de la méthode des moindres carrés, les meilleures valeurs à donner aux constantes inconnues a , b et c

sont celles pour lesquelles la somme des erreurs résiduelles est minimum.

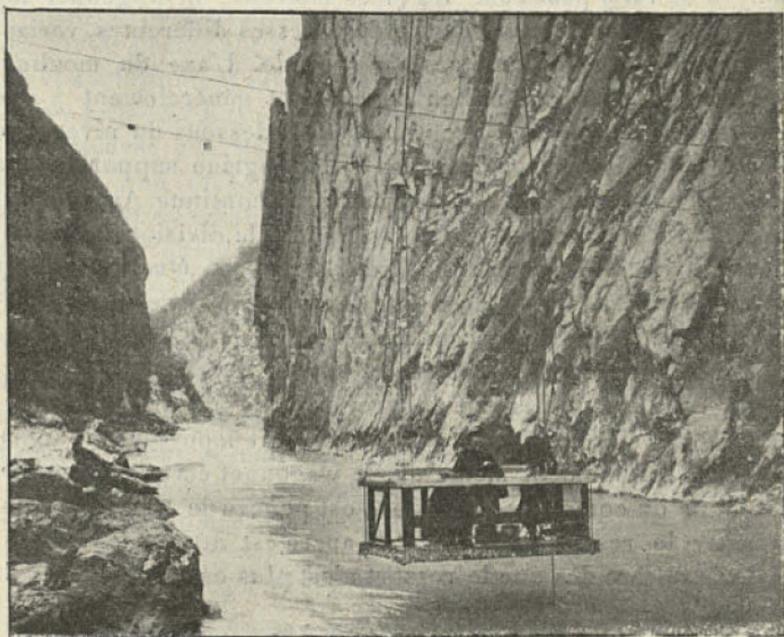
Au laboratoire d'essais des moulinets du Bureau hydrométrique fédéral suisse, à Berne, dont l'installation consiste en un canal en béton de 130 mètres de longueur, 1^m,20 de largeur et 1^m,40 de profondeur, et rempli d'eau dormante jusqu'à une hauteur de 1^m,20 du fond, on fait circuler au-dessus du canal, au moyen de rails posés sur les murs latéraux, un wagonnet mû à la main et qui peut marcher à des vitesses différentes, variant de 3 centimètres à 5 mètres par seconde. L'axe du moulinet se trouve disposé au milieu du canal et généralement à une profondeur d'environ 40 centimètres au-dessous du niveau de l'eau. L'une des parois latérales de la longrine supportant les rails est pourvue d'une division métrique continue. Au côté longitudinal du wagonnet qui correspond à la division métrique, deux fusils à air comprimé (I et II) peuvent être placés sur une table verticale de façon que leurs bouches ne soient éloignées que de quelques centimètres d'une lame de sapin posée horizontalement sur toute la longueur de la voie.

Le moulinet qu'il s'agit de tarer est relié par un fil conducteur à un électro-aimant dont l'ancre fait mouvoir un signal optique. Au moment même où, le wagonnet étant en marche, la pointe du compteur denté dont est pourvu le moulinet vient toucher le ressort de contact, l'ancre est attirée, et celle-ci redevient libre dès que le ressort n'est plus en contact avec la pointe.

Supposons maintenant que l'on procède au tarage d'un moulinet qui donne un signal électrique à chaque centaine de tours; quand le wagonnet a atteint la vitesse voulue, on presse, d'une main, à l'instant où l'ancre est attirée, sur le bouton du fusil I, et l'on met en marche, de l'autre main, un chronoscope dont l'aiguille des secondes est à zéro; aussitôt que l'ancre est attirée une seconde fois, on presse, d'une part, sur le fusil II et, d'autre part, au même moment, l'on arrête l'aiguille des secondes du chronoscope. La montre indique la durée de la marche, et la différence des longueurs marquée par la division métrique entre les points atteints par les projectiles (flèches) représente la distance parcourue. Ces deux données permettent alors de déterminer sans peine les résultats qu'il importe

habituellement de faire connaître dans le tarage des moulinets. Pour les vitesses plus grandes (200, 300 ou 400 tours), on ajuste l'appareil de telle sorte qu'un nombre correspondant de contacts soit sauté durant la courbe d'essai.

Dès qu'une expérience de tarage est terminée, on note les résultats sur un carnet *ad hoc*. On calcule ensuite la vitesse en mètres par seconde, ainsi que le nombre de tours du moulinet



(Cliché J. Jaya.)

Fig. 13 bis. — Station de jaugeage de Ponnassas.

par mètre de parcours ; puis les valeurs respectives sont portées dans un système de coordonnées où on prend les vitesses pour abscisses et les nombres de tours du moulinet pour ordonnées. Ce procédé permet de découvrir rapidement les erreurs éventuelles d'observation et leurs causes, et il a en même temps l'avantage de pourvoir à une répartition régulière des expériences entre la plus petite et la plus grande vitesse dont on a fait usage.

Les points ainsi obtenus forment une courbe d'allure hyperbolique (fig. 14) dont la branche de gauche qui correspond aux

petites vitesses monte rapidement, tandis que l'autre est ordinaire à peu près horizontale. Considérée purement au point

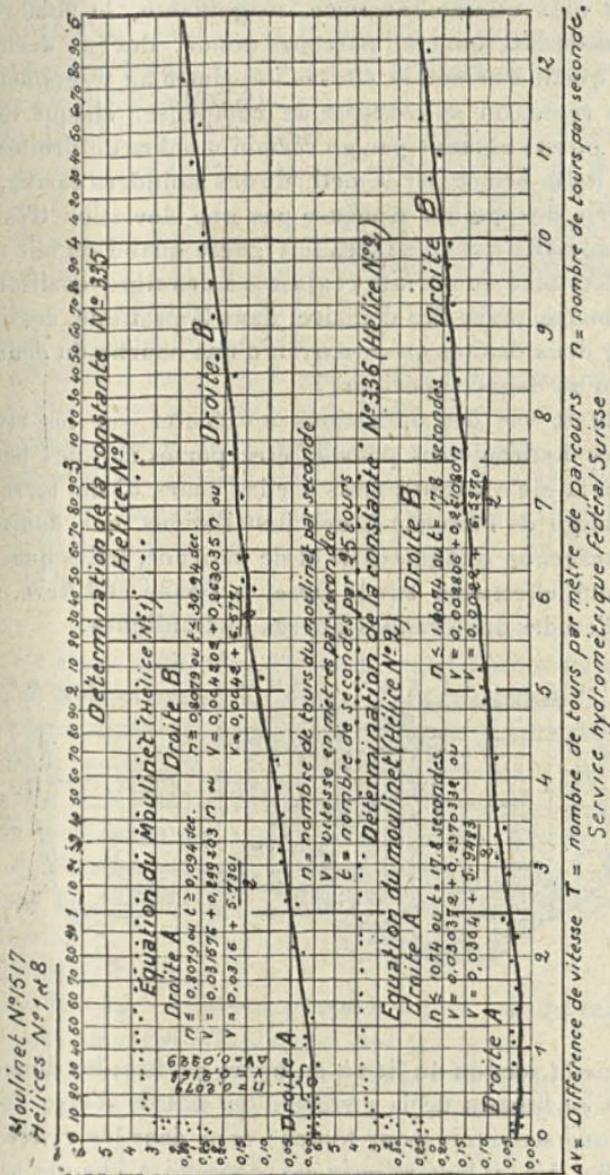


Fig. 14.

de vue théorique, cette seconde branche devrait être absolument horizontale quand le moulinet est bien construit; en con-

séquence, à partir d'une certaine vitesse où le frottement des parties mobiles du moulinet et la force d'inertie de celui-ci n'exercent plus qu'une influence insignifiante, le nombre de tours du moulinet, pour un parcours donné, devrait demeurer constant, quelle que soit la vitesse imprimée au wagonnet.

Dans la règle, on se contente de compenser chaque fois la série des points obtenus par un certain nombre de droites formant une ligne brisée par la méthode des moindres carrés.

Si la série des points n'accuse pas une déviation très prononcée, anomalie qui ne se produit guère quand on fait usage de moulinets bien construits et ajustés à des tiges ovalisées de faible diamètre, on se tire d'affaire, dans la pratique, aussi bien à l'aide de deux droites qu'au moyen d'une courbe du deuxième degré ou d'un degré supérieur.

Au point de vue des opérations à exécuter sur les rivières mêmes, les hydromètres peuvent être portés sur des barques (rivières à faible courant); mais sur les cours d'eau torrentiels on est obligé de recourir à des installations qui demandent parfois beaucoup d'ingéniosité et de patience, telles que celles qui ont été effectuées sur le Drac, la Boune et l'Arve, par le Service d'études des Grandes Forces hydrauliques.

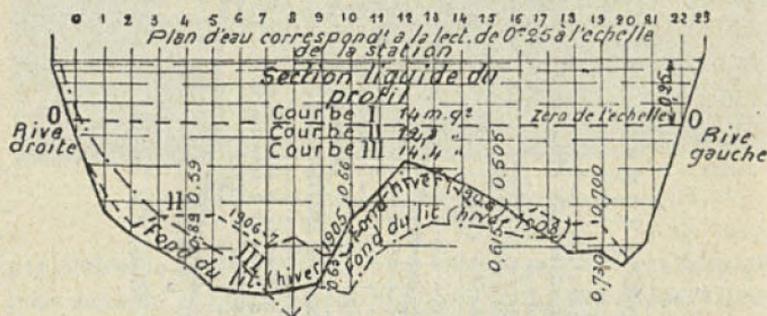


Fig. 15.

Lorsque la section du lit où on opère est fixe, les dimensions du profil en travers de la rivière n'ont besoin d'être déterminées qu'une seule fois pour toutes; mais dans les rivières à lit mobile (fig. 15), il faut relever ces données à chaque série de jaugeage.

17. Jaugeage par déversoirs. — Ce genre de jaugeage est des

plus recommandables quand on peut l'appliquer, car il se présente comme une opération simple et précise.

Les déversoirs sont des orifices de superficie à périmètre incomplet. Pour considérer le liquide comme s'écoulant d'un mouvement uniforme, il faut que le seuil du déversoir (fig. 16) ait une longueur suffisamment grande. La charge sur le seuil est h et celle sur l'arête est : $y = h - x$.

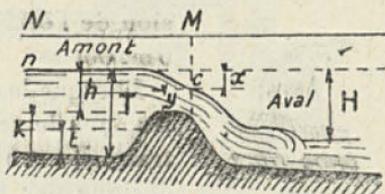


Fig. 16.

Le déversoir figuré est dit complet ou parfait et on le désigne aussi sous l'appellation de déversoir Poncelet et Lesbros.

La valeur de h est prise à une certaine distance, c'est-à-dire là où le plan d'eau est horizontal. Pour obtenir h , la droite MN représentant l'arête de la berge, on prend avec une règle la profondeur MB; de même on relève à une certaine distance la hauteur Nn, et on fait le nivellement des points M et N. Si par exemple M est à 0 m. 10 en contre-bas de N, on aura pour la valeur de la chute :

$$h = MB + 0 \text{ m. } 10 - Nn.$$

Ainsi h est la différence d'altitude entre l'arête du déversoir et le plan d'eau du canal à quelque distance de l'amont.

Les formules que l'on utilise pour les déversoirs sans contraction latérale sont celles de Poncelet et Lesbros, de Boileau et de Bazin.

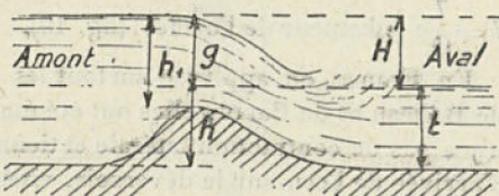


Fig. 17.

La figure 17 représente un barrage en déversoir incomplet ou barrage noyé, appelé aussi déversoir Boileau et Bazin.

La formule simplifiée suivante permet de calculer avec une approximation suffisante le débit d'un déversoir noyé :

$$Q = 0,42 l \left(h_1 + \frac{x}{2} \right) \sqrt{2g(h_1 - x)};$$

l longueur du déversoir en mètres, h_1 hauteur d'eau au-dessus

du déversoir en amont en mètres, x hauteur d'eau au-dessus du déversoir en aval en mètres et Q débit en mètres cubes : seconde.



Fig. 18.
Formes diverses
des nappes provo-
quées par un
barrage.

Déversoirs à minces parois. — Un orifice est dit en mince paroi lorsque l'épaisseur de la paroi est moindre que la plus petite dimension de l'orifice et au maximum de 0 m. 05 à 0 m. 06.

Lorsque le seuil a des dimensions très petites dans le sens du courant (dans le cas contraire il est dit à crête ou à seuil épais), si on désigne par L la largeur du déversoir, h la charge sur le centre de gravité de l'orifice ou distance de ce centre à la surface libre du liquide, la valeur du débit est donnée par la formule ci-après due à Debuat et appelée « formule française » :

$$Q = KLh \sqrt{2gh} = 1,77 Lh \sqrt{h},$$

avec $K = 0,40$ (coefficient de contraction).
Pour un déversoir à crête épaisse, $K = 0,30$.

Dans cette formule L et h sont en mètres et Q en mètres cubes par seconde. Si on mesure l'épaisseur de la lame sur le seuil on prend :

$$h = \frac{7}{6} e \quad (e \text{ hauteur de l'orifice}) \quad (\text{fig. 19}).$$

En France, on applique surtout les formules bien connues de Boileau et de Bazin; elles ont été établies pour les cas où il n'y a pas de contraction latérale et tiennent compte de la vitesse d'arrivée de l'eau sur le déversoir, vitesse d'autant plus faible que H (fig. 20) est plus grand. Plus la vitesse d'arrivée est faible, plus le débit doit être petit pour une même valeur de h .

Formule Boileau :

$$K_1 = 0,417 \frac{h + H}{\sqrt{(H + h)^2 - h^2}};$$

Formule Bazin :

$$K_1 = \mu \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + H} \right)^2 \right];$$

avec $\mu = 0,432, 0,421, 0,417, 0,414$, pour $h = 0,10, 0,20, 0,30$ et $0,40$.

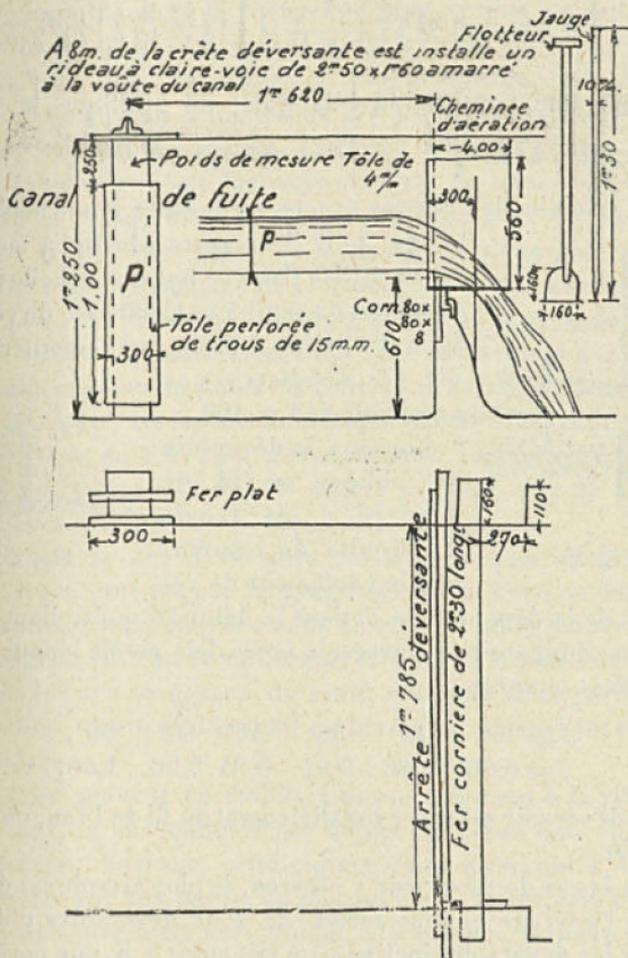


Fig. 18 bis. — Type de déversoir de jaugeage installé à l'usine hydroélectrique de Souloin.

En pratique, quand h ne dépasse pas 0 m. 10, on prend pour la formule du débit :

$$Q = \left[0,425 + 0,212 \left(\frac{h}{h+H} \right)^2 \right] l h \sqrt{2gh},$$

qui donne le débit avec une approximation de 3 à 4 p. 100.]

Quand il y a contraction unilatérale, on prend :

$$Q = \left[0,425 + 0,212 \left(\frac{h}{h+H} \right)^2 \right] \left(l - \frac{2}{10} h \right) h \sqrt{2gh}.$$

Et pour une contraction bilatérale, on applique la même formule, mais avec $\frac{10}{4} h$.

Pour obtenir des relevés exacts, on mesure y une fois pour toutes; puis il ne reste plus qu'à mesurer h . On utilise dans ce but une échelle placée en amont du seuil à une distance de celui-ci égale à environ $5h$. On peut compter obtenir des résultats d'une précision de 1 p. 100.

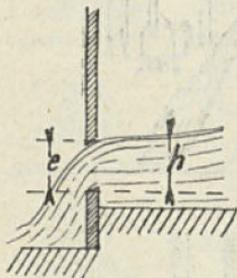


Fig. 19.

Lorsque le déversoir est oblique au fil de l'eau, si a est l'angle d'obliquité du courant et f le coefficient de réduction de la dépense, on obtient le débit en multipliant le volume que donnerait un déversoir normal de même longueur par les chiffres ci-après :

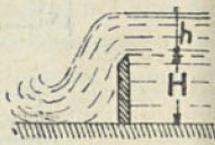


Fig. 20.

Si le déversoir est placé parallèlement au fil de l'eau, on prend $f = 0,80$.

$a = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	90° ,
$f = 0,80$	$0,86$	$0,91$	$0,94$	$0,96$	$1,00$.

Si le déversoir est placé parallèlement au fil de l'eau, on prend $f = 0,80$.

Dans le cas de déversoir à *chevron*, le plus simple est de considérer l'ouvrage comme formé de deux déversoirs obliques.

Pour les déversoirs inclinés, on fait subir à K une correction en le multipliant par un facteur qui varie de 0,93 à 0,96 s'il est incliné vers l'amont, et de 1,04 à 1,09 s'il est incliné vers l'aval. Enfin pour les déversoirs à *talus* (seuils épais), on prend les valeurs des coefficients en mince paroi que l'on multiplie par un facteur qui varie de 0,745 à 1,14 (table de Bazin), selon l'épaisseur de la lame, l'inclinaison des faces du déversoir, la charge sur la crête et la hauteur au-dessus du fond du canal. Si le déversoir a sa crête délimitée par un raccordement curviligne, on fait usage d'un coefficient de correction, comme

ci-avant, qui varie de 0,898 à 1,09 selon la charge, le dernier chiffre s'appliquant à la charge de plus grande valeur.

M. Clément Herschel, inventeur du jaugeur Venturi, préconise un nouveau type de déversoir établi comme suit. L'eau est amenée sur un radier incliné de 2/1 à une crête formée par une surface cylindrique creuse; cette eau s'écoule ensuite sur un autre radier de même inclinaison, mais de sens contraire. On mesure la charge sur la crête et quelque part en amont. Le volume écoulé par unité de longueur du déversoir se trouve être une fonction linéaire de la différence de ces charges.

La perte de pression à la crête se fait au moyen de trous de 3 mm. et demi de diamètre, dont l'axe est normal à la paroi de l'amenée de l'eau au point où celle-ci se raccorde tangentielle-ment à la crête. Le facteur numérique qui affecte la différence des pressions est de 1,675 par mètre courant. Le Société hydroélec-trique de France a décidé de mettre au point, par de nouvelles expériences, l'idée de M. Clément Herschel.

La méthode des déversoirs est d'un emploi généralement facile et pratique pour le jaugeage des cours d'eau de montagne. On choisit comme emplacement un endroit où le mouvement de l'eau est sensiblement uniforme, et pour la mesure de l'épais-seur de la lame au-dessus du seuil, qui doit être parfaitement horizontal, on attend l'instant où le régime permanent est à peu près réalisé.

Le plus souvent on établit transversalement à la rivière un petit mur en maçonnerie sur lequel on élève une cloison en bois formant barrage, cette cloison étant terminée à sa partie supérieure par une feuille de tôle qui forme la crête du déversoir et qui doit être bien horizontale. On mesure la hauteur d'eau au-dessus de la crête du déversoir, mesurée ayant la section contractée. A cet effet, on place en ce point une règle graduée, tenue bien verticalement et dont le zéro est sur l'horizontale de la crête du déversoir.

Pour des calculs rapides, on peut appliquer la formule :

$$q = 0,405 L \sqrt{2gh}.$$

La figure 21 représente un déversoir établi à poste fixe pour jaugeage de canal comprenant un déversoir en maçonnerie en amont, un bassin de repos et un orifice métallique de jauge en

aval. Le déversoir de jauge est encastré dans une ouverture du bassin de repos, dont la partie inférieure est formée par un

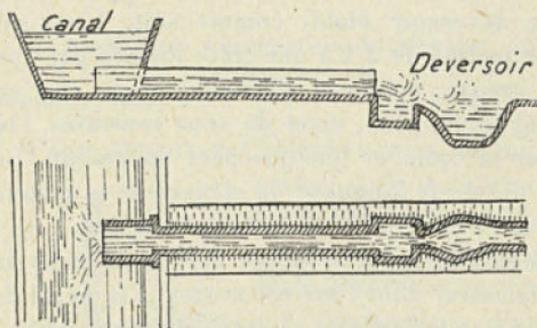


Fig. 21.

seuil en pierre de taille. L'orifice métallique est constitué par un cadre en tôle de fer de 10 mm. d'épaisseur et dont le vide a 0 m. 50 de largeur et 0 m. 75 de hauteur. Les deux parties pleines ont 0 m. 10 de largeur

et sont reliées à leur sommet par deux cornières de $50 \times 50 \times 6$, recourbées à leurs extrémités pour être scellées dans les murs du bassin de repos. Ce déversoir est encastré de 0 m. 03 dans les parois du bassin.

Si le débit est fort, on peut se voir obligé de construire un batardeau en damant de l'argile entre deux séries de madriers ou poutrelles, fortement arrêtées sur les rives et dans le courant au moyen de solides piquets (fig. 22).

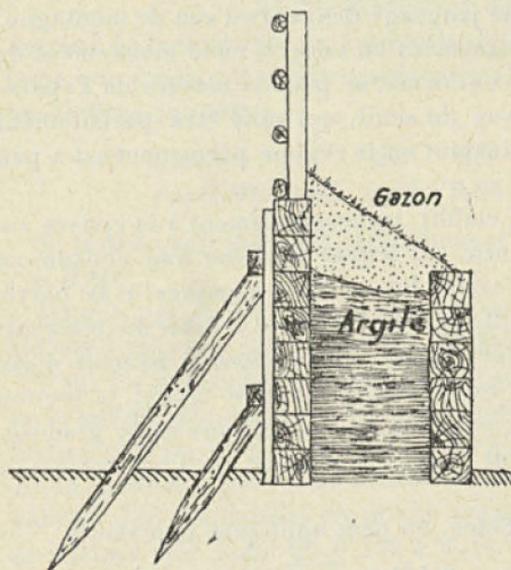


Fig. 22.

Le seuil devra se trouver à moins de 50 centim. au-dessus du niveau aval, pour éviter que la lame d'eau reste adhérente au barrage, c'est-à-dire qu'elle soit complètement détachée et libre.

En raison de la grande largeur de la plupart des cours d'eau,

des matières qu'ils charrient et du défaut de stabilité du lit, les jaugeages par déversoirs sont très difficilement applicables. Cependant un déversoir tel que celui qui est employé par le Service d'études des Grandes forces hydrauliques (fig. 23) peut rendre de réels services, et par suite être utilement employé.

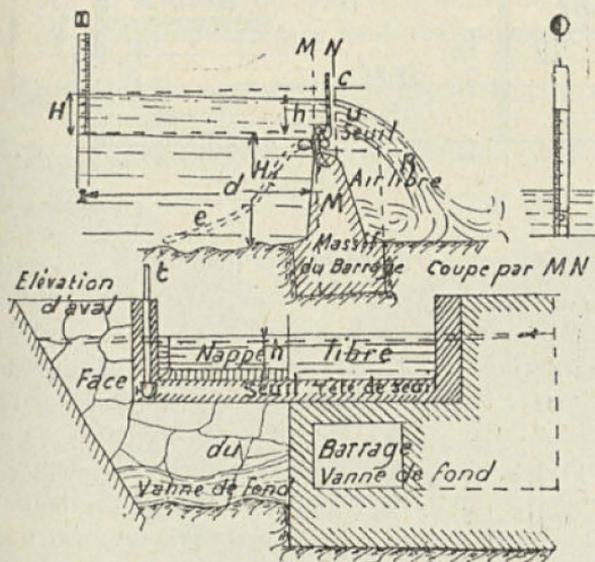


Fig. 23.

18. **Jaugeage par vannes.** — On dispose généralement la vanne à l'extrémité du canal d'arrivée, pour y former un déversoir complet ou incomplet. L'eau s'écoule de là dans un canal de fuite.

Le débit d'une vanne avec charge sur le sommet est fourni par l'expression suivante, où Q est le volume débité en litres par seconde, S la section d'écoulement en mètres carrés et h la charge sur le centre de l'orifice en mètres, l et e les dimensions de l'orifice d'évacuation :

$$Q = KS\sqrt{2gh} \quad \text{ou} \quad Q = Kle\sqrt{2gh} :$$

Pour une vanne à orifice en mince paroi verticale, on prend : $K=0,60$ et pour une vanne de fond, $K=0,67$ (valeurs moyennes).

Ces coefficients supposent la contraction complète et h dépassant 0 m. 15.

Si l'orifice est prolongé par un canal de même largeur, on fait entrer h' dans la formule, h' représentant la charge sur le sommet de l'orifice; alors ($K = 0,60$) suppose la hauteur de

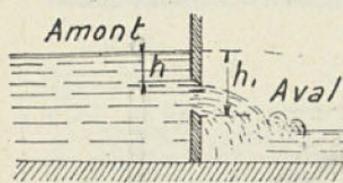


Fig. 24.

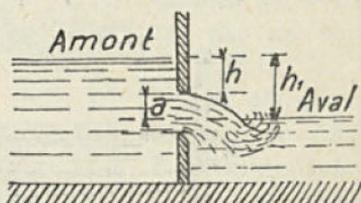


Fig. 25.

l'orifice supérieure à 0 m. 15 et $h' > 0$ m. 40 et une contraction complète.

Les valeurs à donner à K , pour des charges sur le sommet de l'orifice variant de 0 m. 01 à 3 mètres et pour des hauteurs d'orifice variant de 0 m. 01 à 0 m. 20, sont fournies par les tables résultant des expériences de Poncelet et Lesbros.

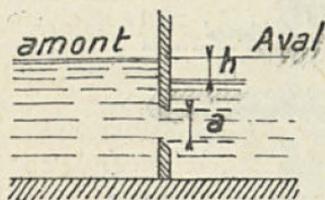


Fig. 26.

Si l'écoulement a lieu par un grand orifice rectangulaire en mince paroi verticale, on devra recourir aux coefficients de contraction indiqués par Bazin, par Graeff et par Hamilton Smith.

L'orifice d'écoulement peut être totalement au-dessus du bief inférieur, ou en partie, ou se trouver en entier au-dessous de ce niveau (fig. 24 à 26).

Les valeurs des débits de l'orifice sont respectivement les suivantes pour les trois cas signalés :

$$Q = \frac{2}{3} \mu L \sqrt{2g} [(h_1 + K)^{\frac{3}{2}} - (h + K)^{\frac{3}{2}}];$$

$$Q = \frac{2}{3} \mu L \sqrt{2g} [(h_1 + K)^{\frac{3}{2}} - (h + K)^{\frac{3}{2}}] + \mu La \sqrt{2g} \sqrt{h_1 + K};$$

$$Q = \mu La \sqrt{2g} \sqrt{h + K};$$

L largeur de l'orifice, $K = \frac{V^2}{2g}$ (V vitesse de l'eau immédiate-

ment à l'amont) et $\mu = 0,60$ dans le cas où l'arête se trouve haut placée par rapport au lit, et 0,65 à 0,70 lorsqu'elle se trouve au niveau de celui-ci.

Pour opérer le jaugeage, on se sert de la vanne de décharge de l'usine, que l'on ouvre d'une certaine quantité après avoir préalablement repéré sur la paroi du canal le niveau exact et fermé la vanne. Si le niveau du canal se maintient constant, on en conclut que le débit de la vanne de décharge est égal à celui

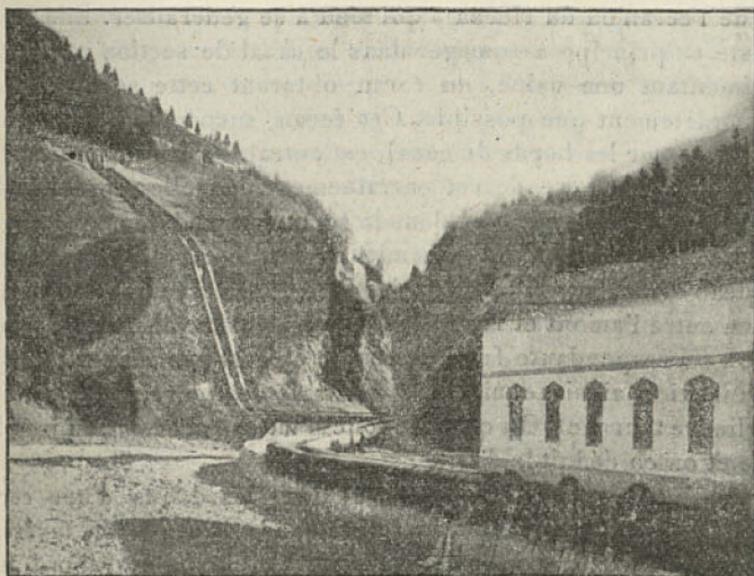


Fig. 26 bis. — Usine hydroélectrique du Giffre.

dépensé par la turbine. On relève alors les cotes nécessaires pour calculer le débit.

On doit opérer de façon que les manœuvres de fermeture des vannes se fassent rapidement.

On peut aussi, à l'entrée de la chambre de mise en charge de la turbine, installer, en travers du canal d'aménée, un barrage volant constitué de manière à pouvoir faire passer toute l'eau prise par la turbine à essayer par un orifice muni d'une vanne pouvant se fermer très rapidement, et l'on mesure l'abaissement de ce plan d'eau pendant un temps donné.

La pression P exercée par l'eau sur une vanne rectangulaire,

en supposant que la vanne effleure le plan d'eau, est donnée par la formule :

$$P = \frac{1}{2} \delta h^2 l.$$

Et le centre de pression est : $x = \frac{2}{3} h$;

h hauteur de la vanne, l largeur et δ densité de l'eau.

M. le professeur Erik Anderson a introduit une méthode dite « de l'écran ou du rideau » qui tend à se généraliser. Elle consiste en principe à émerger dans le canal de section constante alimentant une usine, un écran obturant cette section aussi complètement que possible. Cet écran, suspendu à un chariot roulant sur les bords du canal, est entraîné par le courant. On mesure la vitesse de cet entraînement, laquelle représente la vitesse moyenne de l'eau dans la section considérée.

Le chariot amené à l'extrémité amont du canal et l'écran ou rideau étant dans la position verticale, il se crée une dénivellation entre l'amont et l'aval de l'écran, dont la valeur de la pression correspondante fait mouvoir le chariot aval. La vitesse de translation ainsi acquise par le chariot est enregistrée sur un cylindre tournant. On connaît donc la vitesse et la section mouillée et on en déduit le débit.

Jaugeage par orifices noyés. — Pour les débits d'une certaine importance, M. Rateau recommande l'emploi de tuyères noyées de préférence aux déversoirs. On installe d'abord un canal, dont la forme a peu d'importance, traversé par une cloison s'élevant au-dessus du niveau du liquide. Au travers de celle-ci on place un ou plusieurs tubes, munis d'ajutages réduisant au minimum les pertes de charge. Suivant les quantités d'eau qu'on doit mesurer, on fait varier le nombre et les dimensions des ajutages de façon à obtenir, entre l'amont et l'aval de la cloison, une dénivellation aussi grande que possible, sans cependant découvrir les ajutages. La section des orifices s étant connue, ainsi que la différence de hauteur de l'eau à l'amont et à l'aval (H), la valeur du débit Q est fournie par :

$$Q = 4,25 S \sqrt{H}.$$

L'erreur se chiffre à 1 p. 100, à 2 p. 100 au maximum.

19. Jaugeage du débit des conduites forcées. — Les
IRIS - LILLIAD - Université Lille

appareils Parenty et Mesnager, qui consistent, en principe, en un tube Pitot transformé pour cette application spéciale, permettent de déterminer le débit d'une conduite forcée. M. Bellet adapte au tube Pitot-Darcy un dispositif qui donne le moyen de mesurer la vitesse avec une très grande approximation. La méthode la plus moderne et la plus utilisée pour le jaugeage des conduites forcées est celle dite *méthode Venturi*. On sait que la loi « de Venturi » s'énonce comme suit : « Dans un tuyau dont la section ou le diamètre diminue, la pression que l'eau exerçait latéralement baisse avec l'augmentation de la vitesse, de sorte qu'au rétrécissement du tube « Venturi », qui met en communication deux cônes tronqués, il s'agit d'obtenir une vitesse suffisamment grande pour anéantir toute pression et créer à sa place un vide ou action aspirante. Réciproquement, dans un tuyau conique dont la section ou diamètre augmente, l'eau perd en vitesse et gagne en pression; conséquemment, le « tube Venturi » produit une grande perte de charge au rétrécissement de l'appareil, mais, à la sortie, cette perte est compensée et l'eau revient à peu près à son niveau primitif. »

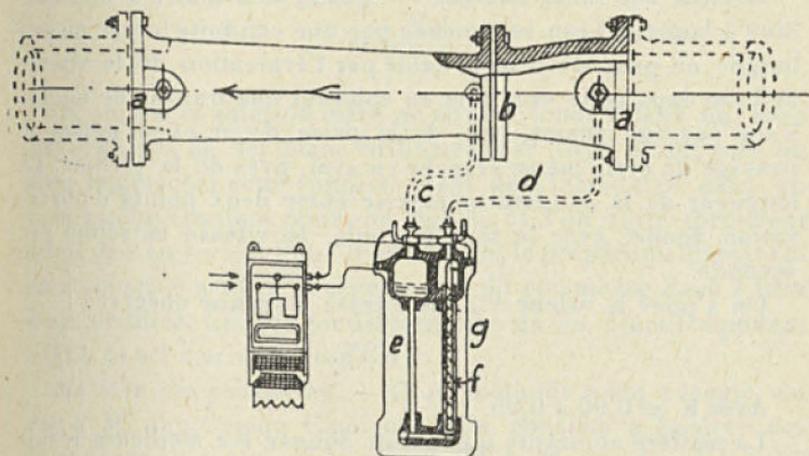


Fig. 27.

Le compteur Venturi, inventé par M. Clément Herschel, se compose essentiellement de deux troncs de cône (fig. 27), l'un convergent, l'autre divergent, réunis par leur sommet commun avec interposition d'un manchon cylindrique; il est intercalé dans la conduite dont on veut mesurer les débits; les

grands diamètres des troncs de cône sont égaux à celui de 1^a conduite. Deux tubes piézométriques sont placés, l'un sur l'un des cônes, l'autre sur le manchon cylindrique. Par suite de l'augmentation de vitesse dans ce dernier, la pression qui y règne, et qu'indique le tube piézométrique correspondant, est plus petite que la pression indiquée sur le cône.

La partie principale du compteur Venturi ou tube est solidaire d'un enregistreur, qui peut être placé à toute distance jusqu'à 300 mètres. Cet enregistreur est généralement muni d'un dispositif traçant un diagramme de la vitesse d'écoulement, ainsi que d'un cadran indiquant la quantité d'eau totale passée. Il est facile de transmettre au loin électriquement les indications tant du diagramme que du cadran.

L'appareil imaginé et étudié par la société belge des appareils Rateau indique et enregistre les débits en échelles proportionnelles à la pression et dans des limites d'exactitude à 1 p. 100 près du débit réel.

Le Venturi peut être installé soit à l'aval, soit à l'amont des appareils d'utilisation, c'est-à-dire des turbines.

Méthode des ondes colorées. — Quand on a affaire à une turbine à laquelle l'eau est amenée par une conduite forcée un peu longue, on peut mesurer le débit par l'évaluation de la vitesse de l'eau dans cette conduite en colorant une tranche de liquide à son passage amont, près de la prise d'eau, et en notant le passage de cette même tranche en aval, près de la turbine. La longueur de la conduite comprise entre deux points d'observation donne, avec le temps écoulé, la vitesse moyenne par seconde.

On a pour la valeur V de la vitesse moyenne observée :

$$Q = KSV.$$

Avec $K = 0,90$ à $0,95$.

La matière colorante qui paraît donner les meilleurs résultats est le rouge de fuchsine. Il est essentiel que, lors de l'opération, les chronomètres soient exactement mis en concordance, et alors on peut déterminer la vitesse moyenne d'écoulement de l'onde colorée avec une approximation de l'ordre de 1 p. 100.

Méthode par la voie chimique. — Si on a pour but de déter-

miner le débit d'un torrent ou jauger le volume d'eau absorbé par une turbine lorsque celle-ci est branchée sur un collecteur en alimentant d'autres et évacue ses eaux dans un canal de fuite qui collecte aussi d'autres eaux, il n'y a guère que les jaugeages chimiques qui permettent de résoudre ces cas avec un degré de précision acceptable.

Pour opérer selon cette méthode, on fait écouler à débit constant et régulier une solution de chlorure de sodium dans une solution de nitrate d'argent et, au moment où le chlorure de sodium est précipité, on observe la quantité de nitrate d'argent employé et on calcule facilement la quantité de chlorure de sodium précipité. On peut remplacer une partie des opérations chimiques par des mesures électriques basées sur le fait qu'à mesure que s'appauvrit la solution, sa résistance électrique diminue.

Si V est le volume de dilution de comparaison, s le nombre de centimètres cubes moyens de solution de nitrate d'argent correspondant à une prise de un litre, et s' le nombre de centimètres cubes de nitrate d'argent correspondant à un litre de solution diluée au volume V , et Q le débit du cours d'eau, l'opération de jaugeage donne :

$$Q = \frac{Vs'}{s}$$

On obtient la solution mère en faisant fondre dans un vase 300 grammes de sel blanc ordinaire par litre d'eau, puis on filtre rapidement cette solution avant de l'introduire dans un vase à débit constant pour son emploi, et l'on agite fortement avant de s'en servir. Pour le réactif, on le prépare en dissolvant 30 grammes d'azotate d'argent pur du commerce dans 1 litre d'eau distillée. Chaque centimètre cube de ce réactif équivaut à 0,01 de sel marin environ.

Méthode des poussières. — Cette méthode toute récente est due à M. l'ingénieur Camichel. Elle consiste à éclairer des poussières conformément au procédé de Marey. Ce dispositif a l'avantage de ne produire dans le liquide où l'on veut mesurer les vitesses aucune action perturbatrice. Le schéma de ce dispositif est représenté par la fig. 28. En A se trouve une lampe à arc; on forme l'image du cratère de celui-ci sur la fente F, au voisinage de laquelle est un disque D comprenant des sec-

teurs alternativement pleins et vides, et monté sur une transmission mue par le moteur *M*; un compteur *C* permet de déterminer la vitesse du disque. Une lentille *L* forme l'image de la fente *F* en coïncidence avec l'axe *O* de la chambre d'eau dont on veut mesurer la vitesse. On obtient ainsi un faisceau lumineux très délié qui éclaire vivement les parcelles situées dans le plan *xy*.

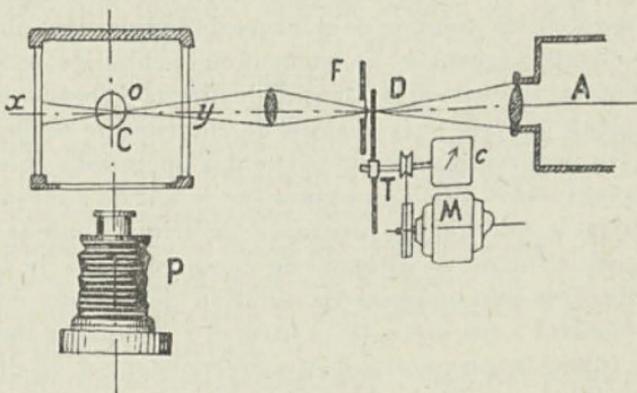


Fig. 28.

A la suite d'essais répétés, on a pu déterminer la formule de la vitesse :

$$V = K \frac{l}{\theta};$$

θ durée séparant deux éclaircissements consécutifs, l longueur séparant deux points homologues de l'image discontinue du filet liquide et K rapport entre la longueur réelle de ces deux points et la longueur déterminée sur la photographie, étant indiqué que la photographie obtenue directement est agrandie suivant les cas dans le rapport de 1 à 3 ou de 1 à 5.



CHAPITRE III

HYDROGRAPHIE. — HYDROLOGIE

Représentation graphique des débits des cours d'eau. — Influence des eaux pluviales et importance des crues. — Prévisions d'annonces des crues. — Classification des réservoirs. — Réservoirs de crues. — Réservoirs d'étiage. — Service d'études des Grandes Forces hydrauliques.

20. Représentation graphique des débits des cours d'eau.

— Pour les cours d'eau dont le lit est à peu près fixe on peut, à l'aide des relevés des hauteurs d'eau pendant un certain nombre d'années, établir la courbe des débits au moyen d'un diagramme des hauteurs d'eau tiré d'un certain nombre de jaugeages directs.

Les graphiques bien établis doivent pouvoir renseigner sur toutes les caractéristiques d'un cours d'eau, et il est très utile de connaître l'amplitude des variations que les débits peuvent subir à des dates déterminées.

En possession des graphiques se rapportant à plusieurs années, on en prend la moyenne et on peut ainsi se rendre compte des époques de disette et de leur durée, des crues ordinaires et de celles extraordinaires, et enfin de l'amplitude des variations à une même date sur plusieurs années consécutives.

La représentation graphique du régime d'un cours d'eau peut se faire de deux manières : soit par juxtaposition sur une bande de papier continue embrassant une période de plusieurs années avec une échelle des temps très réduite, soit par juxtaposition sur une bande de papier transparent avec une échelle des temps beaucoup plus forte.

La question est plus compliquée quand il s'agit de cours d'eau à fond mobile où les jaugeages doivent être faits après chaque crue et où il faut connaître les déformations du lit. La

comparaison des plans de sondage qu'on relève périodiquement sur les cours d'eau navigables permet de dégager avec plus ou moins de certitude la loi des déformations du lit.

Si l'on prend des profondeurs d'eau (h) à un poste déterminé d'observations pour

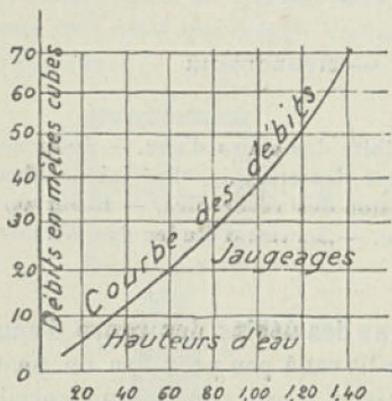


Fig. 29.

abscisses, et que l'on porte à l'extrémité de ces abscisses, pour ordonnées, les valeurs des débits déterminées au moyen de jaugeages directs, on obtient une courbe des débits de la forme : $Q = F(h)$ (fig. 29).

Une fois la courbe des débits déterminée pour une station, il devient facile de construire le graphique des débits; ceux-ci se déduisent de la

hauteur par l'application des formules ci-après ou par la mesure de l'ordonnée sur la courbe elle-même.

Dans la plupart des cas, les observations périodiques sur les cours d'eau sont traduites en hauteurs d'eau par la lecture des cotes données par les échelles hydrométriques.

Le débit d'un cours d'eau en un point donné est lié à la hauteur d'eau par une relation de la forme :

$$Q = a + bh + ch^2;$$

a , b , c , paramètres qu'on détermine par expériences.

La méthode générale employée pour cette détermination consiste à mesurer chaque jour, à la même heure, la hauteur d'eau à l'échelle d'une station de jaugeage et à en déduire le débit correspondant, après avoir effectué, pour diverses hauteurs, une série de jaugeages.

Il est indispensable que les opérations aient lieu au même point et soient rattachées au même repère; il faut aussi prendre les précautions les plus minutieuses dans l'emploi des hydromètres.

Quand on veut obtenir un débit journalier moyen aussi exact que possible, il faut, pendant les périodes de crues,

observer les échelles (limnimètres) à un moment où la hauteur est moyenne, ou installer des enregistreurs de niveau (limni-graphes) qui mesurent automatiquement et à chaque instant la hauteur de l'eau, permettant d'en déduire le débit instantané, et par suite le débit journalier. Quant aux échelles de station, elles doivent, autant que possible, être à l'abri des remous et à bonne portée de l'observation, et les lectures faites avec régularité et précision.

Pour transformer les hauteurs d'eau en une expression corrélatrice du débit, on fait usage des formules suivantes se rapportant à cinq types où H' est la hauteur de l'eau au-dessus du zéro de l'échelle hydrométrique, et H celle au-dessus du fond, au poste d'observation où on opère. Dans chacune de ces formules les constantes arbitraires se déterminent au moyen d'un nombre égal de valeurs de q (débit) évaluées par jaugeages directs.

- Formule Graeff : $q = 100 (H' + 0,25)^{\frac{3}{2}}$ (la Loire à Nantes).
 — Cuvinot : $q = 280 (H' - 0,70)^{\frac{3}{2}}$ (le Drac à Grenoble).
 — Lombardin : $q = 100 (H^{\frac{3}{2}} - 3,20)^{\frac{3}{2}}$ (l'Adda à Côme).
 — Fargue : $q = 86,52 + 120,18 H' + 41,70 H'^2$ (la Garonne à [Langon]).
 — De la Brosse : $q = 72m^3 + 202,5 h + 9,5 h^3$ (l'Isère à Grenoble).

La précision sur laquelle on peut compter par ces mesures ne comporte pas une appréciation supérieure à 5 à 10 p. 100 en basses eaux et à 15 ou 20 p. 100 en hautes eaux.

21. Influence des eaux pluviales et importance des crues. — Dans les terrains calcaires une forte proportion des eaux pluviales et des neiges pénètre par infiltration dans le sol et va grossir, après des cheminements souterrains, des sources lointaines, ce qui fait que la répartition des eaux entre les différentes parties d'un bassin ne concorde pas toujours avec l'étendue et le module de l'émissaire.

A des époques à peu près fixes de l'année les bassins, reçoivent des précipitations qu'ils ne peuvent absorber et qui se traduisent par un écoulement abondant de leurs émissaires. Dans les autres périodes, les bassins sont uniquement alimentés par la réserve qu'ils créent. Ceux qui possèdent des glaciers et des forêts emmagasinent leurs eaux durant l'hiver et les dévalent sur leurs pentes avec une grande régularité, alors que ceux qui

en sont dépourvus sont sujets à des alternatives de crues violentes et de disettes d'eau. Plus le bassin laisse échapper lentement l'eau qu'il a reçue, plus son pouvoir régulateur est grand.

On mesure l'intensité d'une pluie au moyen de la hauteur d'eau qu'occupe l'eau tombée pendant une heure sur le sol, sans trouver aucun écoulement, à l'aide des pluviomètres.

Pour déterminer les lois qui régissent la distribution des pluies suivant l'altitude et l'exposition, il faut un très grand nombre de stations pluviométriques réparties d'une façon méthodique.

En Suisse, on compte un chiffre de 0,88 pluviomètre par myriamètre carré, chiffre bien plus élevé que celui que l'on compte en France.

Les bassins moyens sont ceux dont l'écoulement par seconde est de 9 litres par kilomètre carré; les mauvais bassins, 8 litres, et les bons bassins, 10 litres.

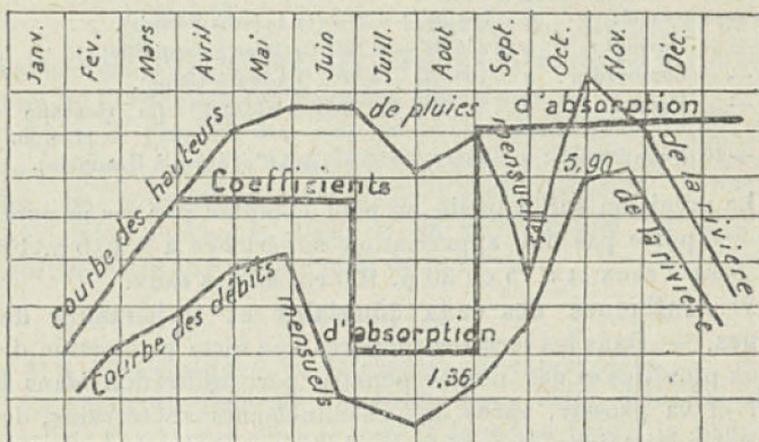


Fig. 30. — Graphique des coefficients d'absorption d'une rivière.

Dans une région à caractère éminemment torrentiel, on peut distinguer deux périodes dans l'écoulement des pluies : l'une où une partie notable de la pluie est employée à saturer le sol et à remplir le bassin de réception, l'autre qui correspond à la période des crues se produisant lorsque le bassin est à saturation. Alors toute la pluie qui tombe a un effet direct et est inscrite sur la cote à l'échelle.

Étant donné que l'on est en possession de tableaux de concordance donnant les pluies totales tombées en vingt-quatre heures aux divers pluviomètres, et les hauteurs de crues correspondantes aux diverses échelles, on en déduit le rapport entre la hauteur totale d'eau tombée dans la région que l'on étudie et la crue au point que l'on a en vue.

Ce qu'il est important de constater dans les grandes crues, c'est le débit correspondant aux pluies de quelques heures de durée.

Les services hydrométriques ont les moyens d'apprécier avec assez d'exactitude les hauteurs maxima qu'atteindra une crue donnée à un emplacement donné, un certain temps à l'avance. On peut ainsi tracer approximativement la courbe probable d'une crue dès qu'elle est annoncée.

Le volume des crues dépend de l'étendue du bassin versant à l'amont du point que l'on considère, de la répartition d'une même averse ou des pluies successives sur les divers points du bassin, de la hauteur d'eau tombée pendant chaque pluie, de la nature plus ou moins perméable du sol et de son état de saturation par suite des pluies antérieures, de la déclivité des versants et de leur degré de déboisement.

La courbe de la montée d'une crue est plus rapide que celle de la descente.

Les lois établies par Belgrand sur le régime des crues expliquent les variations de débit dues à une crue le long d'un cours d'eau et les crues maximum. Ainsi le débit de la crue va en croissant de l'amont à l'aval; la crue maximum d'un bassin imperméable pourra être produite par une pluie tombant seulement sur une partie du bassin, et au contraire dans un bassin perméable la crue maximum est causée par une pluie générale.

En France, les terrains perméables dominent; sur une superficie totale de 53 millions d'hectares, il y en a 21 millions d'imperméables contre 32 millions de perméables. Le coefficient d'écoulement est de 0,45, le ruissellement de 0,25 à 0,33, et l'infiltration ressort à 0,12 à 0,20 de la pluie tombée.

22. Prévisions d'annonces des crues. — Pour évaluer le volume d'eau s'écoulant pendant les crues, en l'absence de jaugeages et en se basant sur les observations pluviométriques, on peut se servir de la formule de Possenti.

$$Q = \frac{ca}{s} \left(m + \frac{p}{3} \right);$$

m la partie montagneuse de la surface du bassin versant, en kilomètres carrés; p la partie en plaine de la même surface, a la hauteur, en mètres, de la plus grande pluie tombée en vingt-quatre heures sur la région considérée; s la longueur du cours d'eau depuis son origine et c un coefficient qui augmente avec la nature torrentielle du fleuve et croît quand s diminue; c varie entre 600 et 1000.

Les formules employées pour la représentation de la marche des crues sont des fonctions linéaires des montées, auxquelles on ajoute un terme qui dépend de la saison ou de la montée au pluviomètre d'aval. Elles sont de la forme :

$$\delta_A = b\delta_B + C\delta_C + K;$$

δ_A est la montée aux stations d'aval, et δ_B , et δ_C celles aux stations d'amont. Dans la méthode des cotes, on calcule la hauteur hydrométrique d'un point à l'aval d'après les hauteurs d'eau enregistrées aux hydromètres établis à l'amont sur le cours d'eau principal et ses affluents. Pour représenter la relation entre la cote de départ et les cotes de deux points d'amont, on porte en abscisse la cote hydrométrique de l'un des points d'amont B et en ordonnée la cote hydrométrique de la station A. Ce point ainsi obtenu, on inscrit la valeur h_C de la cote au troisième hydromètre C et on trace les courbes pour lesquelles h_C est constant.

Le type des formules employées le plus souvent est :

$$h_A = bh_B + ch_C \dots + K.$$

M. Mazoyer, pour les cours d'eau ne recevant qu'un seul affluent, indique la formule :

$$h = f(h_1 h_2);$$

h hauteur de la crue, h_1 et h_2 hauteurs observées aux stations du cours d'eau et de son affluent. On construit, en prenant h_1 pour abscisse et h_2 pour ordonnée, les courbes de niveau de la surface définie par l'équation ci-dessus et l'on a une épure sur laquelle on peut immédiatement lire la valeur de h .

M. Sainjoin indique la formule :

$$Q = m\sqrt{h^3};$$

Q débit par seconde, m coefficient constant, h hauteur d'eau au-dessus du fond moyen du fleuve. Pour l'échelle établie à Orléans sur la Loire l'application de cette formule a donné :

$$Q = 326 \sqrt{(C + 0,29)^3};$$

C la cote de hauteur lue à l'échelle indiquée pour chaque poste d'observation. Mais cette formule n'est appliquée que pour de grandes hauteurs, c'est-à-dire au-dessus de 2 mètres.

Le meilleur moyen d'obtenir la vitesse de propagation d'une crue d'une station à l'autre consiste à superposer les courbes correspondant à ces stations, en allant tantôt de l'amont vers l'aval, tantôt de l'aval vers l'amont; lorsque la coïncidence est aussi complète que possible, la différence des abscisses donne, en temps, la marche de la crue.

On peut trouver une relation simple soit entre les hauteurs lues aux échelles de deux stations consécutives, soit entre les montées mesurées aux mêmes échelles, si on se trouve dans une région où on ne rencontre aucun affluent de quelque importance, et où aucun changement notable de régime ne fait sentir son influence.

Les procédés graphiques sont d'une grande utilité pour arriver à déterminer ces relations. On peut prendre par exemple pour abscisses les maxima de la station d'amont et pour ordonnées les maxima correspondant à la station d'aval.

Lorsqu'il s'agit d'un cours d'eau recevant d'importants affluents, l'étude devient plus difficile.

En France, pour l'annonce des crues prescrite pour un certain nombre de rivières, les graphiques des hauteurs d'eau et les tableaux de tenue des eaux sont élaborés dans les bureaux des ingénieurs des ponts et chaussées, tableaux que l'on transforme en graphiques des débits.

23. Classification des réservoirs de retenue d'eau. — Les réservoirs servant à l'accumulation des eaux au point de vue des forces hydrauliques peuvent se diviser en trois grandes classes: les réservoirs de crues, les réservoirs régulateurs ou d'étiage et les réservoirs industriels.

Les réservoirs de crues servent à emmagasiner temporairement ce que les débits naturels des cours d'eau ont d'excédent et de domageable; les réservoirs régulateurs ont pour

effet d'accumuler pendant certaines crues plus ou moins prolongées des réserves d'eau, à l'effet de régulariser le régime du cours d'eau pendant les périodes d'étiage où les débits ont besoin d'être plus élevés pour satisfaire à des besoins divers, industrie, navigation, etc.; les réservoirs industriels, généralement placés soit sur le cours d'eau, soit en dérivation, sont affectés le plus souvent au service d'une seule usine hydraulique et à la moindre distance en amont de celle-ci. Leur fonction est soit d'augmenter la hauteur de chute disponible, soit de régulariser celle-ci dans d'assez courtes périodes, soit enfin de permettre de suivre, avec la plus grande économie d'eau, les variations de débit de l'usine de force, entre le jour et la nuit par exemple.

24. Réservoirs de crues. — Un tel ouvrage doit normalement rester vide, et quand il est rempli par une crue on doit avoir pour objectif de le vider de nouveau dans un assez court délai. Avec ces réservoirs, des submersions accidentelles, de quelques jours de durée, restent compatibles avec la mise en culture des terrains, et dans quelques cas même profitables.

Les réservoirs dits automatiques se composent essentiellement d'un barrage d'une certaine hauteur, dans la partie basse duquel on ménage une ouverture ou pertuis, toujours libre, permettant de laisser passer naturellement, ou sous une charge d'eau très faible tout au moins, le débit de la rivière quand celle-ci n'est pas en crue. Ce pertuis, bien entendu, peut être établi en tunnel à côté du barrage, et l'ensemble est complété par un déversoir de superficie placé au niveau supérieur du barrage, moins une certaine revanche. Les réservoirs manœuvrés permettent d'arriver à un résultat plus satisfaisant, si les dispositions sont prises de façon à ne causer aucun inconvénient à l'aval, à savoir d'obtenir l'embouteillage de l'eau emmagasinée.

Cependant le système d'embouteillage n'est complètement satisfaisant que si l'on a une série de réservoirs échelonnés sur le cours d'eau principal. Quoi qu'il en soit, il faut évidemment un réservoir de superficie capable d'évacuer au besoin le débit maximum, lequel peut faire partie du système de régularisation en lui donnant une certaine hauteur et en le munissant de vannes.

À la base de l'étude de pareils ouvrages il faut avoir en possession les éléments suivants : les courbes de jaugeage des

cours d'eau aux emplacements des réservoirs projetés, les formes types des crues anciennes dans leur état naturel au droit même des emplacements, la comparaison de leurs volumes aux quantités de pluies tombées dans les bassins versants supérieurs, de manière à obtenir des coefficients d'écoulement moyens, ou à établir dans diverses circonstances une échelle rationnelle de ces coefficients d'écoulement : prévisions (d'après l'état des stations hydrométriques ou pluviométriques d'amont) pour les débits maxima des crues à l'emplacement des réservoirs, et si possible des prévisions journalières; enfin estimation des débits qu'on peut considérer comme inoffensifs pour l'aval au moment où l'on doit faire des restitutions d'eau, en déterminant autant que possible les époques où ces restitutions peuvent être effectuées sans danger.

25. **Réservoirs d'étiage.** — Pour l'établissement de ces ouvrages, indépendamment de l'étude topographique locale, il faut connaître d'une façon précise : le débit d'étiage minimum et moyen dans l'état naturel du cours d'eau, le débit moyen des basses eaux, celui sur lequel peuvent compter les industriels d'aval et qu'il faut respecter, le débit moyen des hautes eaux, ou mieux encore le débit dont on peut disposer, mois par mois par exemple, pendant cette période des hautes eaux, en sus du débit moyen réservé de la période des basses eaux. Le volume total de l'eau dont on peut disposer ainsi est évidemment une seconde limite supérieure à assigner à la capacité du réservoir.

Une fois cette capacité arrêtée, on peut déterminer la ligne du débit d'étiage amélioré que l'on peut entretenir avec la réserve en comblant les vides laissés sur les graphiques annuels entre la ligne horizontale représentant le débit d'étiage amélioré et les débits d'étiage naturels. Plus ce débit amélioré se rapprochera du débit moyen des basses eaux, plus la situation sera satisfaisante. Comme ouvrages régulateurs indispensables, on recourra à un déversoir capable d'écouler le débit maximum des grandes crues, qui peuvent survenir pendant la période où le réservoir est plein, et un ouvrage de prise d'eau suffisant pour écouler, dans la situation la plus favorable du plan d'eau, le débit d'étiage amélioré et le débit moyen réservé de la période des basses eaux.

Au point de vue de la sécurité, le mieux est de prévoir des engins de réglage des débits sur les déversoirs aussi, en prévoyance des débits de crues, et cela à l'effet de limiter dans des conditions acceptables la hauteur de la lame déversante.

Quand on a en vue la mise en valeur des ressources hydrauliques de régions étendues, on peut concevoir la création de réservoirs, les plus grands possible, avec déversoirs manœuvrés et réglementés pour assurer leur fonctionnement. D'ailleurs ces réservoirs pourraient servir à la régularisation des crues dans un domaine fort étendu.

L'utilisation d'une chute d'eau serait évidemment complète si la puissance absorbée était constamment égale à la puissance maximum journalière qu'elle peut produire, autrement dit si, pour la puissance constante de ladite chute, on avait une puissance également constante. Mais il n'en est pas ainsi, et la majeure partie du temps on a une fraction seule de la puissance absorbée.

La capacité du réservoir doit être suffisante pour permettre une réserve de l'eau au moment où la charge est très faible, et son utilisation lorsqu'elle est très forte. Elle peut être absorbée de jour et emmagasinée de nuit. On doit toujours prévoir l'installation d'un bassin de secours quand sa construction n'est pas trop dispendieuse.

Il est recommandable de placer le réservoir à l'extrémité du canal d'amenée, afin de construire ce canal pour la puissance moyenne et non pour la puissance maximum. Les dimensions du réservoir dépendent, à hauteur de chute égale, du diagramme de consommation de l'usine. Les réservoirs ont les dimensions plus petites dans les endroits où les périodes d'accumulation d'emploi (charge et décharge) se succèdent rapidement, où les maxima et minima alternent fréquemment, comme dans le cas où une grande quantité d'énergie doit être produite pendant un temps relativement long, et qu'ensuite on a des périodes de fourniture d'énergie plus faible (par exemple pour une utilisation de dix heures sur vingt-quatre heures).

Lorsqu'on veut assurer à un cours d'eau un régime constant, connaissant la courbe annuelle du débit de la rivière, la capacité à donner au réservoir pour régulariser ce débit peut s'obtenir à l'aide de calculs et de graphiques fort simples.

Lorsqu'on connaît pour chaque mois le débit moyen par seconde et par kilomètre carré ainsi que le débit total moyen correspondant au bassin versant de chaque usine que l'on veut créer dans la région, le choix de celles-ci étant déterminé par une étude préalable, en multipliant ces résultats par la hauteur nette de la chute de l'usine correspondante, on obtient la puissance moyenne pour chaque mois que chacune des deux usines intermédiaire et inférieure (dans le cas de trois usines en échelon sur le même cours d'eau) est susceptible de fournir de façon continue pendant vingt-quatre heures, et cette puissance est dénommée puissance moyenne continue. Telle est la méthode que MM. Edoux et Causse ont employée pour la création d'usines dans la vallée d'Aure.

Ainsi on construit une courbe (fig. 31) ayant mois par mois pour ordonnée la somme des puissances moyennes de ces deux usines et, une

fois en possession de cette courbe, on cherche quelle ordonnée il convient de donner à l'horizontale figurative de la puissance annuelle régularisée, pour que les vides restant entre elle et la courbe définie ci-dessus puissent être comblés, mois par mois, par la puissance fournie par le débit de l'appareil régulateur (lac ou réservoir) tombant d'une hauteur représentant la somme des hauteurs de chute nettes des trois usines considérées (pour le cas qui nous occupe).

M. Coutagne, examinant le cas d'une régularisation incomplète, qui est le cas général, constate que le volume d'eau réceptrice au moyen d'un réservoir est supérieur au volume de ce réservoir, pour les rivières à régime pluvial. L'écart diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de la régularisation complète.

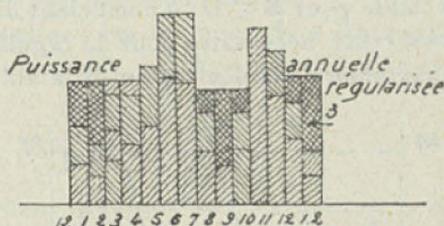


Fig. 31. — Les hachures se dirigeant vers la gauche indiquent la puissance due au débit naturel du cours d'eau dans l'usine supérieure. Les hachures se dirigeant vers la droite indiquent la puissance due au débit naturel du cours d'eau de l'usine inférieure. Les hachures croisées indiquent la puissance due au débit de l'appareil régulateur dans les trois usines.

Si x désigne le volume du réservoir et y le volume d'eau dont il assure la récupération (ces deux volumes étant exprimés en fractions du volume déficitaire ou du volume du réservoir nécessaire pour obtenir la régularisation complète), on a :

$$x = 2y,$$

alors que pour les rivières alpestres on a ordinairement : $x = y$.

Comme on a : $x = \frac{B}{D(X)}$ et $y = \frac{bB}{D(X)}$, on en déduit : $b = \sqrt{\frac{D}{B}}$ valable pour $B < D$; b coefficient de remplissage, D volume du réservoir nécessaire pour la régularisation complète, X débit maximum de la dérivation, B le volume du bassin de régularisation dont on dispose. Soit

V le volume récupéré annuellement, en moyenne, grâce à ce bassin, sur l'excédent d'eau correspondant aux débits supérieurs aux débits dérivés. On fait en outre $(b = \frac{V}{B})$, qui, devient ce qu'on appelle le coefficient déficitaire, et un débit récupérable qui sont fonction de X et qu'on peut désigner respectivement par : $\gamma(X)$; $D(X)$ et $R(X)$.

Entre deux rivières à régime glaciaire et à régime pluvial, ayant mêmes paramètres caractéristiques : Q , m et n , il y a une différence sensible qui provient de ce que pour l'une les

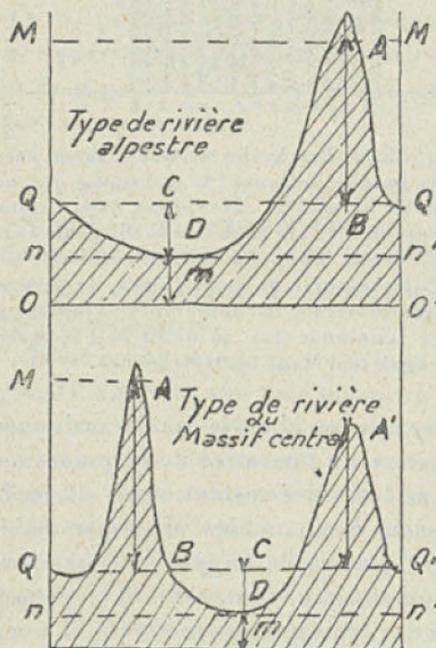


Fig. 32.

faibles et forts débits sont groupés, tandis que pour la seconde le débit oscille beaucoup plus de part et d'autre du débit moyen.

Ici Q représente le débit moyen ou module, m le débit minimum, et n le degré d'irrégularité.

Les deux types de la fig. 32 montrent les éléments caractéristiques du régime hydraulique :

$$a) \text{ débit moyen ou module : } Q = OQ = \frac{\text{aire hachurée}}{OO'};$$

$$b) \text{ débit minimum : } m = 0^m;$$

$$c) \text{ degré d'irrégularité : } n = \frac{AB}{CD} = \frac{M - Q}{Q - m};$$

$$d) \text{ indice de variabilité : } i = \text{fréquence de la sinusoïde.}$$

Pour i , on peut prendre : $i = 2$ (régime semi-pluvial, 2 étia-ges); $i = 1$ (régime glaciaire, sensiblement 1 étia-ge).

On peut généralement exprimer les surfaces S et les volumes V en fonction de la hauteur h du barrage par les expressions ci-après :

$$S = Ah + Bh^2; \quad V = \frac{Ah^2}{2} + \frac{Bh^3}{3};$$

les coefficients A et B étant fonction des caractéristiques suivantes du thalweg du cours d'eau savoir : a largeur moyenne du lit, i pente moyenne du cours d'eau et p pente moyenne des berges suivant les relations :

$$A = \frac{a}{i} \quad \text{et} \quad B = \frac{1}{pi}.$$

Le cube des maçonneries dans le cas des barrages à densité, soit M , est une fonction de h , qu'on peut mettre sous la forme :

$$M = A'h + B'h^2 + C'h^3;$$

les coefficients A' , B' et C' pouvant être calculés d'après les caractéristiques du profil de la rivière au droit du barrage.

L'économie d'un barrage de régularisation dépend des facteurs suivants : volume des réservoirs, nombre de remplissages, superficie des terrains noyés, cube de maçonnerie du barrage et nombre de mètres des chutes régularisées, ou altitude du réservoir.

Par suite, la valeur d'un réservoir peut être chiffrée par la relation :

$$U = \frac{B \times b \times H \times 0,002}{M};$$

B volume du réservoir, b coefficient de remplissage, H hauteur totale des chutes situées en aval du barrage, M cube de maçonnerie du barrage, 0,002 le nombre de kilowatt-heures

(avec rendement de 75 p. 100) correspondant à 1 mètre cube d'eau et 1 mètre de chute, qui donne le nombre de kilowatt-heures supplémentaires produits par le barrage sur les chutes d'aval par mètre cube de maçonnerie.

De même le prix du mètre cube d'eau retenue peut être calculé en fonction de h par une formule de la forme :

$$p = \frac{(Ah + Bh^2)\sigma + (A'h + B'h^2 + C'h^3)\gamma}{\left(\frac{Ah^2}{2} + \frac{Bh^2}{3}\right)b};$$

σ prix du mètre carré de terrain noyé, et γ le prix du barrage par mètre cube de maçonnerie.

Exemple. — Une chute de 250 mètres a son barrage situé à 3 kilomètres en aval. Le bassin versant est de 800 kilomètres carrés. On connaît seulement le module pluviométrique du bassin, soit $H = 1400$ millimètres, et l'on admet : $n = 2,5$;

$$i = 2; m = \frac{Q}{10}.$$

L'écoulement est donné par la formule :

$$H' = 0,50 H^2;$$

soit $H' = 980$ mm. ou 31,7 litres sec. par km².

On a donc : $Q = 23,36$ mètres cubes seconde pour 800 kilomètres carrés.

$$\text{On prend } Q = 25 \text{ et } m = \frac{25}{10} = 2,5.$$

Les abaques des courbes de régime et des débits industriels pour : $X = 20^{\text{m}^3}$ et $X = 25^{\text{m}^3}$ dérivés, soit : $X' = \frac{X - m}{Q - m} = 0,78$

et $X' = \frac{X - m}{Q - m} = 1$, permettent de déterminer les deux régimes correspondants :

	Débit dérivé $X = 20$		Débit dérivé $X = 25$	
Débit minimum	2,5	} 14,2	2,5	} 16,4
Débit inconstant	$22,5 \times 0,52 = 11,7$		$22,5 \times 0,62 = 13,9$	
Débit récupérable	$22,5 \times 0,26 = 5,8$		$22,5 \times 0,38 = 8,6$	
Débit non récupérable	$22,5 \times 0,22 = 5,0$		25,0	
	25,0			
Débit moyen industriel	14,2		16,4	
Coefficient d'utilisation	$\frac{14,2}{20} = 0,71$		$\frac{16,4}{25} = 0,65$	
Nombre de jours à débit $\geq X$	165 jours.		143 jours.	

Volume du réservoir nécessaire pour la régularisation complète :

$$X = 20^{m^3} : D = 5,8 \times 31\,536\,000 = 183\,000\,000^{m^3},$$

$$X = 25^{m^3} : D = 8,6 \times 31\,636\,000 = 271\,000\,000^{m^3}.$$

Effet utile d'un réservoir de 80 millions de mètres cubes :

$$r = \frac{80\,000\,000}{22,5 \times 31\,536\,000} = 0,11.$$

L'abaque des débits déficitaires donne pour $r = 0,11$ et $n = 2,5$:

$$X' = \frac{X - m}{Q - m} = 0,47; \quad \text{d'où : } X = 2,5 + 10,6 = 13,1.$$

Un tel réservoir permettrait de régulariser le débit à 13,1 mètres cubes.

Appliquant la formule : $b = \sqrt{\frac{D}{B}}$, on trouve comme coefficient de remplissage :

$$X = 20^{m^3} : b = \sqrt{\frac{183}{80}} = 1,50; \quad \text{débit supplémentaire} = 3,8.$$

$$X = 25^{m^3} : b = \sqrt{\frac{271}{80}} = 1,84; \quad \text{débit supplémentaire} = 4,7.$$

Le régime sera donc après régularisation :

Pour débit dérivé de 20^{m^3} :

Débit constant	13,1	}	18,0
Débit inconstant.....	14,2 + 4,7 - 13,1 = 4,9		
Débit perdu	7,0		
	25,0		

Coefficient d'utilisation : $\frac{18}{20} = 0,90.$

Pour le débit de 25^{m^3} :

Débit constant.....	13,1	}	21,1
Débit inconstant.....	16,4 + 4,7 - 13,1 = 8,0		
Débit perdu	3,9		
	25,0		

Coefficient d'utilisation : $\frac{21,1}{25} = 0,84.$

L'aménagement à 25^{m^3} : s donne par rapport à celui de 20^{m^3} :

s un supplément de $3,1^{m^3}$: s soit pour 240 mètres de chute : 7 500 chevaux-an de plus.

On peut de même étudier la régularisation pour un débit donné, soit 25^{m^3} : s , en fonction de la hauteur du barrage de retenue.

L'emplacement choisi est caractérisé par les données suivantes :

$$B = 14\,700 h^2 + 268 h^3; \quad s = 29\,440 h + 804 h^2 \quad \text{et}$$

$$M = 70 h + 14 h^2 + 0,425 h^3.$$

Le tableau suivant résume l'effet utile d'un réservoir de régularisation suivant la hauteur adoptée pour le barrage.

HAUTEUR DU BARRAGE h MÈTRES	VOLUME DU RÉSERVOIR EN MILLIONS DE MÈTRES CUBES B	SUPERFICIE DES TERRAINS NOYÉS EN HECTARES S	VOLUME DE MAÇONNERIE EN M ³ M	$\frac{B \times 10^6}{M}$	NOMBRE DE REMPLISSAGES	DÉBIT CONSTANT	DÉBIT SUPPL ^{ts} TOTAL	Kwh EN MILLIONS SUPPLÉMENTAIRES	COUT DE LA RÉGULARISATION	COUT DE LA RÉGULARISATION PAR Kwh
10	1,738	37,44	2,525	688	12,6		0,7	10,5	625 700	0,06
30	20,466	160,55	26,175	782	3,6	7,7	2,3	34,5	4 223 100	0,12
60	110,808	465,84	146,400	757	1,5	16,0	5,3	79,5	19 298 400	0,24
80	231,296	741,76	312,800	739	1,1	23,4	8,0	120,0	38 697 600	0,32
90	314,442	2 185,84	429,525	732	0,86	25,0	8,6	129,0	51 110 900	0,40
100	415,000	1 098,00	572,000	725	0,65	25,0	8,6	129,0	68 180 200	0,53

On a admis σ le prix de l'hectare de terrain noyé = 10 000 fr. et $\gamma = 100$ fr., prix du barrage par mètre cube de maçonnerie.

26. Service d'études des Grandes Forces hydrauliques. — La France, à l'instar de la Suisse, possède un Service d'études des Grandes Forces hydrauliques puissamment organisé. Il a dans ses attributions toutes les questions se rattachant au développement des forces tirées de nos cours d'eau, tant du domaine public que du domaine privé. Il a rendu de très grands services à notre pays et il est appelé à être un des organes les plus vitaux de notre industrie nationale, tant au point de vue technique qu'au point de vue d'économie sociale.

La France est divisée, sous le rapport des forces hydrauliques, en trois grandes régions :

a) Région du Sud-Est comprenant : le bassin de l'Isère, affluents du Rhône entre le Fier et l'Isère; les bassins des

Dranses, de l'Arve, des Usses, du Fier, affluents du Rhône entre l'Isère et l'Eygues (ce dernier non compris); le bassin du Var et fleuves côtiers du département des Alpes-Maritimes; le

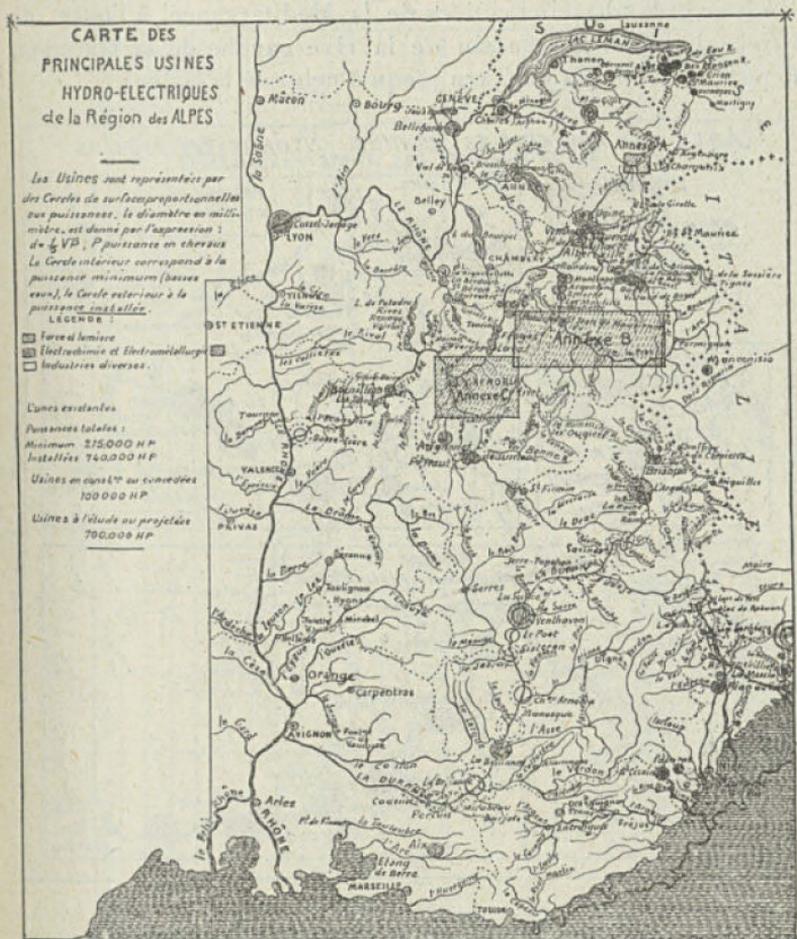


Fig. 33. — Carte des principales usines hydroélectriques de la région des Alpes.

bassin de la Durance, affluents du Rhône au sud de l'Eygues, les fleuves côtiers du département des Bouches-du-Rhône et du Var. L'ingénieur en chef de ce district réside à Toulouse.

b) Région du Sud-Ouest, comprenant : le bassin de la Garonne jusqu'au Tarn inclus, sauf la partie de la Garonne

située sur le territoire du département de la Haute-Garonne et les parties domaniales de l'Ariège et du Salat placées dans les attributions de l'ingénieur en chef à Toulouse; le bassin de l'Adour et les bassins côtiers de la Méditerranée, à l'ouest de l'Hérault inclus; le bassin de la rive gauche de la Garonne, depuis le confluent du Tarn jusqu'à celui de la Baise.

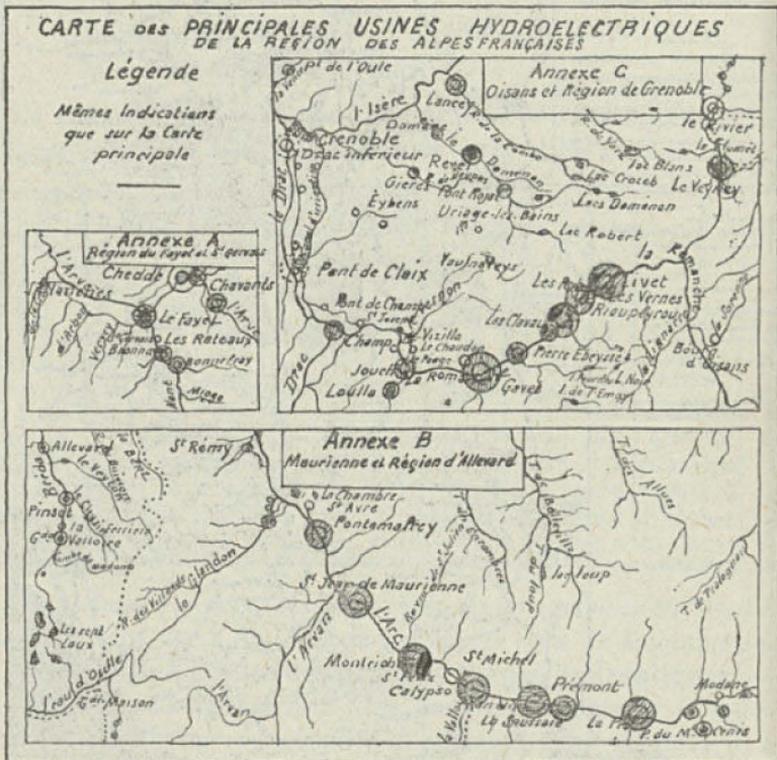


Fig. 34. — Carte annexe de la figure 33.

c) Région du Centre, comprenant : le bassin de la rive droite de la Garonne, en aval de la Baise; les bassins de la Charente, de la Vienne, de l'Indre, du Cher, de l'Allier et de la Loire, en amont du confluent de l'Allier. L'ingénieur en chef de ce district a sa résidence à Périgueux.

Une quatrième région, dite de l'Est, comprendra le bassin de la Saône, en amont du confluent du Doubs, et les bassins du Rhin, de la Moselle et de la Meuse.

rologiques, les Services d'annonces des crues, les Services géologique, géographique de l'armée, les Services du nivelle-

5

LA NIVE
STATION de CAMBO
Graphiques des hauteurs et des débits
Année 1909

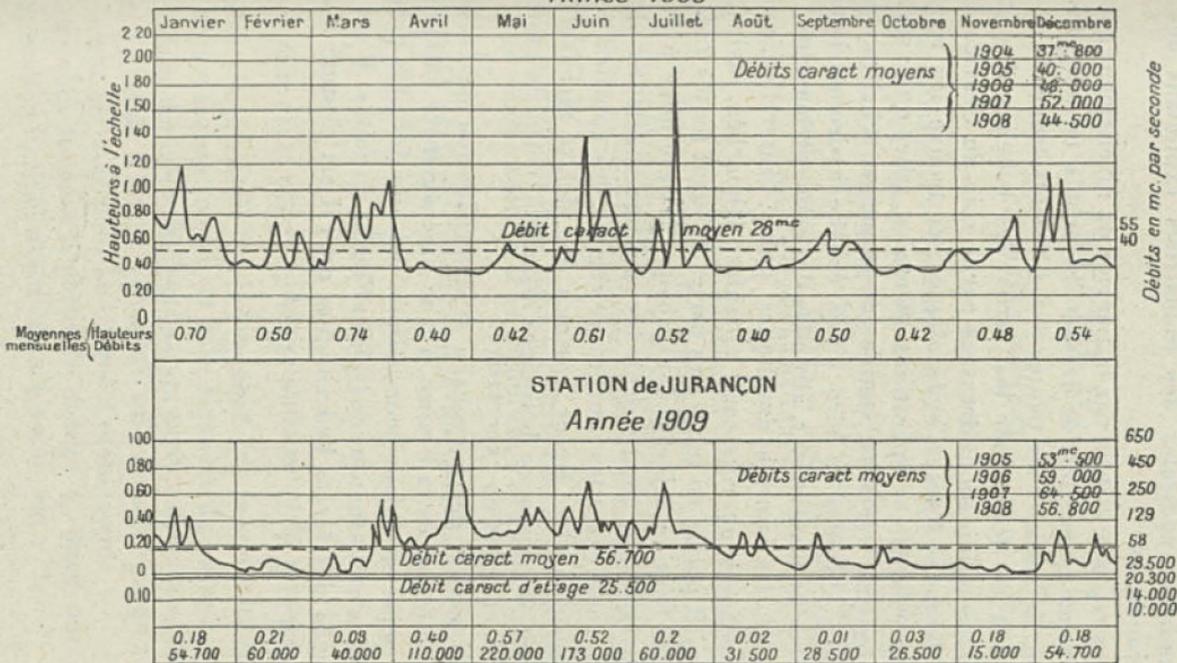


Fig. 35. — Types de graphiques de hauteurs et débits d'eau de rivières torrentielles.

Le Service d'études des Grandes Forces hydrauliques est en rapport constant avec les Commissions départementales météo-

ment général de la France, des Mines, des Forêts, des Glaciers, d'Irrigation et de Navigation, ainsi qu'avec les Syndicats ou Chambres syndicales des industriels exploitant des usines hydrauliques.

Les repères établis par le Service du nivellement général de la France permettent de dresser les profils en long des cours d'eau, de calculer les pentes des différents tronçons des cours d'eau et de déterminer les zéros des échelles des stations. Dans les publications dressées par le soin du Service d'études des Grandes Forces hydrauliques on trouve les renseignements relatifs aux opérations effectuées, telles que : superficies des bassins versants, stations de jaugeage, échelles hydrométriques, altitudes du zéro d'une échelle hydrométrique type, repères de nivellement, altitudes des semi-permanents, emplacements des usines hydrauliques, ponts, passerelles, confluent des rivières ou ruisseaux notables, débouchés, ravins, prises d'eau. Il publie en outre des cartes donnant toutes indications sur les bassins relevés ; dans chaque rivière mise à jour, une étude complète vient fournir les renseignements les plus précieux concernant les courbes de régime, les courbes de débit, l'évaluation des divers régimes des débits mensuels et de l'année, la puissance des usines installées, celles en cours d'exécution et celles en expectative.

Ce service, destiné ainsi à la détermination des ressources hydrauliques de la France, à leur aménagement rationnel et à leur mise en valeur économique, est une des plus grandes et des plus utiles institutions que la France ait faites ; il est la sauvegarde des forces hydrauliques dont il est destiné à assurer l'avenir.

CHAPITRE IV

CONDUITES FORCÉES

Formules usuelles pour la détermination du diamètre des conduites.

— Diamètres en tenant compte de leur valeur économique. — Nature des conduites forcées. — Résistance des conduites forcées métalliques. — Coups de bélier. — Dispositifs de protection contre les coups de bélier. — Tracés et pose des conduites forcées. — Calculs. — Applications numériques.

27. *Formules usuelles pour la détermination du diamètre des conduites.* — Dans l'étude du mouvement de l'eau dans un tuyau, on ne considère que la vitesse moyenne, qui se produit à une distance du centre du tuyau entre 0,66 et 0,71 du rayon de ce dernier.

Si on a une conduite à section constante, le débit étant le même pour chaque section, il en résulte que la vitesse moyenne est constante.

La formule pratique fondamentale du mouvement de l'eau dans un tuyau est :

$$\frac{1}{4}DJ = F(U),$$

où : J représente la perte de charge unitaire ou le rapport $\frac{h}{l}$ de la perte de charge totale h à la longueur l de la conduite considérée, U la vitesse moyenne et D le diamètre du tuyau.

Dans les conduites métalliques pour chutes d'eau ne travaillant pas à plus de 4 kilogr. par mm^2 , on peut aller jusqu'à 3 ou 4 mètres par seconde pour la vitesse d'écoulement.

L'expression donnant la perte de charge h , dans une conduite de section Ω , l'eau ayant une vitesse w , est :

$$h = \varphi \frac{\gamma l w^2}{\Omega 2g}.$$

Si dans cette formule on remplace χ par πd et Ω par $\frac{\pi d^2}{4}$ et si on pose $\Delta r = 4\varphi$, on obtient :

$$h' = \Delta r \frac{lv^2}{d2g}.$$

On prend généralement $\Delta r = 0,025$, valeur moyenne.

Formules de Darcy. — Ce grand ingénieur a posé la formule monôme :

$$\frac{1}{4}DJ = b_1U^2.$$

qui montre que la résistance au débit est proportionnelle au carré de la vitesse.

Dans cette formule, r étant le rayon du tuyau :

$$b_1 = a + \frac{B}{r}.$$

Pour les tuyaux neufs : $a = 0,000507$ et $B = 0,00000647$.

Par suite : $\frac{1}{4}DJ = \left(0,000507 + \frac{0,00001294}{D}\right)U^2$.

$$\text{ou : } J = \left[\frac{3,2423}{D^5} \left(0,000507 + \frac{0,00001294}{D}\right)\right]Q^2 \quad (1)$$

Q , volume d'eau écoulé par seconde, qui est égal au produit de la section Ω du tuyau par la vitesse.

Si on remplace par a la valeur entre double parenthèse, on obtient :

$$J = aQ^2.$$

Les valeurs de a pour les tuyaux en service sont à doubler, et les formulaires renseignent sur ces valeurs.

La formule de Darcy peut se mettre sous la forme :

$$D = \frac{(0,0025 \times LQ^2)^{\frac{1}{5}}}{J};$$

D diamètre intérieur, en mètres ; Q volume en mètres cubes à la seconde et J perte de charge aussi en mètres, ainsi que la longueur L de la conduite.

Formule de Flamant. — Les formules de Darcy ne conviennent généralement pas pour des conduites forcées de grands

diamètres, car elles ont été basées sur des expériences faites sur conduites à faible pression (conduites d'eau pour l'alimentation des villes). La formule Flamant peut s'employer pour des pressions fortes et pour des tuyaux jusqu'à 1^m.30 de diamètre. Elle a pour expression :

$$1/4 DJ = 0,00023 \sqrt{\frac{U^7}{D}} \quad \text{ou} \quad DJ = 0,00092 \sqrt[4]{\frac{U^7}{D}}$$

$$\text{ou :} \quad J = 0,00092 \left(\frac{4}{n}\right)^{\frac{3}{4}} Q^{\frac{1}{4}} D^{-\frac{19}{4}},$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$J = \gamma Q^{\frac{1}{4}}.$$

Auquel cas les tables dressées par Flamant donnent les valeurs de γ en fonction de D et de $\frac{\gamma}{J}$ en fonction de Q .

Formules Lévy. — Ces formules sont celles qui conviennent le mieux pour le calcul des conduites forcées supportant de hautes pressions.

L'expression qui relie les éléments de la section du tuyau à la vitesse du fluide se présente sous les formes suivantes pour la tôle d'acier et pour les conduites en service courant :

$$1^{\circ} \left(\frac{U^2}{20,5}\right) = RJ(1 + 3\sqrt{R}), \quad \text{d'où : } U = 20,5\sqrt{RJ(1 + 3\sqrt{R})}$$

$$\text{ou :} \quad J = \frac{U^2}{20,5 R(1 + 3\sqrt{R})},$$

R rayon intérieur de la conduite et J perte de charge par mètre.

Pour les conduites en béton, le coefficient numérique qui précède le radical doit être compris entre 25 et 30.

$$\text{Si on pose : } \mu = 20,5\sqrt{R(1 + 3\sqrt{R})},$$

$$\text{on obtient : } \mu = \frac{U}{\sqrt{J}}.$$

$$\text{Et de même si on pose : } \beta = \frac{Q}{\sqrt{J}}.$$

Les tables dressées par Lévy donnent directement les valeurs de μ et de β .

$$2^{\circ} \quad D = 0,324 \left(\frac{Q}{\sqrt{J}} \right)^{\frac{3}{8}};$$

D diamètre en millimètres, Q débit en mètres cubes à la seconde, J perte de charge en millimètres par mètre courant. Cette formule s'applique aux tuyaux incrustés ou en service.

Elle se présente aussi sous la forme :

$$\frac{1}{4} DJ = \frac{U^2}{840,5 \left(1 + 3\sqrt{\frac{D}{2}} \right)}.$$

Formules diverses. — 1^o Formule Bresse :

$$D = 0,32 \sqrt[4]{\frac{Q^2}{J}} + 0,005;$$

2^o Formule H. Vallot :

$$D = 0,324 Q^{\frac{3}{8}} J^{\frac{3}{16}}.$$

3^o Formule Mognié :

$$J = \frac{K_1 U^2}{D^{4,25}} = \frac{K_2 Q^2}{D^{4,25}};$$

$$K_1 = \frac{1}{500} \text{ pour tuyaux en service.}$$

M. Dariès a construit des abaques suivant le procédé bien connu de d'Ocagne et en partant des formules Lévy et Flamant¹.

28. **Diamètres des conduites en tenant compte de leur valeur économique.** — Il est de la plus haute importance d'étudier de très près le diamètre à donner aux conduites forcées, car elles sont un facteur important de l'aménagement d'une chute d'eau.

Si L est la longueur de la conduite, H la hauteur de la chute, le poids total p est donné par la formule :

$$p = 1,3 HD^2L.$$

On devra par suite discuter la valeur à donner au diamètre en tenant compte du facteur d'exploitation de l'usine à établir, et à cet égard on peut considérer que la conduite forcée la plus économique est celle pour laquelle la valeur de l'énergie perdue

1. Voir *Technique de la Houille blanche*, déjà citée, pour renseignements et études plus complètes.

annuellement par les frottements de l'eau dans la conduite est égale aux deux cinquièmes du coût annuel de l'intérêt et de l'amortissement.

La formule ci-avant ne tient pas compte du fait si la conduite est établie d'après les lois caractérisant la section aval ou amont, ou, ce qui est le cas général, la combinaison de ces deux sections. Suivant le cas, l'on trouve pour p des valeurs qui diffèrent très sensiblement de la valeur obtenue par la formule précitée. Ceci est d'ailleurs évident, car, toutes choses égales, le poids d'un tronçon établi d'après les lois de la section amont (épaisseur de paroi constante) peut aller jusqu'au double du poids du même tronçon, mais établi pour la section aval, donc avec épaisseurs de parois variables. Il apparaît donc nécessaire, pour déterminer le poids d'une conduite, de connaître le tracé de l'axe. Par contre, si celui-ci est connu, il est toujours possible de calculer le poids, soit exactement en séparant les deux sections, soit globalement en considérant toute la conduite établie d'après la loi de la section aval, mais en substituant la charge statique séparant les deux sections caractéristiques par une valeur fictive, dont l'évaluation dépend de la configuration du tracé de la conduite.

En se basant sur ces considérations, M. l'ingénieur P.-E. Papadapoulo, qui s'est posé la condition pratique de n'utiliser que des tuyaux de fabrication courante, a abouti à un nouveau procédé de calcul des éléments de conduites forcées, le problème modifié de la sorte consistant dans la recherche des charges statiques séparant deux diamètres courants consécutifs.

Il divise à cet effet la conduite en deux sections : la section aval, pour laquelle l'épaisseur des parois en un point quelconque de la conduite est une fonction du diamètre D et de la charge statique h en ce point; la section amont, où l'épaisseur des parois, ayant atteint la valeur minimum admissible pour permettre la construction et le montage et pour parer aux dangers de corrosion, est maintenue constante jusqu'à son extrémité.

Le poids P de la section aval de la conduite s'exprime par la formule :

$$P = \frac{\pi^2 p \lambda}{2K\varphi} \int_n^A D^2 h dl \text{ (en tonnes);} \quad (1)$$

α coefficient exprimant le rapport du poids réel de la conduite toute posée, y compris les jonctions des tubes, poids calculé simplement d'après la formule :

$$e = \frac{\lambda}{2K\varphi} hD;$$

p poids du métal de la conduite en t/m^3 , e épaisseur des parois en mètres, D diamètre en mètres, h charge statique en mètres, λ coefficient exprimant la surcharge statique due au coup de bélier; K travail admis dans le métal à la traction en t/m^2 ; φ rendement de la soudure ou rivure.

La perte de charge totale est exprimée par la relation :

$$\gamma = \frac{64 \mu Q^2}{\pi^2 c^2} \int_n \frac{dl}{D^5}; \quad (2)$$

μ coefficient exprimant le rapport de la perte de charge totale de la conduite supposée mise en service à la perte de charge calculée simplement pour un tube d'axe rectiligne, c coefficient de la formule de Chézy, Q débit moyen annuel en m^3/sec .

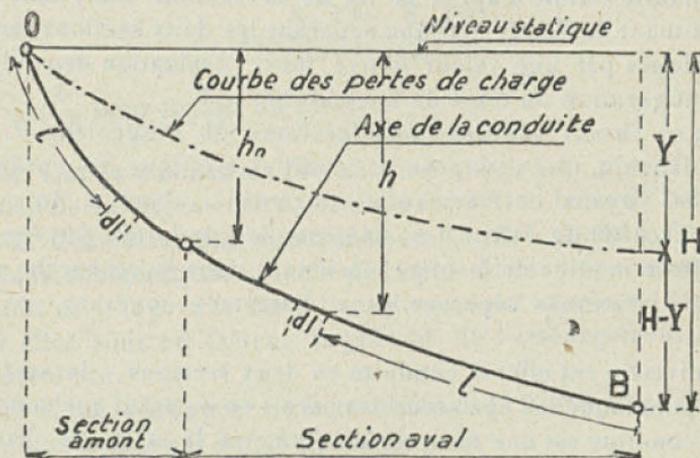


Fig. 36.

Tenant compte de l'énergie électrique produite en une année, du coût de l'installation, des frais d'exploitation annuels, des recettes annuelles et des bénéfices pour que ces derniers puissent devenir maximum, M. Papadapoulo arrive à l'expression suivante pour le poids de la section considérée, c'est-à-dire entre les points B et A de la figure 36 :

$$P = 0,9574 \frac{z\rho\lambda}{K\varphi} L_n \sqrt[7]{T^2(H + h^x)^5}; \quad (3)$$

H charge statique au point B, h^x charge statique au point A, B les bénéfiques et T donné par la formule :

$$T = \frac{736 \times 5,64}{75\pi^3} \times \frac{ab(v - iA)yK\varphi Q^3}{c^2 z p h \lambda f i}; \quad (4)$$

a nombre d'heures de fonctionnement de l'usine durant l'année, b rendement mécanique de l'installation, v prix de vente du kwh. en francs, i taux annuel d'intérêt et d'amortissement, A frais d'installation par kwh. produit annuellement en francs, f prix de la tonne de conduite forcée, compris les ancrages, en francs.

La conduite de rendement économique maximum est par suite constituée par un tuyau dont le diamètre D varie de point en point d'après la loi :

$$D = \sqrt[7]{\frac{T}{h}},$$

où h est la charge statique à chaque point examiné. Une telle conduite, sauf le cas où $h = C^{10}$, est pratiquement inexécutable.

Au lieu de résoudre la solution par la variation des diamètres, M. Papadapoulo a admis préférable d'adopter a priori des diamètres fixes correspondant à des types de fabrication courante et de faire varier la longueur de chaque tronçon pour atteindre comme résultat le rendement économique maximum. Pratiquement, le problème revient à déterminer les charges statiques qui limitent vers l'amont et l'aval la longueur de chaque tronçon d'un diamètre déterminé.

Alors on se trouve en présence de la formule :

$$h_r = \Omega_r T; \quad (5)$$

Ω_r , coefficient qui a pour valeur :

$$\Omega_r = \frac{0,4}{D_r^2 - D_{r+1}^2} \left[\frac{1}{D_{r+1}^5} - \frac{1}{D_r^5} \right],$$

fonction uniquement des diamètres choisis. La table ci-après donne les valeurs de ce coefficient : pour des diamètres des tronçons aval (les premiers) et amont (les seconds) :

1^m,05 et 1^m,00 : 0,841; 1^m,10 et 1^m,05 : 0,606; 1^m,15 et 1^m,10 : 0,438; 1^m,20 et 1^m,15 : 0,327; 1^m,25 et 1^m,20 : 0,238; 1^m,30 et 1^m,25 : 0,213; 1^m,35 et 1^m,30 : 0,142; 1^m,40 et 1^m,35 : 0,108.

La valeur de la charge statique h_r n'est pas influencée, ce qui est remarquable, par les sinuosités de l'axe de la conduite. Mais ce procédé n'est, bien entendu, valable que tant que les tronçons dont il s'agit sont compris dans la section aval de la conduite. Ces formules se rapportent exclusivement à cette partie de la tuyauterie. Le contrôle se fait pour l'extrémité amont d'un tronçon en examinant le rapport de l'épaisseur de la paroi avec le diamètre de ce point.

Pour des diamètres ne dépassant pas deux mètres, l'auteur indique un rapport :

$$S : D = 0,005$$

comme limite caractérisant la section amont.

La valeur de T (formule 4) peut être remplacée par une autre donnant la valeur de T moyen. Si on détermine en outre les valeurs de T maximum et de T minimum et que l'on introduise ces valeurs dans la formule (5), on obtiendra pour chaque paire de diamètre D_r et D_{r+1} trois valeurs de h_r (h_r moy., h_r max. et h_r mim.). Et comme h_r définitif, c'est-à-dire comme point de jonction de deux diamètres différents, on choisira une valeur se rapprochant le plus possible de h_r moyen.

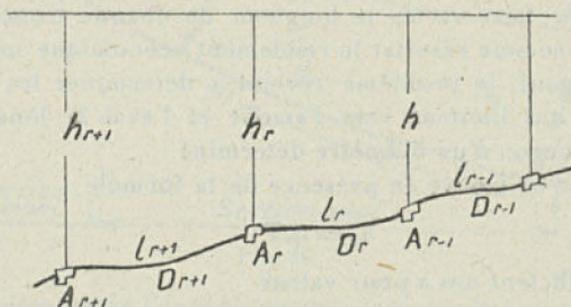


Fig. 37.

Souvent dans la pratique on est tenu de maintenir le diamètre constant entre deux ancrages successifs.

Il faut alors considérer les méthodes en usage pour le choix du tracé : la méthode française qui consiste à établir un profil

de l'axe épousant autant que possible les sinuosités du terrain, différant en certains cas sensiblement dans le plan horizontal et dans le plan vertical du trait rectiligne entre deux points fixes (fig. 37); la méthode suisse, où l'axe de la conduite est posé sous pente uniforme entre deux points fixes.

Si l'axe de la conduite correspond suffisamment, par exemple, à un arc de cercle avec $\sin\left(\frac{x_r}{4}\right) = \frac{\pi}{4}$ et $h_r = 200$ mètres, on obtiendrait :

$$D_r = 0,476 \sqrt[7]{T}.$$

Dans le cas contraire, en substituant à la courbe de l'axe une série de traits rectilignes convenablement choisis (fig. 38), on trouverait aussi :

$$D_r = 0,476 \sqrt[7]{T}.$$

Avec la méthode suisse, la valeur du diamètre est donnée par :

$$D = \sqrt[7]{\frac{T}{h_{mr}}}.$$

La différence caractéristique entre la section aval et la section amont réside dans la loi suivie par e . Pour la section amont on a :

$$e = \frac{\lambda}{2K\varphi} h^x D;$$

où h^x est la charge statique à l'extrémité amont de la section aval. La seule variable étant D , le poids P' de la section amont s'exprime par :

$$P' = \frac{n\pi\rho\lambda h^x}{2K\varphi} \int_0^{x_s} D^2 dl.$$

et :

$$D = \sqrt[7]{\frac{T}{h^x}}.$$

Ici le diamètre ne dépend plus des sinuosités subies par l'axe de la conduite, et un seul diamètre constant est nécessaire.

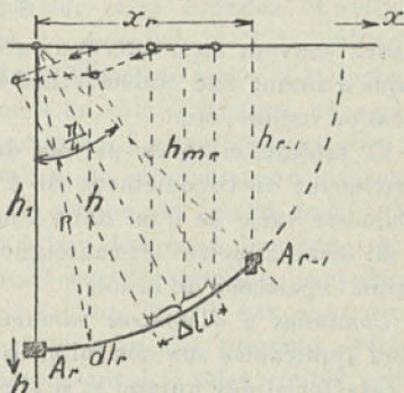


Fig. 38.

On est conduit souvent à prévoir une valeur de e conforme à la valeur de D et à y chercher ensuite le D correspondant par la formule :

$$D = \sqrt[6]{\frac{\lambda T}{K \varphi e}}$$

Assez souvent on a intérêt à substituer à la tuyauterie métallique d'amont une construction en ciment armé, un puits vertical ou incliné, etc.

Le tableau ci-après permet de trouver la perte de charge provenant de l'écoulement de l'eau dans des tuyaux dont le diamètre varie de 0 m. 200 à 2 mètres et pour des vitesses de 0 m. 800 à 2 mètres. Il renseigne sur le poids de ces tuyaux selon l'épaisseur de la tôle.

Conduites à diamètres variables. — Les formules ci-avant sont applicables aux conduites forcées à diamètre constant ou à « caractéristique unique », si elles ont la même épaisseur sur toute leur longueur. Les conduites à diamètres variables sont dites « à caractéristiques variables » quand l'épaisseur et le diamètre sont différents d'une extrémité à l'autre. Lorsqu'une telle conduite est composée de plusieurs tronçons de longueur et diamètres variables, on peut appliquer la formule suivante pour un débit donné q .

Le cas envisagé est pour trois tronçons :

$$J = 0,002 \left[\frac{l_1}{D_1^5} \left(\frac{q}{2} \right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l_2}{D_2^5} \left(\frac{q}{4} \right)^{\frac{15}{8}} + \frac{l_3}{D_3^5} \left(\frac{q}{8} \right)^{\frac{15}{8}} \right].$$

Dans le premier tronçon d'une conduite à diamètres variables la vitesse est moindre que dans le cas d'une conduite à diamètre constant, ce qui fournit l'avantage de réduire la perte de charge à l'entrée de l'eau dans le tuyau. Le volume d'eau contenu dans un tuyau vertical de diamètre constant est inférieur à celui débité par un tuyau à diamètre variable de même hauteur et pour une même perte de charge. Cette augmentation de volume pour ce dernier conduit à une diminution de force vive qui est un précieux avantage contre les coups de bélier et facilite en outre la régulation des turbines.

29. Nature des conduites forcées. — *Conduites métalliques.* — Pour la construction de ces tuyaux, le métal exclusivement employé est la tôle d'acier doux. Quand les épaisseurs sont

cornière, ces brides formant joints desdits par l'intermédiaire d'une tresse de chanvre serrée par des boulons. Parfois on emploie des spirales constituées par une double rivure, évitant les armatures transversales.

Les conduites jusqu'à 0 m. 600 de diamètre s'établissent en tronçons de 6 à 7 mètres de longueur et en grandes et petites viroles cylindriques, les pinces se chevauchant. L'assemblage de ces tronçons a lieu à l'aide de brides et de joints. Ces brides sont fixes ou tournantes, formées de tôle d'acier ou en acier coulé pour les pressions importantes. Les joints sont faits à l'aide de rondelles de plomb munies de rainures concentriques entre lesquelles on dispose un cordon de bitord enduit de minium de plomb. Pour les conduites de grand diamètre (jusqu'à 3 mètres), on opère, quand cela est possible, sur place le rivetage des tronçons bout à bout. Quant aux conduites dépassant trois mètres de diamètre, on est toujours obligé de les construire sur place, en utilisant des tôles toutes préparées.

Pour les tuyaux soudés, la soudure longitudinale s'effectue le long d'une ou deux génératrices, selon le diamètre du tuyau à obtenir. Elle a lieu au moyen des procédés de la soudure « au gaz à l'eau ». La qualité du métal est essentielle pour obtenir une bonne soudure; celle-ci doit donner à l'épreuve les résultats suivants : résistance 32 k. 480; allongement 29 p. 100; élasticité 21 k. 200.

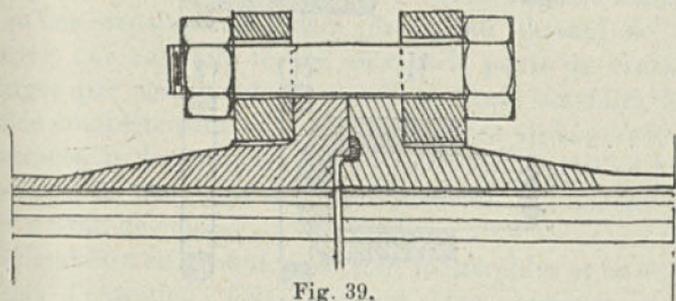


Fig. 39.

¶ L'assemblage (fig. 39) s'obtient en soudant, à l'extrémité du tuyau, un collet d'une seule pièce dont la forme exacte est donnée au tour, la bride mobile ayant été préalablement introduite.

La figure 40 renseigne sur les divers joints utilisés dans la confection des tuyaux.

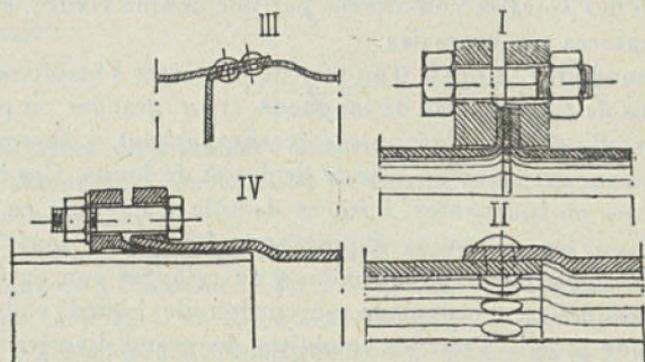


Fig. 40.

Enfin le procédé Ehrhardt (fig. 41) permet d'obtenir des tuyaux sans soudure en partant d'un lingot d'acier coulé brut, puis laminé ou étiré, introduit au rouge blanc dans une matrice

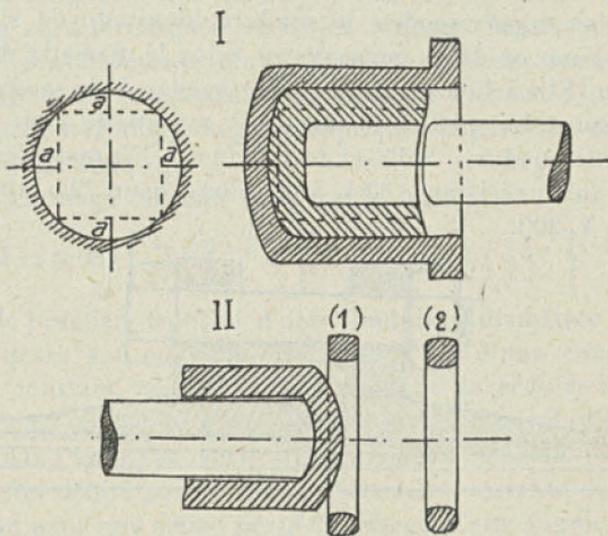


Fig. 41.

et perforé à la presse. L'ébauche ainsi obtenue est allongée sur un jeu de filières successives jusqu'à ce qu'on ait obtenu la longueur et l'épaisseur de paroi désirées; on passe ensuite au calibrage. Une des installations les plus suggestives où ce procédé

a été utilisé est celle de la célèbre chute de Fully, en Suisse, dont la hauteur est de 1650 mètres.

Conduites en ciment armé. — Le béton armé remplace avantageusement la tôle d'acier dans les parties supérieures d'une conduite sous pression. Jusqu'à 5 kg. de pression (50 mètres de charge d'eau) et 4 mètres de diamètre une conduite en ciment armé remplit les conditions qu'on est en droit d'attendre de son fonctionnement.

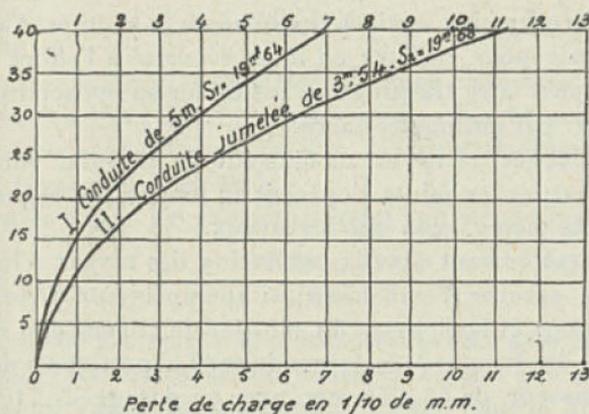


Fig. 41 bis. — Graphiques de pertes de charge dans des conduites forcées en ciment.

L'appareil en ciment armé peut avoir des emplois multiples, tels qu'une canalisation à flanc de coteau servant de canal d'amenée, une conduite forcée suivant la pente du terrain et prolongée par une conduite métallique, une conduite forcée exécutée complètement en ciment armé, un siphon évitant le contournement d'une vallée, ou le remplacement d'un tunnel en charge par une conduite sous pression en ciment armé établie à flanc de coteau.

Les conduites en ciment armé sont inaltérables et ne demandent pas d'entretien. Elles peuvent être enterrées et elles résistent bien aux coups de bélier, et ne sont pas sujettes à vibrations. Dans certains cas, on a utilisé le ciment armé comme enveloppe de renforcement sur des conduites métalliques.

A l'usine de Pontamafrey l'on n'a pas hésité à faire toute la

conduite en ciment armé d'une longueur de 3290 mètres et 40 mètres de charge.

Les tuyaux en béton armé consistent à incorporer dans le béton une ossature métallique de fers ronds, en enroulant ces fers sur un mandrin, ou de fers ronds et de fers à T ou à I pliés en forme de cercles autour de génératrices en fers ronds, ou de fers à I en acier, suivant les résistances que l'on veut obtenir.

Une bonne règle consiste à faire la section d'armature longitudinale au moins égale à la moitié de la section d'armature transversale pour résister en toute sécurité à l'effort d'extension. On peut faire travailler les fils de fer ou les aciers profilés à 8 kilogr. par millimètre carré.

Les tronçons de tuyau, au moment de la pose, sont placés bout à bout, et les joints s'opèrent au moyen de bagues fabriquées de la même façon que les tuyaux.

Le ciment entrant dans la confection des tuyaux n'intervient que pour assurer l'étanchéité; si son épaisseur varie suivant les pressions et la richesse du mortier de ciment, elle est indépendante du diamètre de la conduite. La pratique a démontré que l'épaisseur de 45 à 50 mm. avec un dosage de 1100 kg. de ciment par mètre cube de sable convient très bien aux pressions de 25 à 30 mètres d'eau. L'épaisseur du tuyau est en outre subordonnée à cette considération que les génératrices et les spires doivent être recouvertes de 9 à 11 mm. de ciment pour la protection du métal.

Dans le système Bonna, l'ossature métallique consiste en un tube en tôle d'acier rivé, recouvert d'une armature métallique, noyé dans une couche de ciment faisant enveloppe, ou d'un tube en tôle plombée disposé dans la partie médiane du tuyau, entre deux armatures métalliques. Dans les tuyaux de grand diamètre, l'armature métallique est constituée par des frettes rivées avec plaques de recouvrement. Intérieurement aux frettes sont placées, longitudinalement et sur toute la longueur du tuyau, des barres d'acier portant à leur partie supérieure des encoches régulièrement distancées pour recevoir et encastrer la base des frettes.

Pour les très fortes pressions, l'étanchéité est obtenue au moyen d'un tube en acier soudé à la soudure autogène, lequel

tube est noyé entre deux enveloppes en ciment armé. Ces dernières ajoutent leur action à la résistance offerte par le tube en acier central. Les joints se font sur celui-ci, aux deux extrémités duquel on soude des abouts en forme de cornière.

La Société des ciments prompts de la Porte de France fait travailler le béton constituant les conduites qu'elle construit, à 1 k. 550 par cent. carré. Les épaisseurs peuvent être calculées par la formule suivante :

$$e = \frac{Dh}{30};$$

e épaisseur en mètres, D diamètre du tuyau en mètres, h charge d'eau en mètres. Pour les conduites de petites dimensions, l'épaisseur est de 0 m. 07 (tuyaux de 0 m. 500 de diamètre et 0 m. 08 pour les tuyaux de 0 m. 600).

La section totale de l'armature peut se tirer de la formule :

$$\omega = \frac{1000h \times D}{2Ra};$$

ω section totale des spires en millimètres carrés pour un mètre de longueur. Ra le travail du métal en kilogr. par mm^2 ($Ra = 8$ kg. pour l'acier doux laminé et 10 kg. pour le fil d'acier étiré à la filière).

Pour les génératrices on prend généralement les $5/8$ de la section des spires comptées sur un mètre de longueur de tuyau. L'espacement de ces génératrices est compris entre 8 centimètres pour les petits diamètres et 15 centimètres pour les grands (au-dessus de 0 m. 600).

30. Résistance des conduites forcées métalliques. — Les forces déformatrices à envisager se réduisent généralement à deux dans la pratique : le poids propre du tuyau et celui du liquide contenu qui tendent à ovaliser la conduite, en l'aplatissant contre les supports résistants sur lesquels elle s'appuie. Les fatigues dues aux flexions varient sensiblement comme les cubes des diamètres des conduites.

L'équation générale donnant le moment fléchissant dans chaque section de la paroi, dans le cas d'un tuyau vide, se réduit à la formule :

$$M_f = Kz,$$

M_f moment fléchissant cherché, K constante pour chaque cas

particulier, dont la valeur est donnée par le produit du poids p de la paroi par mètre courant de développement du tuyau par le carré (R^2) du rayon; z variable fonction d'un angle α qui définit la section considérée.

Il faut à cet effet ajouter celui venant du poids de l'eau; dans ce cas K a pour valeur :

$$K = pR^2 + \frac{1}{2} \delta R^3;$$

δ densité du liquide contenu.

L'aplatissement e dû au tuyau ou diminution de longueur du diamètre est donné par la formule :

$$e = \left(\frac{\pi^2}{4} - 2 \right) \frac{KR^2}{EI} = 0,467 \frac{KR^2}{EI};$$

E coefficient d'élasticité de la matière des parois, I moment d'inertie de l'unité de longueur des parois, ce moment d'inertie étant supposé constant sur toute la circonférence.

Lorsque les conduites sont vides, les changements de température amènent des perturbations qui se manifestent soit par une compression, soit par une tension du métal, que celui-ci doit supporter sans aucun risque.

Épaisseurs des tuyaux. — Il faut aussi distinguer les conduites à diamètre constant et celles à diamètres variables. Nous nous occuperons d'abord des premières, pour lesquelles la formule simplifiée ci-après, dérivée de la formule générale de Lamé, donne l'épaisseur e en millimètres :

$$e = \frac{PD}{200R} + 1,5 \text{ mm.};$$

D diamètre du tuyau en millimètres, P la pression intérieure en kg. et R le plus grand effort d'extension en kg. par mm^2 .

La pression que l'on peut exercer à l'intérieur d'un tuyau est limitée par la tension moyenne par unité de surface de la section transversale de la matière du tube que peut supporter le métal sans inconvénient. Mais les effets des chocs sont deux fois plus grands que les effets statiques. On en tient compte en doublant les dimensions que l'on obtient par la formule précitée. Avec des tôles en acier Martin on admet une fatigue de travail de 5 à 6 kg. par mm^2 .

D'autre part le réglage des turbines produit des coups de

béliier en faisant varier la vitesse de l'eau. On doit tenir compte de la surtension provenant de ce fait, ainsi que nous le verrons plus loin.

M. Rémo Catani a donné les formules suivantes pour la détermination de l'épaisseur e des conduites à diamètre constant :

$$e = \frac{hd}{2\delta R};$$

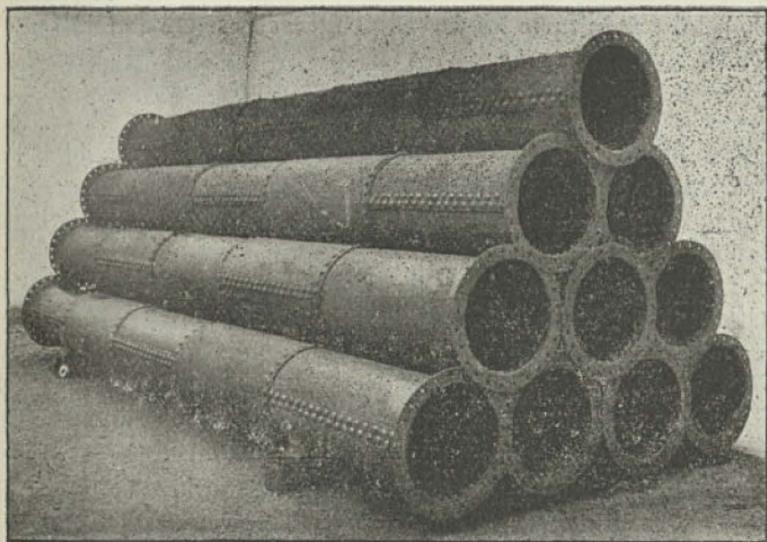


Fig. 42. — Tronçons de conduites forcées métalliques.
(Construction J. Joya.)

d diamètre de la conduite en mètres, h la pression en mètres, e en millimètres, R la charge de rupture en kilogr. et δ le coefficient de sécurité de cette dernière.

Le poids p d'un mètre linéaire de tuyau, exprimé en kilogr., s'obtient par la formule ci-après où C représente le poids d'un mètre cube du métal employé :

$$p = 0,00157 \frac{hd^2 C}{6R}.$$

Pour tenir compte des rivets, des recouvrements, etc., on compte sur une majoration de 15 p. 100, ce qui conduit à admettre :

$$p = 2hd^2,$$

avec $R = 42$ kg. par mm^2 et $C = 7800$ kg.

Dans les mêmes conditions : $e = 0,0714 hd$.

Quels que soient la nature du phénomène propre au coup de bélier et les éléments de régime de la conduite, il faut dans chaque cas déterminer la surpression x en tous les points de la conduite, et si on admet que cette surpression puisse être assimilée à une force instantanée, elle produit un effet double de celui produit par les forces progressives. On a alors :

$$e = \frac{(h + 2x)d}{2R} \text{ centim.}$$

On prendra h pression statique en kg., x coup de bélier maximum en kg. par cm^2 , d diamètre en centimètres, R la charge en kg. par cm^2 correspondant aux 7/10 de la limite inférieure.

Les chiffres donnés par M. Catani peuvent être critiqués du fait qu'il admet des diamètres décroissant de si peu que leur exécution pratique reviendrait éventuellement plus cher que l'adoption de quelques diamètres seulement, mais de fabrication courante. M. l'ingénieur Papadopoulo a, comme il a été indiqué au § 28, pu obtenir la solution du problème mathématiquement, uniquement par la considération qu'il s'agissait de rendre minimum non une fonction en rapport avec un seul tronçon, mais en envisageant la somme de tous les tronçons composant la section aval. C'est là une observation qui avait jusqu'ici échappé à la sagacité des chercheurs pendant plus d'un quart de siècle.

Les conduites sont en général constituées par des tronçons rectilignes raccordés par des coudes ancrés dans des massifs en béton. Dans ce cas, pour diminuer la contrainte du métal résultant de la dilatation, on fait appel à des organes spéciaux assurant la libre dilatation du métal (manchons, soufflets, etc.). On laisse aussi les coudes libres de façon à permettre les augmentations ou les diminutions de la flèche que présente, en plan, la conduite entre ses ancrages successifs.

D'après M. l'ingénieur Baticle, dès que l'on peut adopter un tracé de la conduite, en plan, présentant une flèche entre ancrages de l'ordre de vingt fois le rayon de la conduite, on

n'a plus à craindre les effets de la dilatation dus à la température.

D'après M. Bouchayer, le coefficient de travail de la tôle doit être pris à 6 kg. pour l'acier de déphosphoration obtenu par le procédé Thomas et à 8 kg. pour l'acier au four Martin. C'est sur cette base que cet éminent praticien a établi un abaque pour la détermination des épaisseurs et des poids des conduites en tôle, publié dans l'intéressante brochure *Les Conduites sous pression* de la maison Bouchayer et Viallet.

Pour une perte de charge déterminée, la méthode du diamètre variable conduit à un poids de tuyau inférieur à celui qu'on obtient par la méthode ordinaire. Comme l'on peut réduire l'épaisseur des tôles à mesure que la pression ou la hauteur diminue, on prend pour valeur dans chaque tronçon celle de la charge moyenne.

La Société hydrotechnique de France a établi des modèles de marche et cahier des charges pour la fourniture et l'installation de conduites forcées métalliques et en ciment armé. Le cadre de cet ouvrage ne nous permettant pas de les transcrire, nous renvoyons le lecteur à notre ouvrage : *La Technique de la Houille blanche et des transports de l'énergie électrique*¹.

31. Coups de bélier. Étude d'ensemble de la théorie. — Les surpressions qui se produisent dans les conduites sous l'effet des coups de bélier sont de deux natures : celles dues à des ondes se propageant avec une vitesse finie, telles que celles qui ont lieu au moins au début dans les conduites entièrement purgées d'air, et celles qui se présentent comme des oscillations en masse du liquide dans les conduites munies de réservoirs d'air, de cheminées d'équilibre et lorsque la dilatation de l'enveloppe et la compressibilité du liquide peuvent être négligées vis-à-vis des autres phénomènes. Ces deux actions peuvent d'ailleurs coexister.

Si on considère une conduite forcée en fonctionnement et qu'à un instant donné on fasse une fermeture rapide du vannage de la turbine, on constate alors que presque instantanément l'aiguille du manomètre se déplace vers les pressions plus fortes, atteint un maximum, puis revient en arrière. Si la conduite

1. Dunod, éditeur, Paris.

est courte relativement à la hauteur de la chute, l'aiguille revient généralement jusqu'au point correspondant à la pression statique de la colonne d'eau, puis s'y fixe si le vannage de la turbine reste fermé; au contraire, si la conduite est longue, l'aiguille, en revenant en arrière, dépasse le point correspondant à la pression statique en indiquant une dépression un peu inférieure à la surpression enregistrée tout d'abord; puis la pression remonte, et l'on observe une série d'oscillations qui vont s'amortissant lentement et d'autant plus dans cet ordre que la conduite est plus longue. La fig. 43 traduit ces diverses circonstances.

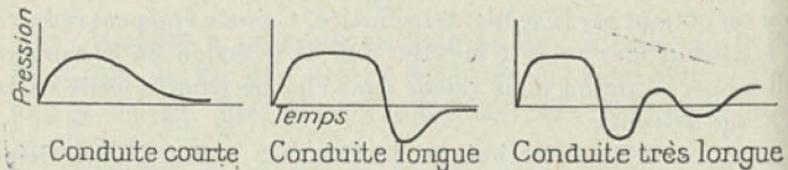


Fig. 43.

Le coup de bélier est donc un phénomène oscillatoire, à période plus ou moins amortie. Quand les conduites sont longues, on peut avoir à craindre des phénomènes de résonance excessivement dangereux.

Les conduites sont soumises à des coups de bélier, soit lors du remplissage ou mise en charge, soit pendant la marche, provenant d'une variation brusque de résistance pendant le travail des turbines ou de la manœuvre des robinets-vannes d'arrêt ou de réglage.

Ainsi, à cause de l'inertie, il se produit, un certain retard dans la compression du liquide et dans la dilatation. Le métal peut ainsi travailler au delà de sa limite d'élasticité et amener la rupture de la conduite.

Les travaux de nombreux savants ingénieurs, tels que ceux de Joukhaski, Aliévi, de Sparre, Rateau, Jouguet, Camichel, Eydoux, Gariel, Carey et Gaden, ont permis de fixer aussi définitivement que possible les conditions de fonctionnement des conduites forcées et les moyens de les calculer et d'atténuer les effets des coups de bélier, soit pour les conduites à caractéristique unique, soit pour celles à caractéristiques variables.

Dans la théorie du coup de bélier on fait intervenir un facteur a qui représente la vitesse de propagation du son dans l'eau, soit 1425 mètres à la seconde à 15°. M. Aliévi a donné à a la valeur suivante :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K \frac{d}{e}}};$$

d diamètre, e l'épaisseur de la conduite et $K = 0,5$ pour le fer et l'acier.

Si L est la longueur de la conduite, on considère des périodes successives de longueur égale à $2 \frac{L}{a} = \theta$.

La surpression ou la dépression, c'est-à-dire le coup de bélier créé par une ouverture ou une fermeture instantanée, a pour valeur en mètres :

$$h = y - y_0 = -\frac{a}{g} \Delta v;$$

Δv la variation de $(v - v_0)$ dans la partie inférieure de la conduite, avant et après le coup de bélier.

Si la conduite est en état de régime avant le coup de bélier, la vitesse v_0 se calcule aisément d'après la pression statique (perte de charge comprise) avant l'orifice du distributeur de la turbine, et d'après la section de cet orifice; mais la vitesse v , après le coup de bélier, dépend non seulement de la pression statique initiale et de l'ouverture de l'orifice, mais aussi de la valeur même du coup de bélier.

Dans le cas d'une fermeture totale, $\lambda = 0$ et le coup de bélier a pour valeur $\left(\frac{av_0}{g}\right)$; λ est le rapport de la section de l'orifice d'écoulement, après une fermeture, à la section initiale, avant la fermeture.

L'intensité des coups de bélier occasionnés par une ouverture ou une fermeture instantanée ne dépend en aucune manière de la longueur de la conduite; mais si les ouvertures ou fermetures de l'orifice d'écoulement sont progressives, l'intensité peut encore ne dépendre, pour une certaine longueur de la conduite, à partir de l'orifice d'écoulement, de la longueur totale de cette conduite, ou au contraire elle peut en dépendre,

suivant les valeurs relatives de la durée de fermeture (ou ouverture) et de la demi-période de choc $\left(\frac{2L}{a}\right)$.

Il importe donc, pour le calcul des conduites, de connaître la manière dont les orifices d'écoulement sont fermés ou ouverts par les appareils de réglage; si l'on doit redouter des fermetures ou ouvertures brusques, il faut établir les épaisseurs de la paroi de la conduite de façon qu'elle puisse supporter la même surcharge d'un bout à l'autre. Si au contraire on n'a affaire qu'à des ouvertures progressives, il faut distinguer les cas où les durées de fermeture ou d'ouverture sont inférieures à $\left(\frac{L}{a}\right)$, comprises entre $\left(\frac{L}{a}\right)$ et $\left(2\frac{L}{a}\right)$ ou supérieures à $\left(\frac{2L}{a}\right)$.

Supposons le cas où on ferme brusquement le distributeur au début de la première période et qu'on le tient fermé pendant toute cette période. On ouvre ensuite brusquement le distributeur et en plein, au début de la deuxième période, en le laissant ouvert pendant toute cette période, pour le refermer à nouveau au début de la troisième période, en le tenant fermé pendant toute cette période pour le rouvrir encore au début de la quatrième période, et ainsi de suite.

Dans ce cas, la valeur c du coup de bélier, d'après Aliévi, est :

$$c = y_0 \left[1 + \frac{(1 - \varepsilon)}{(n + \varepsilon^2)} \right] \text{ où } : n + \varepsilon = \frac{gy_0}{av_0};$$

y_0 et v_0 étant les valeurs de la charge et de la vitesse à l'état de régime, n représente le nombre entier et ε la fraction décimale, et $g = 9,81$.

Ainsi, par exemple, si on avait $y_0 = 800$ mètres et $v_0 = 1$ mètre, on aurait $(n + \varepsilon) = 7,848$ et par suite $n = 7$ et $\varepsilon = 0,848$, et la valeur du coup de bélier serait : $c = 801^m,60$, c'est-à-dire légèrement supérieure à la pression statique. La valeur maximum que puisse prendre le coup de bélier correspond au cas où l'on aurait : $n = 1$ et $\varepsilon = 1/3$; dans ce cas le coup de bélier serait égal aux $9/8$ de la charge statique.

M. Aliévi a établi une synopsis ou ensemble d'abaques permettant une vue d'ensemble sur les lois du coup de bélier et illustrant clairement le système fondamental des équations qui

régissent tous les phénomènes hydrodynamiques susceptibles de se produire dans une conduite alimentée par un réservoir à niveau constant et munie à son extrémité d'un orifice à section variable.

M. Carden, en partant de la synopsis de M. Aliévi, s'est proposé de fixer la loi de fermeture non linéaire qui donne le temps de fermeture totale minimum, pour une charge de coup de bélier déterminée qui ne doit pas être dépassée dans aucune des manœuvres possibles en fermeture continue. Il a été conduit à mettre les lois de fermeture rapide sous la forme d'abaques tout à fait généraux et d'une application facile¹.

M. le comte de Sparre a montré, en appliquant les procédés de M. Aliévi, que si le coup de bélier est notablement inférieur à la charge, pour une conduite à diamètre constant, on peut notablement simplifier les formules de M. Aliévi. Il a traité en outre les questions se rattachant aux conduites formées de tronçons de diamètres différents telles que : conduite formée de deux tronçons de diamètres différents, coup de bélier à la vanne; coup de bélier à la jonction des deux tronçons; cas d'une fermeture totale; cas où la durée de propagation est la même pour les deux tronçons; cas d'une conduite de diamètre constant, mais d'épaisseur variable; conduite formée de trois tronçons de diamètres différents et examen des cas où la durée de propagation est la même pour les trois tronçons; cas d'une conduite de diamètre constant, mais à indice variable; conduite formée de trois tronçons de longueurs quelconques; coup de bélier à la vanne; solution approchée dans le cas d'une fermeture en un temps supérieur à une période complète de l'oscillation de l'eau et enfin coup de bélier en un point quelconque d'une conduite formée de trois tronçons.

M. de Sparre prend v comme vitesse de régime pour le distributeur complètement ouvert et fait le rapport λ de l'ouverture à un instant quelconque à celle de ce distributeur égal à

$(\lambda_0 - bt)$, b étant positif s'il s'agit d'une ouverture; puis $\theta = \frac{2L}{a}$

et $c = \frac{av_1}{2gy_0}$.

1. *La Technique de la Houille blanche et des transports de l'énergie électrique*, par E. Pacoret. Dunod, éditeur.

S'il s'agit d'une fermeture progressive dans un temps supérieur à θ , il faut distinguer deux cas : 1° $C\lambda_0 < 1$.

Et la valeur maximum ξ_m du coup de bélier à la vanne a pour expression :

$$\xi_m = \frac{2e\gamma_0 b\theta}{1 + C(\gamma_0 - b\theta)}$$

Si on veut que le coup de bélier ne dépasse pas une fraction 1 de la pression statique γ_0 au distributeur, on aura :

$$b \leq \frac{1 + C\lambda_0}{(2n + 1)C\theta}$$

Et si T désigne le temps qu'exigerait la fermeture totale de sorte que : $\lambda_0 - bT = 0$.

on a :
$$T = \frac{(2n + 1)C\lambda_0\theta}{1 + C\lambda_0};$$

2° Si
$$C\lambda_0 > 1;$$

Le coup de bélier à la vanne est sensiblement :

$$\xi_m = \frac{Cy_0 b\theta}{1 - \frac{Cb\theta}{2}}$$

$$b \leq \frac{2}{C\theta(2 + 1)} \quad \text{et} \quad T \geq \frac{(2n + 1)C\theta\lambda_0}{2}$$

dans les mêmes conditions que ci-avant.

Comme enseignements pratiques des études de M. de Sparre nous relèverons les faits principaux suivants.

Pour les hautes chutes, il est souvent plus nécessaire de se préoccuper, au point de vue du coup de bélier, de la résistance de la partie supérieure de la conduite que de celle qui avoisine la vanne.

Pour corriger le coup de bélier de l'influence de la perte de charge, on peut admettre que celle-ci est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau dans la conduite, et on a une approximation suffisante en considérant la perte de charge au distributeur comme étant dans ce cas. Si J_1 désigne cette perte de charge, le distributeur étant complètement ouvert, et J la perte de charge en ce point à un instant quelconque où la vitesse est v , la valeur du coup de bélier à la vanne est :

$$\xi - J = \xi - J_1 \lambda \left(1 + \frac{\xi}{y_0} \right).$$

Et si l'on considère un point situé à une distance x du distributeur, la perte de charge en ce point aura pour valeur :

$$J_1 \lambda \left(1 + \frac{\xi}{y_0} \right) \frac{l-x}{l}.$$

M. de Sparre a montré que pour les conduites forcées il était nécessaire de tenir compte, quand elles alimentent des turbines à forte réaction, du degré de réaction dans le calcul du coup de bélier, et en conclut que si on calculait ce dernier au moyen de la formule Michaut :

$$B = \frac{2LV_1}{gT},$$

on lui attribuerait une valeur de 60 p. 100 trop faible; V_1 vitesse de régime lorsque le distributeur est complètement ouvert.

MM. Camichel, Eydoux et Gariel ont spécialement étudié et traité les cas de fermetures brusques et complètes, de fermetures lentes, d'influence de la perte de charge, d'ouvertures lentes dans les conduites à caractéristique unique et à caractéristiques variables. Dans ces dernières, ils ont étendu leurs investigations à la répartition du coup de bélier le long de la conduite et recherché la manœuvre la plus dangereuse donnant le maximum du coup de bélier au distributeur.

Le tableau ci-après résume les calculs faits sur les trois conduites de cette usine et celle de l'usine d'Eget.

M. Carey a porté ses études spécialement sur les conduites à caractéristiques variables et les a traduites par des graphiques du plus haut intérêt, en imaginant que de telles conduites pouvaient être traitées par la conception d'une conduite moyenne et adoptant un facteur de majoration correspondant.

Les chiffres suivants donnent les valeurs du coup de bélier au vannage pour une fermeture en 20' sec. calculée pour une conduite dont les données sont :

$L = 1200$ m.	$y_0 = 510$ m. : s.	$V' = 6\sqrt{50}$	$T' = 6,5\frac{1}{4}$ s.
$l' = 666$ m.	$a' = 1220$ m. : s.	$\delta' = 0\sqrt{50}$	$r' = 0,122$ s.
$l'' = 534$ m.	$a'' = 960$ m. : s.	$d'' = 0\sqrt{70}$	$\theta' = 1,09$ s.

Nous ne pouvons, dans le cadre que nous avons fixé pour

cet ouvrage, que nous limiter à un exposé très succinct des travaux des savants ingénieurs que nous avons cités plus haut. Les lecteurs que cela intéresse plus spécialement trouveront toutes ces questions traitées avec l'ampleur nécessaire dans notre grand ouvrage : *La Technique de la Houille blanche et des transports de l'énergie électrique*¹.

USINE DE SOULOM			USINE D'ÉGET
γ.....	120m	250m	750m
Diamètre.....	1m,200	0m,810	0m,560
Épaisseur.....	de 13 à 17mm	de 20 à 7mm	de 31 à 5mm
Longueur totale.....	346m,50	536m,50	1 225m,50
$\sum \frac{1}{a_1}$ { calculé.....	0°3654	0°5021	1°0554
{ observé.....	1.466/4 = 0°366	2.005/4 = 0°501	»
<i>Division en 2 tronçons.</i>			
1 ^{er} tronçon { l.....	188m,10	289m,95	680m,50
{ a.....	1 030m	1,115m	1,289m
2 ^e — { l'.....	158m,40	246m,41	545m
{ a'.....	867m	982m	1,033m
T _a calculé.....	1°389	1°908	4°0.1
<i>Division en 3 tronçons.</i>			
1 ^{er} tronçon { l.....	124m	198m,87	452m
{ a.....	1,020m	1,188m	1,285m
2 ^e — { l'.....	119m	176m,79	416m,50
{ a'.....	977m	1,057m	1,184m
3 ^e — { l'.....	103m,50	160m,70	357m
{ a''.....	850m	960m	1,015m
T _a { calculé.....	1°360	1°894	3°93
{ observé.....	1°361	1°894	»

Dans l'état actuel des connaissances théoriques et expérimentales concernant les effets des coups de bélier, la Société hydrotechnique de France conseille la méthode suivante pour l'établissement du graphique, dans le cas où la durée de fermeture totale du vannage est supérieure à $\left(\frac{2L}{a}\right)$.

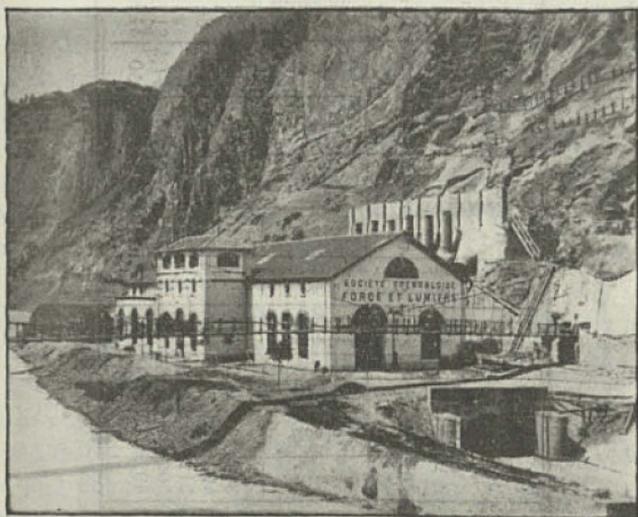
1^o *Cas des conduites de diamètre constant.* — Si b est la valeur du coup de bélier à la base des conduites, on admettra que la surpression se répartit linéairement le long de la con-

1. Dunod éditeur, Par

duite. Si L est la longueur de la conduite, y la pression statique en un point situé à une distance x de l'extrémité aval de la conduite mesurée sur l'axe, la pression à faire figurer dans le calcul sera pour chaque point :

$$y + b \frac{L - x}{L}.$$

2° *Cas des conduites de diamètres variables.* — On pourra appliquer pour l'établissement du graphique les méthodes indiquées par M. de Sparre.



(Cliché J. Jaya.)

Fig. 44. — Usine hydroélectrique d'Avignonet-sur-le-Drac.

3° *Cas des conduites bifurquées.* — On appliquera les méthodes indiquées aux §§ 1° et 2° ci-avant, suivant les cas, à toutes les conduites reliées directement aux turbines; toutefois on ne prendra pas pour valeur du coup de bélier dans le tronçon commun la somme des coups de bélier relatifs aux diverses conduites dérivées, mais seulement le coup de bélier maximum relatif à l'une d'entre elles.

Cette règle n'est cependant applicable que si la section du tronçon commun est égale à la somme des plus grandes sections des conduites bifurquées.

Dans le cas tout à fait exceptionnel où la durée de fermeture

totale du vannage serait inférieure à $\left(\frac{2L}{a}\right)$, les exploitants et constructeurs auront à s'entendre pour l'établissement du graphique.

DATE DES ESSAIS en 1919	NATURE DE L'ESSAI en kilowatts	Vitesse angulaire en tours/min.			Variation max. la vitesse angulaire en centèmes	Ecart et vide en centèmes	Hauteur de chute en mètres		Débit de la conduite en lit./sec.		Maximum du coup de bélier en mètres		Valeur du coup de bélier en centèmes de la chute.	
		initiale	finale	écart			extrême	avant	après	en sur- pression	en dé- pression	en sur- pression	en dé- pression	en sur- pression
3 sept ^{re}	Charge de 0 à 2 500.	510	499	449	11,2	2,2	740	722	»	»	»	155	»	20,7
3	Décharge de 2 500 à 0	499	510	552	10,4	2,2	722	740	»	»	30	»	4	»
4	Charge de 0 à 1 900.	512	499	443	11,4	2,6	740	735	71,5	370	»	175	»	23,4
4	Décharge de 1 900 à 0	500	515	536	7,2	3	736	740	370	71,5	31,2	»	»	»
4	Décharge de 3 500 à 0	492	512	569	13,8	4	714	740	71,5	650	37,5	»	5	»

Ce que nous venons d'exposer s'entend des conduites métalliques.

Pour les conduites en ciment armé, il convient de mesurer la valeur de a après exécution et d'en déduire la durée d'action

minimum admissible et de modifier, s'il y a lieu, en conséquence l'attaque du régulateur.

Au point de vue des essais à effectuer sur les conduites forcées, nous avons pensé utile de consigner les résultats obtenus par MM. Camichel, Eydoux et Gariel sur les conduites de l'usine d'Eget dont le tableau ci-dessus résume les particularités.

32. Dispositifs de protection contre les coups de bélier.

— Le mode de protection le plus usité est l'établissement, le long de la conduite, de cheminées d'équilibre ou reniflards, notamment dans le voisinage des turbines. A l'aide de ce moyen la masse de la colonne d'eau en jeu n'est plus que celle contenue dans la cheminée et non celle de la conduite tout entière, ce qui a pour effet de diminuer considérablement l'inertie. Lors des surpressions, l'eau sort par l'orifice supérieur de la cheminée et se déverse au dehors; en cas d'ouverture rapide des turbines, l'eau s'abaisse au contraire dans la cheminée qui fournit un certain appoint de débit.

On donne à ces cheminées d'aération un diamètre à peu près égal à celui de la conduite. Dans le cas des conduites d'aménée à faible pente, l'installation d'une cheminée d'équilibre est facile à réaliser. Pour les conduites en charge progressant avec la pente du terrain et devant se raccorder au collecteur des turbines, on peut utiliser la disposition ci-contre (fig. 45).

On emploie aussi pour obtenir une diminution des coups de bélier des « vannes compensatrices » conjuguées au mouvement du vannage, lesquelles s'ouvrent à l'instant même où la vanne d'entrée aux turbines se ferme. Le but est de maintenir constante la veine liquide dans la conduite. Dans le cas des roues Pelton, le « défecteur » joue le même rôle. Il consiste

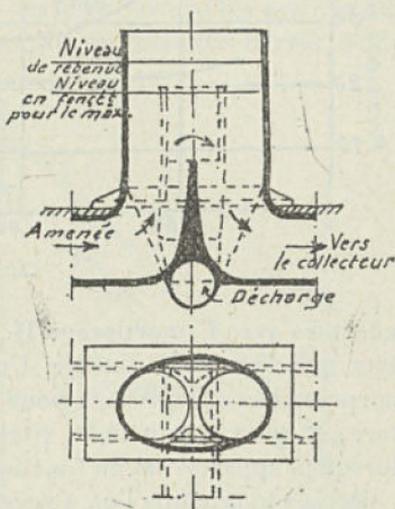


Fig. 45.

essentiellement en un écran mobile manœuvré par le régulateur, qui dévie tout ou partie du jet en dehors de la roue.

Une bonne précaution consiste à disposer des trous d'homme sur la conduite, que l'on peut ouvrir, lors du remplissage, pour permettre à l'air de s'échapper.

Le régulateur de pression ou amortisseur H. Bouvier est essentiellement composé d'une sorte d'indicateur des surpressions et d'un clapet de décharge actionné par un servo-moteur; ce sont les déplacements effectués par l'indicateur qui sont utilisés pour obtenir la commande du servo-moteur et du clapet de décharge. Le diagramme (fig. 46) indique une série d'essais

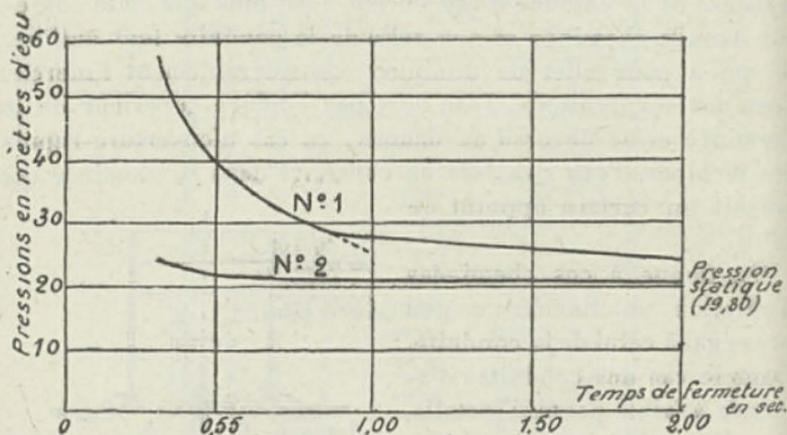


Fig. 46.

effectués avec l'amortisseur H. Bouvier et la nature des résultats que l'on peut obtenir. Une première courbe montre les surpressions enregistrées pour une série de vitesses de fermeture, et, pour ces mêmes vitesses, les surpressions obtenues lorsque l'appareil est en fonctionnement.

Depuis longtemps l'on a reconnu la nécessité d'un appareil permettant d'isoler automatiquement une conduite d'eau de son réservoir, en cas de rupture de la canalisation; et c'est M. Piccard, le constructeur de turbines bien connu, qui a résolu le problème au moyen d'une soupape concave équilibrée qui se ferme lorsque la vitesse de l'eau dépasse une certaine mesure. M. Bouchayer a instauré un appareil automatique qui remplit le but désiré et qui est représenté par les fig. 47 et 48.

Cette disposition offre l'avantage d'assurer le remplissage des conduites dans un laps de temps déterminé. L'appareil tel qu'il

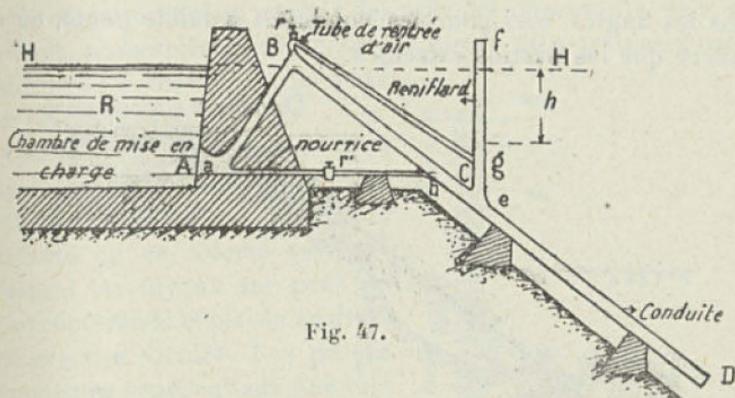


Fig. 47.

est disposé amène l'air au point voulu dans la canalisation, c'est-à-dire dans les conditions les plus favorables pour éviter l'aplatissement. Enfin il permet de commander l'arrêt de la

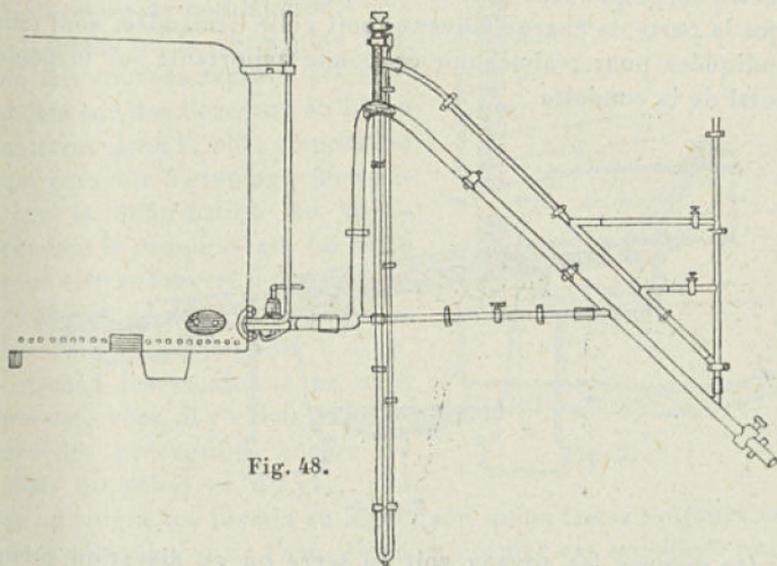


Fig. 48.

conduite par la manœuvre à l'usine d'un robinet de vidange dont la section donne un débit qui, ajouté à celui des turbines, produit la vitesse de désamorçage.

33. **Tracé et pose des conduites forcées.** — On évite autant que possible de donner au parcours une ligne absolument droite en plan, un tracé un peu brisé facilitant la dilatation dans les angles, ceci pour les conduites à faible pente, où on n'ancre que les parties extrêmes.

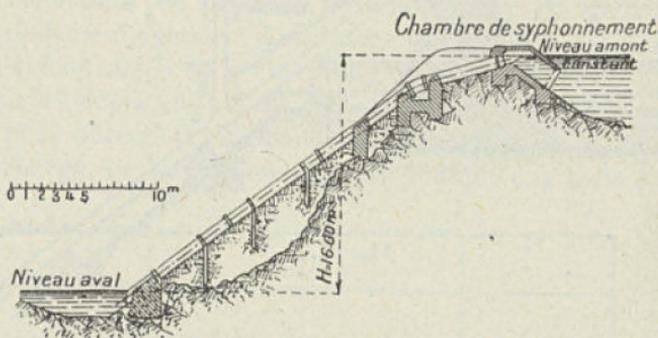


Fig. 49. — Dispositif d'ancrages pour conduite forcée.

Les canalisations à diamètres variables, le plus grand diamètre correspondant aux faibles pressions, établies de façon que la perte de charge moyenne soit celle demandée, sont tout indiquées pour réaliser une économie importante sur le poids total de la conduite.

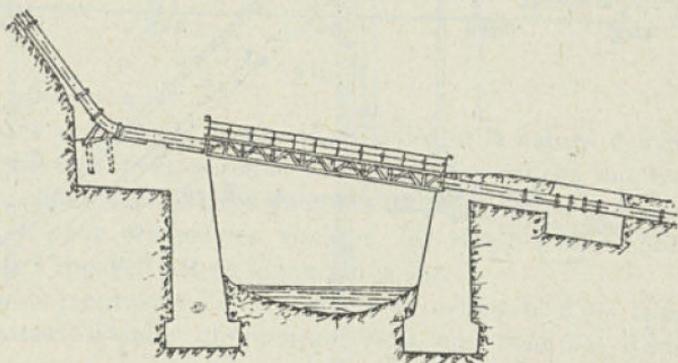


Fig. 50.

On dispose les tuyaux soit en terre ou en élévation, selon la configuration des terrains destinés à les recevoir. Si le sol est incompressible, on enterre la conduite à moitié diamètre et quelquefois dans une tranchée entièrement.

Dans certains cas, on loge les tuyaux dans un puits ou dans une galerie quand on craint des chutes de rochers. Le plus souvent les conduites reposent sur le sol en en suivant les sinuosités, ce qui nécessite parfois des travaux importants, tels que pylônes, passerelles, ponts, etc. La figure 50 a trait aux canalisations des usines de la Praz sur l'Arve (Savoie).

Quand les conduites sont supportées par des piliers, on dispose sur ces derniers des sabots en fonte ou en tôle qui embrassent les tuyaux sur près de la circonférence et placés au droit des grandes viroles. Les piliers eux-mêmes reposent sur une tôle plate, qui elle-même reçoit un coussinet ou semelle de fonte libre de se déplacer suivant les mouvements de la conduite et selon les besoins de la dilatation.

Comme on le verra plus oin, on fait souvent reposer les conduites sur des berceaux en béton enterrés dans le sol, disposition qui présente l'avantage d'empêcher la déformation du tuyau pendant le remplissage. Le reste peut être recouvert d'une couche de gravier ou de terre pour éviter les effets de la dilatation.

Quand les conduites ne sont pas enterrées, il y a lieu de prendre des précautions contre les effets du soleil et du gel, soit qu'on peigne les tuyaux au blanc, soit qu'on laisse toujours un certain écoulement à l'eau. Dans ce dernier cas on admet pratiquement un débit de 1 mètre cube à l'heure et par mètre carré de surface exposée au refroidissement.

Les amarrages et massifs de butées, que nous examinons ci-

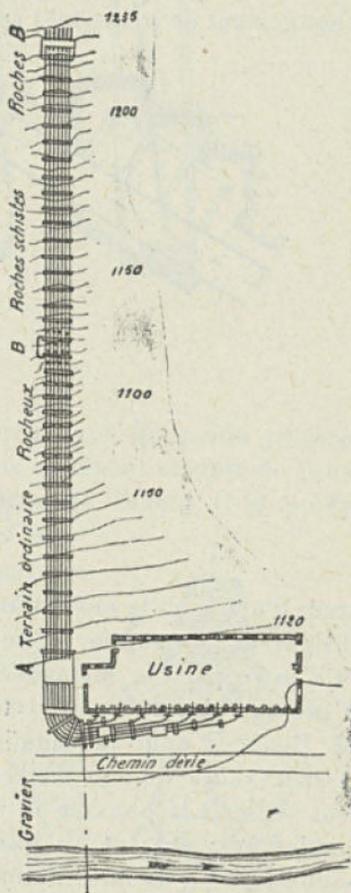


Fig. 51.

après, sont destinés à parer aux déboîtements dans les angles; on amarre et on bute encore des maçonneries pour parer aux déplacements transversaux quand la conduite n'est pas enterrée; enfin on amarre et on bute pour éviter un glissement en long, dernier cas qui n'est motivé que lorsqu'on a des sections rectilignes longues, à forte déclivité et aboutissant à un changement de pente très accentué. Les figures 51 et 52 mon-

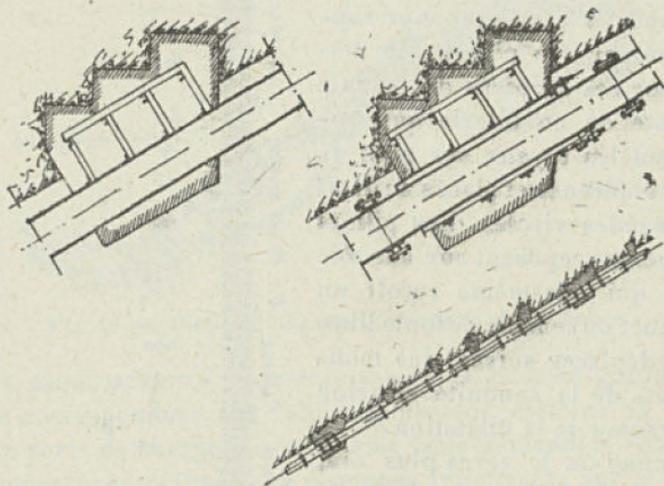


Fig. 52.

trent d'une part le mode d'installation des conduites de l'usine d'Eget, devant supporter la charge due à une chute de 710 m., et d'autre part le dispositif Bouchayer appliqué aux massifs d'ancrage. La figure 53 a trait au genre de joint adopté par M. Boucher pour la canalisation en tôle soudée de l'usine d'Orlu (chute de 940 mètres). Dans les parties verticales, il faut veiller à la poussée au vide en encastrant solidement les coudes adjacents et, au bas de la conduite, en disposant un solide caisson de butée, ainsi qu'à l'extrémité supérieure de la conduite (usine et chambre d'eau).

Soient D et d les diamètres extérieur et intérieur de la conduite, R le travail dû à l'allongement de celle-ci sous l'effet de la dilatation, on aura pour l'effort total F de tension due à la dilatation :

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times R;$$

D et d en millimètres et R pris égal à $10^{k,5}$ par millimètre carré pour une variation de température de 50° C.

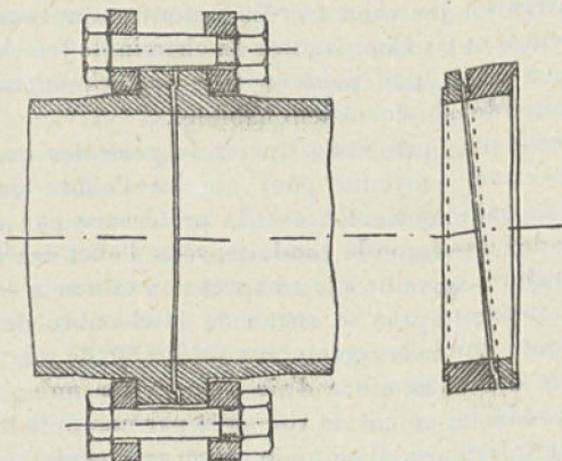


Fig. 53.

A cet effort il faut ajouter celui provenant du poids propre des canalisations et de l'eau contenue, en tenant compte de l'angle α que fait la conduite avec l'horizontale. Soient P le poids de la conduite entre deux ancrages successifs, f le coefficient de frottement; la formule générale qui permet de calculer les amarrages est ;

$$F' = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times R + P(\sin \alpha - f \cos \alpha),$$

qui donne le moyen de calculer le massif d'ancrage ou de butée, lorsqu'on ne peut compter sur le rocher comme appui. Aux changements de direction, généralement accusés par un coude, on appuie celui-ci contre un massif de maçonnerie capable de résister à la poussée de l'eau (fig. 54). Il est nécessaire pour un bon équilibre que la direction de la résultante des forces coupe CD au tiers au moins de cette base à partir du point D. Pour réaliser cette condition, il convient d'égaliser le moment de la force Q par

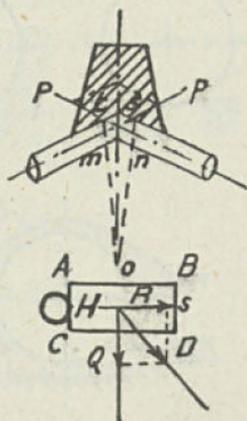


Fig. 54.

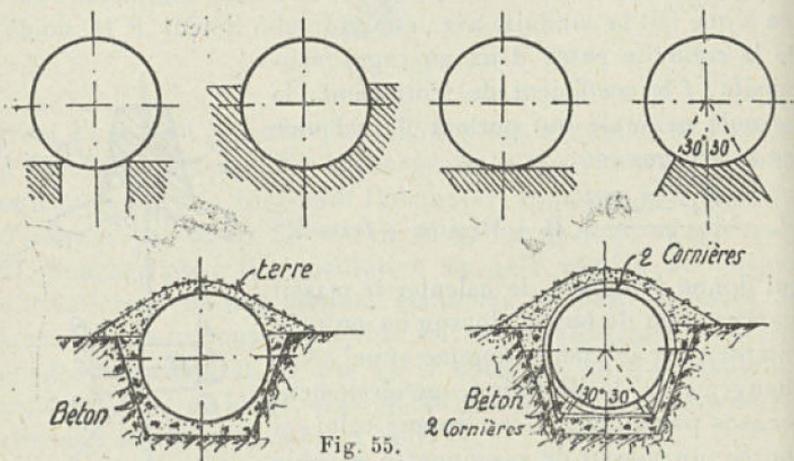
rapport au point D au triple moment de R par rapport au même point.

Les traversées des voies ferrées se font toujours par passages inférieurs, et les Compagnies de chemin de fer exigent que l'on donne à la tôle une épaisseur telle que celle-ci ne travaille qu'à la moitié de son coefficient habituel.

On cherche pratiquement à opérer la pose des conduites à une température moyenne pour réduire l'effort de tension résultant de l'allongement, mais de préférence par un temps froid, car de cette façon la conduite, sous l'effet des variations de température, travaille à la compression et non à la tension.

Immédiatement après sa sortie de la chambre de mise en charge, toute conduite ayant plus de 0^m,80 de diamètre doit être suivie d'une cheminée d'air pour éviter qu'un aplatissement se produise, en cas de vide créé par une fuite importante à sa partie inférieure. Quant à la mise en charge, elle doit se faire avec la plus grande prudence.

Ancrages et appuis des conduites. — La partie inférieure de la conduite est de beaucoup la plus fatiguée; aussi y a-t-il grand



intérêt à appuyer la canalisation suivant une zone d'une certaine largeur. Comme on le voit par la figure 55, on dispose les conduites de grand diamètre sur des fondations épousant la forme circulaire des tuyaux, embrassant la demi-circonférence et plus.

Dans les cas où on a recours à des appuis espacés, on établit en ces endroits des armatures transversales très robustes, les tôles étant raidies par des armatures longitudinales dans l'intervalle de deux armatures transversales successives. Lorsque les conduites sont appuyées d'une façon continue, c'est-à-dire sur toute leur longueur, on évite les effets des flexions longitudinales entre appuis isolés, et l'on n'a à s'occuper que des flexions transversales.

Les tuyaux disposés aux coudes doivent être particulièrement solides. Pour les chutes dépassant 300 mètres, il est indiqué d'employer des tubes soudés ensemble à recouvrement pour la partie la plus basse de la conduite.

34. **Calculs. Applications numériques.** — I. Soit une conduite forcée constituée par une seule file de tuyaux réunissant la chambre d'eau au collecteur des turbines. Supposons que la conduite ait 600 mètres de longueur et que nous consentions à perdre 5 p. 100 de la chute totale, qui est de 60 mètres.

La perte de charge par mètre sera donc :

$$J = \frac{60 \times 5}{100} : 600 = 0^m,005.$$

Et : $Jl = 0,005 \times 600 = 3$ mètres.

Appliquons la formule Lévy; en faisant $D = 1^m,50$, on aura pour l'expression de la vitesse :

$$U = 20,5 \sqrt{0,75 \times 0,005 (1 + 3\sqrt{0,75})},$$

soit : $U = 2^m,35$.

Le débit correspondant aura pour valeur :

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times 2,35 = \frac{\pi \times 1,50^2}{4} \times 2,35 = 4^m^3,2 \text{ à la seconde.}$$

La formule Bresse : $D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{Q^2}{J}}$, fournirait : $D = 1,70$.

La puissance sur la turbine sera :

$$N = \frac{QH}{75} \times \frac{75}{100} = \frac{QH}{100} = \frac{4200 \times 57}{100} = 2.394 \text{ HP.}$$

D'après le § 69, la tôle de 5 mm. conviendra jusqu'au point où le niveau de l'eau sera en contre-bas de 35^m,60 du niveau

minimum de la chambre d'eau (l'épaisseur de 5 millimètres est un minimum pour éviter l'ovalisation du tuyau à vide et au remplissage). Pour une épaisseur de 6 mm. et $R = 8$ kilog., on aura : $h = 42^m,50$; pour 7 mm. et $R = 8$ kilog., $h = 50$ mètres, et enfin, pour de la tôle de 8 mm. et $R = 7^k,00$, on a $h = 56$ mètres. On pourra majorer de 20 p. 100 pour tenir compte des coups de bélier.

II. Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de 1500 mètres de longueur, la chute étant de 80 mètres, le débit à utiliser de 4 mètres cubes à la seconde et la vitesse d'introduction de l'eau dans le moteur hydraulique de 35 mètres à la seconde. Le débit dont on dispose étant entièrement à utiliser, il sera donc présentement celui que doit absorber la ou les turbines à installer.

La section s de la veine liquide admise à la vitesse que nous nous sommes imposée est donnée par la relation :

$$s = \frac{4^m}{35^m} = 0^m,114.$$

La charge capable d'imprimer à l'eau la vitesse de 35 mètres est :

$$h = \frac{35^2}{2g} = \frac{1225}{19,62} = 62^m,40.$$

La puissance disponible ou fournie par la chute est :

$$W = 1000 \times 3 \times 62,40 = 185\,200 \text{ kilogrammètres, soit } 2500 \text{ HP.}$$

En appliquant la formule ci-après pour la détermination du rayon r de la conduite :

$$r = \sqrt{\frac{2f \times s^2 \times h \times l}{\pi^2 (H - h)}};$$

où : f (pour parois peu encrassées) = 0,0075, l est la longueur de la conduite et H la hauteur de chute, on obtient :

$$r = \sqrt[5]{\frac{2 \times 0,0075 \times 0,114^2 \times 62,40 \times 1500}{3,146^2 \times (80 - 62,50)}} = \sqrt[5]{0,1060};$$

$$\text{d'où } r = 0^m,620.$$

Par suite le diamètre = $1^m,24$ et la section $S = 1^m^2,207$.

Le rapport des sections :

$$\frac{s}{S} = \frac{0,114}{1,207} = 0^m,094.$$

La perte de charge : $Jl = 80 - 62,40 = 17^m,60.$

Et le rapport $\frac{Jl}{H} = \frac{17^m,60}{80} = 0,22.$

CHAPITRE V

BARRAGES

Rôle des barrages. — Digués en terre. — Barrages en béton ordinaire et en béton armé. — Barrages métalliques. — Barrages mobiles. — Barrages automatiques. — Grès barrages en maçonnerie. — Barrages-réservoirs. — Capacité des réservoirs. — Stabilité des barrages.

35. **Rôle des barrages.** — Un barrage, dans son acception la plus simple, est en principe un ouvrage destiné à diriger l'eau d'un cours d'eau dans un bief à l'effet de gagner une certaine hauteur de chute. De ce bief l'eau est amenée dans une chambre d'eau, laquelle eau, après avoir actionné un ou plusieurs récepteurs hydrauliques, se rend dans un canal de décharge ou de fuite. Par suite de l'établissement d'un tel ouvrage, le bief d'aval n'est nullement influencé au point de vue des variations du niveau de la surface, alors qu'il en est tout autrement pour le bief d'amont, qui peut être sensiblement modifié. Quoi qu'il en soit, une fois le régime permanent établi, le volume d'eau qui s'écoule dans l'unité de temps par le barrage est le même que celui qui s'écoulait par la section du cours d'eau, si le barrage n'est pas destiné à accumuler une réserve d'eau.

L'industrie moderne des chutes d'eau est venue apporter une modification très importante à ce genre d'installation en intercalant entre la chambre d'eau et l'usine réceptrice une canalisation emprisonnant l'eau à force, ce qui a révolutionné l'ancien

type d'aménagement des chutes d'eau et qui a permis de créer en pays de montagne des captations d'eau qui n'auraient pu jamais être utilisées sans la conception du tube de force. Lorsqu'on est en présence d'une rivière ni navigable ni flottable, on est libre d'établir le barrage directement en travers de la rivière et sur une largeur égale à celle du cours d'eau, sous la réserve que la retenue des eaux en amont, obtenue par l'établissement du barrage, ne gêne pas le service des usines existant sur le même cours d'eau et n'apporte aucun préjudice aux riverains. L'usine à alimenter peut être disposée soit en amont, soit en aval, ou contiguë au barrage.

Le niveau d'amont doit être maintenu tel que le barrage le produit pendant l'étiage et les eaux moyennes; mais, lors des crues, l'eau peut passer par-dessus la crête, et l'Administration fixe l'altitude de cette crête. L'opération par laquelle l'administration détermine la hauteur de retenue est connue sous le nom de « point d'eau » de l'ouvrage régulateur. Ainsi elle impose que la surface de l'eau en amont ne doit pas pouvoir accidentellement s'élever à plus de 0 m. 10 au-dessus du point d'eau, limite de la tolérance administrative. Celui-ci est lui-même fixé par cette considération que, pour les besoins des riverains, il faut que l'écoulement des eaux pour les besoins de l'agriculture puisse se produire normalement et qu'en tous les points du parcours le niveau de l'eau du cours d'eau soit maintenu à 0 m. 15 à 0 m. 20 en contre-bas des parties les plus basses des terres avoisinant les rives.

L'établissement d'un barrage, ou la dérivation plus ou moins complète des eaux par un canal d'amenée, ne peut être établi sans une autorisation de l'Administration, qui détermine les dispositions et les dimensions des ouvrages à créer, notamment du barrage, du déversoir de superficie, des vannes de décharge qui constituent ce que l'on appelle les « ouvrages régulateurs ».

Les grands barrages-réservoirs d'emménagement, même lorsqu'ils ont été édifiés en vue de la marche d'une seule usine hydroélectrique, ont une répercussion favorable sur le régime du cours d'eau à l'aval. Si l'usine avait la possibilité de retenir toute l'eau pour remplir sa réserve, le résultat de cette opération serait, il est vrai, d'assécher complètement le cours d'eau à l'aval durant toute la période de remplissage. Mais l'Admi-

nistration, quand elle autorise la construction d'un semblable ouvrage, a soin de prescrire à l'usinier de laisser en tout temps un volume minimum qu'elle fixe au mieux des intérêts généraux de la vallée.

Dans les usines dont l'écoulement de l'eau doit être constamment maintenu, on assure cette condition, quand l'usine est arrêtée, par une ouverture suffisante des vannes de décharge.

A l'aide des vannes et du déversoir, on arrive à maintenir constant le niveau d'amont pendant l'étiage et la saison moyenne; ce niveau ne s'élève que pendant les grandes eaux, alors que le niveau d'aval, au contraire, varie constamment avec le débit de la rivière. La différence des niveaux en amont et en aval constitue la hauteur de chute; par suite, l'énergie motrice varie aux différentes époques de l'année suivant le régime du cours d'eau.

Si la digue constituée par le barrage a une grande longueur, on donne au mur de l'ouvrage la forme d'un arc de cercle dont la convexité est tournée vers l'amont et formant déversoir lorsque le niveau d'amont dépasse le point d'eau; s'il s'agit de créer un réservoir dans une gorge, on construit un mur en maçonnerie reliant les deux talus de la gorge et on ménage à la crête un déversoir de trop-plein, ainsi qu'un ou plusieurs canaux à la base (aqueducs) munis de vannes pour la vidange.

A l'origine du canal d'amenée ou de dérivation on dispose une ou plusieurs vannes, constituant la passe à graviers. Au moyen de chasses, ces vannes enlèvent les dépôts au pied du mur et entretiennent un chenal profond. En temps de crues, la passe à graviers reste ouverte.

L'installation représentée par la figure 56 est la plus généralement adoptée. Le barrage de retenue B est disposé au droit ou à l'amont de l'usine *u*, et la prise d'eau se fait au moyen d'un canal d'amenée *pu*, qui conduit l'eau à l'usine qui utilise la chute. Le canal de fuite *uo* ramène les eaux à la rivière en aval du barrage. En N est le déversoir de superficie, qui, aux termes des règlements administratifs, doit avoir une longueur au moins égale à la largeur moyenne du cours d'eau. La crête de cet ouvrage est dérasée dans le plan du niveau légal, de telle sorte qu'avec le concours du barrage, qui fonctionne également comme déversoir, on ait une crête de déversement double de la largeur

de la rivière. Enfin le vannage de décharge V complète l'installation.

On peut remplacer le vannage unique en dessus par deux vannages, dont l'un, dit vannage de garde, suffit pour écouler les crues d'importance, tandis que le vannage de décharge n'a besoin d'être levé qu'à des époques espacées.

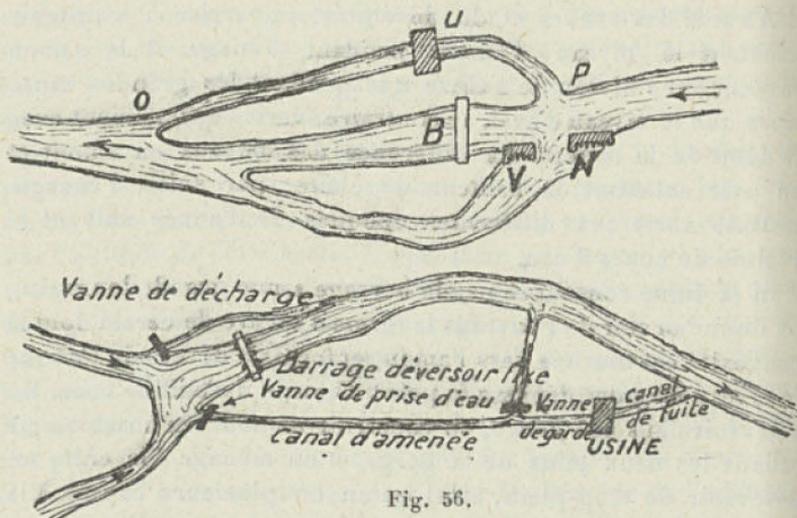


Fig. 56.

On dispose parfois (fig. 57) les galeries de décharge, une sur chaque rive du cours d'eau, pour écouler les crues sans que le barrage soit submergé. La retenue est limitée de chaque côté du barrage par un mur d'endiguement élevé à la même hauteur que les murs de tête des galeries de décharge. Le débouché du vannage de décharge se détermine pour permettre l'évacuation de la totalité des eaux de pleines rives, abstraction faite de la partie qui s'écoule par le déversoir. Quand le déversoir est destiné à l'écoulement des eaux ordinaires non employées par l'usine, une partie de sa crête est alors arasée, c'est-à-dire sur une fraction de sa longueur et à un niveau inférieur à celui de la retenue, pour donner passage aux eaux surabondantes.

Pour les hauteurs de retenue ne dépassant pas 20 mètres, les barrages ou digues en terre sont les plus indiqués, surtout le type à diaphragme central avec aqueducs de drainage,

type Ambursen. Pour dépasser cette limite, avec des barrages en terre, il est nécessaire d'employer des murs de pieds formant contreforts.

Pour les hauteurs moyennes jusqu'à 45 mètres on emploiera avec avantage des barrages en enrochements, avec large empattement à la base et avec un revêtement imperméable à l'amont. Ils sont les moins coûteux, surtout dans les pays où la main-d'œuvre manque pour la maçonnerie. On peut aussi faire appel aux barrages en béton armé en s'inspirant des règles générales indiquées par MM. Lévy-Salvador et Maynard.

Lorsque la retenue doit être supérieure à 45 mètres et atteint 60 mètres environ, les barrages en enrochements et ceux en maçonnerie, construits avec toutes les précautions voulues, entraînent des dépenses considérables, et le choix entre les deux types dépend des conditions spéciales à chaque région, eu égard surtout à la gravité et à la fréquence des mouvements sismiques.

Pour ces derniers, les barrages en maçonnerie tracés en arc et s'appuyant sur les flancs de la vallée, ou les barrages en arches multiples s'appuyant sur des contreforts inclinés sont ceux qui offrent le maximum de sécurité avec le moins de dépenses.

Enfin pour les retenues encore plus grandes, jusqu'à 110 mètres, on a recours à des barrages en maçonnerie calculés pour résister par leur propre poids, malgré les sous-pressions possibles, et munis des derniers perfectionnements, tels que : drainages, masques, galeries et puits d'inspection, joints de contraction, remblais et enrochements à la base et, éventuellement, armatures dans la partie supérieure. Il faut aussi

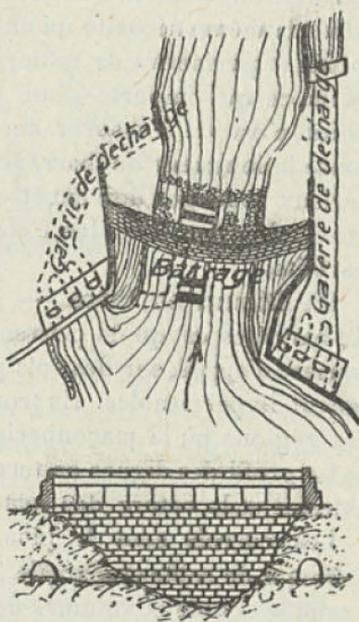


Fig. 57.

employer la forme en arc, avec un rayon de courbure décroissant pour le parement amont depuis la crête jusqu'au pied, pour que l'angle au centre soit aussi constant que possible. Si le barrage doit être construit dans une gorge rocheuse très étroite, on pourra réaliser une voûte effective qui donnera alors la même sécurité qu'un ouvrage résistant par son propre poids et permettra de réduire les dépenses environ de moitié. Mais ce qui importe pour de tels ouvrages, et au plus haut point, c'est de s'assurer de l'existence de la roche solide sur toute la longueur du barrage pour l'assise des fondations. De sérieux sondages doivent être faits à ce sujet, quelle qu'en doive être la dépense. De plus, l'étanchéité de ces ouvrages doit être parfaite.

36. Dignes en terre. — Le grand avantage de ces sortes de barrages est qu'ils peuvent être établis, grâce à leur grande surface d'appui, sur des sols peu résistants, à la condition qu'ils soient imperméables. Ils trouvent aussi leur raison d'être dans les régions où la maçonnerie reviendrait à un prix prohibitif.

Le profil des digues en terre varie suivant les circonstances locales et la nature des matériaux dont on dispose.

Les corrois sont le plus souvent établis au moyen d'un mélange de sable et d'argile ($\frac{2}{3}$ de sable pour $\frac{1}{3}$ d'argile, par exemple), ou deux volumes de terre pour un de gravier. Il convient dans tous les cas d'assurer l'étanchéité des talus soit par un revêtement en terre glaise, soit par un dallage de béton. Il faut en outre drainer convenablement les eaux provenant d'infiltration, au moyen de barbacanes ou de galeries.

On a édifié de ces ouvrages dépassant 70 mètres de hauteur.

Le noyau des digues en terre s'établit parfois soit en argile (fig. 58) (dignes anglaises), soit en fer.

La fig. 59 représente le barrage de Mexaca sur le Rio, qui a 55 mètres de hauteur, 372 mètres de longueur et une largeur maximum de 229 mètres. Il a été exécuté au moyen du procédé dit « remblayage hydraulique ». En Amérique, on réalise celui-ci en attaquant les terres par des jets d'eau puissants, sous une pression de 12 atmosphères et mélangées avec huit ou dix fois leur volume d'eau. Elles sont alors amenées sur le chantier dans des canalisations à forte pente et déversées à l'emplacement convenable par des tuyaux télescopiques; les matériaux

les plus fins et les plus riches en argile sont déposés au centre du barrage, les plus sableux de part et d'autre, et les graviers sur le talus; après tassement et départ de l'eau en excès, on obtient un massif parfaitement compact et imperméable.

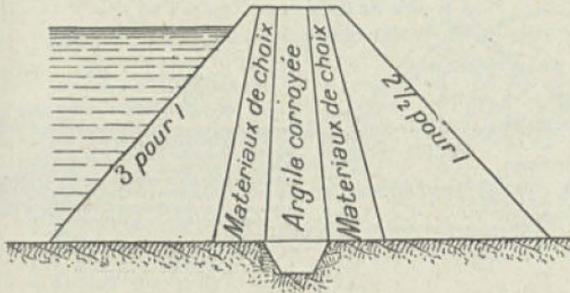


Fig. 58.

Les études de M. Resal sur la stabilité des digues en terre conduisent à reconnaître la nécessité d'adoucir progressivement les talus dépassant une certaine hauteur, c'est-à-dire de modifier les profils adoptés comme classiques depuis un quart de siècle. D'après M. Frontard, la hauteur dangereuse, c'est-à-dire

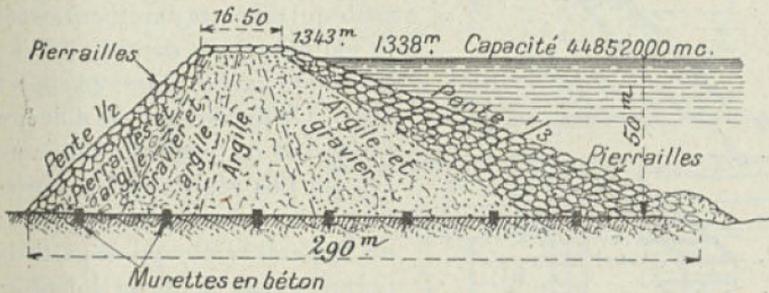


Fig. 59.

celle à partir de laquelle, selon la loi Resal, le talus doit être adouci, varie avec la proportion de gravier contenu dans les terres.

Pour les digues-réservoirs, on dispose au pied de la digue un « béton en terre » formé en mélangeant une forte proportion de gravier à la terre du remblai. On poursuit d'ailleurs l'adoucisement du talus en même temps que l'amélioration des remblais.

37. Barrages en béton ordinaire et en béton armé. — La figure 60 représente un type de barrage en béton de 105 mètres de long et 5 m. 70 de hauteur au-dessus de sa fondation. Le béton repose directement sur un banc d'argile com-

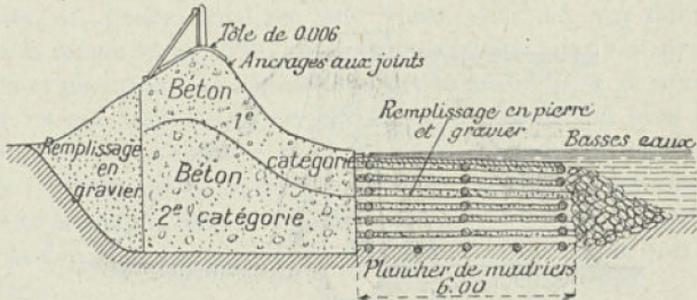


Fig. 60.

pect, et sa construction a été faite par tranches de 15 mètres de longueur reliées par joints, composés de feuilles de tôle réunies par un matelas en sable et glaise.

Le ciment armé pour les barrages est utilisé pour la construction d'ouvrages creux. Ce type de barrage consiste en une dalle qui forme le parement amont et est encastrée dans le sol. Le parement aval est aussi en ciment armé. Quand le barrage doit être fondé sur du gravier ou sur un terrain peu résistant, les contreforts s'appuient sur un radier en ciment armé qui répartit la pression sur toute la longueur de l'ouvrage. De distance en distance, ce radier est percé d'orifices pour la décharge des eaux d'infiltration et à l'effet d'éviter toute sous-pression.

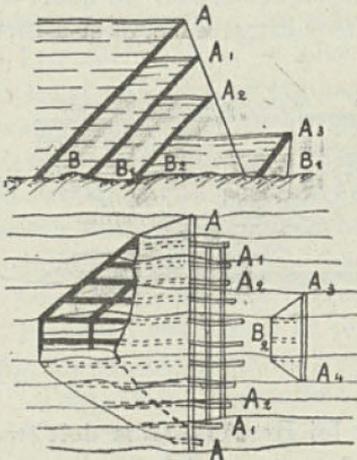


Fig. 61.

Parmi les barrages de forme particulière on peut signaler celui de M. Ruthemberg, dit à charge perfectionnée, et qui consiste à barrer la vallée (fig. 61) par une série d'écrans transversaux, obliques par rapport à l'horizontale et de hauteur décroissante.

Dans le type Ambursen, on utilise l'intérieur du barrage pour l'installation de l'usine (fig. 62).

La barre américaine dite « crénelée » a reçu son application dans la construction des barrages creux. Ce genre d'ouvrage est composé de cloisons verticales ou contreforts en béton armé aussi, disposées parallèlement à la direction du cours d'eau; ces cloisons sont destinées à servir de points d'appui au pont

ou barrage (partie amont) et au tablier (partie aval), composées toutes deux de dalles en béton armé plus ou moins inclinées par rapport à la verticale.

L'effort maximum que l'on se permet, dans ces ouvrages, sur l'acier des barres crénelées, est de 8 à 9^k,50 par millimètre carré. Un ouvrage important à signaler est le barrage-réservoir de Guayabal à Porto-Rico, qui a 42 mètres de hauteur, y compris les fondations, et 230 mètres de longueur.

En Amérique on a été amené, pour les barrages en béton armé, à incliner le mur proprement dit à 45° vers l'aval, l'ex-

trémité des contreforts n'étant plus que légèrement inclinée en sens inverse. Un barrage de ce genre a été construit en France sur la Sélune (Manche) (fig. 63); le plan de naissance de la

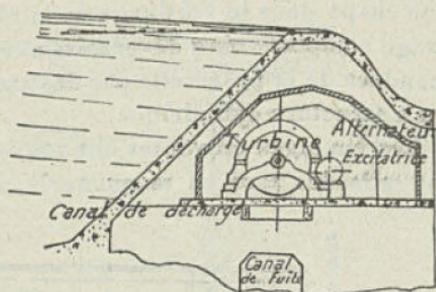


Fig. 62.

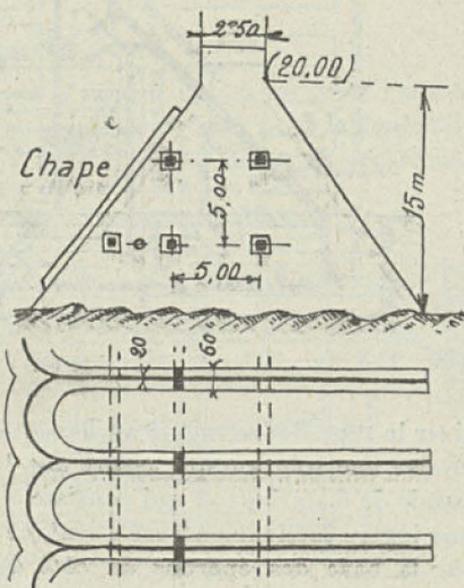


Fig. 63.

santes études sur les barrages en ciment armé. Un type de barrage qu'ils préconisent est constitué en principe par une ossa-

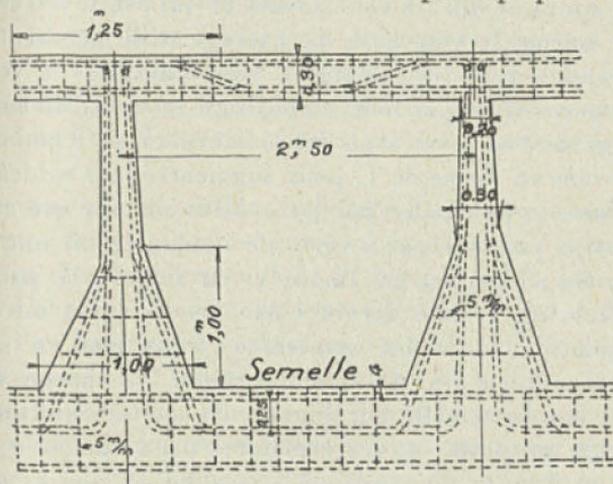


Fig. 65.

ture en béton armé (fig. 64 à 66) inclinée à 45° vers l'amont, ancrée en amont dans la maçonnerie de base pour la consolidation de l'ouvrage et pour faire obstacle aux sous-pressions¹.

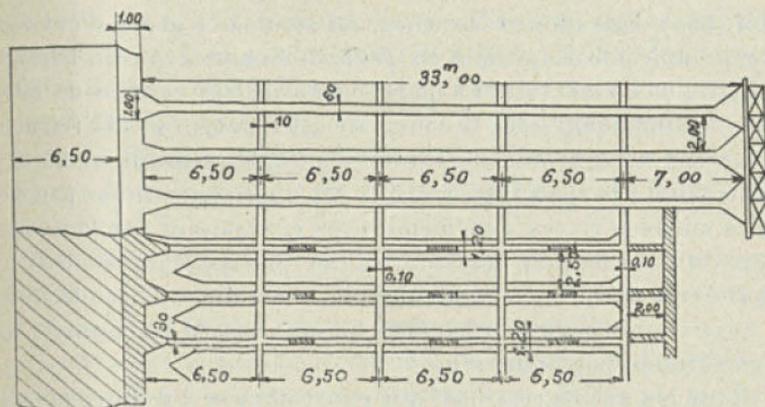


Fig. 66.

Cette ossature est supportée de distance en distance et d'une façon régulière par des cloisons verticales en béton armé,

1. *Revue Générale d'Électricité*.

évidées. Les membrures reposent sur la maçonnerie par une semelle continuée qui les relie toutes et qui est noyée et scellée dans la maçonnerie de base du barrage. Ces membrures sont contreventées par des armatures longitudinales et verticales évidées permettant par leur disposition en croix de supporter la charge de l'eau; en aval, les membrures se terminent par une nervure en forme de T, pour augmenter leur raideur.

Un autre type étudié par les mêmes auteurs est constitué en principe par une paroi verticale implantée sur une semelle horizontale s'étendant en amont et en aval de la paroi verticale et reliée à cette dernière par des nervures ou cloisons rectangulaires, dont les armatures travaillent en amont à l'extension et en aval à la compression. La charge verticale de l'eau sur la semelle horizontale en amont équilibre alors la traction produite sur les armatures par la poussée de l'eau retenue.

Les barrages-réservoirs en béton armé de Saint-Paul (États-Unis) et de la Scoltenna sont des spécimens intéressants de ce genre de construction.

38. Barrages métalliques. — Les barrages en acier commencent à devenir de construction courante aux États-Unis. MM. Lévy-Salvador et Maynard ont soumis ce genre d'ouvrage à une étude toute spéciale en prenant comme type un barrage constitué comme suit. La paroi verticale est formée de tôles semi-cylindriques dont la concavité est tournée vers la retenue, rivée aux membrures verticales. Les tôles travaillent ainsi à l'extension. La paroi horizontale est aussi constituée par des tôles cintrées rivées aux membrures et reposant sur la maçonnerie d'embase, bien garantie contre les sous-pressions. Puis sous cette paroi horizontale de tôle, il est disposé une barrette à l'extrémité arrière du barrage, noyée dans la maçonnerie sur une certaine profondeur.

Pour les sous-pressions qui pourraient se produire entre la face inférieure de la maçonnerie et le sol naturel, il est ménagé dans la maçonnerie de base un réseau de drains pour collecter les infiltrations et les écouler vers l'aval, de manière qu'elles soient nulles à l'aval.

39. Barrages mobiles. — Ces barrages, en dehors de leur application à des installations de force motrice, sont utilisés

dans un grand nombre de fleuves pour les rendre navigables, en relevant leur niveau d'eau pendant l'étiage et en permettant de laisser libre la largeur du cours d'eau au moment des crues. Les modes de construction en usage sont fort nombreux, et on peut les répartir en deux groupes : ceux qui se relèvent du lit à la surface et ceux qui s'abaissent de la surface au lit.

En général, les conditions imposées à un barrage mobile sont différentes dans chaque cas, suivant la nature du cours d'eau, le niveau d'eau des crues et de l'étiage, le sable, les graviers qui sont charriés; mais toutes ces circonstances conduisent à exiger d'un barrage la réalisation des trois conditions principales suivantes : 1° lorsque le vannage est abaissé, le barrage doit être parfaitement étanche; 2° quand le vannage est levé, le barrage doit laisser libre passage aux crues, aux graviers et aux glaces, et 3° la manœuvre de levage du vannage et réciproquement sa mise en place doivent pouvoir se faire avec une sécurité absolue, avec l'emploi du minimum de force et avec une vitesse en rapport avec les circonstances. La condition de libre passage des crues, des graviers et de la glace exige, lorsque le barrage est levé, qu'aucun organe important du barrage ne reste dans le lit du cours d'eau, où il serait exposé aux détériorations causées par les matériaux charriés. Sur les torrents ou les fleuves roulant des graviers et des glaces, on ne peut faire usage des *barrages à aiguilles*, car les fermettes rabattues dans le cours d'eau seraient vite usées par les apports mouvants; d'autre part, ce système ne convient que pour les faibles retenues d'eau.

Les *barrages à pauneaux*, pivotant autour d'un axe horizontal fixé sur un radier établi dans le lit de la rivière, ne sont pas d'un meilleur emploi que les barrages à aiguilles.

Le *barrage à rideaux*, système Caméré, permet d'obtenir des retenues de 4 à 5 mètres de hauteur et ne laisse en temps de crue aucun organe dans le fleuve. Il consiste, en principe, en des rideaux à lames de bois, formant barrage, qui se déroulent sur des supports verticaux s'appuyant, d'une part, en bas, sur un seuil à ressaut dans le lit de la rivière, et d'autre part, en haut, sur un axe fixé sous un tablier métallique. Lors des crues, on retire les rideaux en les enroulant à l'aide d'un treuil et on relève

ensuite les supports en les rabattant sous le tablier, de façon qu'il ne reste aucun organe en dehors des piliers en maçonnerie qui peuvent être espacés.

La fig. 67 représente un barrage muni de vannes à bascule; une seule vanne suffit pour évacuer les eaux ordinaires et les eaux de crues, les autres vannes complémentaires ne servant

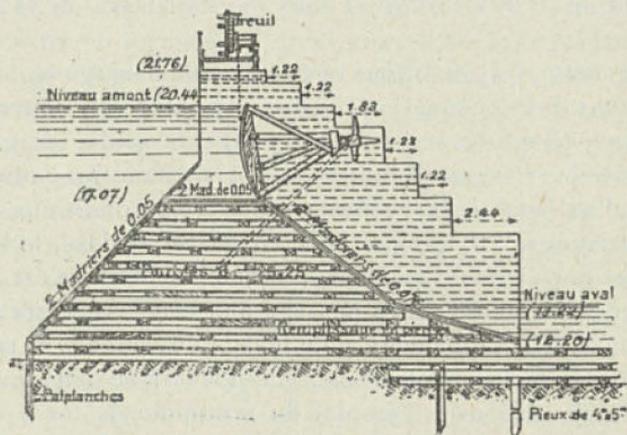


Fig. 67.

qu'en cas de rupture d'autres barrages situés en amont. La manœuvre de ces vannes se fait du haut de la passerelle, au moyen d'un treuil que l'on déplace sur une voie pour la commande des autres vannes.

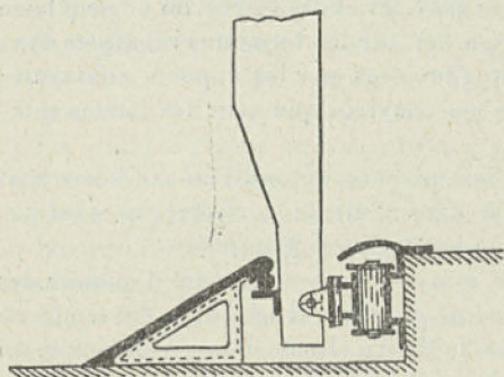


Fig. 68.

pour diminuer le frottement des vannes, suspendues par des chaînes, on les fait rouler sur des trains de galets et, pour réduire l'effort de levage, on équilibre en partie le poids de la vanne à l'aide de contrepoids. Les vannes bien connues

du « type Stonney » appartient à ce genre de barrage (fig. 68).

Partant de la conception de substituer le frottement de roulement sur les piliers au frottement de glissement, M. Kœchlin a imaginé un barrage mobile constitué par un corps cylindrique roulant sur des rails ou crémaillères établis aux deux extrémités dans la maçonnerie, système qui a reçu des applications en Allemagne et dans les Alpes françaises.

Ces barrages, que l'on appelle *barrages à cylindres ou à tambours*, peuvent s'appliquer aux grandes hauteurs de retenue. Alors le vannage est composé d'un tablier plan ou bombé dirigé vers l'amont, d'un cylindre de plus faible diamètre supportant les efforts de torsion et de flexion et relié convenablement au tablier amont, et enfin de deux tambours de roulement fixés aux extrémités du cylindre et portant les couronnes de roulement, les couronnes dentées et les couronnes sur lesquelles s'enroulent les câbles ou chaînes de manœuvre.

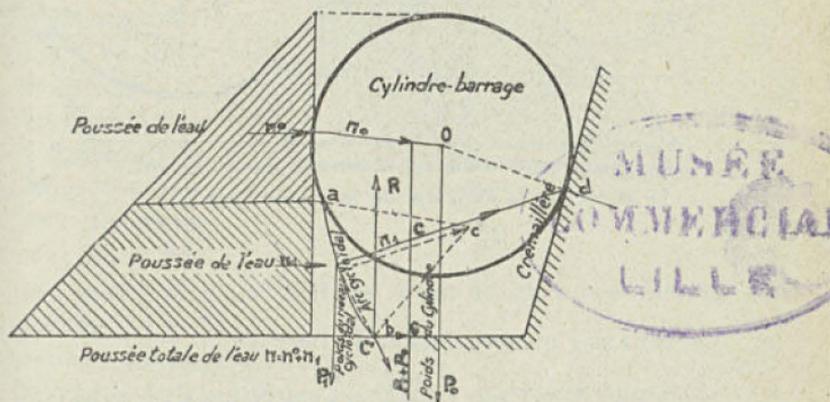


Fig. 69.

L'usine de Saint-Julien-de-Maurienne (Savoie) possède une installation de ce genre qui a donné toute satisfaction. Les figures 69 et 70 montrent l'équilibre des forces agissant sur le type de barrage réalisé dans cette installation.

La charge à laquelle il a à résister se compose du poids propre du cylindre, soit 60 tonnes, plus le poids propre de l'eau, soit 4,7 tonnes, moins la poussée verticale de l'eau de bas

en haut égale à 19 tonnes; il reste donc, pour la résultante des forces verticales, 45,7 tonnes.

La poussée horizontale de l'eau a pour valeur :

$$\frac{3^2}{2} \times 30 = 135 \text{ tonnes,}$$

la retenue étant de 3 mètres de hauteur.

Par suite, la résultante générale est :

$$\sqrt{45,7^2 + 135^2} = 143 \text{ tonnes.}$$

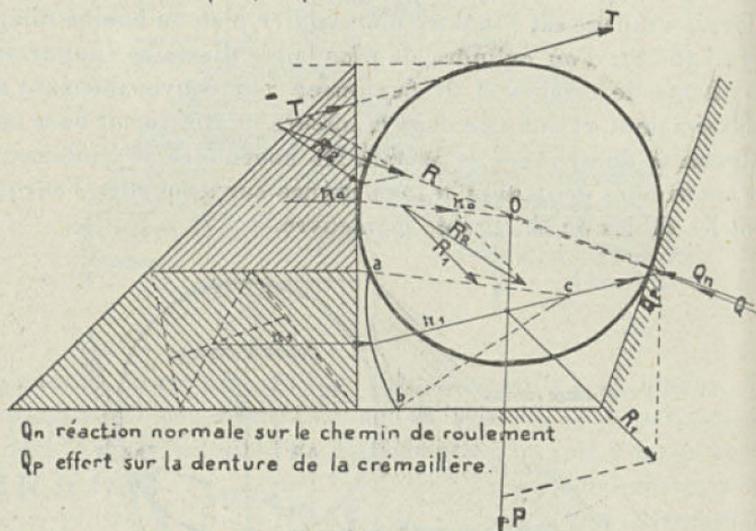


Fig. 70.

Soit par mètre courant du barrage :

$$\frac{143}{30} = 4,767 \text{ tonnes.}$$

Dans le cas où l'eau s'élève jusqu'à 2 mètres au-dessus du cylindre, ce dernier chiffre atteint une valeur de 11,1 tonnes.

Les calculs montrent que les taux de fatigue du métal sont : à la flexion, pour le cas des crues, 1 t/cm² 759; à la torsion, 0 t/cm² 025; à la flexion et torsion combinées, 0 t/cm² 755; au cisaillement, 0 t/cm² 067, et au cisaillement et torsion combinés, 0 t/cm² 259.

M. Camagni a imaginé un système de barrage mobile à hauteur d'eau réglable qui se compose de panneaux inclinés dont la

partie basse est à l'aval. Ces panneaux peuvent tourner autour d'axes horizontaux passant dans les supports fixés sur les deux rives et qui sont appuyés par le bas sur un seuil au fond du cours d'eau. Un certain volume d'eau, venant d'amont dans un coffrage et par des ouvertures percées dans le panneau, sert de lest à ce dernier, formant ainsi un poids qui fait équilibre à la poussée de l'eau d'amont quand le niveau est au maximum permis. Lorsque le niveau a tendance à s'élever, la poussée devient prépondérante et le panneau se soulève, perdant un peu de sa charge d'eau, et laisse ainsi passer l'eau d'amont entre son bord inférieur et le seuil.

Divers autres systèmes ont été préconisés par MM. Walfschütz, Karl Hromas, Persil frères, que le cadre de cet ouvrage ne nous permet que de citer.

Les « barrages à secteurs », fréquemment employés aux États-Unis, consistent en des panneaux mobiles en forme de secteurs cylindriques en tôle pleine maintenus par une charpente appropriée et susceptibles d'être abaissés et relevés en tournant autour de leur axe horizontal, pour créer une retenue d'eau de quelques mètres de hauteur (fig. 71 et 72).

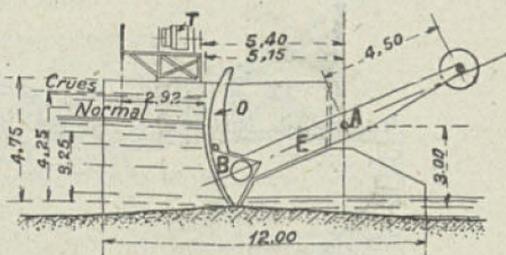


Fig. 71.

Ces secteurs sont parfois creux.

40. **Barrages automatiques.** — Les « barrages automatiques » ont pris de nos jours une large extension. Les barrages du type « Singrün », qui ont pour but de maintenir la constance du niveau réglementaire en amont du barrage, se composent en principe d'un clapet articulé à sa partie inférieure et retenu à son extrémité supérieure par des câbles s'enroulant d'autre part sur un cylindre-contrepois qui peut se déplacer sur deux chemins de roulement séparément installés sur chaque rive. La tension provenant de l'eau et agissant sur le clapet tend à faire monter le contrepois. Il y a équilibre de l'appareil quand les mouvements du poids propre G du rouleau et de la tension des

câbles par rapport au point de contact du rouleau et de la courbe sont égaux ($G'l_1 = Zl_2$) (fig. 73). Quand le débit de la rivière augmente, si le niveau doit rester constant, il faut que le clapet s'abaisse pour laisser passer l'eau en excès, en même temps que le contrepoids se déplace jusqu'à ce que le système retrouve une position d'équilibre ($G'l_1 = Z'l_2$) assurée par une

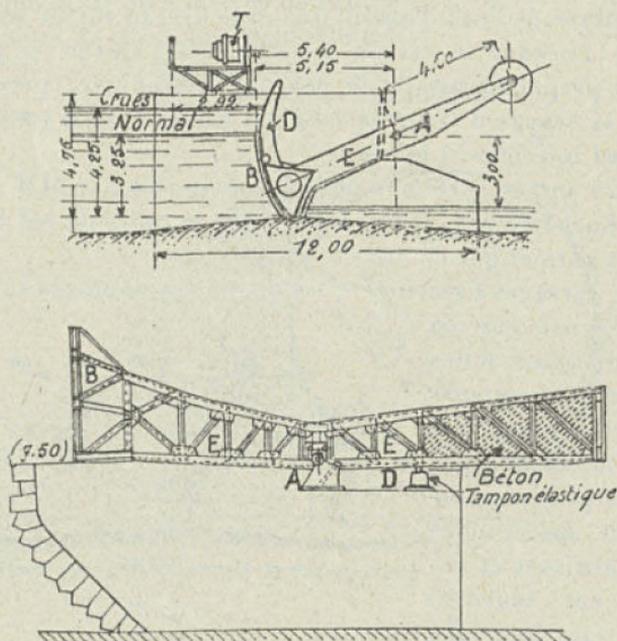


Fig. 72.

nouvelle direction convenable de la courbe, car, le niveau tendant à s'élever, la pression sur le clapet augmente ainsi que la tension des câbles. L'équation d'équilibre est rompue au profit de Z . Le rouleau se met donc en mouvement de lui-même; si le débit diminue, on aura naturellement un mouvement inverse. Cet appareil est dit automatique par contrepoids à rouleau supérieur.

D'autres dispositifs s'établissent avec contrepoids à rouleau inférieur.

La Société des Barrages automatiques de Zurich a réalisé à l'aide de ses appareils de très importantes installations. Les

vannes automatiques de ce genre installées sur le barrage de l'usine de Chavaroché (Haute-Savoie) ont permis de s'adapter à un régime de cours d'eau particulièrement torrentiel, charriant de grandes quantités de gravier et présentant à l'endroit du barrage une très faible pente qui ne permet pas, par suite, de

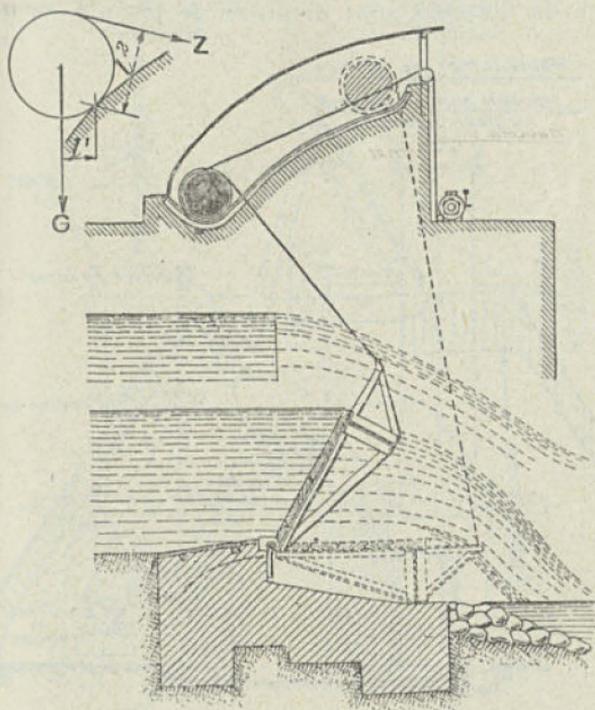


Fig. 73.

disposer d'une chute d'eau suffisante pour l'aménagement des paliers.

Les vannes constituant cette installation sont formées (fig. 74) d'une construction métallique en forme de segments recouverts d'un revêtement de bois et mobile autour d'un axe horizontal disposé au-dessus du niveau de l'eau et en arrière des vannes. Les tourillons de rotation prennent appui sur les piles latérales (piles de rive et pile centrale). Des contrepoids en béton logés dans des puits disposés de chaque côté et en avant des vannes sont reliés directement aux segments par l'intermé-

diaire de chaînes et de poulies de renvoi et tendent à relever les vannes. Deux autres contrepoids sont disposés des deux côtés du barrage dans des puits aménagés dans les piles et suspendus par l'intermédiaire de poutres transversales aux bras de leviers reliant les tourillons aux segments. Par leur poids ils tendent à abaisser les vannes. Ces contrepoids creux et faisant office de flotteurs sont disposés de façon à ce qu'ils se

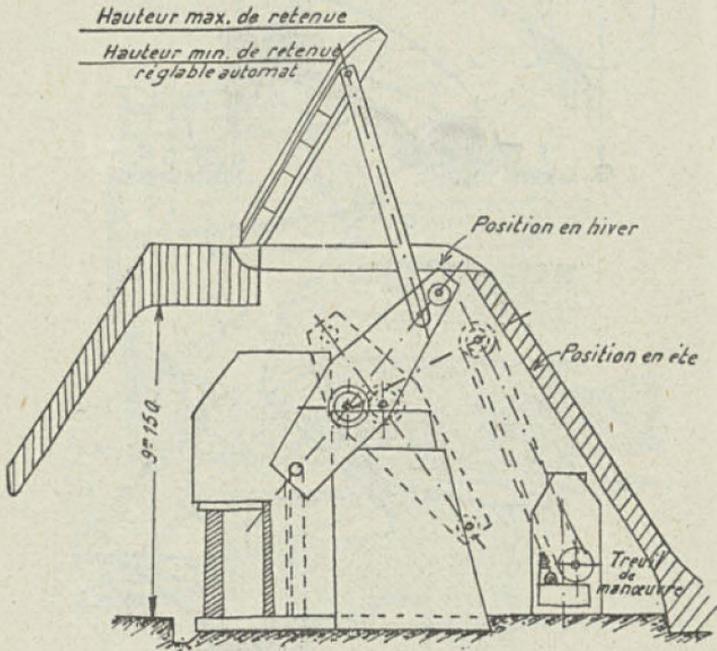


Fig. 74.

trouvent, pour toutes les positions de la vanne, au-dessous du niveau amont et, dans leur position la plus basse, lorsque la vanne est fermée, au-dessus du niveau normal à l'aval. Les puits sont reliés deux à deux, par une conduite aménagée dans le seuil du barrage. Chacune de ces conduites est prolongée et reliée à un déversoir circulaire disposé dans la maçonnerie de la prise d'eau à l'entrée du canal de l'usine et en arrière de la grille (fig. 75).

Ces deux déversoirs correspondent chacun à une des deux vannes se trouvant réunies dans une chambre commune séparée

du canal par de petites parois, tandis qu'une grille met cette chambre en communication avec le bief amont. Une commande par vis et écrou disposée sur la passerelle de service de la grille permet de faire varier la hauteur du bord supérieur des enton-

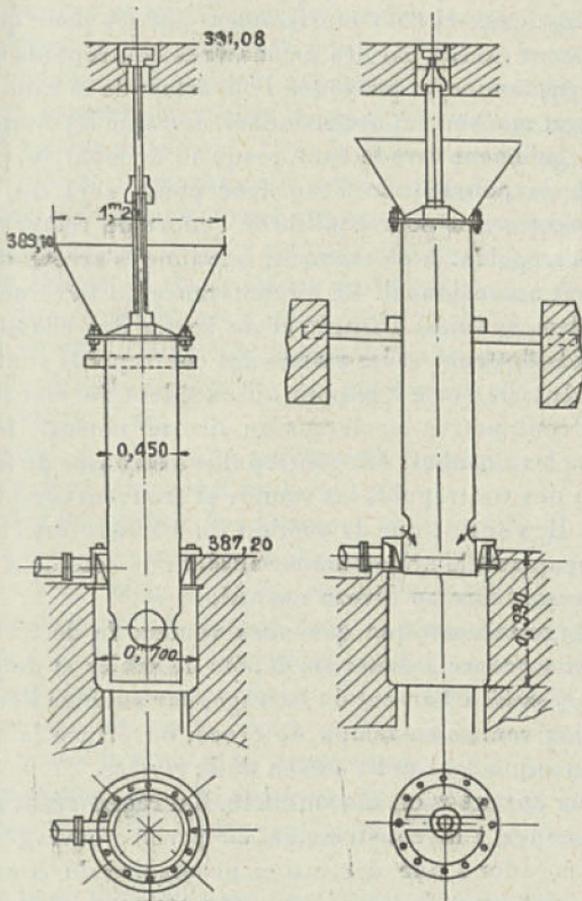


Fig. 75.

noirs, qui sont prolongés par un cylindre muni de larges ouvertures radiales normalement en dessous du presse-étoupe dans lequel coulisse la partie cylindrique.

Le fonctionnement du barrage a lieu comme suit : Aussitôt que le niveau amont s'élève de quelques centimètres au-dessus du niveau normal, les chambres des contrepois flotteurs se

remplissent partiellement avec l'eau qui s'écoule par-dessus les déversoirs. Les contrepoids s'allègent par l'effet hydrostatique, et au moment où l'eau, dans la chambre des contrepoids-flotteurs, atteint à peu près la moitié de la hauteur de ces contrepoids, ceux-ci sont suffisamment allégés pour que l'effet de relèvement exercé par les deux autres contrepoids reliés au segment prédomine et provoque l'ouverture de la vanne. Celle-ci, dans son mouvement ascensionnel, entraîne les contrepoids-flotteurs également vers le haut, jusqu'au moment où, par diminution de la poussée de l'eau, leur poids sera de nouveau suffisamment accru pour équilibrer l'effort de relèvement des autres contrepoids. A ce moment, la vanne s'arrête dans son mouvement ascensionnel. La circonférence du déversoir et les sections des conduites d'entrée et de sortie des chambres des contrepoids-flotteurs et les masses des contrepoids sont dimensionnées de telle sorte que pour un excédent du niveau amont de 5 à 6 centimètres au-dessus du niveau normal, le niveau d'eau dans les chambres des contrepoids s'établisse de façon que par le jeu des contrepoids les vannes se trouvent complètement ouvertes. Il s'ensuit que la section du barrage est complètement libre quand le niveau amont atteint une cote de 5 à 6 centimètres supérieure au niveau normal.

Le barrage automatique que nous venons de décrire a paru aussi le plus propre à éviter les dépôts de sables et de graviers dans le bief créé à l'amont du barrage, par suite de l'ouverture certaine des vannes en temps de crues, ouverture laissant un passage presque égal au lit ancien de la rivière.

41. Gros barrages en maçonnerie. Barrages-réservoirs. — Pour procéder à la construction de pareils ouvrages, il faut d'abord procéder à une dérivation provisoire du cours d'eau dans une des berges de la rivière, suffisante pour assurer l'écoulement de celle-ci, puis on barre le cours d'eau dans sa partie médiane. Pour cela on établit deux ou plusieurs batardeaux et on construit les parties du barrage à droite et à gauche des intervalles ménagés par ces batardeaux, ainsi que les parties en prolongement à édifier sur les rives, généralement constituées par des rochers.

On édifie le plus souvent ces batardeaux en maçonnerie pour qu'ils puissent davantage résister aux crues susceptibles de se

produire pendant le cours des travaux. Les fondations du barrage une fois terminées, on remplit à l'aide d'un béton les vides entre les batardeaux et le mur-barrage.

Pour l'établissement des fondations, il faut, ainsi que nous l'avons indiqué, procéder par de nombreux sondages à une reconnaissance aussi minutieuse que possible de la nature du sol. Les fondations s'exécutent généralement à sec après avoir bouché les fissures du rocher d'appui, s'il en existe, par des injections à refus de ciment. Dans le sens transversal et horizontal, on établit la maçonnerie avec des redans angulaires.

L'étanchéité de la face amont s'obtient en recouvrant le parement d'un enduit de 0^m,03 à 0^m,05 d'épaisseur au mortier de ciment de Portland, d'un dosage de 600 kg. au mètre cube de sable. Sur ce revêtement on applique à chaux une couche de coaltar revêtue elle-même d'un lait de chaux pour éviter la trop grande absorption des rayons solaires quand le barrage est partiellement vidé.

On emploie aussi comme revêtement étanche une feuille de métal entre deux couches d'asphalte.

En général les noyaux des barrages sont établis en maçonnerie ordinaire avec mortier de chaux hydraulique (350 kg. par mètre cube de sable), sable de rivière et roche du pays. La proportion de mortier entrant dans la maçonnerie doit être supérieure à 35 p. 100, qui correspond aux mesures de construction ordinaire. Les parements secs, tant à l'amont qu'à l'aval, ainsi que les pieds droits et l'intrados des voûtes des aqueducs (quand il y en a) se construisent avec des moellons têtus, par assises réglées, dressées d'équerre, dans les lits et joints au moins sur 0^m,15 et ayant de 0^m,30 à 0^m,45 de longueur de queue.

Avec de bons matériaux on peut faire travailler les maçonneries, sans danger d'accident, jusqu'à une limite de 12 kg. par centimètre carré, à condition cependant que le sol offre une grande sécurité. Quant à la résistance au glissement, il faut vérifier si la poussée de l'eau est supérieure au produit du poids de la maçonnerie par le coefficient de frottement de maçonnerie sur maçonnerie (0,70 à 0,75), et cette condition doit être réalisée dans n'importe quel joint de l'ouvrage ainsi que sur la ligne de base du barrage, et pour cette dernière on ne doit

pas tenir compte du surcroît de stabilité résultant de l'encastrement de cette base dans le terrain naturel.

Dans la construction des barrages sur des rivières à grand débit et éventuellement à fort charriage de glace, il y a lieu, pour concilier les intérêts de la navigation et de l'industrie, de régler le niveau de retenue avec toute la précision possible et d'assurer la rapidité de la manœuvre du barrage et d'en augmenter la sécurité en établissant les engins de manutention sur les ouvrages fixes.

Les barrages fixes sont recommandables pour les rivières larges et sujettes à de fortes embâcles quand le niveau du bief supérieur ne doit pas être maintenu avec précision. Mais on peut augmenter cette dernière en rendant amovible la partie supérieure de la retenue ou en établissant un ouvrage mobile à côté du barrage fixe.

Pour d'importants barrages-réservoirs à édifier dans le Massif Central, et en vue de barrages de plus de 100 mètres de hauteur, on s'est décidé à l'emploi de murs composés de blocs monolithes en béton de chaux ou de ciment, comme cela se fait en Amérique, où on a pu poser près de 1 200 mètres cubes de maçonnerie par jour (barrage de la rivière Yadkin qui a comporté 300 000 mètres cubes de maçonnerie). Dans ce genre de construction, on ne doit employer que du béton de ciment, avec dosage de 480 kg. par mètre cube de sable. La résistance à l'écrasement du béton de ciment obtenu de cette façon a donné: 160 à 280 kg. par cent. carré, densité 2,4 à 2,5.

En dehors de la résistance à la compression, les blocs monolithes doivent résister aux effets de rupture par cisaillement, qui sont ici particulièrement à redouter, et on admet qu'ils doivent être limités au dixième de l'effort maximum de compression, soit 5,6 kilog. par cent. carré. Cependant M. Wilhem précise que pour un travail au cisaillement supérieur à 3 kg. cent. carré le béton devrait être armé.

Pour éviter les effets de contraction, dans la construction des barrages monolithes, après un certain temps de leur mise en charge, provenant de la rapidité de construction, on partage l'ouvrage en sections par des joints de contraction verticaux à faces en dedans et on construit les massifs par massifs alternés, de façon que chacun d'eux se soit convenablement

refroidi avant l'exécution du massif adjacent. M. Maynard conseille à cet effet de noyer dans la maçonnerie des barres d'acier tant dans le sens horizontal que dans le sens vertical, en faisant usage de vieilles ferrailles. Les barrages de Whitney, sur la rivière Yadkin (E.-U.), et de l'usine de Barberine, sur le Trient (Suisse), ont été construits d'après le système des blocs monolithiques.

Les *barrages-réservoirs* ont pour but, comme il a été déjà expliqué, non seulement de créer une chute, mais encore d'emmagasiner l'eau et d'en régulariser le débit selon la consommation de l'usine établie sur le cours d'eau et alimentée par ledit réservoir.

La création de tels ouvrages est indispensable pour la bonne exploitation de certaines usines, entre autres celles qui assurent des services de traction et d'éclairage dont la puissance est extrêmement variable, tant journallement que selon les saisons. Les variations journalières peuvent se traduire par des écarts de 1 à 20. Certains ouvrages de ce genre ont des dimensions considérables, tel que le barrage d'Arrow-Rock (E.-U.) qui a 107 mètres de hauteur au-dessus des fondations, une longueur en crête de 323 mètres avec un rayon de courbure de 202 mètres. Il a exigé un volume de maçonnerie atteignant 450 000 mètres cubes.

On donne la préférence aujourd'hui à la maçonnerie dite « cyclopéenne », c'est-à-dire formée de gros blocs de pierre de taille noyés dans un béton plastique avec damage autour des blocs, système qui assure la densité maximum et l'imperméabilité pratique maximum. Le tracé s'établit avec la considération que la limite de pression maximum est de 6 à 8 kg. par cent. carré pour le mortier de chaux ou de pouzzolane et de 10 ou 12 kg. pour le mortier de ciment et de sable en proportion de 1 à 2. Les pressions unitaires, bien entendu, sont moindres sur le parement aval que sur le parement amont.

La construction des barrages se complique de nos jours du fait de l'emploi du ciment Portland et de l'adoption de moyens mécaniques de mise en œuvre du béton, circonstances qui donnent lieu à de grandes quantités de chaleur qui n'ont pas le temps de se dissiper. On a pu ainsi constater dans la masse du béton des températures de 40° à 50°. Le refroidisse-

ment de ces masses donne lieu à des fissures pendant l'hiver et à des efforts considérables dus au retrait du béton qui peuvent amener des surprises graves.

Les barrages les plus courants sont ceux à lame déversante passant par-dessus la crête de l'ouvrage; on les désigne souvent sous les appellations de « barrages à gueule bée », ou de « barrages sans revanche ».

Certaines installations se présentent avec déversoirs latéraux et pertuis de chasse pour éviter l'engorgement du canal de dérivation par les apports du torrent. On obtient de cette façon une décantation partielle des sables en suspension dans l'eau, en n'admettant que celle de surface.

Les barrages dits « évidés » peuvent s'établir d'un seul bloc, et alors les puits dont on les accompagne ont pour fonction de drainer les infiltrations; dans ce cas, on ne fait aucune distinction entre les murs accolés (masques ou écrans) et on les considère comme un seul mur évidé. Le barrage peut ainsi être construit soit avec un parement discontinu, le vide d'un puits étant compensé par l'adjonction d'un contrefort au droit de ce puits, soit avec parement continu et semblable à celui d'un barrage ordinaire, au vide d'un puits correspondant un supplément d'épaisseur uniformément répartie sur toute la longueur de l'ouvrage.

42. Capacité des réservoirs.— Nous avons vu que l'on accole aux barrages fixes des déversoirs de superficie ayant leur seuil placé au niveau de la retenue normale et qui ont pour effet d'écouler le trop-plein provenant des crues.

Si l'on est bien fixé sur la valeur et la durée des plus grandes crues, on peut se rendre compte de la surélévation produite par une de ces crues et par suite déterminer la longueur du déversoir.

Soient: x le débit de cette crue, l la longueur du déversoir, t la durée de la crue, h la surélévation de niveau produite dans le barrage-réservoir, V la capacité du réservoir correspondant à cette surélévation et Q' le débit du déversoir pendant le temps t , on aura:

$$xt - Q't = V.$$

Le débit du déversoir sous la hauteur h est:

$$Q = kh^3 l.$$

Posons : $Q' = 0,40 Q$;
 alors on a : $xt = 0,40 Qt = V$.

Si l'on remplace dans cette dernière expression Q et V par leur valeur en fonction de h , on obtient une équation qui ne renferme plus que cette inconnue h et qui permet de la calculer par tâtonnements.

On doit aussi examiner s'il reste une *revanche suffisante* pour tenir compte de l'action des vagues.

Il est intéressant de déterminer la durée des crues ordinaires et extraordinaires pour produire un relèvement tel que le débit du déversoir soit égal à leur débit moyen. Dans ce cas on évalue la capacité du réservoir pour lesdites, et on détermine le temps qu'une crue d'un débit moyen égal à Q mettrait à remplir les capacités correspondantes par la formule :

$$t = \frac{V}{0,60 Q} \text{ pour } x = Q.$$

43. Stabilité des barrages. — Le calcul des barrages a suscité plusieurs méthodes auxquelles des ingénieurs éminents ont attaché leur nom. Mais la méthode de M. Lévy, qui a reçu une consécration officielle, est la seule qui permette d'expliquer qu'il puisse exister des efforts de traction à l'aval, en charge, comme dans le profil en rectangle. M. l'ingénieur Baticle a démontré que le fruit à donner au parement aval d'un profil triangulaire, pour qu'il puisse résister strictement aux sous-pressions, est indépendant de la pente du sol des fondations.

Dans l'établissement, on doit déterminer les conditions de stabilité, de résistance au glissement, d'équilibre, de rotation, de résistance à l'écrasement et de variation de section du profil selon la forme qu'il reçoit.

Loi du trapèze. — Un barrage peut être considéré comme une poutre encastree, et la loi du trapèze représente la loi suivant laquelle varie dans chaque section horizontale la valeur de la résistance de la maçonnerie ou moment fléchissant dans cette section.

Soit ABCD un solide de forme trapézoïdale (fig. 76) ayant comme projection horizontale un rectangle $C_1D_1D_2C_2$. Sous l'action d'une force verticale N appliquée en un point de la base, celle-ci tend à prendre une position CD' , et si le point E se

trouve sur l'axe OX, et à une distance de l'axe x , de l'axe OY en tout point du rectangle situé sur une parallèle à OY et d'abscisse x , la pression n est représentée par l'équation :

$$n = \frac{N}{\Omega} \left(1 - \frac{12xx_1}{e^2} \right).$$

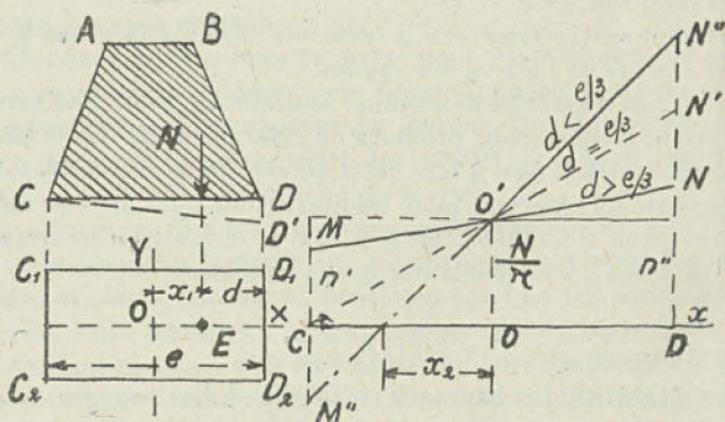


Fig. 76.

Cette expression est l'équation d'une droite représentant la loi de variation de la pression.

La ligne des pressions nulles est donnée par la relation :

$$x = \frac{e^2}{12x_1}.$$

Le minimum de pression a lieu avec le minimum de x , soit pour $x = -\frac{e}{2}$, c'est-à-dire sur l'arête C_1C_2 , et sa valeur est :

$$n' = \frac{N}{\Omega} \left(1 - \frac{6x_1}{e} \right) = \frac{N}{\Omega} \left(\frac{6d - 2e}{e} \right),$$

d étant la distance du point E à l'arête D_1D_2 .

Le maximum de pression a lieu en même temps que le maximum de x , soit pour $x = \frac{e}{2}$, c'est-à-dire sur l'arête D_1D_2 , et sa valeur est :

$$n'' = \frac{N}{\Omega} \left(1 + \frac{6x_1}{e} \right) = \frac{N}{\Omega} \left(\frac{4e - 6d}{e} \right).$$

La demi-somme $\left(\frac{n+n'}{2}\right)$ de la pression minimum et de la pression maximum est égale à la pression moyenne $\frac{N}{\Omega}$.

Pour toute valeur de $x_1 < \frac{e}{6}$, c'est-à-dire $d > \frac{e}{3}$, la ligne des pressions nulles se trouve en dehors du rectangle et la pression minimum n' est partout positive. Pour $x > \frac{e}{6}$ et $d < \frac{e}{3}$ la ligne des pressions nulles se trouve à l'intérieur du rectangle et elle a pour équation :

$$x = -\frac{e^2}{12x_1}.$$

Pour toute valeur de x comprise entre $-\frac{e}{2}$ et $-\frac{e^2}{12x_1}$, la pression est positive, et pour toute valeur de x comprise entre $\frac{e^2}{12x_1}$, et $-\frac{e}{2}$ la valeur de la pression est négative, c'est-à-dire qu'il y aura traction au lieu d'y avoir compression. Enfin pour $x_1 = 0$, $d = \frac{e}{2}$, c'est-à-dire lorsque le point d'application de la force N se trouve au centre de gravité de la base, $n' = n'' = \frac{N}{\Omega}$ et la pression est partout égale à la pression moyenne. L'ordonnée à l'origine OO' est égale à la pression moyenne et le coefficient angulaire de la droite a pour valeur : $\frac{12Nx_1}{e^2\Omega}$.

Pour $x_1 = 0$, $d = \frac{e}{2}$, la pression est partout égale à la pression moyenne, de sorte que la ligne des pressions est parallèle à l'axe des x .

Pour $x_1 < \frac{e}{6}$ et $d > \frac{e}{3}$, on obtient la droite MN , et la pression n est partout positive et plus grande que 0. Pour $x_1 = \frac{e}{6}$ et $d = \frac{e}{3}$, on a la droite CN' , et la pression n est nulle en C et égale

à $\frac{2N}{\Omega}$ en N' . Pour $x > \frac{e}{6}$ et $d < \frac{e}{3}$, on obtient la droite $M''N''$, et la pression est négative jusqu'à ce que :

$$x = -\frac{e^2}{12x_1},$$

où la pression est nulle.

Si l'on transporte les axes de manière qu'ils passent par C, l'équation de la droite devient :

$$n = n' + \left(\frac{n'' - n'}{e}\right)x = P + Qx. \quad (1)$$

Si l'on découpe dans la longueur du barrage une tranche de 1 mètre de longueur, la section Ω de la base de cette tranche est égale à $e \times 1$ mètre, de sorte que les valeurs de la pression minimum n' et de la pression maximum n'' peuvent s'écrire, pour cette tranche :

$$\begin{aligned} n' &= \frac{N}{e} \left(\frac{6b - 2e}{e}\right) = \frac{N}{e} \left(6\frac{b}{e} - 2\right) \text{ et } n'' = \frac{N}{e} \left(\frac{4e - 6b}{e}\right) \\ &= \frac{N}{e} \left(4 - 6\frac{b}{e}\right). \end{aligned}$$

La loi du trapèze conduit pour un mur en forme de rectangle à un surcroît de stabilité pour le profil triangulaire (le profil triangulaire à parement amont sensiblement vertical est le profil-type des barrages modernes); elle satisfait à la théorie mathématique de l'élasticité lorsque le niveau de l'eau affleure le sommet du triangle, que le parement amont soit vertical ou incliné. Il en est de même pour le réservoir vide.

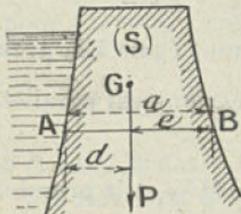


Fig. 77.

Le rectangle emploie un volume de maçonnerie double de celui du triangle, tout en lui étant inférieur au point de vue de la stabilité. Il ne s'emploie que pour le couronnement des ouvrages.

Méthode Lévy. — La circulaire ministérielle du 15 juin 1897 relate les formules établies par M. Maurice Lévy relatives aux barrages-réservoirs.

Soient : a la largeur d'un joint horizontal (fig. 77) quelconque AB, S la surface de la partie du barrage située au-dessus de ce

joint, d la distance de l'extrémité amont du joint à la verticale passant par le centre de gravité G de la surface (S) et D le poids du mètre cube de la maçonnerie sèche.

Quand le réservoir est vide, le joint AB supporte par mètre courant le poids P de la maçonnerie sèche qui a pour valeur : $P = SD$, lequel agit en c à la distance d de l'extrémité amont du joint et on a, en appliquant la loi du trapèze :

Pour la pression moyenne sur le joint AB : $\frac{P}{a}$;

Pour la pression à l'extrémité amont A : $\frac{4a - 6d}{a} \times \frac{P}{a}$;

Pour la pression à l'extrémité aval B : $\frac{6d - 2a}{a} \times \frac{P}{a}$.

Lorsque le réservoir est plein d'eau, le poids du mètre cube de maçonnerie doit être diminué de 100 kg. pour tenir compte de l'effet nuisible des eaux d'infiltration qui viennent suinter sur le parement aval. On posera donc : $D_1 = D - 100$ kg. Le joint AB (fig. 78) supportera, par suite, par mètre courant : d'une part, le poids P de la maçonnerie de la digue qui a pour valeur $P = SD_1$ et qui agit à la distance d ; d'autre part, le poids π de l'eau du réservoir qui presse sur le parement amont du barrage et qui agit à une distance δ de l'extrémité amont du joint, c'est-à-dire qu'il supportera par mètre courant un poids total P_1 qui a pour valeur $(P + \pi)$ et dont la distance d' à son extrémité amont est donnée par la relation :

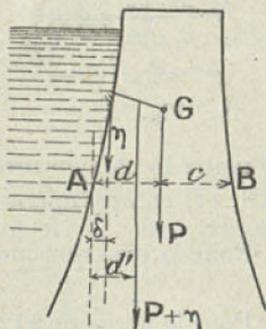


Fig. 78.

$$d' = \frac{Pd + \pi\delta}{P + \pi} .$$

La partie du barrage située au-dessus du joint AB reçoit, d'autre part (fig. 79), la poussée Q par mètre courant de l'eau du réservoir qui agit à une hauteur h au-dessus de ce point, et la résultante R des deux forces P' et Q peut rencontrer le joint AB au point D . Cette résultante fait avec la verticale un angle α qui a pour valeur :

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{Q}{P'}.$$

Si l'on appelle c la distance de son point d'application au point c' on a :

$$c = h \operatorname{tang} \alpha.$$

Et la distance $b = BD$ du point d'application de la résultante R à l'extrémité aval du joint a par suite pour expression :

$$b = a - (d' + c).$$

Ainsi la résultante R , qui agit sur le joint horizontal AB , peut se décomposer en deux forces, une composante horizontale Q et une composante verticale P' qui a son point d'application en D à la distance b de l'extrémité aval B du joint. La composante horizontale Q doit être détruite par la cohésion des maçonneries, et l'on admettra qu'il faut qu'il n'y ait pas glissement, c'est-à-dire que $\operatorname{tang} \alpha$ soit plus petit que le coefficient de frottement.

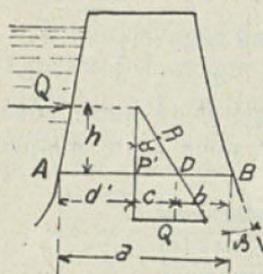


Fig. 79.

Quant à la composante P' , elle se répartit sur le joint horizontal AB , et, en appliquant la loi du trapèze, on a :

Pour la pression moyenne sur le joint AB : $\frac{P'}{a}$;

Pour la pression à l'extrémité aval B : $\frac{4a - 6b}{a} \times \frac{P'}{a}$;

Et pour la pression à l'extrémité amont A : $\frac{6b - 2a}{a} \times \frac{P'}{a}$.

Mais la pression qui se produit sur le joint horizontal à son extrémité aval B , et que l'on désigne par p , n'est pas la pression la plus forte que la maçonnerie ait à supporter en ce point, car il y a à calculer la pression maximum maximorum que la maçonnerie peut avoir à supporter en B sur le parement aval. Cette pression a pour valeur :

$$\frac{P}{\cos^2 \beta} = p (1 + \operatorname{tang}^2 \beta) \text{ (Lévy),}$$

β étant l'angle que fait le parement aval avec la verticale (fig. 80), et :

$$\frac{\cos^2 \alpha}{p} = p (1 + \tan^2 \alpha) \text{ (Bouvier).}$$

Pour appliquer ces formules, on aura à calculer : les surfaces S et les distances d de leur centre de gravité à l'extrémité amont des joints ; les poids P et P_1 de la maçonnerie du barrage pour les deux densités D et D_1 ; les valeurs de π et δ pour la retenue normale et pour la surélévation maximum que pourront produire les effets réunis des crues et des vagues ; enfin les valeurs de P' et d' dans ces deux cas. Ces résultats sont consignés dans des tableaux que l'on dresse à cet effet.

Si on suppose que la section du barrage est divisée en rectangles dont la position du centre de gravité est immédiatement connue et qu'on veuille déterminer les moments de ces surfaces partielles, on procède comme suit : Pour le joint AB , la valeur S de la surface $ABCD$, celle du moment M de S par rapport à l'extrémité amont A de ce joint sont connues, et l'on tire d (fig. 80) de la formule :

$$d = \frac{M}{S}.$$

Pour passer au joint suivant $A'B'$, dont l'extrémité A' se trouve à une distance x de l'extrémité A du joint précédent, on a à calculer le moment M de la surface $A'B'DC$ ou $S + S'$ par rapport à l'extrémité A' , moment qui a pour valeur :

$$M' = Sd + Sx + \text{moment de } S' \text{ par rapport à } A'.$$

Mais $Sd = M$; il suffit donc, pour obtenir M' , d'ajouter Sx à la valeur déjà trouvée pour M et la valeur de S' par rapport à A' .

Les demandes à l'appui de l'établissement d'un barrage doivent être accompagnées d'une épure de stabilité, comme l'indique la figure 81, et de tableaux résumant les calculs pour

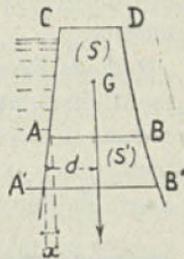


Fig. 80.

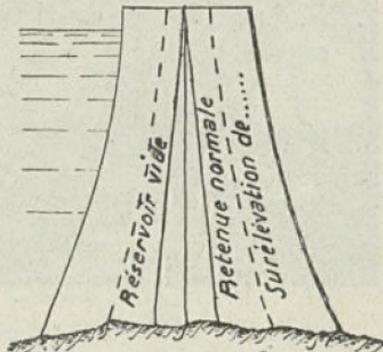
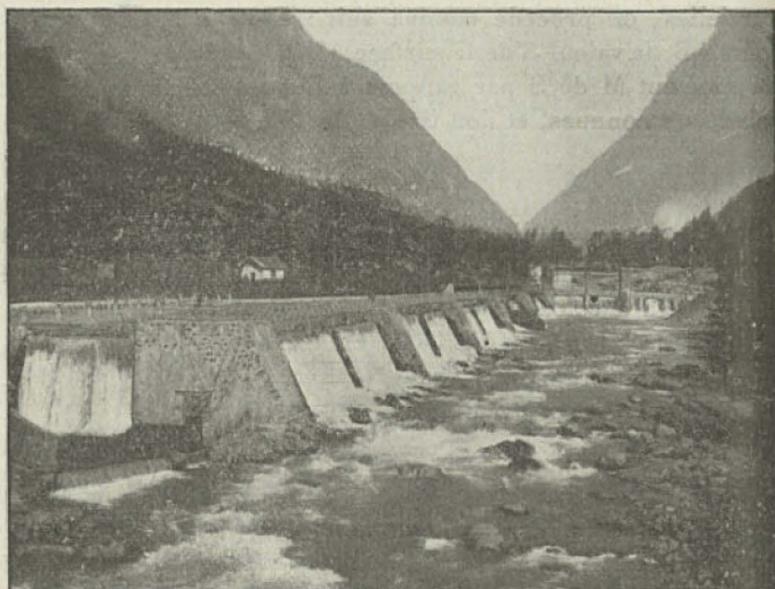


Fig. 81.

chacun des joints que comporte l'ouvrage tant pour la retenue normale que pour la surcharge qui sont : tableau I, calculs de S et de d ; tableau II, calculs de P et P_1 ; tableau III, calculs de π et de πd ; tableau IV, calculs de P' et de d' ; tableau V, calcul des pressions à vide, et tableau VI, calcul des pressions et $\tan \alpha$ en charge.

On trace en traits pleins les courbes de pression et en traits pointillés les courbes qui passent par les tiers des joints horizontaux.

Méthode Résal. — Cette méthode, de venue récente, consiste essentiellement à calculer les pressions développées sur des sections transversales non plus horizontales, mais perpendiculaires à la fibre moyenne, c'est-à-dire à la bissectrice de l'angle de deux parements.



(Cliché J. Joya).
Fig. 8^c. — Prise d'eau sur la Romanche (usine des Roberts).

Pour la partie du barrage située au-dessus des fondations, il n'apparaît pas qu'il y ait de différence sensible avec les méthodes que nous avons exposées. Mais pour la partie inférieure du mur M. Résal imagine de prolonger par la pensée le profil du

barrage jusqu'à un point fictif qui aboutit au pied du parement aval, et il calcule les pressions développées sur les joints obliques, en supposant que la partie du parement amont, prolongé dans le sol, n'est soumise à aucun effort, normal ou tangentiel.

Pour ce qui concerne l'action de la pesanteur seule, les résultats signalés plus haut restent concordants, mais il n'en est plus de même pour ce qui concerne l'action de l'eau. On arrive ainsi à un coefficient de réduction par lequel on multiplie la valeur de la pression à la base, déduite de la méthode usuelle, pour retrouver la valeur de la pression correspondante que donne la méthode Résal.

M. Résal propose de terminer le parement aval par une courbe se raccordant avec ce parement un peu au-dessous d'un point déterminé et venant se terminer sur la fondation perpendiculairement à la base, ou, si l'on préfère, par un pan coupé vertical tangent à la courbe indiquée.

La fig. 83 montre, d'après M. Ruffieux, les moyens pratiques pour la détermination des courbes dans un profil normal, lesquelles diffèrent très peu de celles que l'on obtient avec un profil théorique, qui seraient des arcs d'hyperboles très voisins de leurs asymptotes.

Les dimensions d'un barrage doivent être calculées comme si la hauteur de l'eau atteignait le couronnement et régler le déversoir de telle façon que, en cas de crues, le niveau maximum de l'eau reste inférieur au couron-

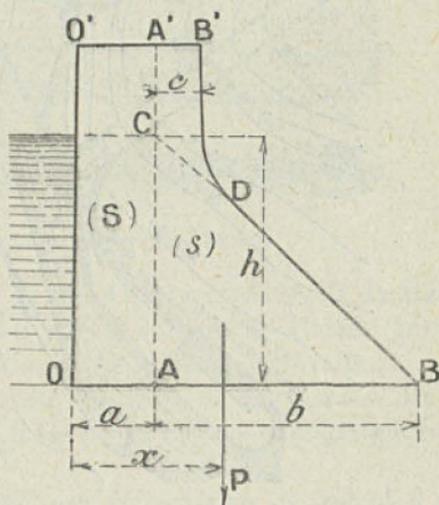


Fig. 83

nement. Assez généralement on admet que la largeur de celui-ci est le dixième de la hauteur de la retenue, et il est prudent, pour le barrage en charge, d'attribuer à la maçonnerie un poids

inférieur de 100 kg. par mètre cube à son poids réel. Mais à vide, la maçonnerie doit être calculée avec son poids réel.

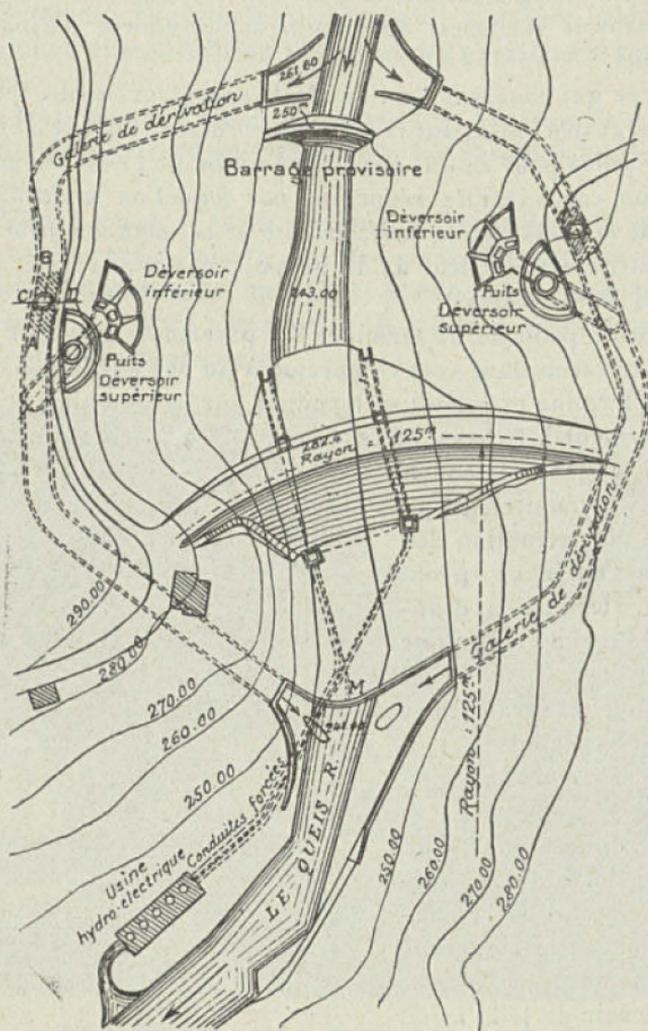


Fig. 84. — Plan d'ensemble du barrage et des ouvrages accessoires.

La capacité du réservoir croît comme le carré de la hauteur de retenue dans le cas d'une vallée à section rectangulaire et comme le cube de cette même hauteur dans le cas d'une section triangulaire, alors que les pressions développées dans la

maçonnerie ne croissent que proportionnellement à la hauteur du mur de la retenue.

Le coût des barrages en maçonnerie s'évalue généralement selon le prix du mètre cube d'eau emmagasiné. Ces prix pour de grands barrages variaient avant la guerre de 0 fr. 10 à 1 fr. selon l'importance des ouvrages et les difficultés d'exécution.

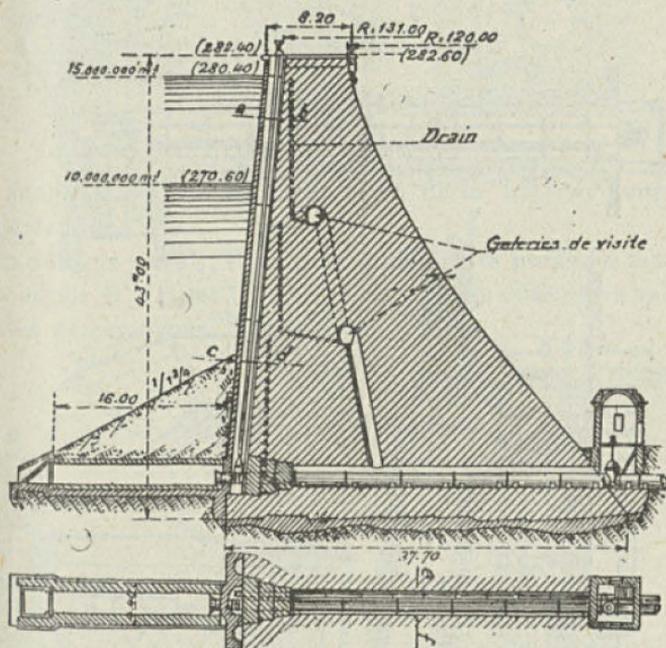


Fig. 85. — Coupe en travers du barrage.

Les fig. 84 à 88 ont trait au grand barrage-réservoir de Mar-klissa (Haute-Silésie) établi sur le torrent le Queis, qui a nécessité pour son édification quatre années de travaux.

Les fig. 89 à 91 montrent le barrage de Dardennes (Bou-ches-du-Rhône), établi selon les prescriptions ministérielles du 25 juin 1897.

La figure 94 présente un cas élémentaire de calcul d'un barrage de faible hauteur de retenue. Le poids de la surcharge d'eau est de 3 mètres de hauteur, soit : $3 \times 2,80 \times 1000 \text{ kg.} = 8400 \text{ kg.}$, poids qui vient en augmentation de celui de chaque zone de maçonnerie considérée. La densité des maçonneries est prise égale à 2200 kg.

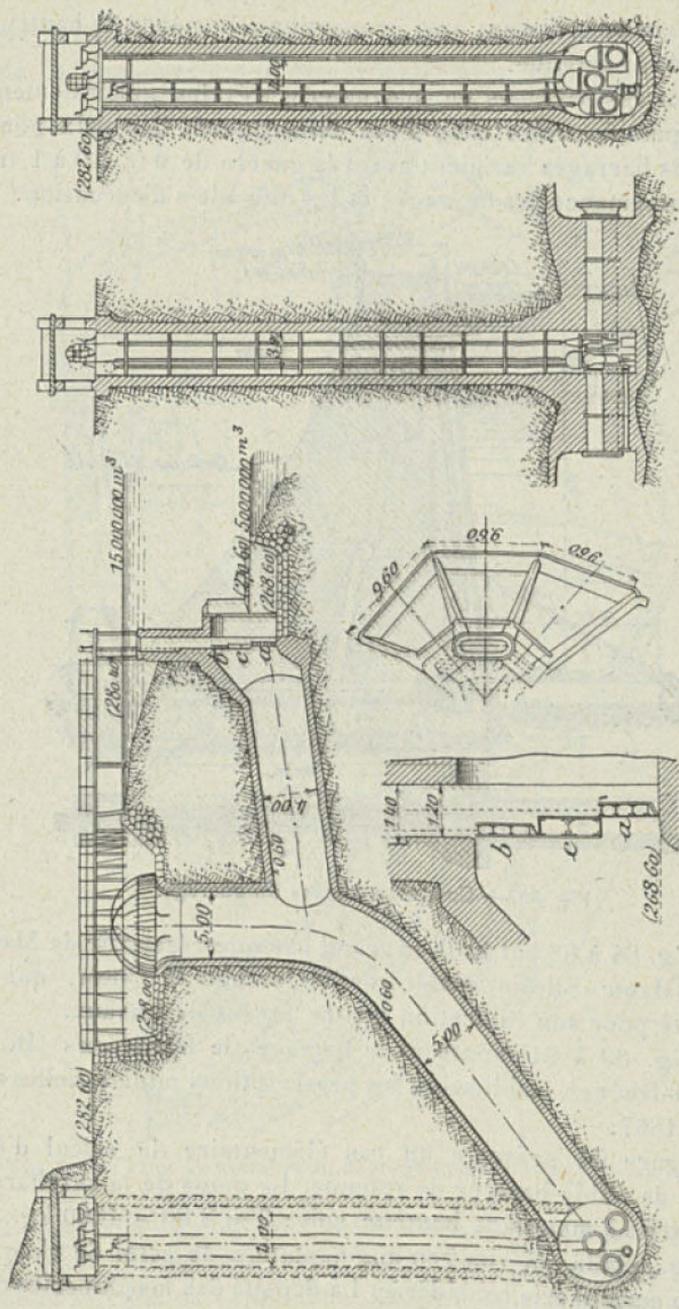


Fig. 86. — Coupes sur la galerie de dérivation de rive droite sur le puits de décharge correspondant.

La poussée Q de l'eau est donnée par :

$$Q = \frac{1000 H^2}{2},$$

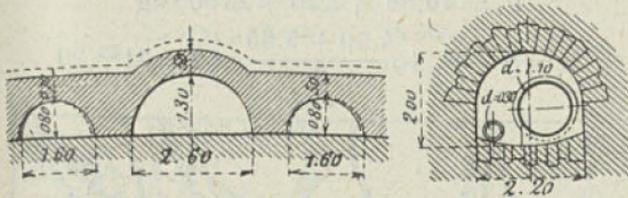


Fig. 87. — Coupes suivant ab et cd .

et son point d'application est au tiers de la hauteur pour une zone déterminée.

Si on désigne par P_1, P_2, P_3 , etc., les divers poids de maçonneries, et par R_1, R_2 et R_3 les résultantes, on obtient les valeurs suivantes de ces forces, correspon-

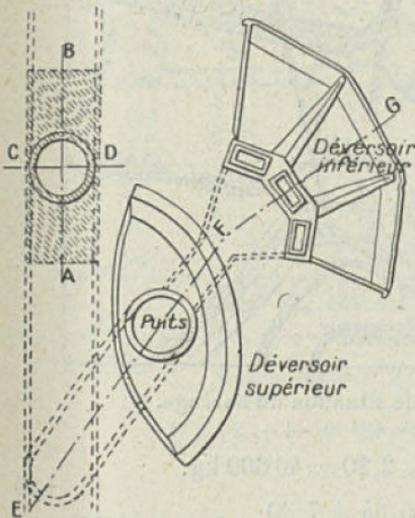


Fig. 88. — Plan détaillé des déversoirs rive droite.

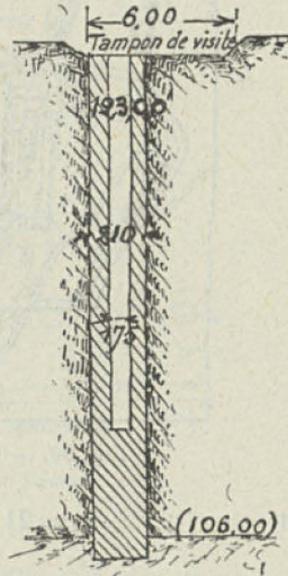


Fig. 89. — Coupe du masque du barrage.

dant aux surfaces de cinq zones considérées :

$$S = \frac{2,80 + 3,30}{2} \times 1 = 3^{\text{m}^2},05$$

et $P = 3,05 \times 2,20 = 6710 \text{ kg.}$

$$S_1 = S + \frac{3,30 + 4,50}{2} \times 2 = 10^{\text{m}^2},85$$

et $P_1 = 10,85 \times 2,20 = 23900 \text{ kg.}$

$$S_2 = S + S_1 + \frac{4,50 + 5,85}{2} \times 2 = 21^{\text{m}^2},20$$

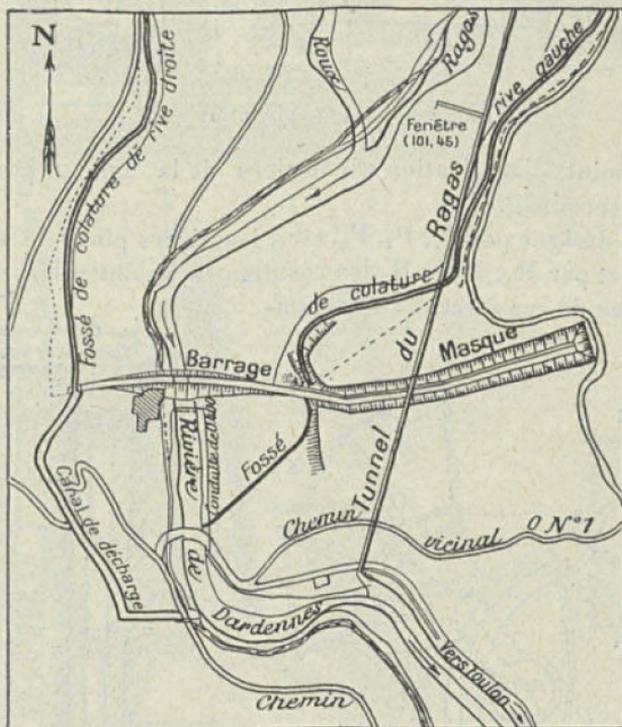


Fig. 90. — Plan de situation du barrage.

et $P_2 = 21,20 \times 2,20 = 46600 \text{ kg.}$

$$S_3 = S + S_1 + S_2 + \frac{5,85 + 7,30}{2} \times 2 = 34^{\text{m}^2},35$$

et $P_3 = 34,35 \times 2,20 = 75600 \text{ kg.}$

$$S_4 = S + S_1 + S_2 + S_3 + \frac{7,30 + 8,80}{2} \times 2 = 50^{\text{m}^2},45$$

et $P_4 = 50,45 \times 2,20 = 119400 \text{ kg.}$

Soit avec surcharge :

$$\begin{aligned} 6\ 710 + 8\ 400 &= 15\ 110 \text{ kg.} \\ 23\ 900 + 8\ 400 &= 32\ 300 \\ 46\ 600 + 8\ 400 &= 55\ 000 \\ 75\ 600 + 8\ 400 &= 84\ 000 \\ 111\ 000 + 8\ 400 &= 119\ 400 \end{aligned}$$

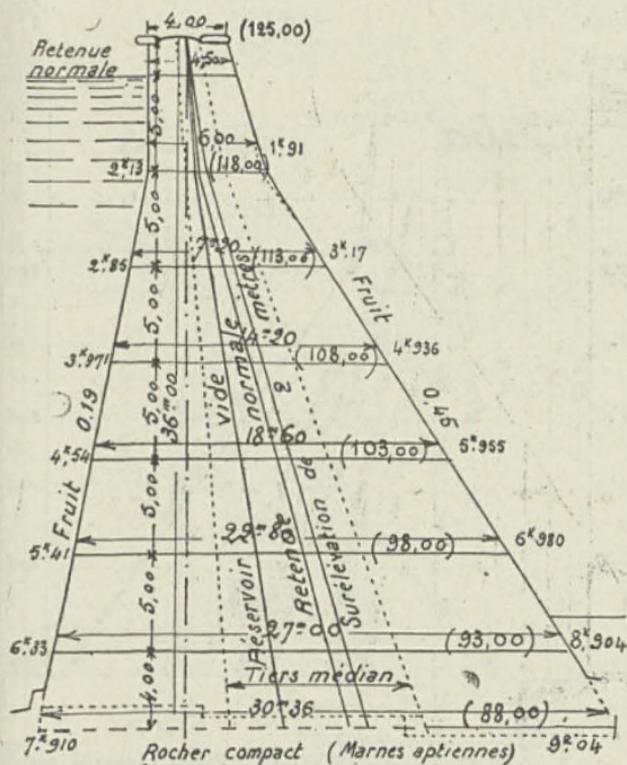


Fig. 91. — Profil théorique du barrage.

Puis :

$$Q = \frac{1\ 000 \times 4^2}{2} = 8\ 000 \text{ kg}; \quad Q_1 = \frac{1\ 000 \times 6^2}{2} = 18\ 000 \text{ kg.}$$

$$Q_2 = \frac{1\ 000 \times 8^2}{2} = 32\ 000 \text{ kg}; \quad Q_3 = \frac{1\ 000 \times 10^2}{2} = 50\ 000 \text{ kg}$$

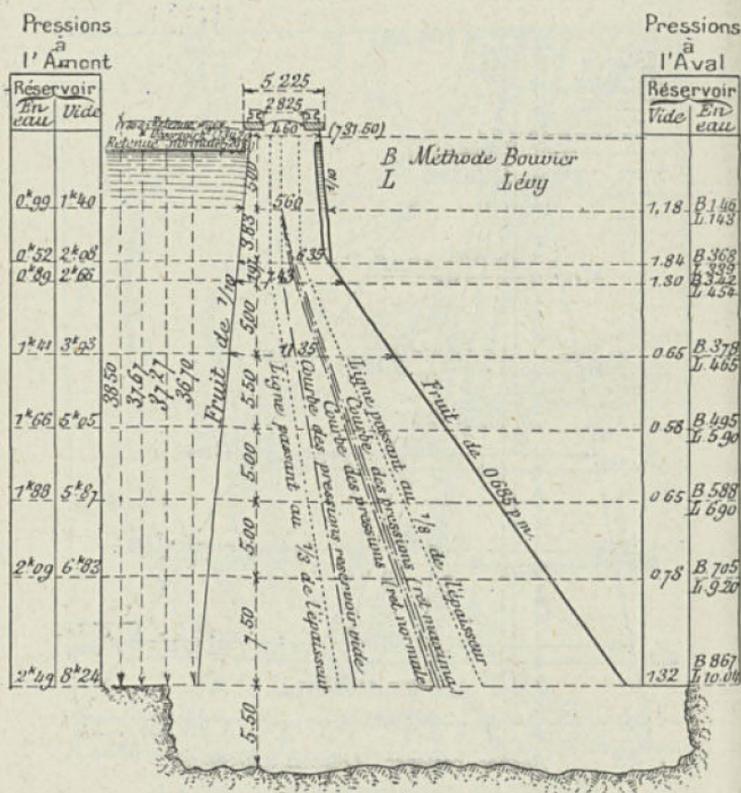
et
$$Q_4 = \frac{1\ 000 \times 12^2}{2} = 72\ 000 \text{ kg.}$$

Et enfin :

$$R = \sqrt{15110^2 + 8000^2} = 17000 \text{ kg};$$

$$R_1 = \sqrt{32300^2 + 18000^2} = 37500 \text{ kg};$$

$$R_2 = \sqrt{55000^2 + 32000^2} = 64000 \text{ kg};$$



$$R_3 = \sqrt{84000^2 + 50000^2} = 98000 \text{ kg};$$

et
$$R_4 = \sqrt{110400^2 + 72000^2} = 140000 \text{ kg}.$$

En construisant l'épure des pressions on voit que la courbe des pressions passe dans le 1/3 médian pour toutes les zones et coupe la base du mur à 3^m,40 de l'angle aigu.

Le moment de renversement de la poussée de l'eau est :

$$Q \times 4 \text{ m.} = 72000 \text{ k.} \times 4 = 288 000.$$

Celui des maçonneries :

$$P_4 \times 5,80 = 119400 \text{ k.} \times 5,80 = 690 200$$

Et le coefficient de stabilité est :

$$\frac{690 200}{288 000} = 2,40.$$

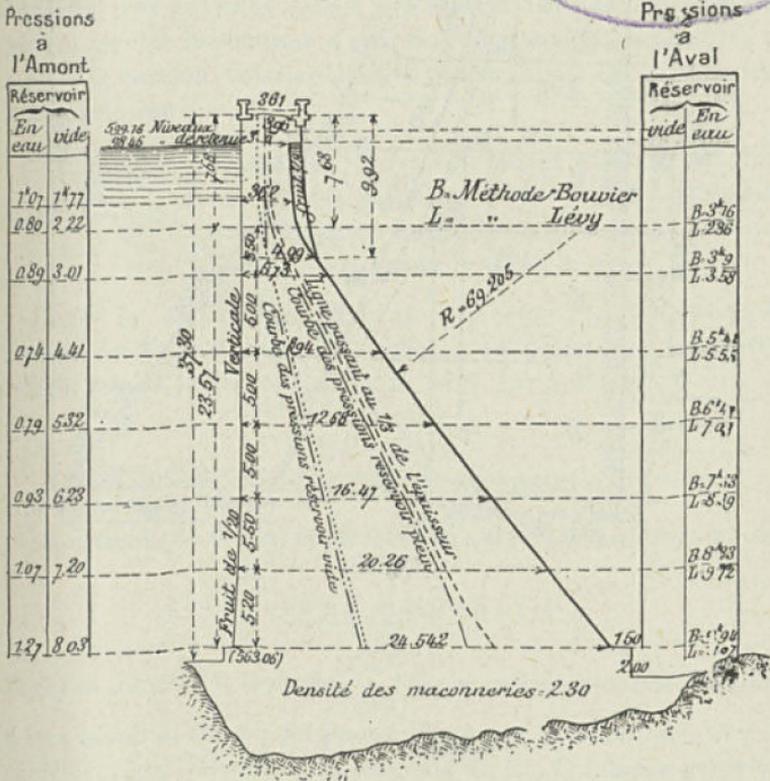
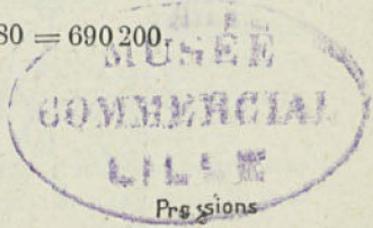


Fig. 93. — Épure de stabilité du barrage-réservoir de l'Écharpe (vallée de l'Ondaine, dans la Loire).

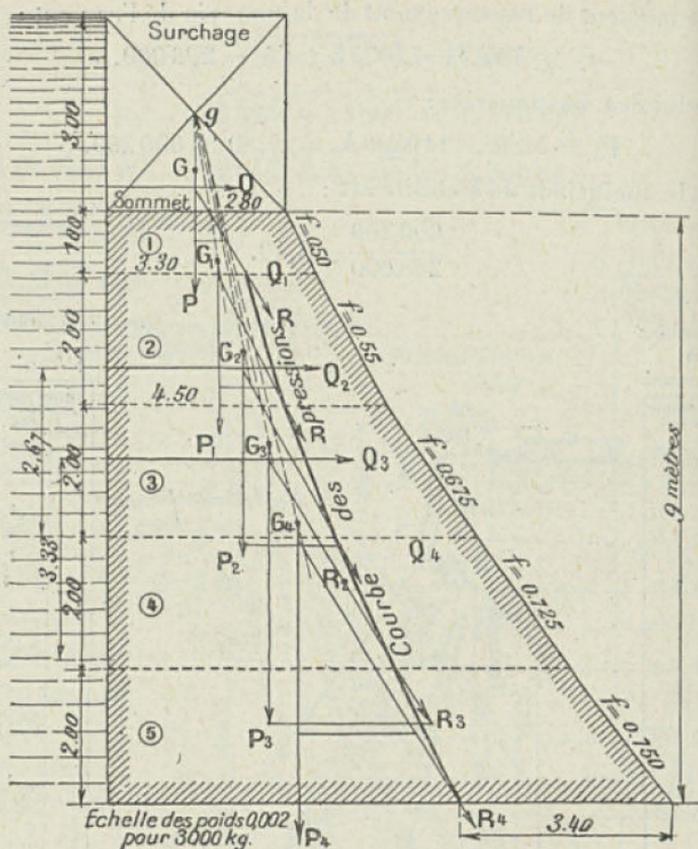


Fig. 94.

CHAPITRE VI

CANAUX

Mouvement de l'eau dans les canaux. — Formes des canaux.

44. **Mouvement de l'eau dans les canaux.** — L'eau qui s'écoule par un canal est animé d'un mouvement uniforme ou varié. Dans le premier cas la vitesse est constante tout le long

d'un filet et on donne au canal une forme rectiligne, une section transversale et une pente longitudinale uniformes, tandis que dans le second cas la section et la pente sont variables. Même dans le régime varié on suppose toujours que le régime permanent est établi, c'est-à-dire que le débit est constant quand les molécules qui passent successivement par un même point y circulent avec la même vitesse, la même densité et la même pression.

Si on appelle Q le débit spécifique dans deux sections transversales très voisines (débit par seconde et par mètre de longueur), par H la hauteur d'eau du côté aval de la section, on a pour la section voisine ($H + h$) et la valeur de h est donnée par la relation :

$$h = \frac{b_1 \times Q^2}{H^3} x; \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 \text{ est un correctif tenant compte de l'influence des parois et dont les diverses valeurs ont été expérimentalement déterminées par Bazin, ainsi qu'on le verra ci-après.} \end{array} \right.$$

Dans le cas du mouvement uniforme l'augmentation du niveau de l'eau h , quand on passe d'un point à un autre très voisin situé à la distance x du premier, est nulle, et on a :

$$H^3 = \frac{b_1 Q^2}{I};$$

I pente superficielle.

La formule de Bazin, applicable au mouvement uniforme, est :

$$I = \frac{bU^2}{R}, \text{ avec } b = 0,0115 \left(1 + \frac{\gamma}{R} \right);$$

R rayon moyen ou rapport $\left(\frac{X}{\Omega} \right)$ de la section mouillée au périmètre mouillé, qui prend le nom de rayon hydraulique, et γ un coefficient qui dépend de la rugosité du lit; U vitesse moyenne du courant.

Lorsque la profondeur h du lit est négligeable devant la largeur, on peut pour les rivières torrentielles appliquer la formule :

$$U = 51 \sqrt{5 \frac{h}{l}} \text{ (Tadini);}$$

l distance entre deux sections du lit de la rivière.

La formule simplifiée qui lie la vitesse moyenne avec la pente de la surface et la section transversale est :

$$U = C\sqrt{RI} \quad \text{ou} \quad I = \frac{U^2}{C^2 \times R};$$

$$\text{avec } C = \frac{1}{\sqrt{a + \frac{R}{\beta}}}; \quad \alpha = 0,00015 \quad \text{et} \quad \beta = 0,0000045,$$

pour parois cimentées.

Si on fait : $C = 50$, on a : $U = 50\sqrt{RI}$ (Tadini).

La formule Darcy et Bazin s'énonce comme suit :

$$RI = b_1 U^2;$$

dans laquelle les valeurs de b_1 sont celles ci-après :

$$\text{Parois très unies (ciment lisse)} = 0,00015 \left(1 + \frac{0,03}{R}\right);$$

$$\text{Parois unies (pierres, briques)} = 0,00019 \left(1 + \frac{0,07}{R}\right);$$

$$\text{Parois peu unies (maçon. de moellons)} = 0,00024 \left(1 + \frac{0,25}{R}\right);$$

$$\text{Parois en terre} = 0,00028 \left(1 + \frac{1,25}{R}\right).$$

Une autre forme courante de la formule Bazin est celle ci-après :

$$U = \frac{87\sqrt{RI}}{1 + \frac{\gamma}{R}};$$

où les valeurs de γ sont, le mètre étant pris comme unité : 0,06 pour parois très unies, 0,16 pour parois unies, 0,46 pour maçonnerie de moellons, 0,85 pour parois de nature mixte, 1,30 pour canaux en terre dans des conditions ordinaires et 1,75 pour canaux en terre présentant une résistance exceptionnelle.

Sonnet a donné la formule simple ci-après permettant d'établir le rapport entre la vitesse moyenne, la vitesse maximum V et la vitesse minimum W :

$$U = \frac{2V + W}{3}.$$

Darcy et Bazin ont aussi fait connaître la répartition des vitesses dans la section d'un canal (fig. 95) :

$$U = 0,80 V \quad \text{et} \quad U = 1,33 W.$$

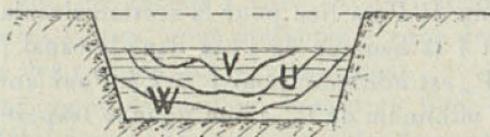


Fig. 95.

Les vitesses de fond compatibles avec la conservation des berges sont les suivantes :

Terres détrempées.....	0 ^m ,076	Cailloux	0 ^m ,900
Terres ordinaires.....	0 ^m ,080	Pierres cassées, silex.....	1 ^m ,200
Argiles tendres.....	0 ^m ,152	Schistes, poudingues	1 ^m ,500
Sables.....	0 ^m ,300	Roche stratifiée.....	1 ^m ,800
Gravier.....	0 ^m ,600	Roche dure.....	3 ^m ,000

La perte de charge totale produite par l'écoulement de l'eau dans un canal de longueur l en mètres, de section s en mètres carrés, de vitesse v en mètres par seconde a pour expression :

$$h = \frac{b_1 v^2}{R} \times l \text{ s mètres,}$$

R rayon moyen hydraulique en mètres.

Lorsque la section du canal est constante, on obtient un mouvement uniforme quand la pente est telle que :

$$\frac{h}{l} = \frac{b_1 v^2}{R}.$$

45. Formes des canaux. — L'inclinaison des parois varie nécessairement avec la nature des matériaux employés à leur construction, et en général la forme du profil transversal est celle d'un trapèze isocèle. La longueur d'un canal étant une dimension finie, on ne peut agir que sur sa section pour réduire au minimum le cube de déblais à effectuer, mais en ne dépassant pas la valeur de la vitesse compatible avec la nature des parois, dont il a été question au paragraphe précédent.

Soit S la surface du profil transversal, on calcule la pente par mètre d'après la formule :

$$I = \frac{S}{P_m} (aU + bU^2) \text{ (Prony);}$$

P_m , périmètre mouillé, a coefficient numérique = 0,000044 et $b = 0,000309$.

Le minimum de P_m a lieu pour la section circulaire. Si L est la largeur et h la hauteur de l'eau dans le canal (section rectangulaire), P_m est minimum pour $L = 2h$. Pour une section trapézoïdale, le minimum de P_m a lieu pour le trapèze circonscrit à un cercle. Dans un trapèze à débit maximum, pour une section d'écoulement donnée, le rayon hydraulique est égal à la moitié de la profondeur d'eau h . Pour des talus $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{1}$, $\frac{2}{1}$ la hauteur h est à la largeur du plafond comme les nombres respectifs 2,12 1,65, 1,21 et 0,81.

Les pentes moyennes des canaux, en millièmes, sont les suivantes :

- canal de prise 0,4 à 0,5;
- canal de décharge 1 à 2;
- grands canaux d'irrigation 0,2 à 0,5;
- petits canaux d'irrigation 0,6 à 0,8;
- canaux de navigation 0,1 à 0,25.

Lorsqu'un canal a une section circulaire complète, la position de la ligne d'eau correspondant au débit maximum ou, autrement dit, la profondeur h à l'aplomb du centre est donnée par l'expression : $h = 1,90r$ et le rayon hydraulique moyen $R = 1,1462 \frac{r}{2}$ (r rayon du canal). Quant à la vitesse maximum, elle correspond au cas où la ligne d'eau, qui peut être considérée comme une corde, sous-tend un arc de 120° environ. Dans un demi-cercle, si la ligne d'eau est supposée coïncider avec le diamètre, le rayon moyen est égal à $\frac{r}{2}$, c'est-à-dire à la moitié de la profondeur d'eau sur l'axe.

Dans un canal maçonné, la vitesse de 2 mètres par seconde peut être considérée comme un maximum, si les parois ne sont pas revêtues d'un ciment, auquel cas on peut aller jusqu'à 3 mètres. Pour empêcher l'accumulation des dépôts, une pente de $0^m,20$ par kilomètre suffit. D'autre part il y a intérêt à réduire la

peûte pour ne pas diminuer la hauteur de chute (dans le cas de canaux d'amenée d'usines de force), si l'augmentation de section n'entraîne pas à des dépenses exagérées.

On est très souvent obligé de suivre un tracé sinueux, pour n'avoir pas trop de déblais à faire, et de franchir les vallées dans les parties hautes, pour diminuer le cube des remblais et l'importance des travaux qui les remplacent.

En résumé, pour déterminer la section d'un canal devant fournir un débit donné à l'avance, il y a lieu de considérer, d'une part, la pente dont on peut disposer, la forme de la section et la rugosité des parois, et, d'autre part, la nature des terrains traversés. Nous revenons plus loin sur l'intéressante question des profils des canaux d'amenée des usines hydroélectriques. La fig. 96 montre un type de canal de l'usine de la Brillanne.

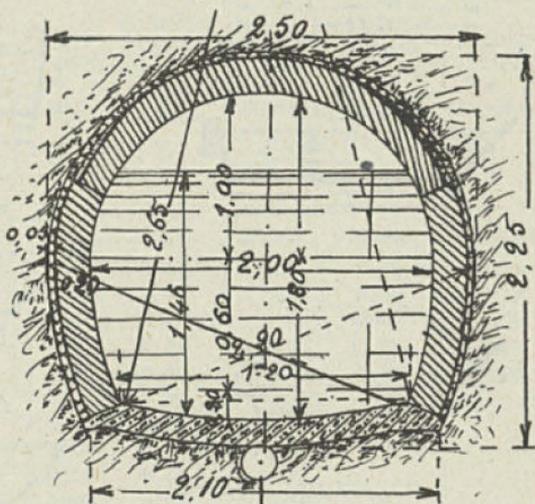


Fig. 96.

Par suite de l'établissement d'un ouvrage en travers d'une rivière, il se produit un remous qui donne lieu à un régime varié. Le profil en long a alors la forme d'une courbe dite des « remous de gonflement », en dénommant remous en un point quelconque la hauteur y au-dessus du régime uniforme qui est égale à $H - h$ (fig. 98). Quand h est plus petit que H , la courbe est dite « courbe de dépression ou d'abaissement ». Pour l'application des formules ayant trait au remous, les tables de Dupuis fournissent les niveaux à une approximation suffisante, c'est-à-dire à quelques centimètres près dans les remous les plus variés. Nous donnons ci-après un abrégé de la table de Dupuis. La première colonne représente les hauteurs de remous y divisées par la hauteur de régime uniforme H . La deuxième

représente les distances au point arbitraire pris pour origine de la table, multipliées par la pente et divisées par H .

Si on a en vue de calculer le remous occasionné par un rétrécissement du lit du cours d'eau sur une grande longueur, connaissant le débit et la pente, l_1 et h_1 étant les dimensions du

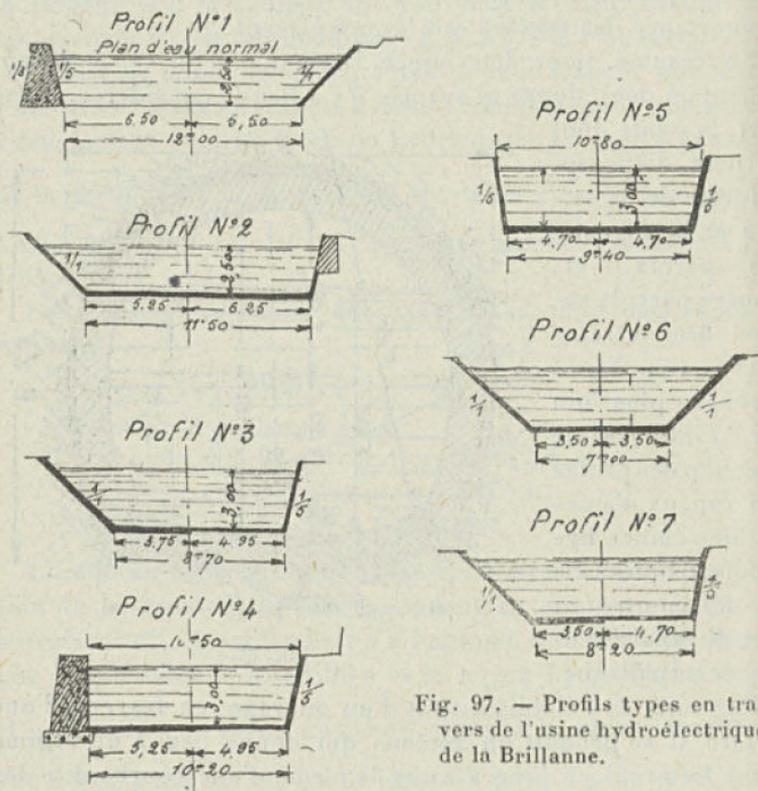


Fig. 97. — Profils types en travers de l'usine hydroélectrique de la Brillanne.

cours d'eau en amont (largeur et profondeur), l et h celles d'aval, et z la hauteur d'exhaussement du niveau d'amont, on aura :

$$z = h_1 - h = h \left(\sqrt[3]{\frac{l^2}{l_1^2}} - 1 \right).$$

Dans notre ouvrage *La Technique de la houille blanche et des transports de l'énergie électrique*, nous donnons de nombreuses applications concernant les calculs des canaux d'amenée ou de dérivation alimentant des usines hydrauliques.

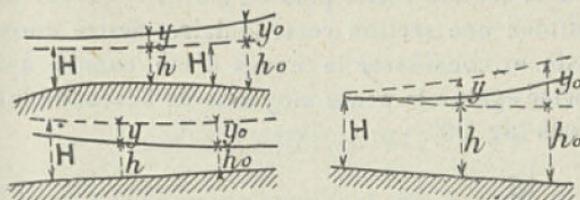


Fig. 98.

HAUTEUR du remous au-dessus du régime uniforme.	DISTANCE à l'origine de la table.	HAUTEUR du remous au-dessus du régime uniforme.	DISTANCE à l'origine de la table.	ABAISSEMENT au-dessous de la hauteur du régime uniforme.	DISTANCE à l'origine de la table.	ABAISSEMENT au-dessous de la hauteur du régime uniforme.	DISTANCE à l'origine de la table.
$\frac{y}{H}$	$\frac{is}{H}$	$\frac{y}{H}$	$\frac{is}{H}$	$\frac{y}{H}$	$\frac{is}{H}$	$\frac{y}{H}$	$\frac{is}{H}$
mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
0.01	0.0067	0.46	1.6032	0.01	0.0067	0.60	1.0140
0.02	0.2444	0.48	1.6324	0.02	0.2287	0.70	1.0176
0.03	0.3863	0.50	1.6611	0.03	0.3463	0.80	1.0199
0.04	0.4889	0.55	1.7307	0.04	0.4356	0.90	1.0203
0.05	0.5701	0.60	1.7980	0.05	0.5034	1.00	1.0203
0.06	0.6376	0.65	1.8631	0.06	0.5577		
0.07	0.6958	0.70	1.9266	0.07	0.6025		
0.08	0.7472	0.75	1.9887	0.08	0.6405		
0.09	0.7933	0.80	2.0496	0.09	0.6733		
0.10	0.8353	0.85	2.1095	0.10	0.7020		
0.12	0.9098	0.90	2.1684	0.15	0.8053		
0.14	0.9751	0.95	2.2265	0.20	0.8709		
0.16	1.0335	1.00	2.2840	0.25	0.9138		
0.18	1.0868	1.10	2.3971	0.30	0.9448		
0.20	1.1361	1.20	2.5083	0.35	0.9671		
0.22	1.1820	1.30	2.6179	0.40	0.9833		
0.24	1.2253	1.40	2.7264	0.45	0.9951		
0.26	1.2663	1.50	2.8337	0.50	1.0037		
0.28	1.3053	1.60	2.9401	0.55	1.0097		
0.30	1.3428	1.70	3.0458				
0.32	1.3788	1.80	3.1508				
0.34	1.4136	1.90	3.2553				
0.36	1.4473	2.00	3.3594				
0.38	1.4801	2.30	3.6694				
0.40	1.5119	2.60	3.9768				
0.42	1.5430	2.80	4.1008				
0.44	1.5734	2.90	4.2826				
		3.00	4.3843				

On peut à la section réelle plus ou moins régulière du cours d'eau substituer une section rectangulaire fictive convenablement choisie et considérer le cours d'eau comme ayant une pente uniforme égale à la pente moyenne de l'étendue intéressée par le remous (fig. 99).

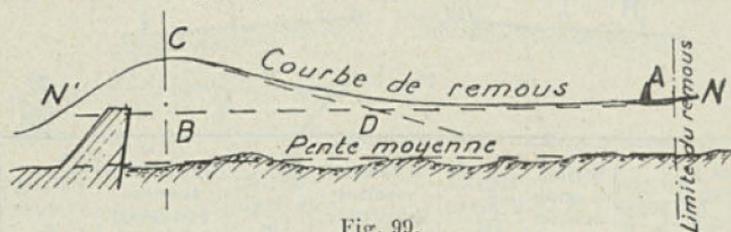


Fig. 99.

Soient NN' la surface libre du cours d'eau et C le niveau de l'eau à l'endroit du barrage après sa construction. La formule du déversoir permet de calculer la charge h au-dessus de la crête du barrage qui détermine le point C . La position de ce dernier étant déterminée, on mène l'horizontale CD et on suppose alors que la courbe du remous est tangente d'une part à CD en C et d'autre part à NN' en A . La courbe de remous cesse d'être appréciable au delà du point A , telle que $AD = BD$. On peut faire le raccordement au moyen d'un arc de cercle; mais on peut aussi faire passer un arc de parabole de second degré à axe vertical dont le sommet serait en C et tangente à la ligne NN' en A . L'équation de cette parabole rapportée à deux axes obliques Ox et Oy est :

$$y = \gamma - Ix \left(1 - \frac{Ix}{4\gamma} \right),$$

dans laquelle $\gamma = BC$ et I représente la pente du cours d'eau.

Cette équation permet de tracer par points la courbe du remous; il suffit pour cela de faire varier x de zéro à la valeur $X = AB$ qui est la limite du remous. Si dans l'équation ci-dessus on fait $y = 0$, on trouve :

$$X = \frac{2\gamma}{I} = \overline{AB}.$$

Partant de ces formules, M. Zorayan a établi un abaque évitant l'essai de nombreux calculs et basé sur la méthode d'Ocagne¹.

1. *Revue générale de l'Électricité*, août 1918.

CHAPITRE VII

AMÉNAGEMENT INTÉGRAL DU RHONE

Régime du Rhône. — Usines existantes et usines projetées sur le haut Rhône. — Usines projetées sur le Rhône moyen. — Navigation et irrigation. — Organisation financière.

46. Régime du Rhône. — Cette gigantesque entreprise sera d'un enseignement du plus haut intérêt en ce sens qu'elle représente le premier effort fait en France pour aménager d'un seul coup un grand cours d'eau sous ses trois formes de richesse : production de force motrice, navigation et irrigation des terrains agricoles. Chacune des formes est caractérisée d'après la nature du cours d'eau par l'application propre des ressources que l'on peut en tirer. Ainsi entre le lac Léman et Lyon, c'est la question des forces hydrauliques qui est capitale ; dans cette section on les évalue au total à 470 000 chevaux-vapeur. De Lyon à Arles, les eaux captables représentent encore 390 000 chevaux ; mais dans ce parcours, c'est la navigation qui prend la première place. Enfin d'Arles à la mer, c'est l'aménagement du fleuve au point de vue des utilisations agricoles qui devient primordial. Selon ces considérations, on a classé le Rhône en trois grandes zones, savoir : celle du Haut-Rhône, comprise entre la frontière suisse et le confluent de la Saône (191 kilomètres), qui elle-même se subdivise en trois sections : de la frontière suisse rive gauche au château du Parc, de ce dernier à l'amont de Lyon et enfin de Lyon amont à Lyon aval ; le Bas-Rhône moyen allant de l'aval de Lyon à Beaucaire (283 kilomètres) et le Bas-Rhône ou Rhône maritime s'étendant de Beaucaire à la mer (84 kilomètres).

La longueur du Rhône est de 812 kilomètres, dont 522 kilomètres sur le territoire français, et l'étendue de son bassin est de 9 180 000 hectares. Franchement glaciaire à son entrée en France, le Rhône voit ce régime s'atténuer par ses affluents de

rive droite (l'Ain, la Saône et l'Ardèche), qui ont un régime différent; le Fier, l'Isère et la Durance (affluents de gauche) ont un régime mixte, où les écoulements glaciaires sont de moins en moins accentués.

Au point de vue de la navigation, le Rhône ne présente une réelle importance qu'en aval du confluent de la Saône.

Sous l'action des affluents, la pente du fleuve se distribue très inégalement; alors qu'elle atteint 0^m,80 par kilomètre au confluent de l'Ain à celui de la Saône, elle n'est plus que de 0^m,15 d'Arles à la mer. Il en est de même des débits.

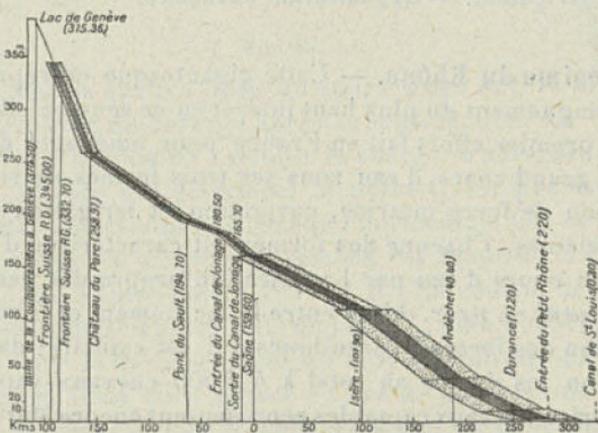


Fig. 100. — Graphique donnant le profil en long du Rhône avec figuration schématique des puissances utilisables. La partie teinte intérieure correspond au débit d'étiage, et celles comprises entre les limites extérieures correspondent aux eaux moyennes.

Le débit dans la zone du Haut-Rhône ne descend pas au-dessous de 120 mètres cubes seconde moins de 10 jours par an (étiage) et au-dessous de 155 mètres cubes moins de 180 jours (débit minimum semi-permanent). Le débit caractéristique en serait de 180 mètres cubes.

Un relèvement du niveau du lac Léman permettrait de remonter le débit d'étiage à 150 mètres cubes et même 220 mètres cubes (pendant 130 à 140 jours).

Pendant quatre mois de l'année on peut compter sur un débit de 460 à 680 mètres cubes.

La pente moyenne dans la partie du Haut-Rhône varie de

2^m,65 par kilomètre à 0^m,64, ou plus exactement : entre la frontière suisse et Génissiat, 3^m,10; entre Génissiat et Culoz, 1^m,20; et entre Culoz et Jonage, 0^m,50.

Le débit caractéristique d'étiage du Rhône moyen est : entre la Saône et l'Isère, 300 mètres cubes; entre l'Isère et l'Ardèche, 400 mètres cubes, et entre l'Ardèche et la Durance, 500 mètres cubes.

La moyenne des débits des six mois de basses eaux et pour les mêmes régions sont respectivement : 500 mètres cubes, 825 mètres cubes et 1075 mètres cubes; enfin les débits semi-permanents sont de 800 mètres cubes, 1150 mètres cubes et 1600 mètres cubes.

D'une façon générale, les eaux descendent au-dessous de l'étiage conventionnel pendant trois ou quatre jours en moyenne; le débit minimum constaté varie, suivant les sections, entre les deux tiers et les trois quarts environ du débit d'étiage. Les eaux moyennes représentent environ deux fois et demie le débit d'étiage, et dans les grandes crues le débit du Rhône s'élève jusqu'à vingt-cinq fois et vingt-huit fois le débit d'étiage.

47. **Usines existantes et usines projetées sur le Haut-Rhône.** — Les usines existant actuellement sur le cours du Rhône en France sont : l'*usine de Bellegarde*, avec une chute de 8 à 14 mètres et une puissance installée de 10 800 chevaux; l'*usine de Jonage*, avec une chute de même importance et une puissance hydraulique de 24 000 chevaux; l'*usine de Brigue*, avec une chute de 55 mètres et une puissance de 2 200 chevaux; la nouvelle usine de Bellegarde pour la fabrication des produits azotés et l'*usine d'Eloise* à l'effet d'utiliser temporairement l'excédent des eaux du Rhône au droit du pont de Lucey.

L'aménagement intégral du Rhône comporte l'utilisation de l'énergie qui pourra être produite entre la frontière suisse et Seyssel, soit par un barrage unique ou à un palier avec emplacement de l'usine à Génissiat, soit par deux barrages constituant deux paliers avec usines à Bellegarde et Malpertuis, soit par des chutes de faible hauteur avec barrages mobiles dites « dérivations latérales », conçues dans la technique consacrée par l'aménagement des chutes en haute montagne. Tous ces projets prévoient en même temps des dispositions pour la navigation du fleuve.

Au point de vue de l'utilisation de l'énergie hydraulique du fleuve, le tableau ci-après, dressé par M. de la Brosse, inspecteur général des forces hydrauliques, qui résume toutes les données de la question, montre que l'ensemble de l'énergie totale ou brute correspond à 4085 millions de kilowatts ou l'équivalent de 5 millions de tonnes de charbon par an.

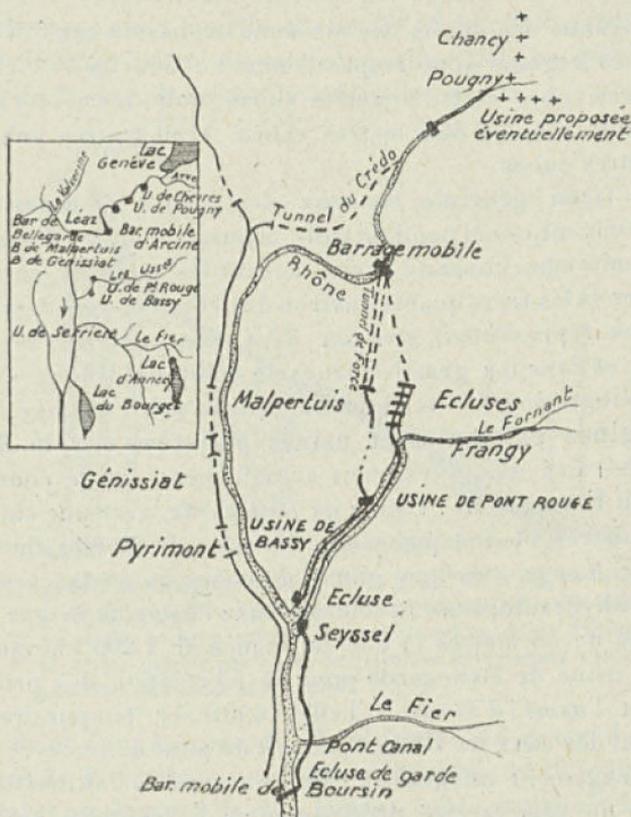


Fig. 101. — Plan de situation des usines projetées sur le haut Rhône.

La totalité de l'énergie pouvant être produite serait de 11 à 12 milliards de kwh. dans la chute totale du fleuve, soit 332 mètres de chutes brutes, dont on pourrait pratiquement utiliser 35 pour 100, soit 800 000 chevaux-vapeur.

Subsidiairement le Haut-Rhône, en amont de Seyssel, peut donner 200 000 chevaux moyens, soit 1100 millions de kilow h,

SECTIONS DU FLEUVE				AMÉNAGEMENTS PROJÉTÉS							
N°	Limites et Localités.	Chutes brutes.	Énergie moyenne existante en millions de KWh par an.	Origine des retenues.	N°	Usines génératrices. — Localités.	Hauteurs en basses eaux.	Puissances moyennes en HP.	Quantités annuelles correspondantes d'énergie en millions de KWh.	Coefficients d'utilisation.	
1	Frontière suisse (Seyssel)	69 ^m	1.100	Frontière suisse..	1	Génissiat.....	69 ^m	200.000	1100	100 0/0	
		104 ^m	1.840	Eilloux.....	2	Eilloux.....	7	16.400			
				Boursin.....	3	Maty.....	19	53.000			
				Chanas.....	4	Brens.....	9	24.500			
				Tremurs.....	5	Peyrieux.....	8	23.500			
				Le Sault.....	6	Groslee.....	12	29.700			
					7	Villette d'Anthon.	16	40.800			
		Jons.....	8	Cusset.....	12	13.500					
		Jonage.....	80								
2	Lyon (confluent de la Saône).	»	»		»	»	»	»	0		
3		52 ^m	2.100	Irigny.....	9	Ternay.....	6	16.000	605	29 0/0	
		52 ^m	2.100	Loire.....	10	Sainte-Colombe...	5	12.000			
				Condrieu.....	11	Saint-Rambert...	13	30.000			
				Andance.....	12	Saint-Vallier.....	5	13.000			
				Serves.....	13	Tournon.....	6	15.000			
				Tournon.....	14	La Roche de Glun.	6	15.000			
4	Confluent de l'Isère (Valence) Confluent de l'Ardèche.	68 ^m	3.985	Valence.....	15	Etoile.....	16	43.000	665	16 0/0	
				Le Pouzin.....	16	Les Tourettes.....	10	26.000			
				Meysses.....	17	Montélimar.....	16	42.000			
				Donzère.....	18	Mondragon.....	21	63.000	510		26,5 0/0
				Orange.....		19	Sorgues.....	11			
5	Confluent de la Durance. M. Méditerranée.	30 ^m	1.925	Avignon.....	20	Montfrin.....	8	23.000	125	19 0/0	
				645							
Totaux et moyennes.		332 ^m	11.590					715.440	4085	35 0/0	

et autant en aval de Seyssel jusqu'à Lyon, y compris l'usine de Jonage.

Le Bas-Rhône, entre la Saône et l'Isère, apporterait une contribution de 122 000 chevaux; entre l'Isère et la Durance, 240 000 chevaux, et enfin, entre la Durance et le Gardon, 25 à 30 000 chevaux.

Usine de Génissiat. — Ce projet, conçu par MM. Blondel, Harlé et Mailh, consiste à établir un barrage de 76 mètres de hauteur dans le lit même du fleuve et donnant une chute brute de 68 mètres; ce barrage serait du type plein en maçonnerie avec une courbe légèrement arquée et un profil triangulaire; le

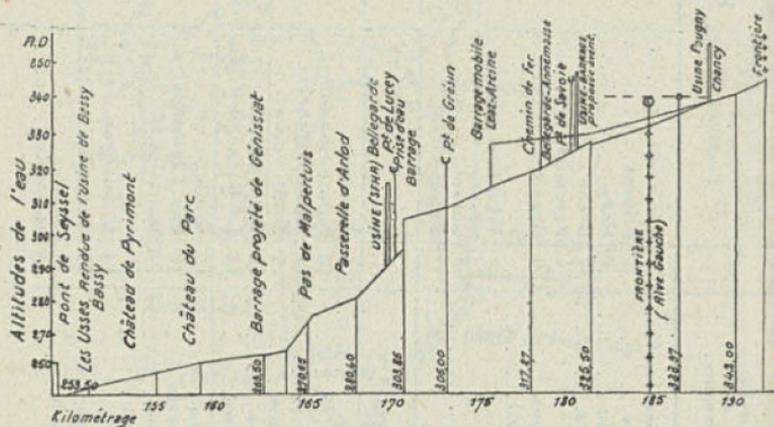


Fig. 102. — Coupe en long du Haut-Rhône avec indications des usines projetées.

parement presque vertical en amont serait revêtu d'un bouclier d'acier soudé et consolidé par un mur de garde suivi d'une digue étanche, le tout entremêlé d'espaces garnis de galets. Les fondations paraissent devoir atteindre une profondeur de 26 mètres, ce qui donnerait une hauteur totale atteignant près de 100 mètres. L'eau accumulée produirait une pression correspondant à 33 millions de kilogrammes.

Le projet prévoit un débit de 480 mètres cubes correspondant au débit normal du fleuve pendant environ trois mois par an.

Un barrage complémentaire serait construit dans la région de Dorches pour l'établissement d'un réservoir compensateur pour amortir les variations de niveau dans la région voisine de

Seyssel et assurer ainsi le service de la navigation, et aussi pour utiliser une partie de chute constante entre le barrage de Génissiat et Seyssel. La longueur du bief aurait 23 kilomètres jusqu'à la frontière suisse, et sa capacité atteindrait 12 millions de mètres cubes.

Pour la navigation, il est prévu un canal latéral sur la rive droite en aval du réservoir compensateur et en amont du grand barrage.

Les installations élévatrices devant assurer le franchissement de la chute totale pour la navigation seraient situées un peu au-dessus de Dorches (ascenseurs ou chapelets d'écluses simples ou doubles à débit compensateur). Le canal d'aménée, de faible longueur, aurait une section de 480 mètres carrés avec une vitesse de 1 mètre à la seconde.

La puissance installée à l'usine génératrice serait représentée par 24 groupes de 10 000 kw. produisant au minimum un million de kwh. quotidiens en février et 6 millions en juillet. Les turbines utilisées seraient du type Francis doubles, jumelées, et des alternateurs fourniraient du courant triphasé à la tension de 12 000 ou 15 000 volts, 25 périodes seconde.

L'usine élévatrice de tension comprendrait 2 départs de 12 000 ou 15 000 volts pour l'alimentation des localités voisines, 3 départs à 30 000 ou 50 000 volts pour l'énergie à fournir dans les départements contigus, et enfin 6 départs à 120 000 ou 150 000 volts, voire 220 000 volts pour l'alimentation de l'agglomération parisienne, chacun de ces six courants débitant 25 000 kw. groupés deux par deux sur pylônes spéciaux. Trois itinéraires différents sont prévus et distants entre eux de plusieurs kilomètres. Tous les cent kilomètres ces lignes seraient reliées par des transversales, et aux arrivées la tension serait abaissée à 15 000 volts.

Pour reconnaître les roches de fondation on a creusé sur la rive droite du Rhône un puits de 54 mètres de profondeur, et du fond de ce puits on a ouvert une galerie qui passe à 15 mètres environ sous le fond présumé du thalweg de la vallée. Il a été en outre ouvert une autre galerie perpendiculaire à la première et dirigée suivant l'axe du lit mineur du Rhône. Dans cette galerie ont été pratiquées 4 cheminées allant à la rencontre du thalweg du fleuve.

Projet Bellegarde-Malpertuis. — La solution préconisée consiste en deux barrages, de 43 mètres à Bellegarde et 40 mètres de hauteur à Malpertuis, y compris les fondations.

Les deux biefs surperposés auraient respectivement des longueurs de 5 et 6 kilomètres et des capacités utiles de 1 100 000 mètres cubes et 10 800 000 mètres cubes. Les chutes déterminées par les barrages seraient respectivement de 30 mètres et de 38 mètres (chutes brutes).

Le projet des deux barrages comporte un canal latéral à trois paliers successifs raccordés entre eux par des ascenseurs ou élévateurs à bateaux pour le service de navigation et afin de permettre l'extériorisation des deux biefs de retenue sur la plus grande partie de leur étendue.

Le barrage de Bellegarde alimenterait une usine située à Essertoux (90 000 kw.) et une autre à Bellegarde (25 000 kw.).

L'usine de Malpertuis atteindrait une puissance de 100 000 kw.

Projet Ripert ou des Usses. — Ce projet a pour effet d'éviter le cañon du Rhône et le pont de Seyssel défavorables à la navigation. La dérivation latérale du Rhône est réalisée par un tracé à travers le massif montagneux qui sépare le fleuve du torrent des Usses et l'emprunt de ce dernier ensuite, pour ramener les eaux au Rhône en aval de Seyssel.

Deux usines hydroélectriques sont prévues : l'usine dite « du Pont-Rouge » établie sur le torrent des Usses, l'autre dite « du Pont de Bassy » à l'est du village de ce nom.

Le canal d'aménée des eaux alimentant l'usine du Pont-Rouge ferait suite à un barrage de 15 mètres de retenue. La chute utilisable serait de 48 mètres en hautes eaux, 49^m,85 en eaux moyennes et 51^m,25 en basses eaux.

L'usine du Pont de Bassy comporterait un barrage de retenue donnant respectivement 21 mètres, 19^m,70 et 19 mètres de chute en basses, moyennes et hautes eaux.

La production annuelle de ces usines serait de 1 300 000 000 kilowatts.

Au point de vue de la navigation, un canal ayant son origine en amont de la prise d'eau Leaz-Arcine, partie en tunnel, partie à ciel ouvert, arriverait par trois écluses au niveau de la rivière des Usses, et à l'usine de Pont-Rouge une écluse de 18 mètres à trois bassins l'amènerait au niveau du canal de

fuite de l'usine. La navigation se continuerait par le bassin de l'usine de Bassy, où une écluse à trois bassins serait établie, et de là une dérivation, qui suivrait la rive gauche du Rhône jusqu'à Seyssel, assurerait la navigation jusqu'au canal de la Chautagne.

Projet Armand. — A partir de Seyssel jusqu'à Lyon, le projet de M. Armand, ingénieur en chef du service spécial du Rhône, prévoit cinq grosses usines placées à Elloux (16 000 chevaux), à Maty (49 900 chevaux), à Brens (43 225 chevaux), à Groslée (26 900 chevaux) et à Villette-d'Anthon (38 225 chevaux).

Projet A. Maillot dit « Rhône Léman ». — Ce projet, qui est du type à « dérivation latérale », a sa prise d'eau sur la rive gauche du Rhône à la cote 322.

Le barrage du type mobile constituerait une retenue de 6 mètres seulement. Les eaux seraient recueillies dans six chambres qui serviraient de décantation et capables chacune d'un débit de 50 mètres cubes seconde, soit ensemble 300 mètres cubes. Un système particulier de canaux assurerait le renvoi dans le fleuve des alluvions amenées dans lesdites chambres.

L'usine génératrice serait située un peu à l'amont du confluent des Usses avec le Rhône, au voisinage du village de Bassy, avec chambre de mise en charge placée sur le plateau, et l'usine sur la berge du Rhône elle-même. Douze conduites forcées de 3^m,10 de diamètre et de 158 mètres de longueur chacune alimenteraient les turbines.

La chute brute moyenne atteindrait 76 mètres, et la puissance installée serait de 180 000 kw. En hautes eaux (débit de 330 mètres cubes), on pourrait compter sur 242 000 chevaux, et en basses eaux, avec débit régularisé au moyen du lac Léman (220 mètres cubes), environ 152 000 chevaux.

La puissance totale annuelle correspondrait à 1 198 000 000 kw.

Dans ce projet, la navigation est assurée par : un port d'attente et de transit raccordé aux voies ferrées voisines, un bassin de virage, deux écluses et enfin par des digues de protection.

Par le tracé choisi, le cañon du Rhône est évité, la dérivation partant de la prise d'eau aboutissant à Bassy, les canaux de prise de force et de navigation cheminant ensemble. A partir de ce point, le canal de navigation se sépare de l'autre pour atteindre un vallon très large où pourront être établies les écluses

destinées au franchissement de la dénivellation. Les figures 103

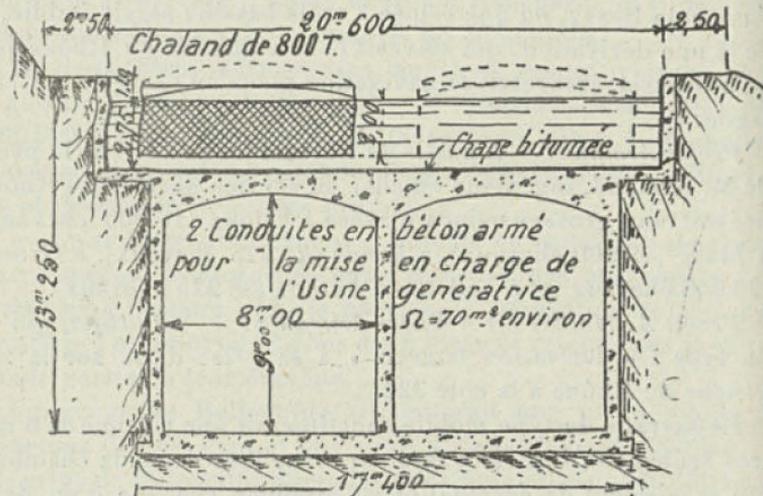


Fig. 103.

et 104 représentent les dispositions prises pour les ouvrages superposés de la dérivation et pour des chalands de 800 tonnes.

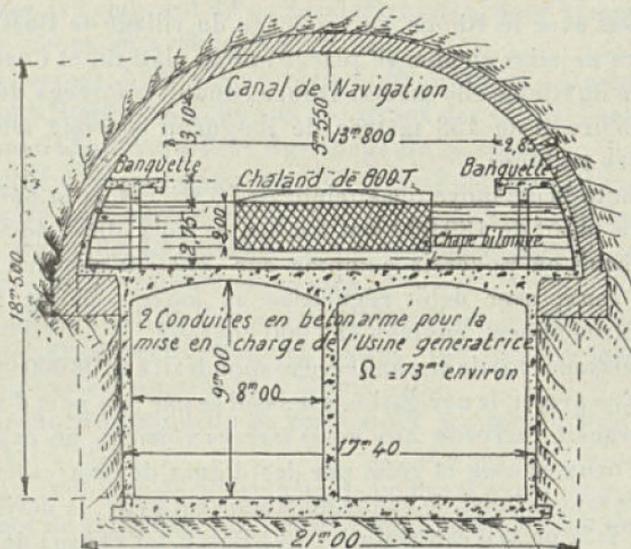


Fig. 104.

48. Usines projetées sur le Rhône moyen. — *Projet de*

M. Rateau. Tous les projets que nous venons d'analyser concernent la mise en valeur de l'énergie hydraulique du Haut-Rhône. Le projet Rateau vise l'aménagement du Bas-Rhône, et

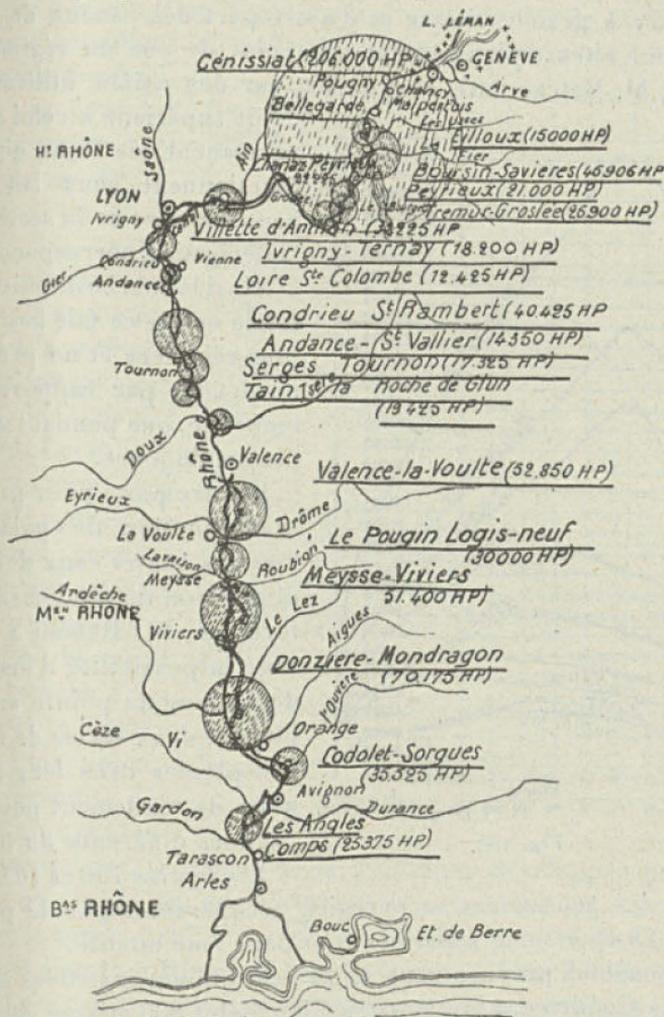


Fig. 105. — Plan de situation des usines hydroélectriques à créer sur le Rhône moyen.

son éminent auteur part de cette conception que dans cette partie du fleuve l'aménagement par barrages successifs avec usines au droit de ceux-ci, ainsi que l'aménagement par dérivations mixtes ne sont pas d'ordre pratiquement réalisable.

En conséquence, M. Rateau préconise le principe de dérivations de force motrice et de canaux de dérivation indépendants permettant de créer d'une part des canaux de dérivation de force motrice à grande vitesse et d'autre part des canaux de navigation à vitesse plus réduite. Au point de vue du régime des eaux, M. Rateau jette son dévolu sur des usines utilisant un

débit supérieur à celui semi-permanent, de façon qu'elles fonctionnent sous les plus hautes chutes de la section de la dérivation correspondante.

Ainsi la courbe de puissance totale est de ce fait beaucoup plus régulière et ne présente un déficit, par rapport à la moyenne, que pendant un minimum de jours.

D'autre part, pour parer à la diminution de puissance lors des hautes eaux due à la diminution de rendement des turbines, M. Rateau a envisagé la possibilité d'installer des usines de pointe en employant deux séries de turbines placées dans leur maximum de rendement pour des régimes différents du fleuve.

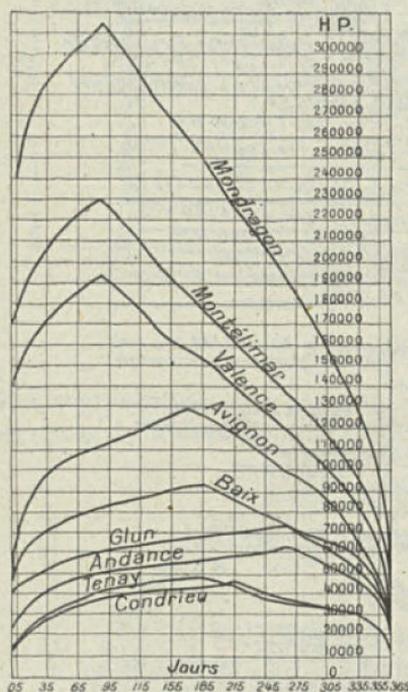


Fig. 106.

Les figures 106 et 107 montrent les puissances et énergies récupérables par le projet, pour chaque usine séparément et pour leur totalité.

Les usines prévues dans ce projet seraient installées à Ternay, à Condrieu, à Andance, à Glun (débit 800 mètres cubes), à Valence, à Baix, à Châteauneuf, à Mondragon (débit 1 200 mètres cubes et 1 700 mètres cubes en hautes eaux); chutes variant entre 12, 14 et 20 mètres en eaux moyennes.

La puissance totale récupérée en eaux moyennes serait de 950 000 chevaux, la chute totale étant de 150 mètres brutes ou 103 mètres utiles. Le fleuve, dans l'ensemble du projet, dérive

environ les 30 p. 100 du parcours du Rhône entre Lyon et Arles.

Dans son projet, M. Rateau prévoit la création d'un émissaire du lac du Bourget, venant se joindre au Rhône à un point assez bas pour permettre un écoulement d'une tranche de 10 mètres donnant un volume de 410 millions de mètres cubes, et pour

que la chute nécessaire par l'écoulement ne puisse être perdue, soit 3^m,34, il est prévu à la prise une petite usine pouvant débiter 250 mètres cubes à la seconde, travaillant sous une chute de 3 mètres à 7^m,90. Lorsque la chute ne serait plus que de 3 mètres, les turbines seraient arrêtées et une vanne assurerait la vidange du reste de la tranche d'eau utilisable. Cette usine fonctionnerait pendant les basses eaux et vien-

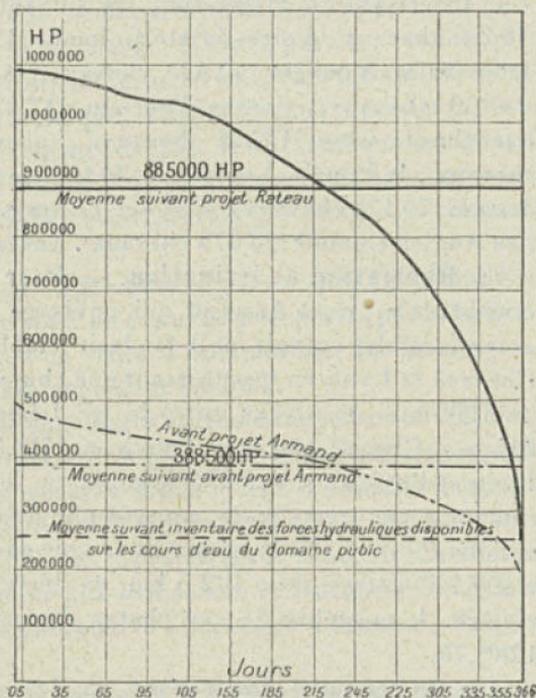


Fig. 107.

drait compenser le déficit de la puissance développée par le Rhône en étiage. Et pour pouvoir emmagasiner les crues du Rhône, il serait établi à l'amont du barrage projeté de Chanaz un canal allant du Rhône au lac et pouvant débiter 1 000 mètres cubes avec 6 mètres de hauteur d'eau. Ce canal serait en outre muni de portes permettant le barrage du lac.

L'aménagement du lac du Bourget permettrait de produire 330 millions de kwh. nécessaires à la régulation du Bas-Rhône, pour une puissance minimum de 700 000 chevaux-vapeur. Le coût des travaux pour réaliser ce programme s'élèverait à 120 millions de francs.

Projet du Service spécial du Rhône. — En aval de Lyon, l'étude faite par le Service précité prévoit, avec un débit minimum de 350 mètres cubes à la seconde, une douzaine de chutes qui utiliseraient seulement environ 15 à 30 p. 100 de l'énergie du fleuve.

Les dérivations visées sont les suivantes : Ivrigny-Ternay (18 200 chevaux), Loire-Sainte-Colombe (12 245 chevaux), Condrieu-Saint-Rambert (40 425 chevaux), Andance-Saint-Vallier (14 360 chevaux), Serves-Tournon (17 325 chevaux), Train-Laroche-de-Glun (19 425 chevaux), Valence-la-Voulte (52 850 chevaux), le Pouzin-Logisneuf (30 100 chevaux), Douzère-Mondragon (70 175 chevaux), Codolet-Lorgues (35 525 chevaux) et Les Angles-Comtes (25 375 chevaux). Ensemble 387 405 chevaux.

48. **Navigation et irrigation.** — Pour la navigation, si on considère le projet Armand qui envisage l'aménagement dans son ensemble, on voit qu'il faudrait établir douze biefs entre Chèvres et Lyon en franchissant une chute totale de 180 mètres (la différence de niveau entre le lac Léman et Lyon étant de 215 m.). Chaque bief aurait environ 17^{km},5 de longueur. Entre Lyon et Beaucaire, sur 276 kilomètres, le lit du Rhône serait remplacé par treize biefs, séparés par douze chutes avec dérivations éclusées. La longueur de la voie navigable serait réduite à 258 kilomètres, dont 102,5 km. en dérivation et 155,5 km. en rivière. L'ensemble de ces chutes donnerait une hauteur de 128^m,75.

Les dimensions des canaux et des dérivations auraient 320 mètres carrés de section, de façon qu'au moment où elles débiteraient le débit maximum le courant n'y dépasserait pas 4 km. à l'heure. Les écluses auraient 80 mètres de longueur sur 18 mètres de largeur.

Le chenal pourrait être partout établi sur le bord même du fleuve, qui permettrait la traction des bateaux depuis la berge, ce qui serait du plus haut intérêt.

L'énergie pour l'actionnement des tracteurs serait demandée aux usines à établir, qui trouveraient là un débouché permanent et assuré. D'autre part la traction réduirait sensiblement les frais d'exploitation. Mais la considération qui domine le problème de la navigation sur le fleuve entier est qu'en comblant les lacunes actuelles, le Rhône deviendrait alors une voie de

transit international. Un grand port serait établi à l'aval de Lyon et relié à la voie navigable par un canal de ceinture empruntant le canal de Jonage sur 13,5 km.

Au point de vue de l'irrigation des terres incultes et fertiles, les concessionnaires d'usines seraient tenus de véhiculer le débit nécessaire moyennant le remboursement du supplément des dépenses résultant de cette charge. D'autre part, on conçoit que la création d'usines voisines permettrait, grâce à l'abaissement du prix de l'énergie électrique, d'utiliser, pour l'arrosage, des pompes pour l'exhaussement des eaux. Il s'entend que les usines ne fourniraient cette énergie qu'en dehors des moments des pointes, c'est-à-dire qu'on s'adresserait à l'énergie résiduaire des chutes d'eau.

L'industrialisation de l'agriculture, c'est-à-dire l'exploitation des fermes, trouverait ainsi un essor de prospérité par la facilité d'une énergie voisine et de vente à bon marché. La fabrication des engrais serait aussi largement facilitée.

La surface intéressée aux usages agricoles dépasse 850 000 hectares, dont 75 000 paraissent devoir être irrigués et à peu près autant à assainir. La réserve totale d'eau à constituer serait représentée par un débit de 80 mètres cubes à la seconde, soit une puissance de 11 350 kw. à prendre sur l'énergie du Rhône et 19 630 kw. à demander aux usines sur la Durance. On estime pouvoir obtenir l'énergie relative à cet usage à raison de 0 fr. 01 le kilowatt-heure.

50. Organisation financière de la mise en valeur des forces du Rhône. — Les estimations les plus approchées des installations complètes concernant l'aménagement intégral du Rhône sont les suivantes :

a) Production de la force motrice :

Haut-Rhône.....	460 millions.
Bas-Rhône.....	550 —
TOTAL.....	1010 —

b) Navigation :

Haut-Rhône.....	490 —
Bas-Rhône.....	790 —
Port de Lyon.....	52 —
TOTAL.....	1332 —

soit pour l'aménagement total : 2342 millions.

ESSAI DE BILAN POUR L'ÉNERGIE DU HAUT-RHÔNE.		DURÉE DE CONCESSION (175 ANS À PARTIR DE L'ACHÈVEMENT DES TRAVAUX)			APRÈS L'EXPIRATION DES CONCESSIONS ET L'AMORTISSEMENT DES CAPITAUX	
		1 ^{re} PÉRIODE 10 ANS	2 ^e PÉRIODE 40 ANS Amortissement des obligations.	3 ^e PÉRIODE 25 ANS Amortissement des actions.		
Administration et frais généraux.	Frais d'administration.....	500,000	8,500,000	9,000,000	9,000,000	
	Direction et surveillance.....	1,000,000				
	Entretien et réparations ordinaires..	2,500,000				
	Redevances à l'État.....	1,000,000				
	Impôts, assurances, contrôle, etc....	2,000,000				
	Accidents et imprévus.....	1,000,000				
	Ensemble pour administration et frais généraux.....	8,000,000				
	Renouvellement du matériel.....	»	1,000,000			
	Grosses réparations.....	»	»	2,000,000	2,000,000	
Charges financières.	Obligations 300 millions.	Intérêts	9,000,000	19,500,000		
		à 6 1/2 % } la moitié. sur la part } latotalité. réalisée.				
		Amortissements (en 40 ans).....	»	1,708,000	»	»
	Actions	Intérêts à 8 %.....	6,400,000	6,400,000	6,400,000	
		Amortissement (en 25 ans).....	»	»	1,094,270	»

Conseils d'administration et gratifications au personnel.....	500.000	600.000	700.000	800.000
Réserve légale (5 % des bénéfices).....	»	700.000	»	»
Dépenses totales.....	23.900.000	38.408.000	19.194.270	11.800.000
En chiffres ronds.....	24.000.000	38.000.000	19.000.000	12.000.000
Représentant par rapport aux capitaux engagés.....	10,44 %	10 %	5 %	3,15 %
Energie produite. { Pourcentage du total..... (1800 millions de kwh). Quantités en millions de kwh...	de 20 à 50 % 35 % 630	de 50 % à 100 75 % 1350	le tout 100 % 1800	le tout 100 % 1880
Prix de revient du kilowatt-heure.....	$\frac{24}{630} = 0.038$	$\frac{38}{1350} = 0.03$	$\frac{19}{1800} = 0.01$	$\frac{12}{1800} = 0.007$
Emplois présumés. { Transport et distribution..... Electro-chimie et métallurgie..	300 millions à 0f.05 = 15 330 à 0f.03 = 10	800 millions à 0f.04 = 32 550 à 0f.015 = 8	1.000 à 0f.03 = 30 800 à 0f.01 = 8	1.000 à 0f.02 = 20 800 à 0f.01 = 8
Résultats annuels en millions de francs. { Recettes..... Dépenses..... Profits et pertes.....	25 24 » + 1	40 38 + 2	38 17 + 21	28 12 + 16

Dans ces conditions, le cheval hydraulique reviendrait au prix moyen de 1.200 fr. environ, pour 800.000 chevaux-vapeur.

Le prix de revient de l'énergie électrique ressort du tableau ci-dessus dressé par M. de la Brosse.

La loi concernant l'aménagement intégral du Rhône a été votée par la Chambre des Députés le 17 octobre 1920 et par le Sénat le 25 mars 1921.

L'économie financière de cette loi peut se résumer comme suit : concession de l'ensemble des travaux accordée pour soixante-quinze ans à une Société unique groupant tous les intéressés : départements, villes, compagnies de transports, particuliers et pour une certaine fraction appel à l'industrie privée.

Cette société doit être constituée à un capital-actions pouvant être réduit à un dixième de la dépense totale, le surplus devant être réalisé par émission d'obligations. Il n'y aura aucun dividende réservé ou garanti, et le Trésor ne doit intervenir que pour avancer les sommes nécessaires à la rémunération des obligations en cas d'insuffisance de recettes.

Les proportions du programme envisagé et l'ordre de grandeur des capitaux à réunir (3 milliards à 3,5 milliards aux prix actuels) n'ont rien de définitif.

D'autre part, la Société exploitante, dite Société Nationale du Rhône, est chargée de présenter les projets d'exécution concernant tant la force motrice que la navigation et d'en assurer la réalisation sous sa propre responsabilité.

MUSEE
COMMERCIAL
LILLE

CHAPITRE VIII

TURBINES HYDRAULIQUES

Classification et appropriation des turbines. — Théorie des turbines centripètes. — Turbines Francis. — Turbines mixtes. — Turbines tangentielles. — Turbines Pelton. — Fonctions caractéristiques des turbines. — Installation des turbines. — Essais des turbines. — Régulateurs de vitesse. — Régulateurs de pression. — Régulateurs absorbeurs.

51. Classification et appropriation des turbines. — Les turbines hydrauliques diffèrent des anciennes roues hydrauliques du fait qu'elles peuvent recevoir l'eau sur leur pourtour, qu'elles sont, à puissance égale fournie sur leur arbre, plus légères, plus solides, moins coûteuses et qu'elles tournent dans le sens qu'on désire. Elles peuvent fonctionner en temps de gelée et permettent d'utiliser, avec un égal rendement, des volumes de plusieurs mètres cubes sous des chutes de quelques mètres et quelques litres sous des charges de plusieurs centaines de mètres.

Au point de vue du mode d'action de l'eau, on classe les récepteurs hydrauliques en *turbines à réaction* ou à pression intérieure et en *turbines à action* ou à libre déviation ou à impulsion, où l'eau agit sans pression.

Dans les *turbines mixtes*, la pression et la vitesse varient simultanément.

Les turbines à réaction, où l'énergie de l'eau, est utilisée en partie sous forme cinétique et en partie sous forme potentielle et qui doivent tourner dans l'eau, admettent toujours l'eau sur tout leur pourtour, c'est-à-dire qu'elles sont à admission totale.

Ces turbines ont pris la forme centripète parallèle et elles sont désignées sous le nom de *Francis*, leur inventeur.

Quant aux turbines à impulsion, elles sont représentées par les turbines *Pelton*.

Dans la presque totalité des cas, ces turbines sont appelées à entraîner des machines électriques qui doivent fournir une puissance constamment variable. Pour assurer ce régime, elles tournent avec une vitesse angulaire sensiblement constante malgré les variations brusques et importantes du couple moteur. D'autre part, leur rendement, qui doit être le plus élevé possible au régime le plus utilisé, demande à conserver une valeur satisfaisante aux différents régimes.

Les usines de hautes chutes fonctionnent à chute relativement constante, alors que les usines à basses chutes voient leur charge réduite par les crues dans des proportions très sensibles, parfois de la moitié de celle utilisée en régime normal. Dans ce dernier cas, les turbines doivent être susceptibles de fonctionner sous des chutes assez variables avec un rendement acceptable, c'est-à-dire sans trop de diminution; cette considération est d'ordre capital pour l'utilisation pratique de la force motrice des marées.

Pour les turbines utilisant de basses chutes, le progrès le plus récent a consisté à augmenter la vitesse angulaire afin de pouvoir accoupler directement les récepteurs hydrauliques aux génératrices électriques (turbines Francis rapides). D'autre part, jusqu'ici le coefficient de réaction des turbines Francis, du type normal, était voisin de 0,5. Dans les nouveaux types on a obtenu une amélioration sensible en produisant une forte réaction à la partie inférieure de l'entrée et une moins forte à la partie supérieure, c'est-à-dire que la réaction varie sur toute la hauteur de l'aubage. On accepte généralement une assez grande perte à la sortie, qui varie de 8 à 10 p. 100 au lieu de 4 à 6 p. 100 anciennement.

De plus, les aubes ont leurs arêtes extrêmes parallèles, ce qui permet d'avoir un diamètre d'entrée aussi petit que possible et une augmentation de la vitesse relative de l'eau dans la roue. Pour réduire les frottements à l'intérieur de la turbine on a diminué la longueur des aubes. Enfin on constitue ces nouvelles turbines en leur donnant un petit nombre d'aubes et on fait la distance variable et décroissant du haut en bas, entre distributeur et aube.

De même elles peuvent absorber plus d'eau, quand la chute diminue, que les turbines normales. Ainsi une de ces dernières

absorbant 1000 litres sous 2 mètres de chute n'en admettra que 775 sous 1^m,20, tandis qu'une turbine rapide avec un coefficient de puissance ($n_s = 500$), et appelé aussi « nombre de tours spécifiques », en consommera environ 850, soit 10 p. 100 de plus. Il est vrai que le rendement de cette dernière diminue sensiblement plus vite que celui des turbines normales lorsqu'on s'éloigne de la charge normale pour une chute donnée.

Cependant ces turbines, malgré leurs avantages incontestables, ne réalisent pas encore la solution d'engins utilisant les eaux surabondantes en basses chutes au moment des crues, pour arriver à une puissance aussi constante que possible. Il n'apparaît pas encore qu'on ait résolu le problème au moyen de turbines dont les roues fonctionnent simultanément sous toutes les hauteurs de chutes. Pour l'instant, on ne peut y satisfaire qu'en montant sur le même axe plusieurs roues, l'eau n'étant admise, quand la chute est haute, que sur une partie d'entre elles, tandis que toutes travaillent quand la hauteur de chute diminue.

La théorie et, plus peut-être encore la pratique par la comparaison entre les nombreuses turbines réalisées, ont permis d'établir le type de turbines à choisir et les conditions à réaliser avec un coefficient de puissance donné, pour avoir un rendement satisfaisant. On sait ainsi que pour une roue Pelton à un injecteur marchant à un régime normal, si n_s est compris entre 1,4 et 25, le rendement hydraulique qui est de 76 p. 100 pour $n_s = 1,4$ croîtra jusqu'à 84 p. 100 pour $n_s = 9,8$ et reviendra aux environs de 76 p. 100 pour $n_s = 25$. En dehors de ces limites, le rendement n'a plus aucune valeur acceptable.

De même pour une turbine Francis à une roue, pour n_s compris entre 47,50 et 250, le rendement oscille dans les mêmes conditions, avec un maximum analogue au cas précédent pour $n_s = 106$.

Entre les valeurs 25 et 47,50 on pourra employer une turbine Pelton avec deux, trois ou quatre injecteurs. Au delà de $n_s = 250$, on montera plusieurs roues Francis sur le même axe.

Soit par exemple une chute de 200 mètres avec des groupes de 2000 chevaux et une vitesse de 230 tours à la minute, on a $n_s = 19,6$, ce qui conduit à une roue Pelton à un injecteur; avec 1 000 tours à la minute, $n_s = 59$, ce qui indique une turbine Francis à une roue.

On peut ainsi réaliser à la partie inférieure du rotor d'une turbine Francis une vitesse périphérique supérieure à $\sqrt{2gH_n}$, c'est-à-dire plus grande que celle que pourrait atteindre l'eau si toute son énergie était transformée en énergie cinétique. Ainsi avec des turbines où le nombre de tours spécifiques $n_s = 500$, on arrive à avoir : $u_0 = 1 \text{ à } 1,25 \sqrt{2gH_n}$.

On sait que Kaplan dit avoir atteint $n_s = 800 \text{ à } 900$, avec un rendement de 80 p. 100.

Dans les considérations qui précèdent nous avons limité notre examen aux turbines Francis et Pelton, en raison de cette circonstance que ce sont actuellement les deux genres de turbines presque exclusivement employés dans les installations de chutes d'eau avec conduites forcées.

Par rapport à leur mode de fonctionnement dans l'espace, les turbines sont disposées soit verticalement, soit horizontalement. Cette dernière disposition ne convient pas pour des chutes à faible hauteur, et l'actionnement direct est d'ordre impossible en raison de la faible vitesse de la roue mobile. Les turbines à axe vertical offrent une certaine complexité dans leur installation et sont moins faciles à surveiller.

On sait que l'on peut relier le nombre de tours n d'une turbine fournissant une puissance de N chevaux sous une chute de hauteur H au nombre n_s de tours d'une turbine semblable donnant une puissance de 1 cheval sous 1 mètre de chute par la relation suivante :

$$n_s = n \frac{\sqrt{N}}{H \sqrt{H}}$$

52. Théorie des turbines centripètes. — Les turbines centripètes fonctionnent toujours par réaction. L'eau agit de l'extérieur à l'intérieur en se rapprochant de l'axe, les filets se mouvant dans un plan normal à l'axe. La force centripète a une double action : elle diminue la pression effective à l'entrée des aubes et elle repousse l'eau en empêchant son entrée dans le récepteur. Le débit varie en sens inverse de la vitesse, assurant ainsi l'uniformité de la rotation. Les turbines centripètes sont aujourd'hui les plus répandues, par suite de leur rendement élevé et de la facilité avec laquelle elles satisfont toutes les exigences de la pratique.

Les turbines centripètes offrent l'avantage de pouvoir être fractionnées, sans diminution du rendement, fractionnement qui est nécessaire quand on veut régulariser la puissance sans abaisser l'effet utile; la meilleure solution consiste à diminuer graduellement l'arrivée de l'eau sur toute la circonférence plutôt que de fermer quelques ouvertures du distributeur.

La relation fondamentale qui régit le fonctionnement des turbines centripètes est :

$$V_2 = 2g \left(\frac{h + p_a - p_o}{\rho} \right);$$

V vitesse absolue à la sortie de l'eau, p_o la pression du liquide au niveau de la couronne supérieure, p_a la pression atmosphérique par mètre carré, h la distance du niveau de l'eau dans le bief d'amont au plan médian horizontal de la couronne mobile.

Le triangle des vitesses au point a fournit (fig. 108) :

$$\omega^2 = V^2 + v^2 - 2 Vv \cos \alpha.$$

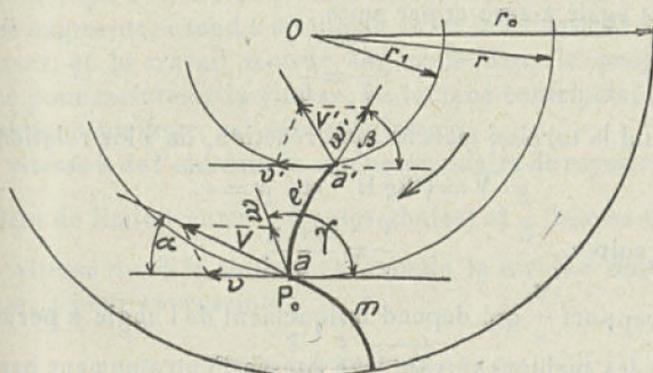


Fig. 108.

Et celui au point a' :

$$V'^2 = \omega'^2 + v'^2 - 2 \omega'v' \cos \beta.$$

Pour que l'eau entre sans choc dans la couronne mobile, il faut que le premier élément des aubes soit parallèle à la direction de ω , formant avec la direction de v un angle γ qui fournit :

$$\frac{v \sin (\gamma + \alpha)}{V \sin \gamma}.$$

Enfin le rendement a toujours pour expression :

$$R = 1 - \frac{V^{1/2}}{2gH}$$

On s'arrange pour que b soit aussi petit que possible et que d'autre part : $\omega' = v'$, à la condition que la vitesse v' soit assez grande pour assurer le débit total de la chute.

La relation $\omega' = v'$ permet d'avoir :

$$v = \frac{gH}{V \cos \alpha}$$

donnant la vitesse v sur le périmètre extérieur de la couronne mobile.

Pour que la turbine centripète fonctionne sans réaction, il faut, comme dans le cas d'une turbine centrifuge, que :

$$\frac{p}{\theta} = \frac{p_a}{\theta} + h' \quad \text{ou} \quad \frac{p_o - p_a}{\theta} = h'$$

Lorsque la turbine fonctionne non immergée, la valeur de h' devient égale à zéro et par suite :

$$\frac{p_o}{\theta} = \frac{p_a}{\theta}$$

Quand la turbine marche sans réaction, on a les relations :

$$V = \sqrt{2gH} \quad \text{et} \quad \omega = v.$$

Par suite :

$$\frac{V}{v} = \frac{\cos \alpha}{2}.$$

Ce rapport $\frac{V}{v}$ qui dépend uniquement de l'angle α permet de classer les turbines suivant leur vitesse d'entraînement par rapport à la vitesse absolue de l'eau à la sortie des aubes directrices.

Les turbines à petite vitesse sont celles pour lesquelles le rapport $\frac{v}{V}$ ne dépasse pas 0,60, et les turbines à grande vitesse ont $\frac{v}{V} = 1$ ou très voisin de l'unité.

Le rendement augmente lorsque les angles α et β diminuent; par suite les turbines centripètes à petite vitesse présentent sur les turbines à grande vitesse un avantage notable à ce point de vue.

On sait, de plus, qu'il y a intérêt à faire r_1 aussi peu différent que possible de r .

Quand la turbine centripète est située, par exemple, à une hauteur h'' au-dessus du niveau d'aval, la chute est réduite d'autant et devient égale à $(H - h'')$. Le rendement alors est :

$$R = \left(1 - \frac{V'^2}{2gH}\right) - \frac{h''}{H}$$

La réduction est d'autant plus grande que h'' représente une fraction plus grande de H .

Il y a donc intérêt à ce que la turbine centripète fonctionne noyée.

Le débit de la couronne mobile est donné par la même relation que pour la turbine centrifuge, c'est-à-dire qu'il varie comme $v\omega'$ et en raison inverse de la vitesse v .

Lorsque la résistance diminue, la vitesse v augmente et, ω' s'abaissant, le débit diminue, réduisant le travail développé par la turbine, qui ramène sa vitesse à la valeur du régime. Si la charge augmente, v tend à diminuer, $v\omega'$ et le débit de la turbine croissent, et le travail moteur augmente dans la proportion voulue pour maintenir la vitesse. La turbine centripète, comme la turbine centrifuge, est auto-régulatrice.

La vitesse u de l'eau dans la section circulaire de rayon r_1 , qu'il convient de limiter entre $\frac{1}{7}$ (hautes chutes) et $\frac{1}{5}$ (basses chutes) de la vitesse due à la chute sous laquelle la turbine doit fonctionner, a pour expression :

$$u = \frac{1}{5} \text{ à } \frac{1}{7} \sqrt{2gH}$$

Connaissant Q le débit et H , et en se fixant u , on a :

$$r_1 = \sqrt{\frac{Q}{\pi u}}$$

On prend $r = 1,5 r_1$ à $2 r_1$ et on fait le rapport $\frac{r_0}{r} = 1,15$ à $1,25$.

La valeur de v' doit être suffisante pour que la turbine débite toute l'eau fournie par la chute.

La somme des dimensions horizontales des sections de sortie pour chacune des couronnes est :

Couronne directrice : $2 \pi r \sin \alpha \times mK$;

Couronne mobile : $2 \pi r_1 \sin \beta \times m'K'$;

K et K' coefficients tenant compte de l'épaisseur des aubes et m et m' de la contraction qui se produit à l'entrée des orifices.

Désignant toujours par b et b' les dimensions verticales respectives des deux couronnes et en nous rappelant que V et v' sont les vitesses du liquide à la sortie des deux couronnes, on obtient :

$$Q = mK \times 2 \pi r \sin \alpha \times bV \quad (1)$$

et
$$Q = m'K' \times 2 \pi r_1 \sin \beta \times b'v'.$$

Connaissant r , l'équation (1) fournit, en remplaçant V par sa valeur ($V = \sqrt{2gH}$) :

$$Q = mK \times 2 \pi r \sin \alpha \times b\sqrt{2gH} ; \quad (2)$$

m varie de 0,85 à 0,95 suivant la matière dont les aubes sont constituées et selon que leur poli est plus ou moins parfait.

Enfin si n est le nombre d'aubes et e leur épaisseur, on a :

$$Q = m(2nr \sin \alpha - ne) b\sqrt{2gH}.$$

La valeur de b , tirée de l'équation (2), dépend de celle de l'angle α . Si n_m est le nombre de tours par minute, on écrit :

$$n_m = \frac{60v}{2\pi r}; \text{ mais } v = \frac{2 \cos \alpha}{V}; \text{ d'où : } n_m = \frac{60V}{4\pi r \cos \alpha}.$$

Comme on connaît d'autre part la valeur de V , il devient facile de déterminer les valeurs de n_m et de v , c'est-à-dire la vitesse d'un point de la circonférence extérieure et de la couronne mobile.

La valeur théorique que peut prendre le rendement hydraulique du tracé des aubes dans les deux cas extrêmes de la pratique est définie par les considérations suivantes :

1° Quand : $\alpha = 15^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\frac{r'}{r} = \frac{1}{2}$ et $\varepsilon = 0$.

2° Quand : $\alpha = 45^\circ$; $\gamma = 20^\circ$; $\frac{r'}{r} = \frac{3}{2}$ et $\varepsilon = 2/3$;

en rappelant que α est l'angle que fait la vitesse d'entrée dans la couronne mobile en ce point, γ l'angle que fait la vitesse de sortie de la couronne avec la vitesse de la couronne mobile en ce point, ε le degré de réaction et que la valeur du rendement

varie de 0,998 à 0,92. En prenant les chiffres ci-après pour les pertes d'énergie correspondant à une bonne construction, soit : 10 p. 100 dans le distributeur, 10 p. 100 dans la couronne mobile et 5 p. 100 pour les frottements de l'arbre et de la couronne dans l'air, on trouve que le rendement total est compris entre 0,765 et 0,711. Mais on atteint heureusement des chiffres plus élevés, soient 0,88 et 0,80, les pertes ci-avant pouvant être réduites de moitié dans les constructions bien soignées.

Quand les turbines centripètes travaillent sous une charge réduite ou avec une hauteur de chute variable, le degré de réaction varie dans une très large mesure.

Si on désigne par v_0 la vitesse de l'eau à l'entrée de la turbine, on a pour la valeur du degré de réaction :

$$\varepsilon = 1 - \frac{v_0^2}{\sqrt{2gH}} \quad \text{ou} \quad K = \frac{v_0}{\sqrt{2gH}}$$

Si u_0 est la vitesse d'un point de la turbine, on obtient :

$$u_0 = \frac{1}{2 \cos \alpha_0} \sqrt{\frac{2gH}{1-\varepsilon}}$$

α_0 angle avec u_0 de la vitesse absolue et de la vitesse relative pour le filét moyen à son entrée dans la turbine.

On voit aussi que la turbine tourne d'autant plus vite que le degré de réaction est plus élevé.

53. **Turbines Francis.** — Ces turbines, d'abord utilisées avec succès pour les basses et moyennes chutes, prennent de plus en plus d'importance dans l'aménagement des hautes chutes.

Leur coefficient de réaction est :

$$\varepsilon - 1 = \frac{v_0^2}{\sqrt{2gH}}$$

v_0 vitesse de l'eau à son entrée est voisine de 0,5.

Dans ce genre de turbine il y a, contrairement à ce qui se passe pour la roue Pelton, une poussée axiale dirigée en sens inverse de la sortie de l'eau. On a cherché à y remédier en admettant l'eau sous pression, en quantité convenable, en arrière de la roue mobile du côté opposé à la sortie de l'eau. Mais on n'arrive à un équilibrage que pour le cas d'un régime donné. Il est donc nécessaire de prévoir des paliers assez forts et suffisamment bien refroidis pour pouvoir supporter sans

échauffement appréciable les frottements dus à cette poussée dans les cas les plus défavorables. Pour une turbine à axe vertical et à une roue, cette poussée, dirigée de bas en haut, présente au contraire l'avantage de soulager les pivots et les crapaudines.

Si l'on veut monter plusieurs roues sur le même axe, on les dispose de façon que les directions de sortie de l'eau soient opposées, soit que les turbines se présentent accolées dos à dos, soit au contraire que les sorties d'eau soient disposées en face l'une de l'autre.

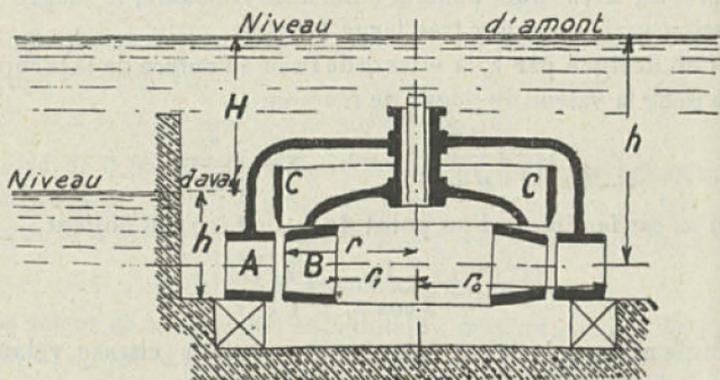


Fig. 109.

La fig. 109 représente une turbine Francis à axe vertical dont le distributeur A entoure entièrement la roue mobile B, l'eau coulant de l'extérieur vers l'intérieur. Les aubes directrices sont inclinées de l'angle α sur le cylindre d'entrée dans la couronne mobile. Les aubes mobiles sont établies entre deux joues formées par les surfaces de révolution dont la méridienne est tracée de façon à forcer les filets liquides à s'infléchir vers l'orifice de sortie et à s'écouler sans remous; leur longueur perpendiculairement à l'aube est une fraction aussi faible que possible du rayon. Entre l'espace annulaire compris entre le distributeur et la roue, c'est-à-dire le jeu, on fait descendre ou monter le tiroir cylindrique C ou distributeur auxiliaire. Le pivot de la turbine se trouve en haut de l'arbre. La hauteur de la roue mobile à l'entrée est un peu inférieure à celle de la sortie; tandis que dans la turbine Fourneyron la hauteur à l'entrée est égale à celle à la sortie.

Pour les hautes chutes, les turbines sont complètement closes, et l'eau y est amenée par une conduite allant du bief amont à la capote de la turbine, prolongée par un tube d'aspiration. Un couvercle est placé sur la face de la turbine opposée à la sortie de l'eau. Il sert en outre au démontage de la turbine en cas de réparation.

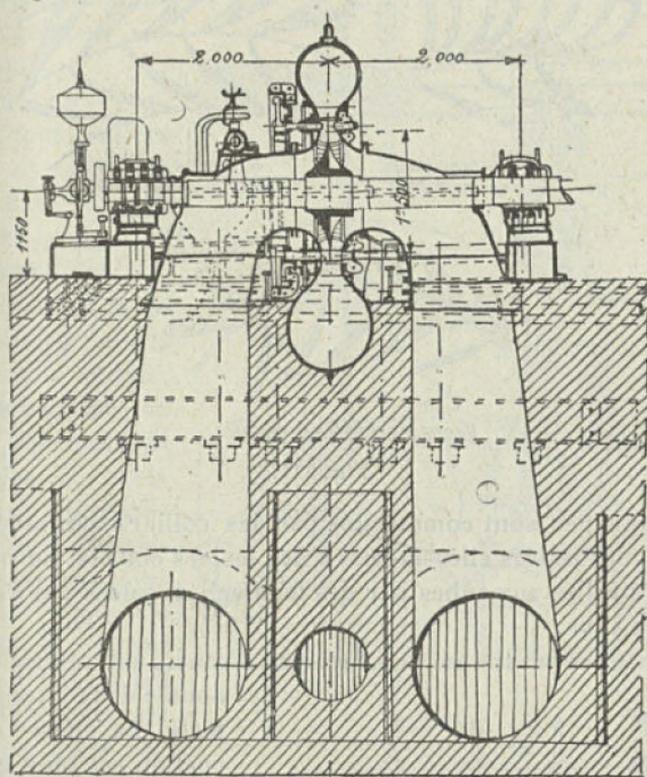


Fig. 110. — Turbine centripète Voith.

Les vannages de ces turbines sont analogues à ceux des turbines axiales et centrifuges. La fig. 111 montre des vannages à persiennes qui peuvent tourner autour de l'axe de la turbine et, pour un faible déplacement angulaire, ouvrir totalement l'admission. Il est placé extérieurement à la roue fixe. Quand on veut éviter la poussée de l'eau sur le vannage, on dispose au-devant de lui une série d'avant-becs fixes.

Le vannage à directrices mobiles (fig. 112) a chacune de ses

aubes directrices articulée autour d'un axe passant par son milieu, afin que l'action de l'eau s'équilibre sur chacune d'elles pour que la résistance au mouvement soit réduite au minimum.

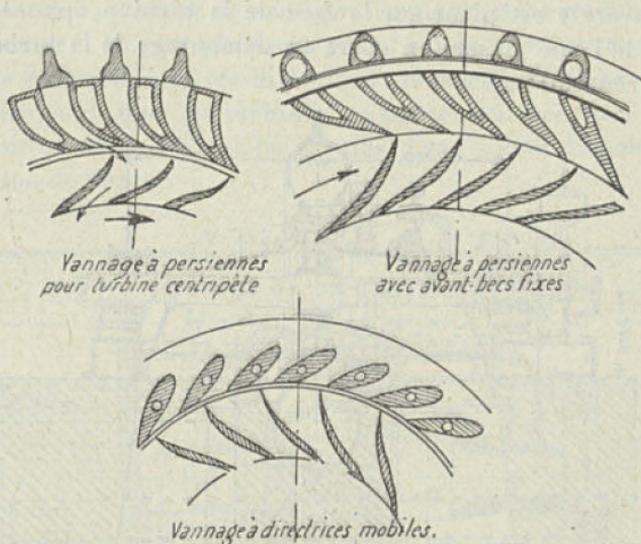


Fig. 111.

Ces vannages sont commandés par des colliers actionnés par des bielles reliées elles-mêmes à des leviers coudés, ou par des colliers reliés aux aubes par des manivelles calées sur l'axe de chaque aube.

La vitesse maximum des turbines Francis est inférieure au

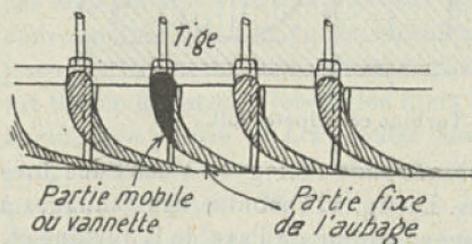


Fig. 112.

doubling de la vitesse normale. La vitesse d'évacuation est plus grande que pour le type à libre déviation, et la vitesse linéaire, prise à la circonférence moyenne, est plus considérable dans la turbine à réaction que dans la turbine à libre

déviation. Enfin, la vitesse relative de l'eau à l'entrée de la turbine à réaction est plus faible que celle correspondante dans la turbine d'action.

La fig. 113 a trait à une turbine Francis de 3000 chevaux construite par la maison Escher Wyss.

Dans certaines turbines, l'admission se fait par un système d'obturateurs pivotants, de forme spéciale, qui agissent simultanément et de la même quantité sur tous les canaux distributeurs. L'attaque des obturateurs a lieu à l'aide d'un régulateur automatique.

D'autres fois, l'aube tout entière pivote autour d'un point fixe et peut obstruer le passage entre deux aubes voisines, qui sont fixes.

On divise parfois la couronne mobile, dans sa hauteur, au moyen de cloisons verticales et horizontales. En Amérique, une disposition assez communément employée consiste à replier l'une sur l'autre les aubes de la couronne directrice pour régler la dépense d'eau. A cet effet chaque aube est composée de deux parties, dont la plus rapprochée de la couronne mobile est fixe, tandis que l'autre est articulée au moyen d'une charnière qui lui permet de se fermer, lorsqu'elle y est sollicitée, par un dispositif de manœuvre variant suivant les constructeurs.

Une catégorie de turbine, de venue récente, est celle dite *Kaplan*, qui est caractérisée par une roue mobile très simple traversée axialement et munie d'un petit nombre d'aubes réceptrices, et le distributeur est à aubes mobiles perpendiculaires à celles du récepteur.

Une catégorie de turbine, de venue récente, est celle dite *Kaplan*, qui est caractérisée par une roue mobile très simple traversée axialement et munie d'un petit nombre d'aubes réceptrices, et le distributeur est à aubes mobiles perpendiculaires à celles du récepteur.

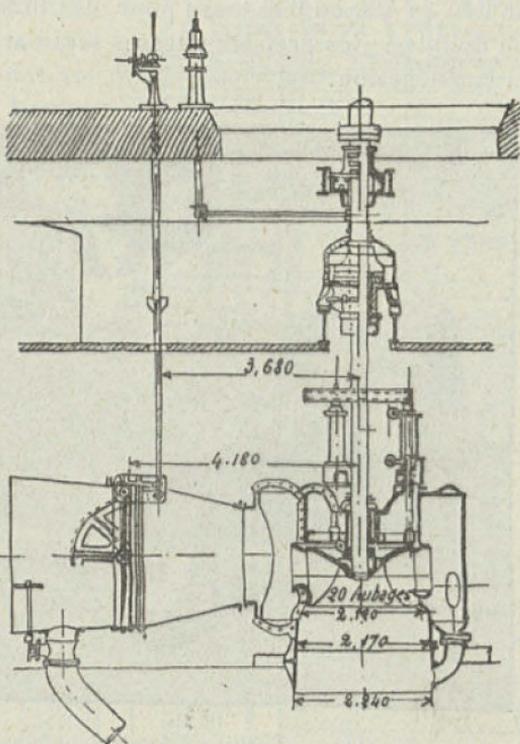


Fig. 113.

Le rendement reste constant pour des débits variables entre la moitié et le débit normal; il a été reconnu, dans des essais, de 75 p. 100 à la vitesse spécifique maximum, soit à 1000 tours par minute. Une turbine de 2000 chevaux de puissance fonctionnant sous une chute de 25 mètres tourne à la vitesse de 1000 tours, au lieu de 400 ou 650 tours pour des turbines Francis simples ou doubles. Ces grandes vitesses seraient dues à la simplicité de la construction.

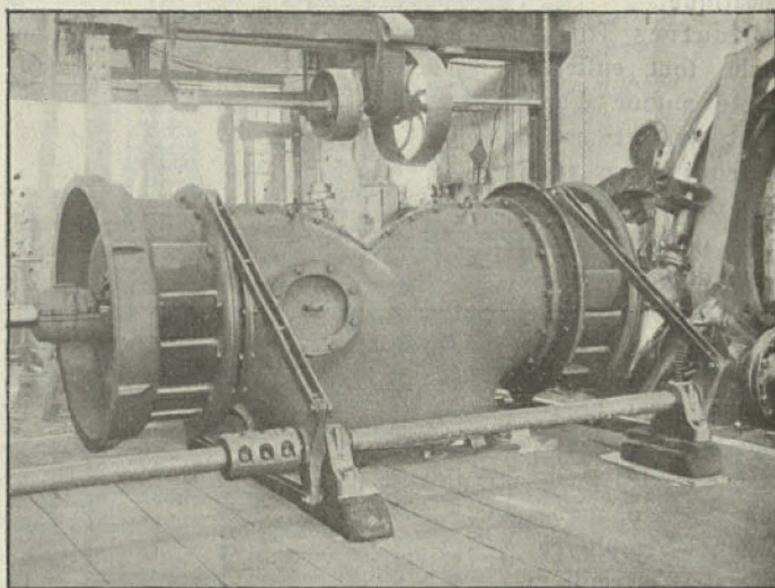


Fig. 114. — Turbine Francis double en chambre d'eau
(250 tours, chute 6^m25, 320 chevaux).

On constate que l'emploi des turbines centripètes verticales à une roue pour l'utilisation des basses chutes se généralise avec succès, là où précédemment étaient employées des turbines à roues multiples soit verticales, soit horizontales. Aussi, pour une chute et une vitesse données, il est possible actuellement de faire produire à une turbine une puissance plus grande que celle qui était réalisable il y a quelques années; inversement pour une chute et un débit donnés, il est possible de faire tourner une turbine d'un tracé moderne à une vitesse beaucoup plus élevée, sans diminution du rendement; au contraire, il est plus élevé.

La vitesse spécifique de ces turbines (roue unique) est donnée par l'expression :

$$n_s = \frac{n}{h} \sqrt{\frac{H}{h}}$$

Pour de hautes chutes et de grands débits, ou bien pour obtenir de grandes vitesses de rotation en basses chutes, on emploie des « turbines jumelées ». En opposant les turbines l'une à l'autre, on équilibre totalement la poussée sur l'arbre et l'on évite les paliers de butée. On place la turbine au-dessus des plus hautes eaux (fig. 115), afin de pouvoir employer toutes les sortes de turbines et de les faire tourner dans l'air, dont le frottement contre la roue mobile est très faible.

La plupart des turbines sont installées avec « tube d'aspiration », ce qui permet d'établir les turbines au-dessus du niveau d'aval, en reliant le distributeur à un tuyau coudé qui débouche horizontalement dans le fond du canal de fuite (fig. 116). Une vanne sert pour régler la dépense d'eau, pour l'amorçage et aussi pour arrêter la turbine. La turbine fonctionne comme si la couronne mobile était établie

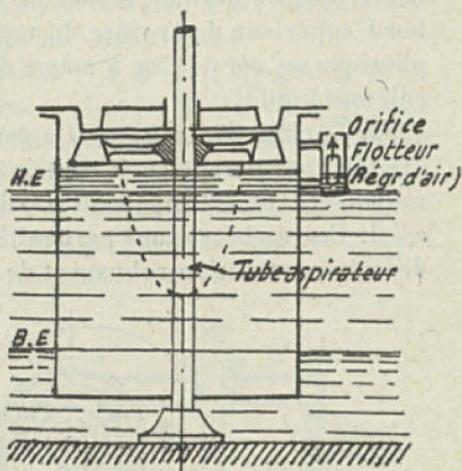


Fig. 115.

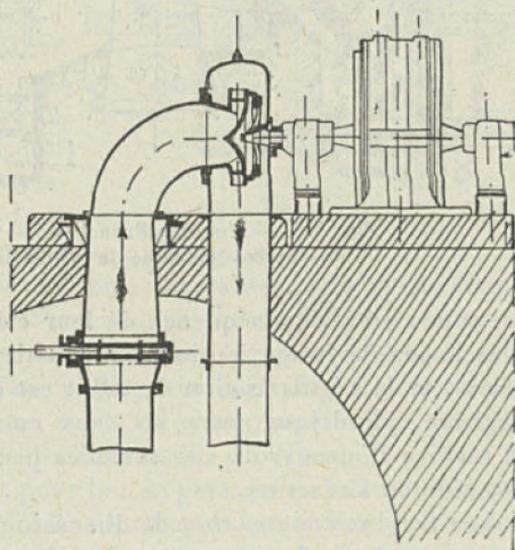


Fig. 116.

exactement au niveau d'aval. Pour qu'il en soit toujours ainsi, il faut que ce dernier niveau ne descende pas au-dessous du bord supérieur de l'orifice du tuyau, sinon la pression atmosphérique ne serait plus à même de pouvoir faire équilibre à la colonne liquide.

54. **Turbines mixtes.** — Ce genre de turbines, qui dérivent des turbines parallèles et centripètes, ont leur admission d'eau radiale et leur échappement axial ou même à la fois radial et axial. Ces turbines sont particulièrement appréciées en raison de leur construction robuste et de leur prix de revient relative-

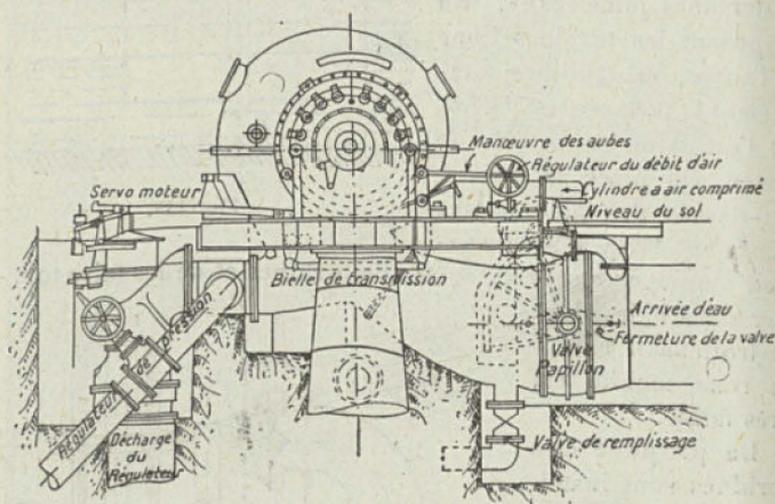


Fig. 117. — Turbine Francis de 25 000 chevaux.
Usine hydroélectrique de White River (E. U.).

ment peu élevé, conséquence de leur établissement en séries. Des lames de forme lenticulaire constituent les aubes directrices, et la régularisation du débit est obtenue à l'aide d'un registre cylindrique entre les deux couronnes, comme dans la turbine Fourneyron. Ces turbines peuvent fonctionner sans réaction ou à réaction.

Les turbines mixtes sont de dimensions plus réduites que les autres systèmes de récepteurs; leur installation est plus facile et le coût moins élevé; mais elles se prêtent mal aux variations de débit et le tracé des aubes offre de grandes difficultés d'exécution. En Amérique, ce genre de moteur est toujours constant

pour être noyé; on le place dans un tube à succion (turbine Hercule). Lorsque de grandes réductions de débit sont à craindre, on peut faire tourner la turbine dans l'eau.

Il est possible avec ces turbines d'utiliser un grand débit avec de petits diamètres de roues; elles se prêtent facilement à l'accouplement direct aux machines électriques, même lorsque la turbine travaille sous faible charge.

Le rendement pratique de ces turbines est de 0,80 pour pleine admission. Le débit n'est pas proportionnel aux levées des vannes; il croît à mesure que cette levée est moindre. Le dispositif Jonval ou tube aspirateur est généralement applicable aux turbines mixtes à axe horizontal.

La fig. 118 représente la turbine très connue dite « Hercule » construite par les établissements Singrün.

La couronne fixe AA a la forme d'un cylindre muni d'aubes directrices, et la couronne B, disposée à l'intérieur, est aussi constituée par une partie cylindrique de même hauteur que les aubes fixes et se prolongeant dans la partie inférieure par des surfaces en forme de cuiller. Ces aubes étaient primitivement amovibles et fixées sur porte-aubes dont le moyeu est claveté sur l'arbre de la turbine; leur ensemble forme un bloc indéformable. Mais ce dispositif, qui devait permettre le remplacement facile des aubes, n'ayant pas été concluant, on en est revenu à faire venir de fonte les aubes avec la joue.

Les nervures K ont pour but de partager la hauteur d'entrée de l'eau en plusieurs gradins correspondant aux diverses positions que l'on peut donner au vannage. La courbure des aubes est telle que les filets liquides, d'abord dirigés horizontalement, se recourbent verticalement en agissant par réaction et s'échappent dans le bief d'aval. Entre les couronnes fixe et mobile

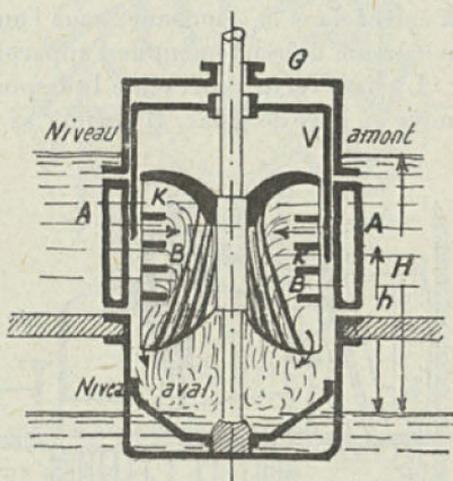


Fig. 118.

vient glisser la vanne cylindrique V équilibrée par des contrepoids, effectuant un mouvement de descente et de montée, à l'aide de deux crémaillères en prise avec des pignons calés sur un arbre horizontal, celui-ci recevant son mouvement d'un arbre vertical par l'intermédiaire de roues d'angle. L'étanchéité autour du vannage est assurée par des joints hydrauliques à la base de la cloche et au sommet de la couronne mobile.

La base du cylindre porte à l'extérieur une couronne qui s'engage entre les aubes fixes par des échancrures spéciales, qui obligent les filets liquides, pour une faible levée du vannage, à entrer dans la couronne, sous l'angle α , à l'effet d'obtenir le maximum de rendement de l'appareil.

L'arbre vertical présente la disposition bien connue du pivot noyé en bois de gaïac. Il porte à sa partie inférieure une boîte

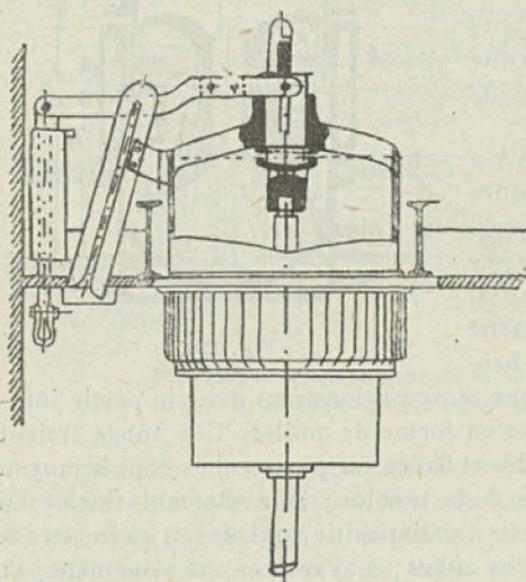


Fig. 119.

comportant des traverses reliées aux parois de la cuve inférieure, laquelle boîte porte la crapaudine recevant le champignon de gaïac sur lequel repose le pivot de l'arbre. Ce pivot est une pièce de fonte portant le grain sur lequel repose le champignon de gaïac. A la partie supérieure, l'arbre est guidé dans un boitard fixé sous le fond de la cuve supérieure G, à l'intérieur de laquelle

vient se loger la cloche de la vanne lorsqu'elle est soulevée.

La turbine dite « la Houille blanche » (fig. 119) ne diffère de la précédente que par les dispositions prises pour rendre le pivot démontable. A cet effet on cale la roue mobile, on déplace la traverse T, après avoir desserré les écrous R, et on exerce

une traction sur les tringles des leviers. Cette turbine, comme la précédente, s'emploie en bêche ouverte ou fermée avec ou sans tube d'aspiration.

Parmi les turbines du type mixte les plus répandues, nous citerons les turbines Leffel, Laurent, Ridson (fig. 120), New American, H. Bouvier, Teisset Chapron et Brault, Riva et Singrün.

On utilise les turbines mixtes pour les chutes à grand débit en accouplant deux machines sur le même arbre, enfermées dans une enveloppe commune mise en communication des deux côtés avec le bief d'amont et portant un tuyau commun d'évacuation, lequel plonge dans l'eau d'aval, y jouant le rôle de siphon. Dans ce cas, les turbines sont alimentées par l'extérieur, et l'eau se rend au tuyau d'évacuation après avoir traversé les deux turbines.

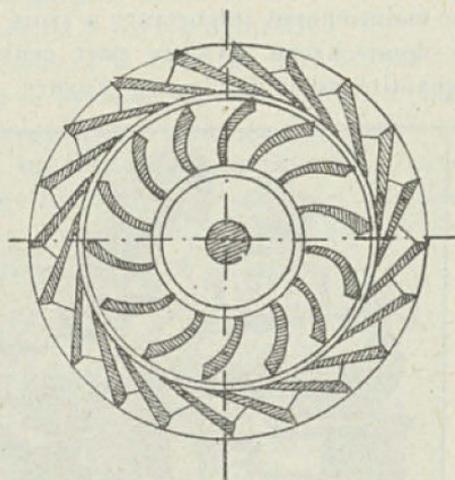


Fig. 120.

En disposant ces dernières en sens inverse sur l'arbre, l'eau pénètre dans chacune d'elles par le centre de l'enveloppe commune, et l'évacuation a lieu par les deux extrémités au moyen de deux tuyaux indépendants plongeant chacun dans le bief d'aval.

55. Turbines tangentielles. Turbines Pelton. — On peut considérer ce genre de turbine comme un récepteur à action, à axe horizontal avec injection partielle, admission et décharge de l'eau tangentielles. Par suite de leur constitution, ces engins ne peuvent pas fonctionner en réaction, ni en turbines limites; ils sont donc toujours à libre déviation. Par suite, la vitesse périphérique est sensiblement la moitié de la vitesse du jet pour que l'effet utile soit maximum.

Ces turbines sont maintenant employées dans la plupart des cas où on utilisait précédemment les turbines centrifuges à libre

déviations, c'est-à-dire pour les chutes moyennes avec débit relativement faible. Mais leur adaptation la plus importante est celle des chutes de grande hauteur.

Le rendement des turbines tangentielles, de bonne construction, varie de 82 p. 100 pour les faibles puissances à 85 p. 100 et plus pour les turbines de grande puissance. Les rendements se maintiennent importants à trois quarts de charge et même à demi-charge. D'autre part ceux-ci ne baissent que d'une quantité assez faible avec l'usure.

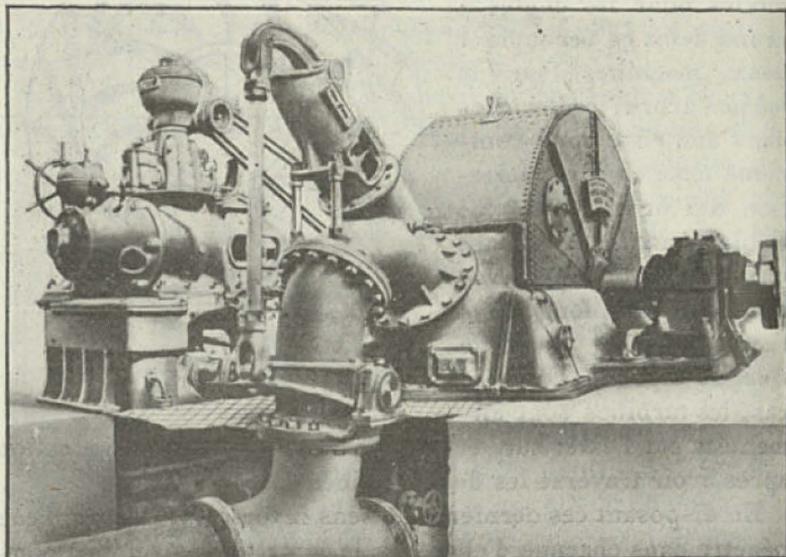


Fig. 121. — Turbine Pelton à une roue et deux jets, double réglage et régulateur, 13500 chevaux.

Dans les roues Pelton, on a deux moyens de régler la vitesse : le premier en changeant légèrement la direction de l'eau donnant l'impulsion, le second en modifiant le débit au moyen d'une aiguille qu'on avance dans le tuyau. Avec le premier on diminue beaucoup le rendement de la turbine; avec le second on ne peut agir que lentement et on s'expose à des ruptures par coups de bélier.

Lorsqu'une turbine est déchargée, pour limiter la vitesse dans les turbines on peut soit fermer l'injecteur, soit dévier le jet hors de la roue. Le premier moyen entre seul en action

lorsque la décharge est lente. Le second intervient dans tous les cas de décharges brusques où l'on ne pourrait fermer rapidement l'injecteur sans produire de coups de bélier dangereux dans la conduite forcée.

Un réglage nouveau a été imaginé par M. Sewer qui a pour objet de remplacer le « déflecteur ». Ici la déviation du jet est remplacée par sa dispersion obtenue au moyen d'éléments de guidage disposés à l'intérieur de la tuyère d'injection.

Le fait d'actionner directement le pointeau par un servomoteur propre présente sur le système à action indirecte par un servo-moteur placé au régulateur l'avantage de supprimer les retards dus aux jeux et aux flexions des organes de transmission. Le déflecteur étant toujours tangent au jet suit les mouvements du régulateur d'une façon précise; en cas de décharge de la turbine, il dévie le jet sans aucun retard.

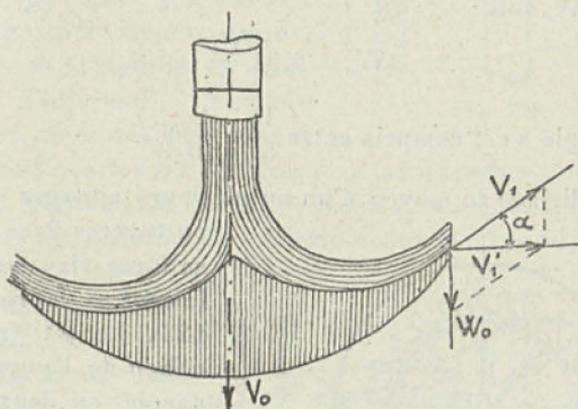


Fig. 122.

Si V'_0 et V'_1 sont les vitesses moyennes du jet à la sortie du distributeur et des augets et si W_0 représente la vitesse de rotation correspondante de la circonférence moyenne de la couronne (fig. 122), les vitesses relatives V_0 et V_1 de l'eau à l'entrée et à la sortie des augets sont :

$$V_0 = V'_0 - W_0 \text{ et } V_1 = W_0 - V'_1.$$

Faisons pour le rendement maximum $V'_1 = 0$, on obtient :

$$W_0 = V'_0 - W_0.$$

Par suite :
$$W_o = \frac{V'_o}{2}.$$

A la sortie la vitesse V' a aussi une petite valeur, et l'autre doit être établie de telle sorte que V'_1 soit normale à W_o .

Quant à V'_o ou vitesse moyenne à la sortie du distributeur, elle a pour valeur :

$$V'_o = K\sqrt{2gH},$$

H étant la charge sur le centre de l'orifice et K un coefficient variant de 0,90 à 0,96.

Appelons n le nombre de tours par minute et D le diamètre de la roue, V_1 pris sur la périphérie des augets, on a :

$$W_o = \frac{D \times n}{60}.$$

Pour avoir le rendement maximum, il faut que la vitesse de rotation W_o soit :

$$W_o = 0,94 \frac{V'_o}{2}.$$

Et l'angle a est compris entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{10} V'_o$.

L'eau dirigée au moyen d'un ou plusieurs ajutages coniques

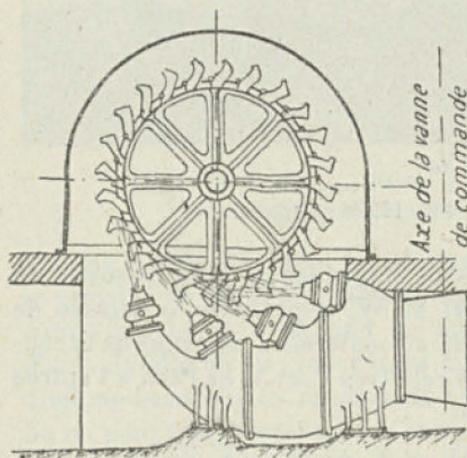


Fig. 123.

ou tuyères fixes agit par sa force vive tangentielle à la roue (fig. 123). Le jet frappe le milieu de l'auget et s'épanouit en deux nappes symétriques. Chaque filet liquide s'incurve ainsi dans son plan tangent au disque de la roue et détermine, comme dans les turbines axiales et radiales, un effort tangentiel qui fait tourner la roue.

L'auget de la roue Pelton affecte une forme caractéristique en double cuiller que le jet d'eau embrasse com-

plètement. La largeur totale de l'auget ou poche est généralement égale à sept fois le diamètre du jet.

En employant des ajutages multiples on peut, à l'aide de ces roues, utiliser des débits assez importants. Les vannages sont constitués par des aiguilles, par des obturateurs articulés ou becs de canard ou par des obturateurs glissants. Les dispositifs les plus employés sont ceux de Hett, de Scharff, de Cauchin, d'Escher Wyss.

La régularisation de la vitesse des turbines Pelton s'obtient soit par l'aiguille (fig. 124), soit par le déflecteur (fig. 125), soit par ces deux dispositifs simultanément. Le réglage par l'aiguille, en agissant sur l'injecteur, s'emploie lorsque les conduites forcées sont relativement courtes ou que l'on peut adopter des vitesses de fermeture relativement lentes, de façon à limiter à des valeurs acceptables les variations de pression consécutives aux mouvements du régulateur. Le déflecteur permet de faire varier le couple moteur tout en laissant rigoureusement constant le débit de la conduite. Le réglage de la vitesse se fait donc en évitant absolument toute variation brusque de pression dans la conduite forcée. L'action seule du déflecteur s'impose quand on munit les turbines tangentielles de simples limiteurs de vitesse et non de régulateurs.

La solution la plus générale consiste à employer deux servomoteurs hydrauliques commandés par un régulateur, dont l'un agit rapidement sur le déflecteur qui dévie le jet en dehors de

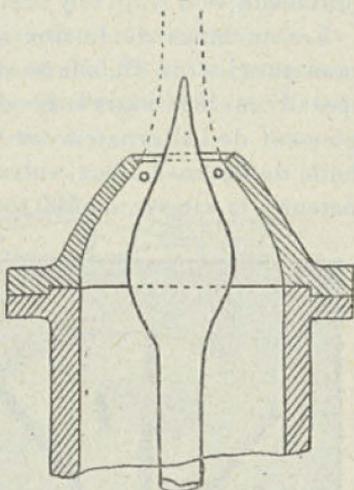


Fig. 124.

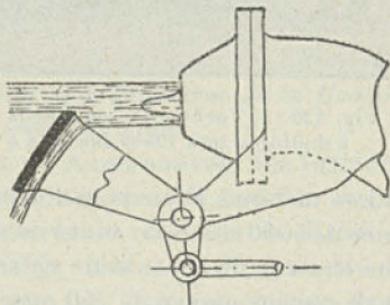


Fig. 125.

la roue lors d'une décharge brusque de la turbine, tandis que l'autre actionne directement un pointeau de réglage de débit. D'ailleurs la turbine peut avoir plusieurs déflecteurs et plusieurs pointeaux.

Les turbines de l'usine hydroélectrique de Fully ont leur toue motrice de 3^m,550 de diamètre portant 54 aubes rapportées. L'une des extrémités de l'arbre porte le plateau d'accouplement de l'alternateur, et l'autre, l'embrayage de la pompe à huile du servo-moteur, entraînant de ce fait directement l'alternateur à la vitesse de 500 tours de la turbine.

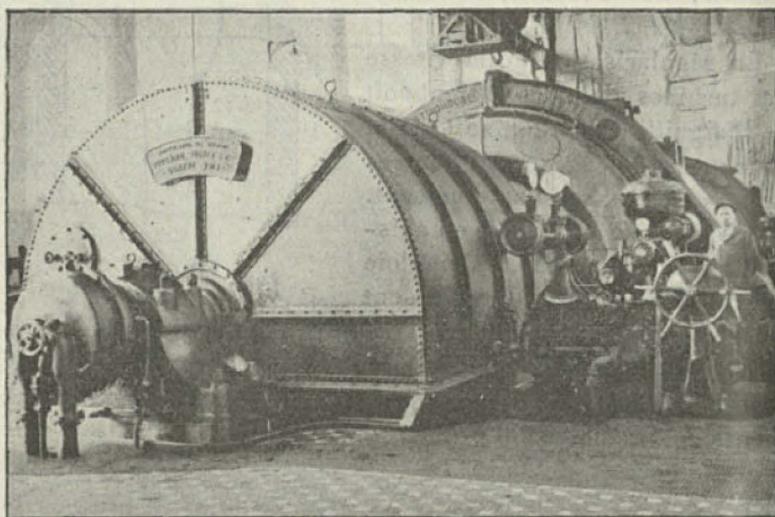


Fig. 126. — Turbine Pelton à deux roues et deux jets avec régulateur à double action 13500 chevaux à 250 tours (chute de 382 mètres).

Les turbines Francis de l'usine d'Eget, d'une puissance unitaire de 5000 chevaux, sont à un seul injecteur, et travaillent sous une hauteur de chute nette en régime maximum de 715 mètres et en régime moyen de 740 mètres. Elles tournent à 500 tours à la minute.

Le diamètre de la roue des augets est de 2^m,20, le nombre des augets de 30, la hauteur de ceux-ci de 0^m,305, le débit maximum absorbé de 680 litres par seconde et enfin la vitesse périphérique est de 57^m,20 à la seconde. Le nombre de tours caractéristique est de 9,2. Le réglage du jet est fait simultanément par

une aiguille et un déflecteur. La réaction hydraulique sur l'aiguille est équilibrée d'une part par des ressorts renfermés dans un servo-moteur C (fig. 127), d'autre part, par une pression d'huile maintenue dans ce servo-moteur par une petite pompe D à débit constant actionnée par courroie sur la commande du pendule du régulateur; la prépondérance de cette pression assure en temps utile la fermeture de l'aiguille B à vitesse uniforme et sans possibilité d'accélération.

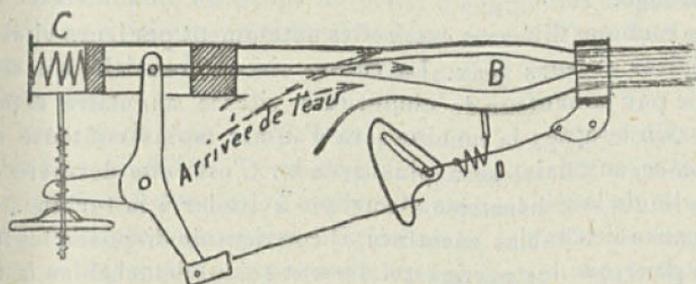


Fig. 127.

56. Fonctions caractéristiques des turbines. — Les méthodes graphiques pour l'établissement des turbines et les tracés géométriques qui s'ensuivent permettent de déterminer les profils des aubes fixes et mobiles, le rendement hydraulique de ces profils, les efforts dynamiques exercés par la masse liquide, l'influence de l'angle α et du degré de réaction sur les éléments du fonctionnement. Ces questions sont traitées avec l'ampleur voulue dans notre ouvrage précité: *La Technique de la Houille Blanche et des transports de l'énergie électrique*.

57. Installation des turbines. — Assez souvent les turbines sont disposées dans une chambre en maçonnerie, appelée chambre d'eau et qui, en général, renferme le récepteur, le distributeur et une partie de l'axe. Quand la turbine est dite ouverte, le canal d'amenée pénètre dans l'usine, et l'eau est retenue dans la chambre en maçonnerie sur le plancher de laquelle repose la turbine. Alors que la turbine comporte un tube d'échappement, celui-ci doit toujours plonger dans l'eau d'aval de façon à utiliser la chute dans tous les cas.

Pour les chutes élevées et pour les installations où la chambre d'eau ne peut être construite en maçonnerie, la turbine est

disposée dans une chambre métallique en fonte ou en tôle appelée bêche, laquelle permet, par sa forme en spirale, une vitesse d'arrivée plus grande de l'eau et partant une réduction du diamètre de la conduite forcée.

Le sol de la salle des machines doit être nécessairement placé plus haut que le niveau aval en temps de hautes eaux. Pour ne pas perdre de la chute aux périodes de basses eaux, on a recours au tube aspirateur, mais ce principe n'est pas d'une application rigoureuse.

Les turbines diffèrent entre elles notamment par leurs vitesses angulaires et leurs prix. La vitesse circonférencielle est seule limitée par la hauteur de chute, et la vitesse angulaire dépend du dessin adopté; la turbine sera d'autant moins coûteuse que la vitesse angulaire sera plus grande. C'est cette dernière qui fixe celle de la génératrice électrique à atteler à la turbine.

A cause des sables entraînés, il convient de disposer les turbines pour que les parties qui s'usent soient détachables facilement pour les remplacer. On peut faire ces parties amovibles en fonte ou en aluminium.

La puissance des turbines doit être établie en concordance avec la dépense de courant des machines électriques qu'elles conduisent. Et comme celles-ci sont soumises aux variations de charge de l'emploi de l'énergie, il est bon d'avoir des récepteurs hydrauliques pouvant se prêter à des augmentations de charge soudaines dépassant la charge normale. On sera dans de bonnes conditions en choisissant la puissance maximum égale aux huit septièmes de la puissance normale.

L'accouplement direct de la turbine avec la machine électrique, peu encombrant et fort commode, s'effectue aisément avec des récepteurs à axe horizontal ou à axe vertical. Les joints employés à cet effet sont rigides ou élastiques. Ces derniers sont préférables en ce sens qu'ils offrent l'avantage d'amortir les heurts, dans le cas de brusques surcharges, et d'atténuer les petites variations de vitesse. De plus, ces accouplements permettent non seulement une déviation des axes des machines accouplées, mais ils assurent aussi l'isolement électrique l'une de l'autre.

Les moyens préconisés pour augmenter le rendement des turbines en profitant des augmentations temporaires du débit sont, dans leur ordre chronologique : le renforceur de chute, la

double transmission mécanique par engrenage conique et l'aménagement total ou partiel des turbines pour les hautes eaux. En vue de cette dernière solution on a construit des turbines doubles (turbines horizontales) avec cloison séparatrice dans le tuyau d'évacuation; ce genre de turbines a supplanté avantageusement les récepteurs verticaux à étages et ceux à couronnes multiples.

Le renforceur de chute du type Herschel permet, en utilisant l'eau surabondante en temps de crue, d'augmenter la pression effective, en y faisant un vide partiel au moyen d'une véritable pompe utilisant de l'eau sous pression puisée dans la chambre de prise d'eau.

Le rendement pratique de cet appareil n'est pas élevé, tout au plus 10 à 15 p. 100. Pour atteindre le rendement maximum, il faut que la consommation totale de la turbine et du renforceur dépasse le triple de la consommation seule, et l'effet du renforceur ne se fait sentir que pour une consommation totale double de la capacité d'absorption de la turbine.

Les appareils analogues, tel que le récupérateur Conrad Beel qui comporte un approfondissement dans le canal de dérivation à l'ouverture d'évacuation des turbines, n'offrent pas des avantages supérieurs au renforceur.

Dans les installations hydrauliques à basse chute de ces dernières années, tant en Suisse qu'en Allemagne, on a fait de nombreuses applications des turbines axiales à réaction. On a disposé parfois deux turbines sur le même arbre, l'une servant à produire la vitesse et la puissance sous la hauteur de chute ordinaire, et l'autre en cas de besoin imprévu. Parfois l'on a monté les deux turbines sur le même axe horizontal ou vertical, l'une ne fonctionnant pas ou tournant à vide, lorsque son concours n'est pas nécessaire.

La figure 128 montre une des turbines de 2000 chevaux installées à l'usine hydroélectrique de Wiesberg (Tyrol) fonctionnant sous une chute de 87 mètres, dont chaque roue utilise la moitié de la puissance; elles ont démontré par leur excellent fonctionnement que l'on peut obtenir ainsi des résultats équivalents à ceux des roues du genre Pelton.

La turbine Francis convient particulièrement bien pour les chutes jusqu'à 120 mètres, et la roue Pelton pour toutes celles au-

dessus de 80 mètres. Donc entre 80 et 120 mètres, le choix peut être embarrassant et demande à être étudié de près.

La turbine Francis utilise toute la hauteur de chute, tandis qu'avec la roue Pelton on perd toujours la hauteur entre le distributeur et le niveau de décharge; mais, par contre, la pre-

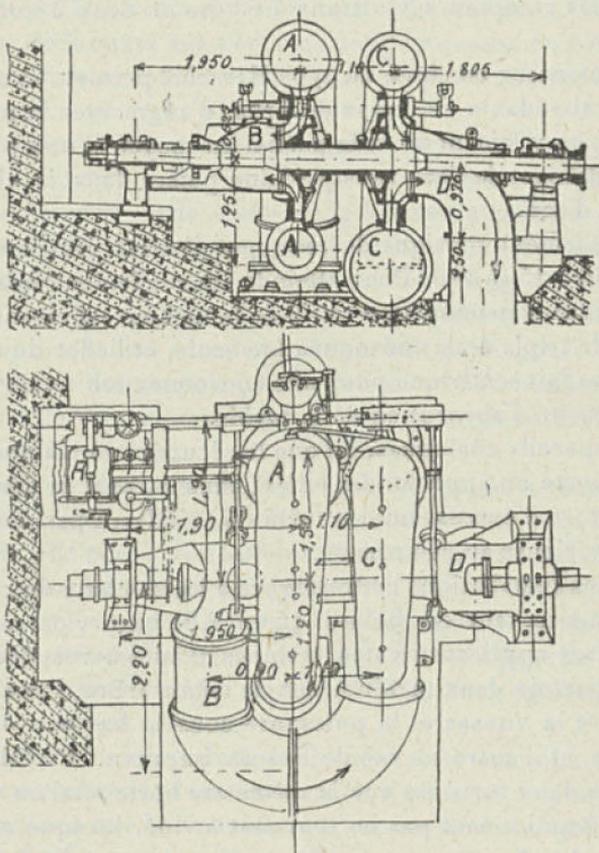


Fig. 128. — Turbine compound de l'usine hydroélectrique de Wiesberg (Tyrol).

mière exige un mécanisme plus coûteux, et, en outre, pour les grandes hauteurs, elle exige une construction irréprochable qui en élève le prix.

Dans les grandes centrales, il est rare qu'on utilise une turbine à pleine ouverture, car à ce moment le régulateur est fatalement sans action dans le cas où la charge du réseau augmente;

pratiquement, dès que la charge d'un groupe électrogène atteint à peu près les $\frac{3}{4}$ de la puissance maximum, on met en route un deuxième groupe et on exécute un couplage. Il y a donc intérêt à ce que le rendement maximum de la turbine corresponde aux $\frac{2}{3}$ ou aux $\frac{3}{4}$ du débit total, ce qui est le cas pour les turbines Francis. Et c'est le vannage Flinck qui a permis d'obtenir ce résultat, qui est aussi une des améliorations les plus utiles apportées aux turbines centripètes.

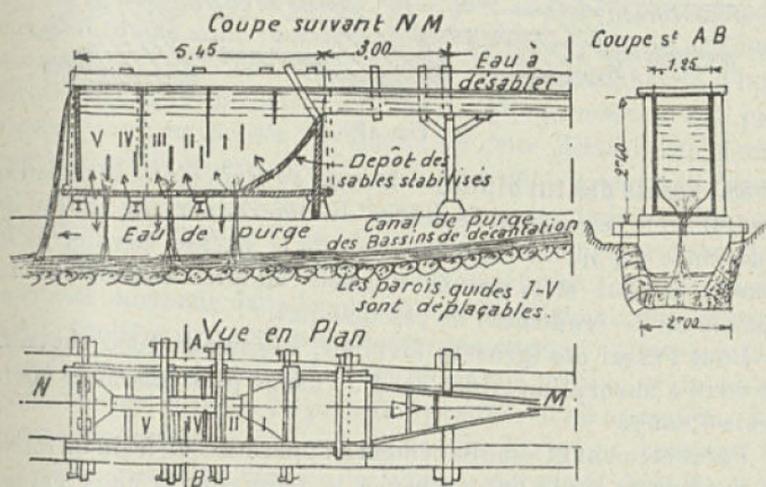


Fig. 129.

Nous avons signalé plus haut les inconvénients du passage des sables dans les turbines. Pour éviter l'usure des aubages, le meilleur remède est l'amélioration à apporter dans le désablage des eaux motrices. A cet effet il convient de citer le désableur de M. Henri Dufour, qui a pour effet de donner à l'eau une vitesse ascendante très faible, mais que l'on doit pouvoir régler de façon que la distribution et la vitesse de l'eau soient uniformes sur toute la surface des bassins de décantation. La fig. 129 représente le genre de désableur étudié par M. Henri Dufour basé sur ces données. L'écoulement automatique et continu est assuré par la forme en entonnoir au fond des bassins et d'orifices purgeurs laissant échapper les alluvions avec une certaine quantité d'eau.

D'autre part, MM. Lévy-Salvador et E. Maynard, prenant le

problème dans un autre sens, à savoir d'éviter l'introduction des limons et surtout des sables dans les conduites forcées, ont imaginé un appareil consistant (fig. 130) en une pompe-turbine de clarification à action centrifuge.

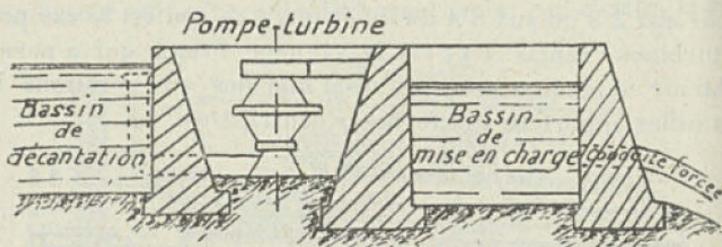


Fig. 130.

58. **Essais des turbines.** — L'essai au frein d'une installation hydraulique, en offrant le moyen de déterminer une courbe de puissance des turbines en fonction de la vitesse, permet de se rendre compte si la vitesse normale adoptée correspond au maximum de rendement de ces turbines.

Pour l'essai des grosses turbines, dépassant 1000 chevaux, le frein à absorption Alden est d'un usage plus commode que le frein Prony.

Parallèlement et simultanément à l'opération du frein on relève la hauteur de chute et on mesure le débit comme nous l'avons déjà indiqué. Quant à la vitesse de rotation de la turbine, c'est une opération facile à réaliser et à enregistrer.

L'essai par la méthode thermométrique, dû à MM. Barbil lon et Poirson, est basé sur la remarque que dans une turbine les quantités de chaleur correspondant aux pertes d'énergie sont employées à échauffer l'eau, qui en même temps que le fluide moteur se trouve jouer le rôle de réfrigérant. L'échauffement de l'eau représenté par la différence de température à l'entrée θ_1 et celle θ_2 à la sortie de la turbine en degrés centigrades est proportionnel aux pertes p .

Appelons H la hauteur de chute en mètres, P la puissance fournie en eau à la turbine; le rendement est fourni par la formule :

$$\rho = P - \frac{425 (\theta_2 - \theta_1)}{H}.$$

Le mode opératoire consiste à placer dans le canal de fuite

un thermomètre et un autre dans la conduite forcée en un point où la vitesse est faible et ne puisse produire d'erreurs par le frottement de l'eau sur le thermomètre. On peut aussi prendre la température θ_1 dans la chambre de mise en charge de la conduite forcée et mesurer ainsi le rendement global conduite-turbine, d'où l'on déduit celui de la turbine, le rendement de la conduite forcée étant égal au rapport entre les pressions manométriques en charge et à l'arrêt, près de la turbine.

Pour opérer par la méthode chimique, on injecte par seconde une quantité de solution concentrée d'un sel approprié et à une distance très faible des aubes dans la conduite d'amenée d'une turbine débitant un certain nombre de kilogrammes d'eau par seconde et étant donné le rapport de cette dilution et d'une nouvelle solution, rapport que l'on peut déterminer par l'analyse, en prélevant des prises d'eau à la sortie de la turbine, on détermine le poids de l'eau traversant la turbine par seconde.

M. Gibson préconise une méthode basée sur l'évaluation de la vitesse moyenne dans la conduite en appliquant une charge aussi régulière que possible à la turbine et que l'on mesure. On ferme alors la vanne d'admission d'eau à la turbine et on enregistre l'accroissement de pression pendant cette opération. La courbe de variation de pression avec le temps pendant la fermeture permet d'évaluer la vitesse moyenne dont il vient d'être parlé. Cette vitesse donne le débit avec une grande précision. M. Gibson a cité un appareil sur ce principe à l'aide duquel on déduit facilement le débit.

Des installations d'essais de turbines existent dans divers pays, entre autres en Amérique, en Russie, en Allemagne, en Italie et en France.

La station d'Holyoke, en Amérique, créée sur la rivière Connecticut, permet aux industriels d'y faire des essais dans des conditions variées. L'installation est particulièrement remarquable et présente toutes garanties. La figure 131 représente les dispositifs de ladite installation.

Soient : Q le volume débité, L la longueur du déversoir, n le nombre de contractions latérales, H la charge sur le déversoir ; la formule appliquée est :

$$Q = 0,4152 \sqrt{2g} (L - 0,10nH) H^{\frac{3}{2}}$$

Cette formule cesse d'être applicable quand H est plus grand que $\frac{L}{3}$.

En France, il existe une station d'essais au Conservatoire des arts et métiers, pour turbines jusqu'à 150 chevaux de puissance.

La mesure des débits s'effectue par un compteur Venturi. Les turbines sont chargées au moyen d'une dynamo-frein.

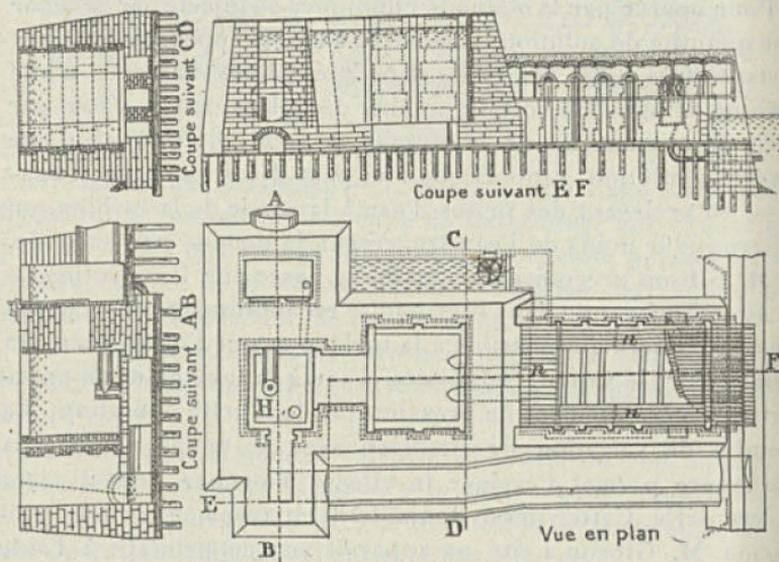


Fig. 131.

Le laboratoire d'hydraulique de l'Institut électrotechnique de Toulouse consiste en un réservoir où une pompe centrifuge aspire pour refouler l'eau dans un réservoir supérieur déterminant ainsi une chute de 20 mètres. Cette eau alimente trois turbines et retourne au réservoir inférieur. La conduite forcée d'alimentation des turbines possède un compteur Venturi muni de deux manomètres à mercure. Les turbines Francis sont chargées au moyen d'une dynamo-frein, et les roues Pelton sont munies d'un frein de Prony à circulation d'eau intérieure.

La station d'études de Rieupeyroux (Isère) est établie à l'usine même; les turbines sont essayées au frein de Prony et les débits mesurés par un déversoir en mince paroi du type Bazin.

Enfin la récente installation du laboratoire de Beauvert (Grenoble), créée sous les auspices de la Société hydrotechnique de France, va permettre d'effectuer des essais dans des conditions parfaites. On pourra effectuer des opérations sur les conduites forcées et leurs points particuliers, sur les canaux de fuites, grilles, etc., et enfin sur les turbines sous des chutes respectives de 4 mètres, 8 mètres et 200 mètres.

La Société hydrotechnique de France a établi un type de marché et cahier des charges pour la fourniture des turbines qui est appelé à rendre de grands services tant aux constructeurs de matériel hydraulique qu'aux exploitants des usines hydroélectriques.

RÉGULATION DES TURBINES

59. **Régulateurs de vitesse.** — Les régulateurs de vitesse ont pour but, comme l'on sait, de corriger le plus rapidement possible toute perturbation due à un écart entre la puissance et la résistance, en limitant au maximum l'amplitude de variation de la vitesse angulaire. Dans les régulateurs pour moteurs hydrauliques, la manœuvre des vannes exige des efforts si considérables que l'action directe du régulateur est généralement impossible; aussi interpose-t-on entre le vannage et l'appareil centrifuge ou tachymètre un mécanisme spécial ou « servomoteur », dont la force est empruntée au moteur même ou à une source extérieure d'énergie. L'importance du réglage de la vitesse des turbines s'est accentuée depuis leur application à la conduite des machines électriques et en particulier à celle des alternateurs, où il faut maintenir constante la tension aux bornes ainsi que la fréquence du courant, laquelle est proportionnelle à la vitesse.

Les régulateurs-tachymètres dits aussi centrifuges ne sont à proprement parler que des mo-

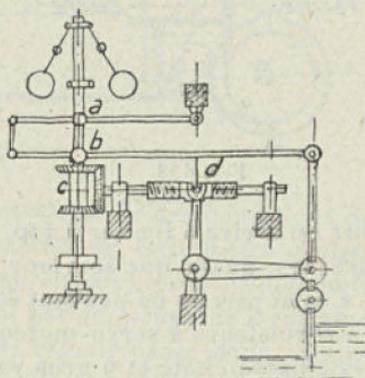


Fig. 132.

dérateurs de vitesse, basés sur le principe qui consiste à admettre qu'on peut tolérer une certaine variation de vitesse et à utiliser cette variation elle-même pour commander les organes de réglage. Ces appareils sont à action directe et à action indirecte.

Le principe du fonctionnement des régulateurs mécaniques s'explique ainsi : lorsque la vitesse vient à augmenter, les points

a et *b* s'élèvent (fig. 132) et l'embranchage a lieu en *c*; alors la vis *d* tourne et détermine la fermeture du vannage. Lors du mouvement de descente, la vanne entraîne la douille *b* et désembraye *c*; le mouvement de la vanne s'arrête dès que la vitesse cesse de croître.

Si celle-ci continue à augmenter, la vanne continue à descendre et ne s'arrête que lorsqu'il y a équilibre entre l'effort moteur et l'effort résistant.

Parmi les régulateurs de cette espèce, nous citerons les appareils Singrün, Piccard (fig. 133), Woodward, le régulateur universel Escher Wyss, dont le cadre de cet ouvrage ne nous permet pas de donner les descriptions.

Les dispositifs de régulateurs hydrauliques sont très nombreux; avec les régulateurs à servo-moteur on arrive à limiter à 1 p. 100 près le nombre de tours des turbines, quelle que soit leur puissance.

Ces appareils ne peuvent être utilisés avec des eaux impures; les régulateurs à servo-moteur à huile conviennent aux turbines à basse chute et à gros volume, qui demandent de grands efforts et de grands mouvements pour actionner les vannages des distributeurs.

Ces appareils ne peuvent être utilisés avec des eaux impures; les régulateurs à servo-moteur à huile conviennent aux turbines à basse chute et à gros volume, qui demandent de grands efforts et de grands mouvements pour actionner les vannages des distributeurs.

Les appareils de cette espèce à citer sont ceux construits par

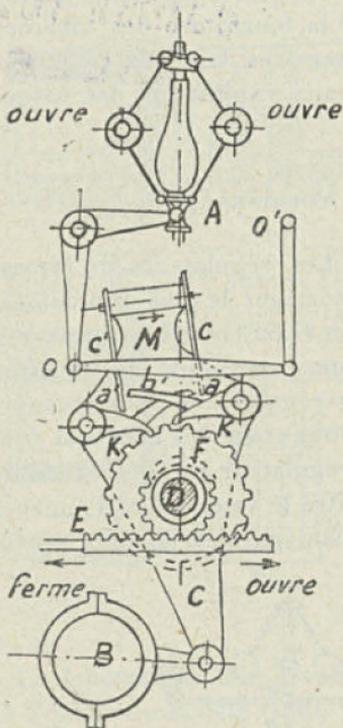


Fig. 133.

les maisons Neyret et Brenier, Rietter, Gunz, Société alsacienne de constructions mécaniques (système Minetti [fig. 134], A et H. Bouvier).

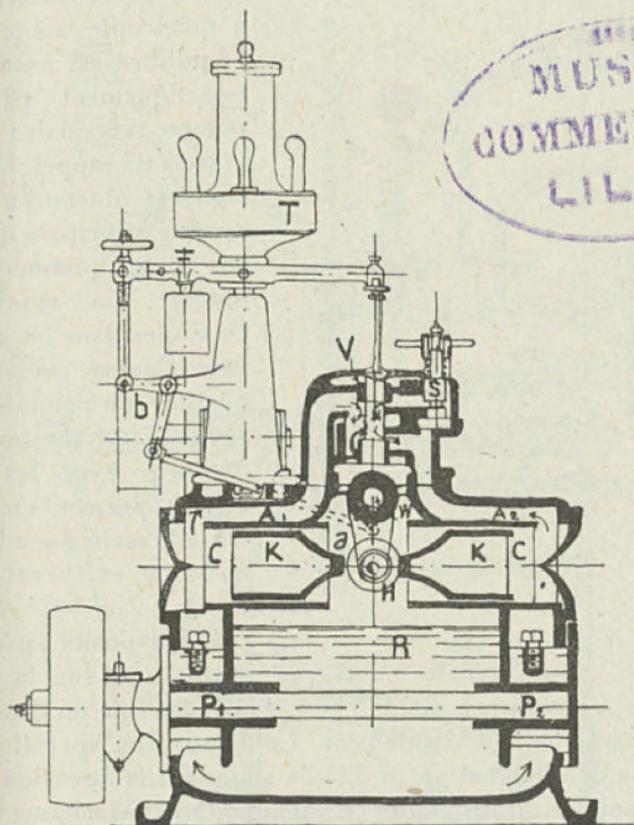


Fig. 134.

Les *hydrotachymètres* permettent d'obtenir des conditions de rupture d'équilibre supérieures à celles du tachymètre centrifuge. Dans l'appareil « Ribourt » un circuit liquide fermé, huile ou eau pure, est mis en mouvement par un compteur Z entraîné par la turbine (fig. 135). Le liquide refoulé passe dans un ajustage *f* muni d'un organe mobile qui en modifie automatiquement la section libre, de manière à transformer les variations de vitesse du compteur en variations de pression interne dans des conditions très favorables pour une rupture brusque de

l'équilibre au voisinage de la vitesse de régime pour laquelle l'appareil a été réglé.

Le régulateur « Singrün » est à servo-moteur par pression d'huile avec distributeur à quadruple siège, dont l'équilibre est assuré automatiquement par une pompe secondaire et un ressort de rappel. La pression est obtenue par une pompe principale qui agit sur deux pistons pour obtenir un mouvement rectiligne dans un sens ou dans l'autre, suivant la position du pendule. Une soupape de sûreté et de décharge évite les pressions et permet la manœuvre à la main pour la mise en route et l'arrêt de la turbine.

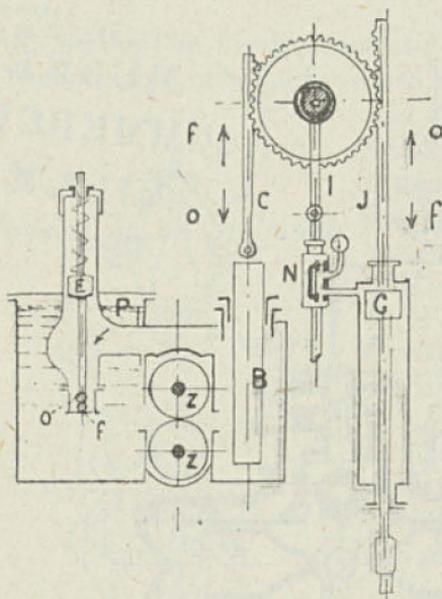


Fig. 135.

Un dispositif spécial de sûreté agit sur la fermeture de la turbine en cas de chute d'une courroie ou d'accident et en arrête le fonctionnement. La disposition spéciale de la soupape de distribution de l'huile maintient la pression constante toujours prête à agir, ce qui donne à l'appareil une vitesse d'action très rapide et une grande sensibilité.

60. Régulateurs de pression. Régulateurs absorbeurs. — Lorsque les turbines sont alimentées par de longues conduites, pour obvier aux coups de bélier (fermeture brusque du vannage), aux surpressions et dépressions (ouverture ou fermeture brusque du vannage) qui rendent le rôle du régulateur de vitesse difficile, surtout quand on a plusieurs turbines branchées sur la même conduite, on utilise avec succès des vannes compensatrices appelées « déchargeurs » ou « régulateurs de pression ». Ces appareils sont de deux sortes; ceux qui maintiennent constant le débit de la conduite quel que soit le degré d'ouverture

des vannes des turbines et ceux qui n'ont pour but que d'éviter la production des surpressions ou coups de bélier.

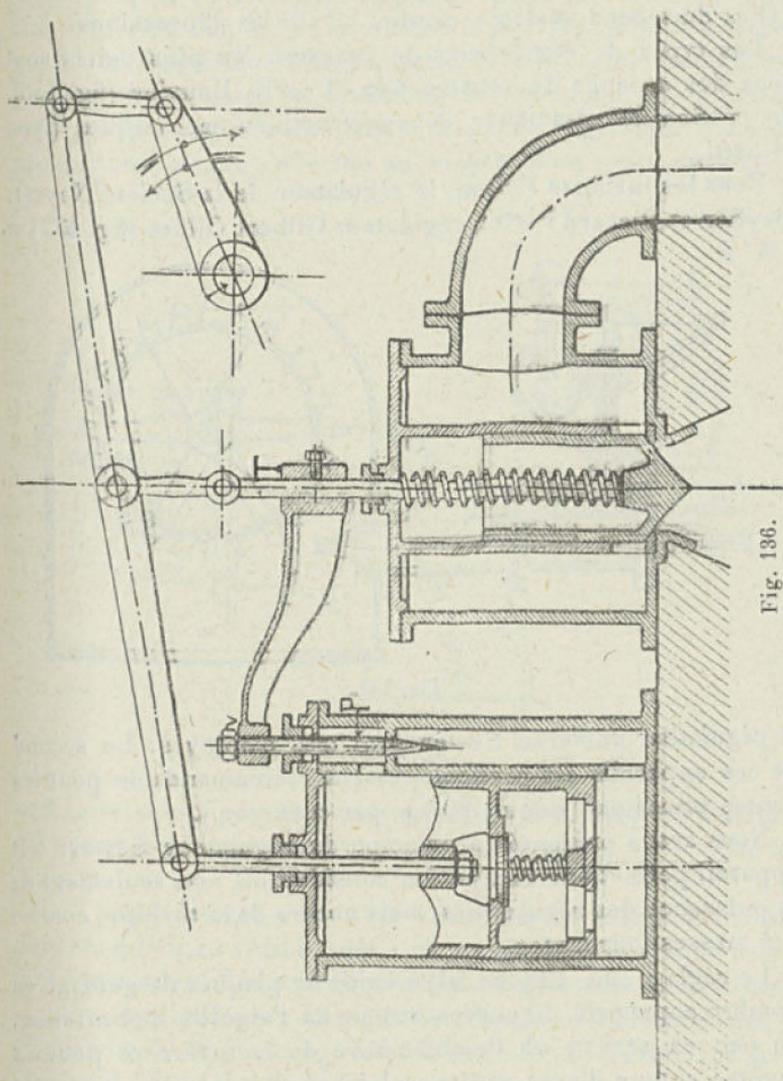


Fig. 136.

Il existe une autre classe de régulateurs de pression qui ne sont plus sous la dépendance du régulateur de vitesse, la pression de la conduite agissant pour bander plus ou moins un ressort taré d'avance; dès qu'une surpression lui fait subir une

variation de longueur, la vanne compensatrice qui lui est asservie subit un déplacement proportionnel. C'est, somme toute, une soupape de sûreté à servo-moteur. Pas plus que les déchargeurs du second système, celui-ci n'évite les dépressions.

Les types de régulateurs de pression les plus usités sont ceux des maisons de construction A et H. Bouvier (fig. 136), de la Société alsacienne de constructions mécaniques (type Minetti).

Pour les turbines Pelton, le régulateur de la Société Neyret, Beylier et Piccard Pictet, régulateur Gilbert Gilkes (fig. 137) et

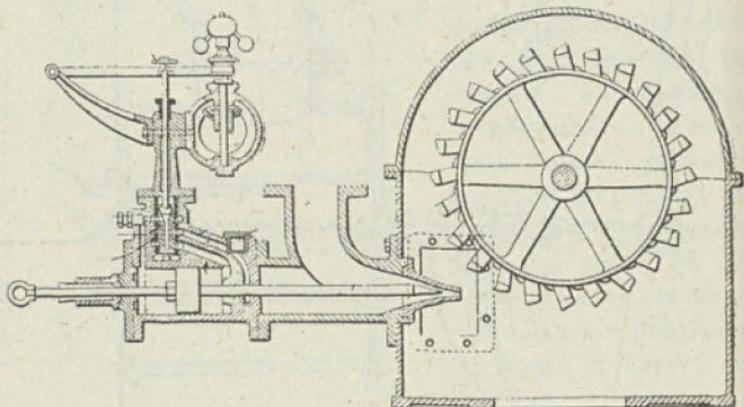


Fig. 137.

le régulateur universel Sewer sont très employés. Le second de ces appareils est particulièrement recommandable pour les hautes pressions (jusqu'à 90 kg. par cent. car.).

Nous avons présenté le principe du régulateur Sewer. Cet appareil permet une diminution considérable non seulement de la puissance des régulateurs, mais encore de la turbine, comme des masses tournantes.

Le réglage (fig. 138) se fait à l'aide de plaques de guidage en nombre approprié disposées autour de l'aiguille d'obturation, un peu en arrière de l'embouchure de la tuyère et pouvant pivoter autour d'axes radiaux. Lorsque les plaques occupent une position parallèle à l'axe de la tuyère, elles déterminent un jet parfaitement cylindrique. Lorsqu'elles sont déviées, l'effet du jet est sans action sur la roue motrice. D'autre part la déviation des plaques est sans influence nuisible sur la pression

de la conduite. La fermeture est presque instantanée et l'ouverture de l'aiguille peut se faire dans un temps très court.

Les plaques sont actionnées par un petit servo-moteur spécial, lequel est disposé de façon que la pression d'huile s'exerce sur le côté postérieur de son piston, et la pression variable qui s'exerce sur les côtés du piston du servo-moteur du pointeau est réglée par le tiroir de distribution D du régulateur. La commande automatique s'effectue au moyen d'un petit régulateur

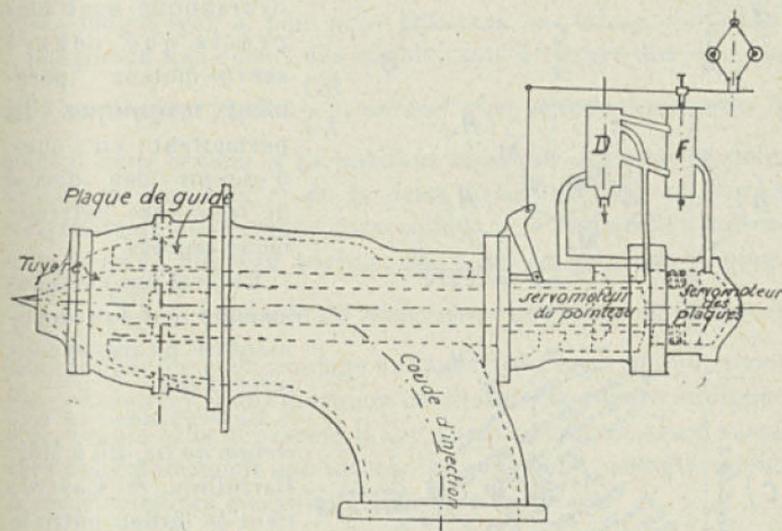


Fig. 138.

ordinaire se composant d'un tachymètre, d'un tiroir de distribution pour le pointeau et d'un tiroir de distribution F pour les plaques.

Les appareils qui servent à maintenir constante la vitesse d'un récepteur en rétablissant à chaque instant le couple résistant à une valeur fixe sont dénommés « régulateurs absorbants » à action hydraulique. Lorsque la résistance utile diminue, le régulateur de ce genre oppose à la turbine une résistance passive qu'il fait varier de la même quantité, mais en sens inverse de la variation de résistance utile.

Avec les régulateurs à frein on peut arriver à une précision assez grande et à une action assez prompte (3 p. 100). On applique ce système de réglage lorsque l'eau est en grande abon-

cement brusque des couples donné, la longueur M_oM_o' représente l'écart des couples, ou, ce qui revient au même, l'accélération angulaire du groupe à ce moment-là et la distance N_oN l'écart des vitesses.

On a évidemment :

$$M_o = M'_o = \frac{\partial \omega}{\partial t}; \quad N_oN = \omega - \omega_o \text{ et } \frac{M_oM'_o}{N_oN} = tg^2\psi.$$

Pour un type donné de groupe électrogène le coefficient $(tg^2 + \text{tang } \varphi)$ est à peu près constant en valeur moyenne.

Imaginons que l'écart des couples soit à l'écart des vitesses dans un rapport égal à $\frac{CB}{CA}$, on voit que, automatiquement, le point C sera revenu à sa position moyenne lorsque le point figuratif μ (fig. 139, c) de la perturbation se trouvera sur la caractéristique mécanique correspondant à l'admission nécessaire pour le nouveau régime, car pour ce point on a bien : $\frac{M_oM'_o}{N_oN'_o} = \frac{CB}{CA}$. Il est facile de démontrer que cette condition de blocage du moteur de vannage ne sera réalisée que pour ce point. Par conséquent, à une première oscillation de vitesse atteignant le maximum et le dépassant d'une quantité à déterminer succédera obligatoirement une marche à admission constante suivant la caractéristique mécanique définitive à utiliser.

CHAPITRE IX

RÉSERVOIRS NATURELS ET RÉSERVOIRS ARTIFICIELS

Rôle des réservoirs naturels et des réservoirs artificiels dans la régularisation des cours d'eau. — Lacs régulateurs.

61. Rôle des réservoirs naturels et des réservoirs artificiels dans la régularisation des cours d'eau. — On peut, par le jeu des réserves naturelles, influencer d'une façon prépondérante sur le régime d'étiage d'un cours d'eau et par suite sur la marche des usines alimentées par ledit cours d'eau.

Si on envisageait le volume moyen de ce dernier, il faudrait créer une réserve d'eau considérable correspondant à un taux très élevé de ce volume moyen. Pour arriver par exemple à trouver que le volume de la réserve ait les 30 p. 100 du volume moyen, l'utilisation devrait être les 90 p. 100 de ce volume.

Au point de vue de la capacité à donner aux réservoirs, question des plus importantes en ce qui concerne la captation des forces hydrauliques, nous traitons plus spécialement ce sujet au chapitre X.

L'aménagement des lacs de montagne a lieu soit par une percée au fond du lac ou par siphonnement. La première méthode est assez difficile, car il faut assez souvent établir un blindage contre les eaux souterraines, et d'autre part l'eau doit être épuisée au moment de la jonction du tunnel avec le lac. Le procédé par siphonnement consiste à creuser un puits vertical assez rapproché du lac, et l'eau est siphonnée entre le lac et le puits auquel on a eu soin préalablement de relier la tête d'eau. L'usine de Brusio, en Suisse, est un exemple classique de ce dernier genre d'aménagement.

Au point de vue de la capacité à donner aux réservoirs artificiels pour corriger le régime variable saisonnier d'un cours d'eau, on peut la fixer au cinquième du volume débité par la rivière à l'emplacement même du barrage pendant une année moyenne; mais il convient, sauf exceptionnellement, de se tenir au-dessous du tiers.

Le maximum du débit du réservoir à utiliser étant déterminé, on peut maintenir le débit tiré du réservoir à son maximum autant que possible ou, au contraire, ne jamais descendre au-dessous d'un certain minimum de débit imposé à l'avance, et, sous cette réserve, obtenir la meilleure utilisation du réservoir.

La première solution donne le moyen d'obtenir du cours d'eau une production d'énergie aussi élevée que possible en utilisant au mieux les hautes eaux, mais est d'ordre peu effectif pour l'amélioration des étiages faibles. La seconde solution permet d'obtenir un débit en tout temps notablement supérieur à celui de l'étiage naturel, par exemple de doubler ce dernier. Il faut aussi, dans l'étude du régime du réservoir, tenir compte de celui de la rivière dans les parties les plus éloignées et aussi des autres besoins. En particulier pour la seconde solution, on

peut établir parfois à peu de frais des réservoirs à faible alimentation ou réservoirs d'appoint, fonctionnant en période de sécheresse exceptionnelle. Ce qui permet d'utiliser plus largement le réservoir principal.

Il est de règle de faire servir la chute du réservoir à la chute elle-même. On peut par exemple limiter la hauteur de la réserve à la moitié de la hauteur de retenue, et même davantage. On s'est rendu compte de l'importance capitale que les barrages-réservoirs sont de plus en plus appelés à prendre dans l'aménagement des forces hydrauliques. Pour les rivières non navigables, on a préconisé la création d'un certain nombre de barrages à faible relief dans le lit majeur de quelques vallées inférieures.

Les bassins compensateurs permettent d'emmagasiner le débit inutilisé aux heures de faible charge, pour grossir de cette réserve le débit de la rivière au moment où la puissance à demander aux moteurs passe au maximum. On adapte ainsi le mieux possible à une utilisation variable l'énergie disponible correspondant à un débit donné de la rivière. Quand on peut faire le réservoir assez important, on obtient un double effet de régulation; on accumule pendant les grandes eaux et on restitue en temps de sécheresse, en même temps qu'on opère la régulation journalière; la capacité de ces réservoirs varie naturellement en raison inverse de la hauteur de la chute.

Si on ne peut s'adresser à un lac ou un étang pour avoir l'accumulation d'eau, on crée un réservoir artificiel, qui, même conçu pour une réserve journalière, sera cependant capable d'améliorer la puissance de la chute et son pouvoir de régularisation. Une telle installation permet par exemple de venir en aide à une basse chute solidairement à une haute chute en utilisant sur les deux cours d'eau une quantité d'énergie disponible qui soit supérieure à la somme des puissances des usines isolées desservant la haute et la basse chute.

62. Lacs régulateurs. — De nombreux cours d'eau sont de nos jours régularisés par les eaux provenant de lacs importants. Ainsi les cours d'eau de Lancey et de Saint-Mury ont leur régime soutenu par l'apport des eaux des lacs Crozet et Blanc (Isère). La rivière la Neste a donné lieu à l'aménagement des lacs d'Oredon, de Caillaouas et de Cap de Long (Hautes-Pyré-

nées); les réserves de ces derniers sont respectivement 1300 000, 6 800 000 et 7 000 000 de mètres cubes. Le débit minimum du bassin versant du lac d'Oredon est 7,7 litres par kilomètre carré, le débit moyen 42 litres et le débit maximum 203 litres. Le débit moyen fourni par le bassin versant du lac de Caillouas est de 86 litres par kilomètre carré.

Le cours d'eau des Sept-Laux est régularisé par les déversoirs des lacs Carré, Cotepeu et de la Motte (Isère). On a pu de cette façon constituer une réserve de 12 millions de mètres cubes entre la cote du couronnement du barrage (2130) et celle du niveau du tunnel (2100), soit sur 30 mètres de profondeur, et porter le débit du cours d'eau à 700 litres par seconde.

Le lac de la Girotte (Savoie) sert à la régularisation du torrent le Doron, en assurant à ce cours d'eau un débit d'étiage de 6 à 7 mètres cubes à la seconde. La rivière la Têt a donné lieu, pour sa régularisation, à la création d'un réservoir de 13 millions de mètres cubes à l'emplacement de l'étang de la Bouillouse, capacité correspondant à 35 p. 100 de l'apport moyen annuel du cours d'eau au droit de Montlouis (altitude 1600 mètres). La rivière l'One, affluent de la Pique, devra sa régularisation prochaine à l'aménagement du lac d'Oo, avec une réserve d'eau d'environ 12 millions de mètres cubes, capacité correspondant à 42 p. 100 de l'apport moyen du bassin.

Le lac d'Annecy (Haute-Savoie), dont le débit en basses eaux est de 1500 litres à la seconde, peut au moyen de sa réserve assurer un débit moyen de 5000 litres utilisé par les usines établies sur son émissaire.

Le lac de Genève, dont le débit, à sa sortie, variait de 50 à 500 mètres cubes à la seconde, a été amené à 700 mètres cubes à la suite des travaux de régularisation qui ont permis de disposer d'une tranche d'eau de 0 m. 60. Ainsi que nous l'avons signalé, en raison de l'aménagement intégral du Rhône, on a songé à augmenter la partie de la réserve du lac jouant le rôle de régulateur; on porterait ainsi l'épaisseur de la tranche régulatrice de 0 m. 60 à 1 mètre ou même 1 m. 50, correspondant à un débit d'étiage du Rhône de 200 mètres cubes environ.

L'aménagement du lac de Challain (Ain), à l'aide d'une réserve de 23 millions de mètres cubes, a permis de porter le débit d'é-

tiage de cette rivière de 6 mètres cubes à 16 mètres cubes à l'usine de Saint-Mortier.

Le fameux lac du Bourget (Savoie) permettra par son utilisation de fournir au Rhône un débit supplémentaire de 45 mètres cubes par seconde pendant dix heures par jour.

Le lac d'Oule (Hautes-Pyrénées), à la suite des travaux qui ont été exécutés pour son aménagement, a permis de disposer d'une tranche d'eau de 22 m. 50 de hauteur, représentant 6500000 mètres cubes d'eau. On a pu ainsi tabler sur un débit de 2050 litres en été et de 1600 litres en hiver, correspondant, à l'aide de la chute de 700 mètres produite par l'usine d'Eget, à 16400 poncelets en été et 14400 en hiver. Mais la présence des lacs de Cap de Long, d'Aumar, d'Oredon, de Caillouas et d'un réservoir journalier de 3000 mètres cubes permettent de parer à de grandes irrégularités, soit instantanées, soit dans le cours de la journée. On a reconnu ainsi la possibilité d'atteindre 22000 poncelets à l'entrée des turbines.

Les lacs du bassin de Barèges : Aygue-Cluse, Concy-la, Escoubous, Blanc, Tracena, Noir, Claire, Maille et Loncy, Nègre, situés à des altitudes supérieures à 2000 mètres, sont alimentés en toute saison par la fonte des neiges. Un projet à l'étude envisage le cirque d'Escoubous comme collecteur central des eaux à ramasser et à emmagasiner dans tous les autres lacs. Dans la partie sud du bassin le débit d'étiage des lacs et des cours d'eau en dépendant serait porté de 1300 litres à 2000 litres à la seconde par le captage des lacs. La partie nord permettrait de faire monter le débit d'étiage de 800 litres à 1200 litres. On pourrait y aménager deux chutes variant de 460 mètres à 640 mètres de hauteur.

Le lac d'Artouste (Hautes-Pyrénées), situé dans la vallée d'Ossau à la cote 1068, pourra, en raison de sa régularisation, assurer le fonctionnement de trois usines importantes, aidé par le jeu des eaux des bassins de Bious, de Brousset, de Soussouéou et du bassin moyen du gave d'Ossau.

Un système d'aménagement mixte est offert par la contribution de la rivière la Neste d'Aure, dans les Pyrénées; celle-ci, en effet, qui a un débit permanent assez important, alimente d'autres rivières à débit très faible et près de leur source. De plus, pour fortifier le débit de la Neste aux époques de grands froids et en

automne, on a emprunté, pour l'alimentation de celle-ci, les eaux provenant des lacs d'Aubert, d'Aumar et d'Oredon.

Comme réservoir jouant un rôle compensateur journalier, nous citerons celui de l'usine de Jonage, sur le Rhône, d'une superficie de 160 hectares et qui permet de porter la puissance de l'usine de 16000 chevaux à 20000 chevaux au moment où la consommation est maximum. Quand ces 4000 chevaux supplémentaires jouent pendant 4 heures, le plan d'eau de la réserve s'abaisse de 0^m,30. L'accumulation d'eau est de 400000 mètres cubes.

Le réservoir compensateur de l'usine hydroélectrique d'Eget (Hautes-Pyrénées), qui a une capacité de 6500000 mètres cubes, permet d'assurer aux turbines un débit de 4800 litres avec un tirant d'eau de 1^m,40.

Aux États-Unis, l'aménagement des lacs Trout et Coquitlan, en contre-bas l'un de l'autre de 10 mètres, mais séparés par une chaîne de montagnes, ont permis d'opérer une réserve de 10 millions de mètres cubes. Les deux lacs sont reliés entre eux par un tunnel. En Allemagne, on a mis à l'étude la régularisation du Rhin, en ménageant dans le lac de Constance une réserve disponible en tout temps de 300 millions de mètres cubes (la capacité totale du réservoir étant de 2 milliards 385 millions de mètres cubes). De cette façon on pourrait augmenter de 200 mètres cubes par seconde le débit minimum actuel de 50 mètres cubes du Rhin et rendre utilisable une puissance de 1 million de chevaux entre Constance et Strasbourg.

Les lacs de Joux, de Paschivo et de Lugano, en Suisse, ont été utilisés pour améliorer le régime des rivières tributaires de ces lacs. À l'aide du premier de ces lacs, on dispose d'une réserve de 35 millions de mètres cubes qui donne un minimum utilisable pour la force motrice de 1600 litres à la seconde. Le lac de Lugano a pour exutoire la rivière Tresa, dont le débit moyen est de 23^{m³},830 à la seconde et le débit minimum de 4^{m³},500. Les travaux de régulation permettraient de porter ce dernier débit à 8 mètres cubes et d'assurer la navigation en tout temps dans le détroit de Lavena et sous le pont de Melide-Bissone.

CHAPITRE X

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'AMÉNAGEMENT ET DE L'EXPLOITATION DES CHUTES D'EAU ET DES USINES HYDROÉLECTRIQUES.

Puissance variable des cours d'eau. — Rayons d'action économique des centrales à vapeur et des centrales hydrauliques. — Utilisation rationnelle des chutes d'eau. — Association des chutes d'eau.

63. Puissance variable des cours d'eau. — Un cours d'eau non régularisé peut être considéré, au point de vue de la puissance que l'on peut en tirer, comme étant la résultante d'une quantité constante qui est donnée par le débit minimum et qui sont les « chevaux permanents », et d'une autre quantité variable et fonction de la différence des débits moyen et minimum de la chute et de la durée de cette variation que l'on désigne par « chevaux périodiques ». La « puissance limite » de la chute est fournie par le débit caractéristique moyen et elle est égale à la somme des chevaux permanents et des chevaux périodiques.

Dans les pays montagneux, il n'y a guère que les industries électrochimiques et électrométallurgiques qui puissent utiliser les chevaux périodiques. Les hautes chutes peuvent ainsi utiliser leurs chevaux permanents, de production et de transport coûteux, pour l'alimentation des services publics (éclairage, force motrice, traction), et leurs chevaux périodiques pour la fourniture à des usines électrochimiques. Quant aux basses chutes, elles ne peuvent guère que produire des chevaux permanents, pour pouvoir obtenir des prix de vente suffisamment rémunérateurs.

On estime d'une façon générale à 2000 heures par an la moyenne de consommation des forces motrices des services publics. La quantité de chevaux permanents non utilisés s'appelle « résidus d'énergie » ou énergie résiduelle.

Toujours dans le cas d'une chute d'eau non soutenue par une réserve hydraulique, et si l'usine alimente des services publics,

il est prudent de ne compter que sur le débit caractéristique d'étiage.

Pour utiliser la quantité d'eau dépassant la quantité minimum disponible naturellement, on peut l'emmagasiner pour servir aux époques de sécheresse, ou disposer l'installation de façon à utiliser pendant la plus grande partie de l'année toute la quantité d'eau disponible, tandis que son service peut être diminué de beaucoup pendant la saison des basses eaux, ou enfin le service peut être rendu continu au moyen d'une usine thermique de secours.

Lorsqu'on dispose d'un réservoir suffisamment grand, on peut ne laisser écouler l'eau qu'au fur et à mesure des besoins de l'usine, de sorte qu'elle soit entièrement utilisée. Il arrive ainsi qu'un cours d'eau d'altitude élevée et d'un débit relativement faible peut donner une puissance beaucoup plus grande que celle qu'il fournirait s'il n'était aménagé que pour son débit d'étiage. Même avec les chutes moyennes, utilisant d'assez gros débits, il est possible dans certains cas de créer des réserves capables de faire varier le débit journalier d'un cours d'eau suivant la variation de puissance de l'usine. Lorsque le cours d'eau est susceptible de régularisation et si on connaît la superficie du réservoir, le graphique du débit de la rivière indique de combien on doit élever le niveau pour obtenir le maximum de puissance constante.

L'adjonction d'une usine thermique est assez avantageuse dans les pays où l'on peut produire la force en très grande quantité et la distribuer à un nombre considérable de petits consommateurs. L'économie de ce système dépend du rapport entre le prix de la force hydraulique et celui de la force à vapeur, étant entendu que le prix de cette dernière est plus élevé pour une durée restreinte.

Ainsi l'emploi de la vapeur peut servir à remplacer les chevaux permanents qui manquent aux basses eaux. Parfois on attribue le même résultat à des accumulateurs électriques que l'on charge pendant les périodes de faible charge et qui restituent leur énergie au moment de passer la pointe. Enfin on peut faire appel à un réservoir compensateur, établi sur le canal d'aménée de la chute, permettant d'emmagasiner dans les heures de faibles charges le volume nécessaire au moment de la pointe.

Aux usines d'Aarburg et de Schaffouse, en Suisse, où pendant les heures de faible demande d'énergie l'excédent disponible est employé à élever de l'eau dans un réservoir qui est utilisée pendant les heures de forte charge pour actionner les turbines, on a reconnu que le rendement d'une telle installation était de 50 p. 100.

64. Rayons d'action économique des centrales à vapeur et des centrales hydrauliques. — Le besoin d'utiliser les chutes abondantes et puissantes peut amener les exploitants de ces chutes à concurrencer avec la houille noire alimentant des centrales à vapeur ou à gaz pauvre dans des régions éminemment industrielles où se trouvent des villes populeuses, des usines, des chemins de fer, c'est-à-dire où les débouchés sont nombreux et considérables. La connaissance des rayons d'action économique des usines noires et blanches les unes par rapport aux autres permet de fixer, d'une façon assez sûre, l'emplacement le plus favorable aux stations centrales à vapeur.

Si on se met dans l'hypothèse d'une bonne marche industrielle, les usines noires et les usines blanches peuvent parfaitement se suppléer dans la plupart des cas, les dernières apportant de leur énergie moins coûteuse, les premières corrigeant le défaut de régularité dans la puissance fournie par l'eau.

Le problème peut se prêter à une combinaison telle que la suivante. On a une ligne de chemin de fer qui traverse des régions accessibles à l'énergie hydraulique; alors des stations centrales à vapeur ou à gaz sont établies sur certains points de son parcours, où elles peuvent avoir une action plus rationnelle aux endroits où les sections sont hors des zones d'action économique des chutes d'eau.

Les lignes de chemin de fer peuvent ainsi être alimentées par des forces hydrauliques ou pourvues de centres d'approvisionnement de charbon dans les zones respectives d'action du prix de revient minimum des deux agents de force. Les centrales à vapeur placées sur les limites des zones servent à passer les pointes du diagramme de débit du réseau général, et les usines hydrauliques n'ont à fournir que les chevaux permanents, les chevaux périodiques ne se présentant pas au moment de ces pointes.

Dans les centrales à vapeur modernes, par une utilisation

appropriée d'unités extrêmement puissantes, on produisait avant guerre le kilowatt-heure à 4 et même 2,5 centimes, tous frais compris.

65. Utilisation rationnelle des chutes d'eau. — L'étude de l'aménagement d'une chute d'eau doit être basée sur la connaissance des variations du débit du cours d'eau et sur la durée maximum des périodes de sécheresse. S'il a été fait antérieurement des jaugeages sur la rivière, il est bon d'en contrôler les résultats par les moyens que nous avons indiqués. Mais de plus en plus les données fournies par le service des Grandes forces hydrauliques rendront ces opérations moins laborieuses.

Si le cours d'eau est à régime variable nettement caractérisé, on devra autant que possible lui adjoindre un régulateur par la création d'une réserve hydraulique.

Et si on envisage l'emploi d'une certaine partie de la force pour alimenter par intermittences, en sus du transport de force, une usine électrochimique ou électrométallurgique, on pourra aménager la chute en comptant sur la valeur du débit caractéristique moyen (puissance limite).

En cas d'impossibilité, la puissance disponible de la chute est donnée par le débit minimum *minimorum* sous la hauteur de chute utile.

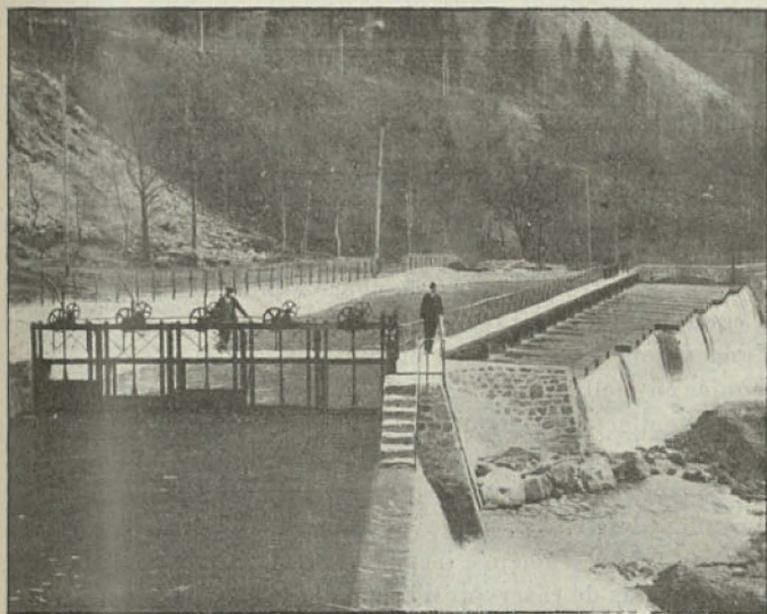
On établit alors, selon le nombre de chevaux dont on dispose, la répartition du nombre de chevaux par vingt-quatre heures, douze heures ou dix heures que l'on pourra distribuer. On remarquera que les chevaux dix heures s'arrêtent une grande partie de l'année, au moment où l'éclairage commence. Si les basses eaux sont en été, la circonstance est particulièrement favorable.

Connaissant la capacité de la réserve et la plus grande durée possible de la saison sèche, le quotient de ces deux facteurs donne le cube d'eau disponible par jour en plus du débit *minimorum*.

La puissance à installer à l'usine devra être au moins égale à la plus grande puissance demandée au même instant dans le réseau d'énergie électrique, divisée par le rendement total de l'installation. On table généralement sur les chiffres suivants : génératrice 0,92; transformateurs-élévateurs 0,97; ligne 0,85 à 0,90; transformateurs-abaisseurs 0,97; distribution 0,97; soit

un rendement pour le transport de force de 0,72 à 0,75. Si on prend 0,88 pour les turbines et 0,95 pour les conduites forcées et canaux de dérivation, on arrive à un rendement final de 0,60 à 0,63.

L'aménagement des chutes par barrages-réservoirs présente cet avantage qu'en augmentant la chute globale utilisée on augmente la réserve générale et l'on se rapproche de l'uniformité du débit, surtout dans les biefs inférieurs et les chutes infé-



(Cliché J. Joya.)

Fig. 140. — Prise d'eau sur la Romanche (usine des Roberts).

rieures qui profitent aussi de toute nouvelle installation faite à l'amont.

En vue de récolter toutes les puissances hydrauliques, si petites soient-elles, on a préconisé l'emploi d'usines génératrices isolées et en transmettant l'énergie de celles-ci à des centrales puissantes hydrauliques ou thermiques. Cette disposition s'adapterait aussi bien à un cours d'eau sensiblement constant qu'à un cours d'eau comportant des variations saisonnières et même à un cours d'eau régularisé seulement pour quelques heures de marche par jour.

Plusieurs procédés peuvent être utilisés. On sait que les alternateurs asynchrones fonctionnent sans surveillance et au prix d'un faible entretien. On peut alors commander à distance la petite usine hydraulique.

Le vannage de chaque turbine est conduit par un moteur conduit par un ampèremètre à contact. Des contacts flottants font démarrer les génératrices à tour de rôle quand le niveau de l'eau atteint une certaine hauteur, et quand ce niveau est trop bas, ils les arrêtent. En parallèle avec ces contacts sont reliés des fils pilotes aboutissant à des interrupteurs de la station centrale; c'est par eux que s'effectue la commande à distance.

Une autre disposition consiste, le moteur étant relié au réseau d'une façon permanente, à utiliser ce moteur à remonter les vannes et les maintenir ouvertes au moyen d'un ressort, ce dernier ayant pour mission de refermer les vannes au moment où, le flotteur ayant atteint son niveau le plus bas, l'amenée du courant est automatiquement confiée au moteur et le couple de ce dernier se trouve en conséquence annihilé. On conçoit donc la condition qu'il soit possible d'utiliser la puissance disponible d'une façon intermittente et au moment même où elle est requise en mettant sous tension ou hors circuit, en temps utile, la ligne collectrice reliant la petite usine à la grande centrale où s'effectue la concentration de l'énergie produite.

Le système de commande pas flotteurs est encore applicable lorsqu'on désire effectuer à distance les manœuvres requises par les tuyères d'amenée d'eau supplémentaires dans le cas où il n'existe pas de réservoir d'accumulation. Si on fait usage d'un relais, il doit être disposé, dans ce cas, entre la génératrice d'induction et la ligne collectrice. Ce relais a pour fonction, en premier lieu, de connecter la génératrice à la ligne dès que la machine a acquis une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme, et il comporte à cet effet un dispositif fonctionnant sous l'action de la force centrifuge.

66. **Association des chutes d'eau.** — L'association des chutes permet de faire soutenir les forces provenant de hautes chutes, soit par d'autres chutes à altitude élevée mais de régime différent, soit par des forces demandées à de basses chutes. On sait en effet que les hautes chutes faiblissent pendant les sécheresses et les grands froids, mais que l'on peut mettre la dépense d'eau

en rapport avec la demande d'énergie par le moyen de lacs naturels ou artificiels employés concurremment avec les réservoirs journaliers, et que de cette façon on a la facilité d'augmenter notablement la puissance apparente du cours d'eau, lorsque la puissance demandée aux turbines a des variations importantes dans le cours de la journée de vingt-quatre heures.

Les usines à basse chute, n'étant susceptibles dans la plupart des cas de marcher avec le débit d'étiage, peuvent donc tirer un grand secours de l'appoint d'une chute, aménagée comme il vient d'être indiqué, et, en cas de froids intenses, sauver leur situation.

On accouple électriquement à une usine hydroélectrique une autre usine alimentée par une chute dont l'énergie est disponible au moment des pointes du réseau de distribution. Des chutes à régime quelque peu différent se marient et s'envoient alternativement de l'énergie lorsque les disponibilités de l'une correspondent aux surcharges de l'autre. De cette façon, diverses chutes accouplées sur un même réseau de transport peuvent utiliser un certain nombre de chevaux périodiques.

Au point de vue électrique, un système qui a donné d'excellents résultats consiste, par exemple si on a trois usines hydrauliques à faire fonctionner en parallèle sur un réseau commun, à mûnir une des usines d'alternateurs asynchrones et les deux autres de générateurs synchrones.

Aujourd'hui on peut prévoir que toute grande installation de houille blanche sera appelée à user de l'accouplement des usines hydrauliques avec ou sans le secours d'usines à vapeur, ces dernières destinées non seulement à parer aux pointes, mais encore dans une certaine mesure aux alternatives d'abondance et de disette, pour la meilleure utilisation de la puissance dynamique et économique des cours d'eau. De nombreux et intéressants exemples existent et ils sont ainsi une source de précieux renseignements pour l'avenir de cette forme d'exploitation des richesses de houille blanche.

CHAPITRE XI

CAPTATION ET UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES MARÉES

Principes généraux de la captation. — Puissance des marées. — Procédés et cycles de captage de l'énergie des marées. — Conditions de fonctionnement d'une usine maréomotrice. — Systèmes utilisateurs et installations d'usines génératrices. — Adaptation des turbines au régime des marées.

67. **Principes généraux de la captation.** — La captation de l'énergie des marées a préoccupé de tout temps l'attention de l'homme industriel. Son ingéniosité lui a permis de concevoir des moyens en rapport avec l'état de la science du moment.

Aujourd'hui seulement on peut envisager la solution au point de vue industriel et économique, et l'essentiel, en cela, c'est que l'on s'est rendu compte des difficultés qu'une telle solution présente. D'autre part, on possède, grâce aux travaux de haute valeur de M. l'amiral Amet et de M. Maynard, une théorie générale qui est à la fois un flambeau et un guide.

De toutes les formes que la mer prend dans le déplacement de ses eaux, la marée est celle qui offre le mouvement et par suite l'effort le plus régulier. La mer monte pendant près de six heures, et après quelques minutes, la mer haute commence à descendre. Le reflux ou jusant demande à peu près le même temps.

Dans les mers ouvertes, l'amplitude des oscillations des marées est à peine de 1 mètre, tandis que dans les golfes et passages étroits elle atteint 14 à 15 mètres. Le tableau ci-après donne quelques indications à cet égard.

Si l'on divise la différence de hauteur entre une pleine mer et le niveau moyen par l'unité de hauteur, on obtient le coefficient de marée.

L'amplitude de la marée sur une côte donnée, dans un jour donné, s'obtient en multipliant le double de l'unité de hauteur de ce port par le coefficient de la marée de ce jour relevé

dans la table des coefficients de la marée en centièmes, de l'Annuaire des marées. La valeur du coefficient de marée varie de 0,29 à 1,19. Cette amplitude est commune à tous nos ports et caractérise la marée. Les marées dites de vive eau moyenne sont celles pour lesquelles le coefficient est égal à 0,94, et celles pour lesquelles il est égal à 0,45 sont dites de morte eau moyenne.

	DIFFÉRENCE MAXIMUM DES EAUX	DIFFÉRENCE MINIMUM DES EAUX
	mètres.	mètres.
Saint-Jean-de-Luz	4,50	1,10
La Rochelle.....	6,50	1,70
Brest.....	7,10	1,70
Saint-Malo.....	13,67	3,00
Cherbourg.....	6,30	1,30
Le Havre.....	7,55	2,45
Boulogne.....	9,30	2,75
Dunkerque.....	5,70	1,85

Les unités de hauteur dans nos ports principaux sont : Dunkerque, 2^m,70; Calais, 3^m,30; Boulogne, 3^m,88; Dieppe, 4^m,44; Le Havre, 3^m,50; Cherbourg, 2^m,82; Granville, 6^m,20; Saint-Malo, 5^m,70; Brest, 3^m,21; Lorient, 2^m,27; Saint-Nazaire, 2^m,60; et La Rochelle, 2^m,39.

L'établissement d'un port est pratiquement l'heure de la pleine mer en eau vive à ce port et la différence des établissements de deux ports mesure le temps que met l'onde de marée à se propager de l'un à l'autre. L'onde de marée se propage plus loin en eau morte qu'en eau vive.

La pression barométrique influence les hauteurs des pleines mers et des basses mers; cette variation a été trouvée de 13,3 centimètres pour 1 mètre de hauteur du baromètre.

Le vent régnant peut aussi influencer la marée.

La courbe de marée affecte sur nos côtes, en général, la

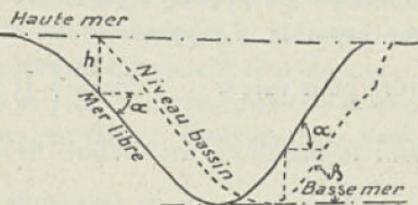


Fig. 141.

forme sinusoïde (fig. 141). Les courbes de marée en morte eau et en vive eau affectent des formes un peu différentes.

Si $\frac{\Lambda}{2}$ est la demi-amplitude ou produit de l'unité de hauteur par le coefficient de marée, c et t le nombre d'heures écoulées depuis le passage de la mer à son niveau moyen, on a pour l'équation de la sinusoïde :

$$\gamma = \frac{\Lambda}{2} \sin \frac{\pi t}{6,2} = uc \frac{\pi t}{6,2}.$$

Si on examine un bassin à marée à parois verticales, de surface unie, rempli par la marée, le travail accompli par le flux consiste à élever directement chaque couche de l'eau dont le bassin se remplit, depuis le niveau de la basse mer jusqu'à la hauteur que cette couche occupe en haute mer; au total, c'est l'élévation du poids Λ du volume d'eau compris dans le bassin dans ses plans d'eau de basse mer et de haute mer à la hauteur $\frac{\Lambda}{2}$ (Λ amplitude de la marée) du centre de gravité dudit volume au-dessus de la basse mer.

Par suite :
$$\Lambda \times \frac{\Lambda}{2} = \frac{\Lambda^2}{2}.$$

Si donc le remplissage du bassin se fait au reflux par sa mise en communication, sans aucun obstacle, avec la mer libre, l'expression du travail naturel accompli par la marée est : $\frac{\Lambda}{2}$.

Lorsque le remplissage du bassin par le flux se fait sous une différence de niveau H , maintenue constante aussi longtemps que possible, l'expression du travail accompli par le flux a alors pour valeur : $T = \frac{\Lambda^2}{2} + H(\Lambda - H)$;

dont le maximum atteint par : $H = \frac{\Lambda}{2}$ est $\frac{3\Lambda^2}{4}$.

M. Amet donne à ce maximum le nom d'énergie potentielle de la marée. C'est la plus grande quantité d'énergie dont le captage puisse être envisagé dans un bassin à double effet, c'est-à-dire dont les turbines fonctionnent au flux comme au reflux, sous la charge $H = \frac{\Lambda}{2}$. Et il appelle énergie disponible

celle développée dans le bassin à double effet par la marée le remplissant sous charge quelconque et dont la valeur est :

$$\frac{A}{2} + H(A - H).$$

Pour la courbe de marée de forme sinusoïdale, cette énergie disponible, en cas du remplissage du bassin à marée, sous hauteur de chute atteinte au temps t compté depuis le demi-flux, est :

$$\frac{A^2}{4} \left(3 - \sin^2 \frac{nt}{6,2} \right).$$

Mais les bassins à parois verticales que nous venons d'envisager ne sont pas précisément d'une utilisation pratique ; le cas général est plutôt celui d'un bassin à parois déclives, s'établissant dans un bras de mer, d'une barre, d'une anse, d'un estuaire barré par une digue, et les parois constituées par des plages, grèves, falaises, en ont les déclivités ordinaires.

Les formules établies ci-avant restent applicables aux bassins à parois déclives, en multipliant les volumes par un facteur μ plus petit que 1 et les centres de gravité par un facteur ν plus grand que 1, les bassins comparés étant de même surface, ou, ce qui revient au même, en multipliant lesdites formules par $\rho = \mu\nu$, pour qu'elles puissent représenter l'énergie développée par la marée dans le remplissage d'un bassin à parois déclives. La valeur de ρ s'approche de l'unité en même temps que le rapport des aires du plan d'eau du bassin à base mer (mortes eaux) et à haute mer (vives eaux).

68. Puissance des marées. — L'énergie de la marée en fonction de ses caractéristiques de lieu et d'époque, si on appelle u l'unité de hauteur du lieu considéré et c le coefficient de marée du point (qui varie entre 0,35 et 1,19) et l'amplitude de marée étant égale à $2uc$, a pour valeur, en faisant intervenir la densité de l'eau :

Énergie naturelle de la marée.....	$1,026 \times \rho \times 2u^2c^2.$
Énergie intégrale.....	$1,026 \times \rho \times 4u^2c^2.$
Énergie potentielle.....	$1,026 \times \rho \times 3u^2c^2.$
Énergie disponible dans le cas de remplissage sous hauteur de chute atteinte au temps t compté depuis le mi-flux.....	$1,026 \times \rho \times u^2c^2 \left[3 \sin^2 \frac{nt}{6,2} \right]$

Le produit u^2c^2 (celui uc représentant des mètres) donne des milliers de kilogrammètres par mètre de surface du plan d'eau du bassin à haute marée. Si l'unité de surface est l'hectare, u^2c^2 représente des dizaines de millions de kilogrammètres.

L'énergie récupérable, quand on connaît le coefficient de rendement moyen du procédé de captage et le coefficient de perte moyenne de charge et l'aire du plan d'eau du bassin à marée à haute mer, s'obtient en multipliant une des expressions représentant les diverses formes de l'énergie ci-avant par le produit de ces divers facteurs.

Étant ainsi reconnu que l'énergie de la marée est proportionnelle à u^2 , on voit l'intérêt qu'il y a à s'adresser aux marées de fortes amplitudes. Au point de vue de la puissance économique la plus favorable de la station marémotrice, c'est celle qui serait capable d'absorber l'énergie des marées de 0,60, en utilisant ainsi 58 p. 100 de l'énergie annuelle des marées.

Dans l'hypothèse du remplissage du bassin par le flux sous une différence de niveau H maintenue aussi constante que possible, on ouvrirait toutes les vannes pour amener le niveau du bassin à accoler au bassin de la mer; à ce moment la mer

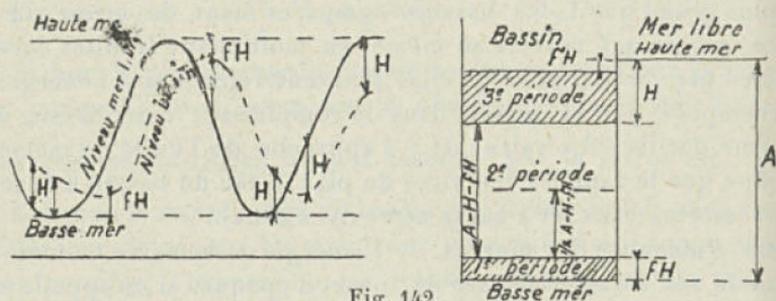


Fig. 142.

pourrait avoir monté de $f'H$ (fig. 142); on fermerait alors les vannes jusqu'à ce que le niveau de la mer surmonte celui du bassin de la quantité H . On réglerait ensuite l'ouverture des vannes pour maintenir H constant jusqu'à la haute mer et on ouvrirait alors les vannes en grand pour permettre au niveau du bassin de rattraper celui de la mer rencontrée quand elle a commencé à descendre de $f'H$. Enfin on fermera les vannes jusqu'à ce que le niveau du bassin surmonte celui de la mer de la hauteur H . Et ainsi de suite.

Dans le cas de $f=0$ et de H quelconque, l'expression du travail est :

$$T = \frac{\Lambda^2}{2} + H(\Lambda - H);$$

énergie qu'il s'agit de récupérer.

L'énergie développée par la marée dans le cas de $f=0$ et de H correspondant au temps t compté depuis le mi-flux, peut alors être exprimée par :

$$\frac{\Lambda^3}{H} \left(3 - \sin^2 \frac{n}{6,2} \times t \right).$$

69. Procédés et cycles de captage de l'énergie des marées. — Les procédés de récupération de l'énergie des marées peuvent reposer sur les trois principes suivants : *a*) poussée du liquide, élevant au flux et laissant redescendre au reflux des moteurs dont le lent mouvement alternatif est transformé d'une façon ou d'une autre par des machines appropriées auxquelles les flotteurs sont reliés; *b*) la vitesse du liquide agissant par sa force vive sur des palettes ou les aubes d'organes rotatifs plongés dans son courant; *c*) pression ou chute d'eau créée en laissant s'établir une différence de niveau entre la surface de la mer libre et le plan d'eau d'un bassin naturel ou artificiel convenablement barré.

Le procédé de captage par la pression ou chute d'eau comporte plusieurs solutions connues sous la désignation de cycles, dont nous allons donner la définition des principaux.

Cycle Decœur. — Ce procédé comporte deux bassins dont un bassin supérieur alimenté par sa communication avec la mer libre pendant la dernière partie du flux et un bassin inférieur qui se vide pendant la dernière partie du reflux. Les deux bassins sont séparés de la mer libre par une digue insubmersible; ils communiquent entre eux à travers les turbines installées dans un barrage transversal qui permet d'établir une différence de hauteur entre leurs niveaux respectifs. Ce dispositif, au rendement près, pourrait s'améliorer en recourant à l'emploi d'un compartiment intermédiaire jouant le rôle de régulateur de charge génératrice.

Cycles à bassins conjugués. — On peut aussi conjuguer les deux bassins, situés dans la même région, lesdits bassins

ne communiquant pas entre eux, mais avec la mer libre, tous les deux. Chacun d'eux entre en action au moment où celle de l'autre s'arrête. Le maximum de travail de chacun des bassins est obtenu par une entrée en action de leurs turbines sous une hauteur de chute égale au cinquième de l'amplitude de la marée, charge réalisable une heure cinquante minutes environ après la haute mer ou la basse mer. Ce maximum n'est que $0,273 A^2$, alors que l'énergie potentielle d'un bassin à double effet a pour valeur :

$$\frac{3}{4} A^2.$$

Les bassins conjugués peuvent être soit superposés (système Pein), ce qui est d'un bon effet économique pouvant utiliser le même jeu de turbines, soit éloignés l'un de l'autre.

Le système à trois bassins conjugués dans la même région consiste en un bassin principal à double effet, avec arrêts de deux à trois heures à la haute mer et à la basse mer et deux bassins auxiliaires entrant en action pendant ces arrêts. L'un, rempli par le flux précédent, travaille pendant la basse mer, l'autre, vidé par le reflux précédent, ne se remplit que pendant la haute mer.

Le système de bassins conjugués situés en région d'établissement de ports différents permet de mieux réaliser la continuité et la constance de la puissance. Mais il faut recourir au transport de l'énergie à distance.

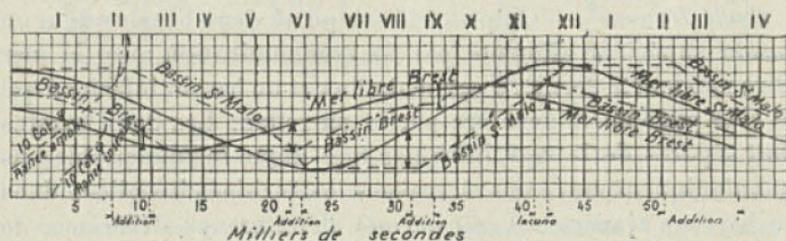


Fig. 143.

La fig. 143 schématise la combinaison de bassins à double effet réalisant la puissance constante. Dans ce cas il y a, aux environs des étales des heures de puissance, et à des moments intermédiaires, des additions de puissance qui tiennent à ce

que la différence des établissements du port de Brest et de Saint-Malo n'est que de 2 heures 14 minutes. On conçoit que les lacunes puissent être comblées au moins partiellement par l'action de bassins de retenue ou de vidange. Mais le coût des turbines spéciales pour un fonctionnement très intermittent est de nature à faire écarter de telles conceptions.

Le professeur Berger estime à 20000 HP le rendement théorique par kilomètre carré de bassin la force qu'on peut capter. M. Maynard compte sur une force de 39 HP par hectare de réservoir rempli d'eau de mer sur 4 mètres de hauteur, à cause de la réduction de la chute. D'après cette indication, on obtiendrait 156 HP par hectare dans la baie de Saint-Malo par exemple, où le marnage est très fort. M. Thouvenin estime qu'avec une marée de 6 mètres on pourrait avoir une chute de 2 mètres, et il faudrait un débit de 5 mètres cubes à la seconde pour une puissance de 100 HP avec une turbine d'un rendement de 75 p. 100. Un hectare donnerait ainsi 56 HP pendant 7 heures et demie, soit par marée, 32 HP.

Cycle Maire. — Ce système comporte l'emploi de deux bassins dont l'un travaille au remplissage et l'autre à la vidange. Les réservoirs ne communiquent pas entre eux, mais on peut les mettre séparément ou conjointement en communication avec la mer, pendant les phases respectives du fonctionnement, afin de les faire travailler soit séparément, soit en conjugaison. Dans la première phase, le réservoir de remplissage se remplit jusqu'à un niveau déterminé en recevant l'eau à travers les turbines. Cette phase débute lorsque le flux s'est élevé d'une hauteur de 1^m,15 au-dessus de l'étales inférieure, permettant ainsi d'utiliser cette hauteur de chute qui va atteindre au moment de l'étales supérieure une hauteur de 7^m,80 ; elle se termine lorsque le niveau de la mer au reflux n'assure plus qu'une hauteur de chute de 1^m,15 vers le réservoir, celui-ci ayant reçu un volume d'eau correspondant à une élévation du niveau de 4^m,20. La puissance produite ne varie que du fait de la hauteur de chute, qui débute à 1^m,15, atteint une hauteur de 7^m,80 au moment de l'étales supérieure et se termine par celle de 1^m,15. Dans la deuxième phase, le réservoir de vidange se déverse vers la mer par l'intermédiaire des turbines jusqu'à un niveau déterminé. Cette phase débute lorsque le reflux est descendu de 1^m,15 en

dessous de l'étales supérieure. Cette hauteur va augmenter et atteindre $7^m,45$; elle se réduit ensuite jusqu'à ce que le niveau du réservoir et celui de la marée ne soient plus écartés que d'une hauteur de chute de $1^m,15$, moment où se termine cette phase. De même que pour le réservoir de remplissage, le débit du réservoir de vidange s'effectue d'une façon régulière.

Cycle Claude. — Ce cycle ne diffère du cycle Maire que du fait de l'augmentation des hauteurs de chute; on n'obtient cette augmentation qu'au moment des étales; à l'étales supérieure, pour surélever le plan d'eau du réservoir de vidange, et à l'étales inférieure pour abaisser le niveau du réservoir de remplissage. La dépense d'énergie est nécessitée par le pompage pour obtenir la surélévation du niveau du réservoir de remplissage et l'abaissement du niveau du réservoir de vidange.

Cycle État. — Ce système ne comporte qu'un seul réservoir avec une usine de secours ayant un réservoir hydraulique travaillant par intermittence, comme nous l'indiquons dans la description de l'usine de l'Aber-Wrach (§ 70). Le réservoir principal fonctionne au remplissage lors du flux et à la vidange lors du reflux. Le fonctionnement a lieu aussi en deux phases. Dans la première phase, le réservoir se remplit en recevant l'eau à travers des turbines.

La hauteur de chute s'élève pour se terminer à la hauteur de l'eau à l'étales supérieure. On ferme alors les chambres des turbines et on ouvre la robinetterie de remplissage pour faire le plein du réservoir.

Lors de la seconde phase, le reflux étant descendu d'une hauteur déterminée prise du niveau de l'étales supérieure, le réservoir se vide vers la mer par l'intermédiaire des turbines. Entre la première et la seconde phase la production d'énergie est absolument interrompue pendant un certain temps.

Cycle Defour. — Ce système comporte l'emploi de deux réservoirs ne communiquant pas entre eux; mais on peut les mettre séparément en communication avec la mer, pendant les phases respectives du cycle de fonctionnement, afin de les faire travailler soit au remplissage, soit à la vidange. Le plus grand réservoir (R, fig. 144) a son radier à un niveau positif, et le plus petit bassin est au niveau des plus basses mers de l'endroit.

Le fonctionnement des bassins s'opère en quatre phases : Dans la première, le niveau du petit réservoir s'élève en recevant l'eau à travers les turbines; dans la seconde phase, ce même réservoir achève de se remplir en même temps que la mer arrive à l'étale supérieure, et l'on fait intervenir le grand bassin. Pendant ce temps on a fermé les vannes du petit bassin lorsque la mer était au niveau de l'étale supérieure. A la troisième phase, la mer ayant descendu, son niveau présente alors avec celui du petit bassin maintenu à l'étale supérieure une différence suffisante pour obtenir par l'alimentation des turbines la puissance constante désirée. On met donc de nouveau en communication le petit réservoir avec la mer, mais en sens inverse de celui de la première phase; le réservoir se vide dans la mer par l'intermédiaire des turbines. Lors de la quatrième phase, la mer ayant descendu davantage et le petit bassin ayant continué à se vider, la différence de niveau entre ce réservoir et la mer devient insuffisante pour assurer la puissance constante voulue; on ouvre les vannes du petit réservoir pour qu'il achève rapidement de se vider, et en même temps on fait de nouveau fonctionner le grand bassin, qui se vidange d'une hauteur déterminée à travers les turbines.

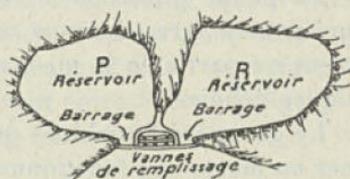


Fig. 144.

70. Conditions de fonctionnement d'une usine maréomotrice. — L'usine à créer est supposée constituée par un bassin à marée double effet auquel serait annexé un réservoir capable de faire marcher les turbines pendant les intermittences du premier fonctionnement. Les turbines, pour se trouver dans les meilleures conditions, fonctionnent sous une charge égale à la demi-amplitude de la marée, et l'énergie de la marée serait récupérée sous un fonctionnement à puissance constante, par compensation entre charge et débit.

On posera donc : charge initiale $= uc$ et la charge maximum $= h^M = 1,1 \times uc$.

Quant au débit maximum, il doit satisfaire à la relation :

$$Q_m = S \times 10 \text{ Cot } \varphi \text{ tang } \beta;$$

β angle de pente de la courbe du niveau du bassin et $10 \text{ Cot } \varphi$, abscisse de la courbe de déclivité au même moment, S représente la superficie en hectares du bassin à marée.

La pleine puissance de la station maréomotrice sera celle qui pourra être soutenue avec constance en marée de coefficient c à partir de la mi-marée par des turbines de caractéristiques définies.

Le groupe des turbines que la marée sera capable d'actionner en morte eau fonctionnera en toute marée; il fournira le fond de l'installation de l'usine. La charge minimum à laquelle devront pouvoir fonctionner avec rendement satisfaisant ces turbines sera :

$$h_m = 0,35 u.$$

Et à charge maximum : $h_M = 1,1 \times 0,64 \times u$.

Si on admet 0,65 pour le rapport de la charge normale d'une turbine à la charge minimum de la turbine, on aura pour la valeur de la charge normale :

$$h_n = \frac{0,35 u}{0,65} = 0,54 u.$$

Par suite :
$$\frac{h_M}{h_m} = \frac{1,1 \times 0,64 \times u}{0,54 \times u} = 1,30.$$

Le rendement des turbines dans ces conditions serait de 0,74.

Il convient donc, pour que les turbines puissent s'adapter à l'énergie croissante de la marée, que les orifices des turbines varient dans le même sens et la même mesure que la vitesse d'écoulement, c'est-à-dire de la puissance de la charge génératrice. On peut, à défaut de distributeurs de débit, faire varier le nombre des turbines en action.

Les autres turbines que celles de morte eau qu'il faudra faire entrer en action, dès que les premières ne seront plus capables d'absorber toute la partie récupérable, devront fonctionner sous une charge plus forte que la charge normale des turbines de morte eau, c'est-à-dire fonctionner sous la charge de marche en vive eau. La préoccupation de conserver aux turbines un bon rendement en vive eau a fait émettre l'idée d'associer en quantité durant la morte eau, en tension durant la vive eau, les turbines adaptées aux conditions d'une faible marée. Il apparaît que seule l'idée de l'association en tension puisse être acceptée

pour l'écoulement de l'eau retenue ou accumulée dans les réservoirs prévus soit pour prolonger le fonctionnement des turbines durant la basse mer, soit pour soutenir leur puissance en morte eau et parce que, dans ces cas, le débit et la charge seront relativement, l'un réduit, l'autre amplifiée. Les turbines seraient associées en tension en reliant par un aqueduc le réservoir aux chambres des turbines et en établissant entre celles-ci (fig 145) les cloisons et tunnels des conduites convenables.

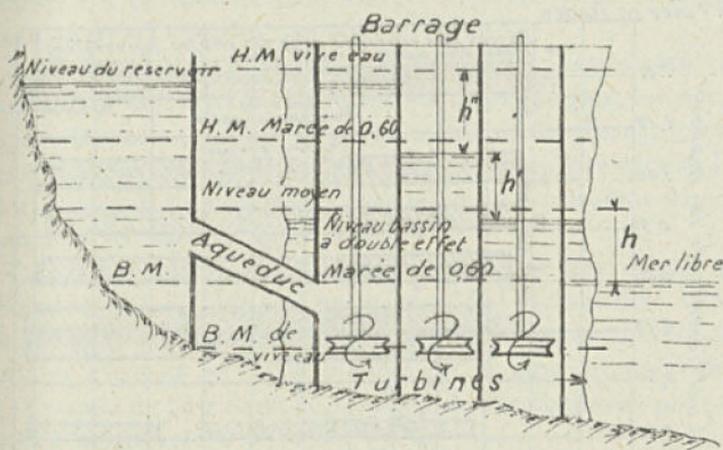


Fig. 145.

Dans le cas d'un bassin à double effet et d'un réservoir, pour le fonctionnement des turbines à basse mer, on doit les disposer de façon à pouvoir être actionnées par la chute du bassin à double effet, soit par la chute du réservoir en assurant entre le flux et le reflux la continuité de leur travail et autant que possible la constance de la puissance. La figure 146 présente synoptiquement le fonctionnement des turbines sous les chutes successives d'un bassin à double effet et de l'eau d'un réservoir de même superficie.

70. **Systèmes utilisateurs et installations d'usines génératrices.** — Les marémoteurs, dans le système Fusenot, consistent en des flotteurs qui, soulevés par le flot, retombent ensuite de tout leur poids, actionnant à chaque chute un système de transmission avec appareil amplificateur de la hauteur de la vague, par le fait de la précipitation de la masse liquide dans un che-

nal resserré situé lui-même au fond d'une crique hémiconique. En outre, le système utilise l'action de la vague aller et retour.

Par application de ce principe, on peut concevoir des pompes motrices installées sur le rivage; en s'élevant, le flotteur aspirerait une quantité d'eau, et en retombant, après le passage de la vague, refoulerait cette eau dans un tuyau, qui l'enverrait à terre dans un récipient élevé où elle servirait à actionner des turbines hydrauliques.

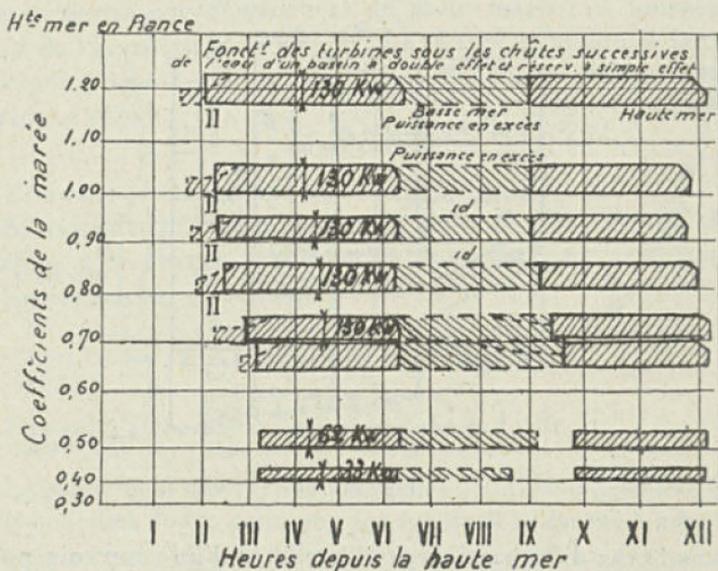


Fig. 146.

Le flotteur imaginé par le docteur Legrand est mobile autour d'un point de suspension situé à sa partie supérieure et recevant au passage des vagues une poussée qui le fait osciller à la façon du balancier d'une pendule. Le mouvement est transmis à un moteur pneumatique.

La *force vive des vagues* suffit à actionner des turbines. Les vagues arrivant dans une chambre close et retournant à la mer par un canal de sortie peuvent traverser des turbines qu'elles mettent en jeu (procédé Maurel). La nappe d'eau ayant par exemple 2 mètres au-dessus du niveau des basses eaux, on pourrait obtenir 5000 HP, même davantage avec 8 ou 9 turbines.

Systèmes pneumatiques. — On a proposé des systèmes à

réservoirs clos, basés sur la compression ou la dilatation que subit l'air d'une chambre fermée lorsque la marée y arrive ou s'en retire.

Le moteur hydropneumatique conçu par M. Legrand se définit comme suit : l'eau de la mer emmagasinée dans une citerne comprime l'air qu'elle contient et s'échappe ensuite par une soupape. A la marée descendante il se produit un appel d'air qui détermine la rotation d'un moteur constitué par une roue dentée. Un tel moteur peut fournir 0,83 HP pour une hausse d'eau de 0^m,02 environ par minute.

MM. Parenty et Vandame préconisent aussi l'emploi de l'air comprimé, mais en utilisant, en outre du flux, le choc des vagues fournissant ainsi de grandes quantités d'air, alternativement aspiré et comprimé, et d'assez fortes pressions. L'air comprimé est emmagasiné à mesure qu'il est produit dans des appareils accessoires appropriés.

La pression de l'air comprimé par le choc des vagues peut atteindre 2 kg. à 3 kg., ce qui permet de l'utiliser directement. Au moment du reflux ou du retrait des vagues un effort de succion s'exerce en sens inverse de la poussée précédente, et ce retour de l'air sous la pression de l'atmosphère peut être également utilisé.

Flotteurs articulés. — On a proposé une ingénieuse combinaison de flotteurs articulés présentant sensiblement la forme d'un bateau serpent lorsqu'ils sont assemblés. Ils sont reliés par leurs arêtes inférieures au moyen de charnières, ce qui permet à l'ensemble d'épouser la forme des vagues. Les caissons extrêmes sont effilés pour donner à la construction l'allure d'un navire et faciliter son avancement qui est produit par un moteur marine. Le navire ainsi articulé est soumis à l'action des vagues qui font osciller les caissons les uns par rapport aux autres, et chaque caisson porte une pompe commandée par une bielle fixée au caisson voisin ; l'eau puisée par ces pompes est accumulée dans un réservoir, conservée sous pression et utilisée pour la propulsion du navire lui-même, soit au moyen d'un ajutage, ou en lançant le jet d'eau sous pression contre les aubes d'une turbine qui à son tour actionne l'hélice propulsive. On peut, au lieu d'utiliser les vagues à la propulsion du navire, installer celui-ci à poste fixe à une certaine distance du rivage

et faire fonctionner à bord des machines électriques qui envoient le courant à terre.

Le *procédé Bigourdan* consiste en une cloche fixe ouverte à sa partie inférieure et placée de manière à être remplie graduellement par l'eau de la mer montante. L'air emprisonné dans la cloche est comprimé, et il en résulte une force utilisable soit directement, soit pour élever d'autre eau et créer une chute. Ensuite, quand la mer redescend, il y a aspiration dans ce qui peut encore être utilisé pour élever de l'eau. Ainsi la cloche est l'organe fondamental d'une pompe dont le piston soumis à l'action de la mer ferait un peu plus de deux mouvements de va-et-vient.

Captation par réservoirs ou bassins. — On conçoit que tous ces systèmes plus ou moins ingénieux ne sont pas appropriés à la réalisation d'usines semblables à celles auxquelles a donné lieu la captation des cours d'eaux de montagne et des grandes rivières de plaine. Seule l'application des réservoirs permet d'aborder le problème dans ce sens, c'est-à-dire permet d'établir des usines marémotrices d'ordre acceptable, soit de 4000 à 25000 chevaux environ de puissance. A titre d'indication, nous donnons la description de quelques installations réalisées, projetées ou en cours d'exécution.

Installation de Rocklard (E.-U.). — Cette installation faite d'après le système Taylor actionne très régulièrement plusieurs usines et donne de 300 à 5000 chevaux de puissance. On a utilisé un bassin naturel de 2 kilomètres carrés aboutissant à une écluse de 80 mètres de long, 12 mètres de largeur et 8^m,40 de profondeur. Dans le roc on a creusé des puits de 61 mètres de profondeur. L'eau coule dans ces puits et passe par des trompes en communication avec l'air extérieur; celui-ci est entraîné à la pression de l'eau, 5^k,9 par centimètre carré, et est utilisé comme force motrice.

Projet d'aménagement des baies de Rothéneuf, de la Rochelle et de la Rance. — D'après M. Maynard, la solution la plus économique, pour l'aménagement de la baie de Rothéneuf, serait l'établissement d'un bassin de marée unique avec barrage de 300 mètres au travers du goulot d'entrée (fig. 147). La puissance moyenne développée correspondrait à 16000 chevaux produits d'une manière continue et constante, et le cheval-heure reviendrait à 0 fr. 005.

En aménageant la baie de la Rochelle (fig. 148) et le Marais-Perdu en un bassin de marée unique, on obtiendrait très facilement une puissance intermittente variant de 1755 à 17575 chevaux, le cheval ressortant à 0 fr. 0113. Pour avoir une puissance continue il faudrait utiliser le Marais-Perdu comme bief et la baie comme bassin écoulant ses eaux dans le marais et dans la mer. L'installation, assez complexe, demanderait 850 francs par cheval et le cheval-heure s'obtiendrait pour 0 fr. 0127.

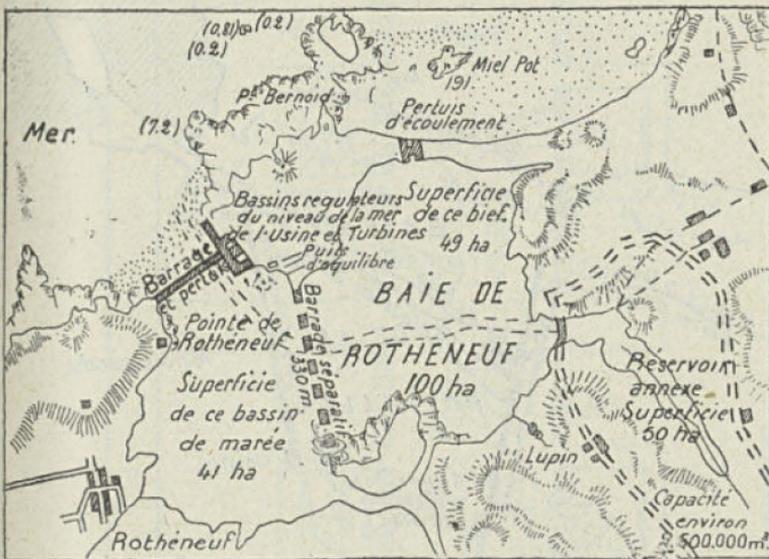


Fig. 147.

La fig. 149 montre le projet de M. Maynard où on remarque l'idée très intéressante de la création de petits bassins ou puits d'équilibre dont le fond serait au niveau des plus basses mers et dont les murs d'enceinte s'élèveraient au-dessus des plus hautes mers.

Ces puits ont pour but de réaliser une hauteur de chute constante pour le débit régulier des turbines qui seraient alimentées toujours dans le même sens. L'eau suivrait un trajet en croix du bassin I par *p, e, h, i, t, s* ou de la mer K par *o, d, h, i, f* et *r*.

Sur la Rance, près de Saint-Malo, la puissance fournie avec accumulation hydraulique correspondrait à 102000 chevaux, les

frais d'établissement s'élevant à 210 francs par cheval et le prix de revient du cheval-heure à 0fr. 00273.

La station d'essai marémotrice de l'Aber-Wrac'h (Finistère), instaurée sous les auspices du ministère des travaux publics, comporte l'établissement d'une usine motrice avec bar-

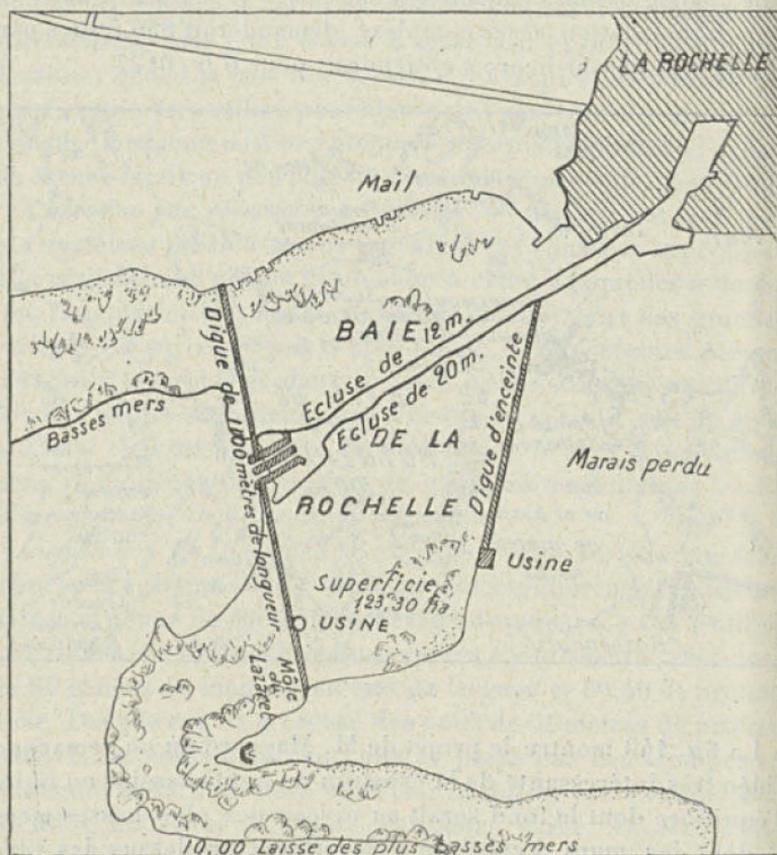


Fig. 148.

rage à marche intermittente établie dans la partie maritime du cours d'eau l'Aber-Wrac'h et d'une usine réceptrice ou régulatrice située à 5 km. 800 en amont dans un barrage fermant la vallée de son affluent, le Diouris. Une ligne de transport d'énergie électrique amènera le courant à Brest.

L'usine motrice doit recevoir, dans le corps même du bar-

rage, quatre turbines groupées deux à deux et actionnant deux alternateurs de 1500 kilowatts.

L'usine d'eau douce du Diouris ou usine régulatrice sera construite dans un barrage de trente mètres de hauteur prévu

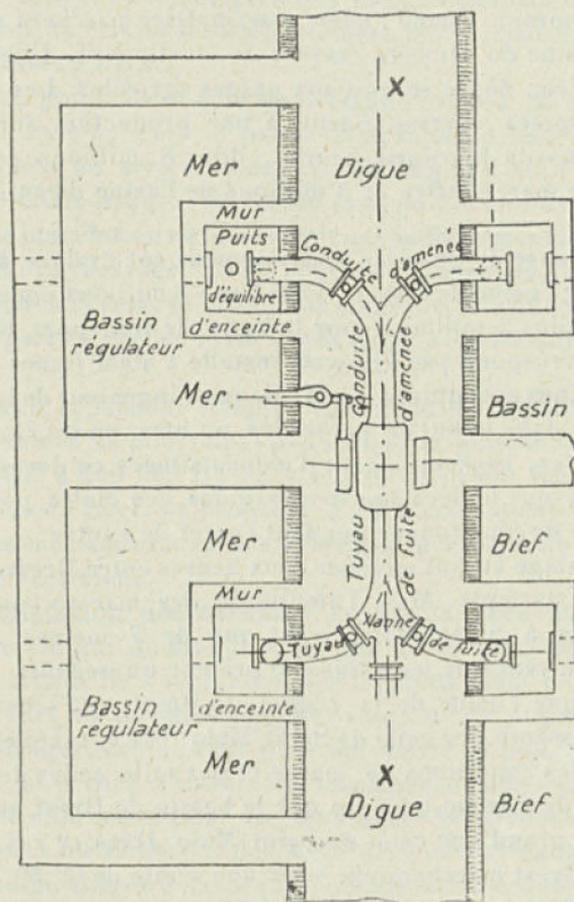


Fig. 149.

en travers de la vallée et créant un réservoir de 7 km. 500 de longueur et d'une capacité moyenne de 12 millions de mètres cubes. Cette usine comprendra : quatre turbines de 1200 chevaux actionnant deux alternateurs de 2700 chevaux. Le tout complété par deux groupes auxiliaires de 100 chevaux et

par une installation de pompes permettant de prendre l'eau en aval du barrage afin d'accroître la retenue du Diouris.

Pendant les heures d'arrêt de l'usine marémotrice et durant certaines mortes eaux, les turbines de l'usine d'eau douce entraîneront les alternateurs pour assurer la continuité de production du courant. Quand l'usine marémotrice marchera normalement, l'usine du Diouris cessera de fonctionner. Une seconde réserve d'eau douce servira aux usages agricoles. Les suppositions adoptées correspondent à une production annuelle de 11 millions de kilowatts-heures, dont 8 millions provenant de l'usine marémotrice et 3 millions de l'usine d'eau douce du Diouris.

La dépense de premier établissement est évaluée à 18 millions pour l'usine de l'Aber-Wrac'h et à 8 millions pour celle du Diouris, plus 2 millions pour la ligne de transport de force, ce qui correspond par kilowatt installé à 4000 francs environ.

72. Usines accouplées. — M. Mangin, ingénieur de la marine, propose, dans le but de passer les pointes où les chutes sont inutilisables, l'accouplement d'usines situées en des points de côtes tels que le décalage des périodes des étales permette à une usine de fonctionner pendant l'arrêt de l'autre.

Le décalage atteint environ deux heures entre Brest et Saint-Malo par exemple. Mais l'amplitude des marées, qui est de 13 mètres à Saint-Malo, n'est que de 7 mètres à Brest. Si donc on veut que les usines se prêtent un secours efficace, il faudra que l'usine de la région de Brest soit sensiblement aussi puissante que celle de Saint-Malo; par conséquent, étant données les conditions de marée et par suite celles des chutes normales de marche, il faudra que le bassin de Brest soit beaucoup plus grand que celui de Saint-Malo. Dans ce cas les turbines de Brest marcheraient sous une chute de 0^m,60, et celles de Saint-Malo sous une chute de 1^m,30.

Si on prend un rendement de 0,80 pour l'installation hydraulique, sur les turbines, on trouve que dans les périodes de marche en morte eau l'usine de Brest peut donner 6,3H P par hectare de bassin, et celle de Saint-Malo 19,6. Il en résulte que la superficie du bassin de Brest devra être 3,1 fois plus grande que celle du bassin de la Rance à Saint-Malo. Or la surface du bassin de la Rance à l'amont du bassin de Bizeux est de

2000 hectares, correspondant à une puissance de 40 000 chevaux. Pour donner une puissance équivalente, le bassin de Brest devrait couvrir plus de 6000 hectares. En vive eau on peut obtenir à Brest 21,3 HP sur l'axe des turbines, et 98,7 à Saint-Malo. Le rapport des surfaces des bassins devrait être alors de 4,6, soit un bassin de 2000 hectares sur la Rance et un de 9200 hectares à Brest.

Un seul point de la côte de Bretagne permet de constituer un pareil bassin; c'est la partie de la rade de Brest, dite de Landévennec ou arrière-rade, avec barrage à établir entre la pointe de l'Armorique, l'île Ronde et la pointe de l'île Longue; mais cette installation ne réserverait pas suffisamment les besoins militaires. Le barrage (3) au contraire donne un bassin de 6900 hectares et réserve la rade de Lanvéoc. L'usine construite en deux parties sur les rives serait facile à fonder sur les fonds rocheux.

Il faudrait cependant compter que vingt jours par an, environ, les usines ne pourraient pas donner la puissance escomptée (200 000 à 400 000 HP en vive eau et 40 000 HP en morte eau); alors on pourrait remédier à cet inconvénient en reliant les usines marémotrices à des centrales thermiques ou hydrauliques de l'intérieur.

73. Adaptation des turbines au régime des marées. — Une question qui domine la captation de la force motrice des marées est celle de l'adaptation des turbines à leur régime spécial. En effet les turbines actuelles sont loin de se prêter à une utilisation équivalente à celle pour les chutes de houille blanche. Sous de si petites chutes, ces machines demandent un très grand encombrement pour des puissances relativement faibles. D'autre part les vannes de décharge se trouvent dans des conditions particulières défavorables pour pouvoir écouler, dans un sens ou dans l'autre, au voisinage des étales, une tranche d'eau dont la surface est celle du bassin et l'épaisseur égale à la hauteur de chute minimum pour les turbines. En effet si la vitesse est importante au début, elle diminue très rapidement au fur et à mesure que diminue la différence des niveaux dans le bassin de retenue et dans la mer, et on risque, si les sections d'écoulement ne sont pas suffisantes, de ne pas vider complètement le bassin en basse mer ou de ne pas le remplir complètement en haute mer.

Il est naturel que l'on ait songé dès l'abord pour la captation des marées, à l'instar de ce que l'on a fait en pays de montagnes, à établir, dans un but économique, des barrages dans des goulets étroits. Mais il apparaît que le barrage le plus avantageux est celui qui, pour un même cube de maçonnerie, est le plus long et le moins haut. D'autre part il semble que les usines génératrices doivent plutôt être placées dans des bassins fermés protégés où la houle est déjà amortie, plutôt qu'exposées directement aux vagues.

Enfin en ce qui touche les turbines et le matériel électrique, il nous sera permis de poser un point d'interrogation que nous n'avons relevé nulle part : c'est la façon dont se comporteront machines et matériel en contact prolongé d'une part avec l'eau de mer et d'autre part avec l'air salin. Nous craignons des mécomptes de ce côté, qui pourraient peut-être conduire à envisager l'adoption d'un métal spécial, au moins pour certaines parties en travail des turbines.

CHAPITRE XII

MATÉRIAUX POUR L'ÉTUDE DES USINES

- I. AVANT-PROJET POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UNE USINE HYDROÉLECTRIQUE. — Aménagements hydroélectriques. Ligne de transport d'énergie électrique. Etude financière.
- II. BILAN DES FORCES HYDROÉLECTRIQUES MONDIALES. — Richesse de la France en houille blanche. Richesse des principales nations du monde.
- III. LÉGISLATION ET RÉGLEMENTATION DES COURS D'EAU. — A. *Forces hydrauliques*. — Lois et décrets antérieurs à la loi du 16 octobre 1919. — Lois et décrets concernant le régime actuel.
B. *Distributions d'énergie électrique*.
- IV. CONCESSIONS ET AUTORISATIONS. — Lois, décrets, circulaires et arrêtés. — Réglementation des usines hydrauliques. — Autorisations. — Concessions. — Formalités pour l'obtention des concessions ou des autorisations. — Autorisation, approbation et récolement des travaux.

I. — Avant-projet pour l'établissement d'une usine hydroélectrique.

74. **Aménagements hydroélectriques.** — *Débit du cours d'eau.* — Les hauteurs de pluie du bassin versant sont, à défaut de données plus précises, un bon élément pour l'évaluation du débit du cours d'eau. Connaissant la superficie (X) de ce bassin, on détermine la moyenne de hauteur de pluie par hectare (*h*) et en prenant un coefficient moyen d'absorption annuel, soit 0,50, on aura pour le débit de la rivière :

$$X.h.0,50 = Q \text{ mètres cubes.}$$

Par suite le débit moyen peut être estimé à :

$$\frac{Q}{365 \times 24 \times 3600} = q' \text{ mètres cubes à la seconde.}$$

Pour le débit minimum, on peut le fixer en adoptant le chiffre de 5 litres par kilomètre carré, par suite :

$$\frac{X}{100} \times 5 = q'' \text{ litres à la seconde.}$$

On est ainsi en face d'une première évaluation. A défaut de renseignements plus exacts sur l'état du cours d'eau, fournis par le service des Grandes Forces hydrauliques ou par le service des Ponts et Chaussées, on peut procéder à un contrôle à l'aide de jaugeages effectués, par exemple au moyen de flotteurs de surface, en opérant dans deux sections de la rivière.

Comme il nous est indispensable, pour pouvoir évaluer la capacité de la réserve de la retenue, de connaître les débits mensuels, à défaut de renseignements administratifs, on peut les évaluer d'après les hauteurs moyennes de pluie mensuelles et les coefficients d'absorption correspondant à chacun de ces mois. On aura ainsi les débits mensuels en mètres cubes.

Pour déterminer la capacité du réservoir, on connaît la hauteur de chute brute; d'après l'étude faite sur place on a relevé la longueur du canal d'aménée et on se fixe sa pente par mètre courant. On a ainsi la hauteur de chute disponible (H). Sa puissance (P) en chevaux, de 11 heures par exemple, étant fixée, le débit pour assurer cette puissance sera :

$$Q' = \frac{P \times 75}{H \times 1000} \text{ mètres cubes à la seconde.}$$

Par suite pour vingt-sept jours de 11 heures, la quantité d'eau à débiter mensuellement sera :

$$Q' \times 3600 \times 27 \times 11 = N \text{ mètres cubes.}$$

Si on adjoint à l'installation une usine thermique de x chevaux (par exemple égale à $\frac{P}{4}$) fonctionnant pendant trois ou quatre mois de l'année, son équivalent en eau aura pour valeur :

$$\frac{N \times \frac{P}{4} \times 100}{P \times 80} = N' \text{ mètres cubes.}$$

On aura à compenser le manque d'eau de certains mois par le jeu de la réserve d'eau emmagasinée, et quand celle-ci sera insuffisante, on pourra faire appel à l'usine de secours de vapeur.

On est donc en état de dresser un tableau comportant pour chaque mois de l'année : le débit de la rivière en mètres cubes, les débits à assurer, les échanges ou les quantités d'eau fournies par le réservoir et les quantités d'eau restant au réservoir.

Ce tableau permettra de fixer l'emplacement de la prise d'eau correspondant à la quantité d'eau minimum que l'on voudra laisser dans le réservoir.

La forme de la réserve étant définie par les divers profils en travers que l'on a relevés, si on porte en abscisses les longueurs représentant les distances entre les profils, et en ordonnées les superficies de ces mêmes profils, on aura le moyen de déterminer le volume total de l'eau que peut emmagasiner le réservoir. On aura par les résultats obtenus le moyen de constater à nouveau le volume d'eau à laisser au réservoir qui viendra en confirmation de celui fixé par l'établissement du tableau précité.

Barrage. — La hauteur et la longueur au sommet du barrage étant données, on calculera sa stabilité d'après les données que nous avons fixées.

Appelons Q la poussée de l'eau appliquée au tiers inférieur de la hauteur H du réservoir, M le mouvement de renversement dû à la poussée de l'eau par rapport à l'arête et qui doit faire

équilibre au poids de la maçonnerie, S la section du barrage (profil triangulaire), x la distance du centre de gravité à l'arête de renversement, on aura :

$$Q = \frac{1000 \times H^2}{2}; \quad M = \frac{Q \times H}{3}.$$

En prenant la densité de la maçonnerie égale à 2200 et en admettant un coefficient de sécurité égal à 2, on a :

$$M = \frac{S \times 2200 \times x}{2}.$$

On trouve par suite :

$$S = \frac{AB \times H}{2}; \quad x = \frac{2 AB}{3};$$

AB base inférieure du barrage.

$$\text{Alors :} \quad M \times 2 = \frac{H}{2} \times AB \times 2200 \times \frac{2 AB}{3}$$

$$\text{ou :} \quad M = \frac{H \times 200 \times 2 \times \overline{AB^2}}{12};$$

$$\text{et :} \quad AB = \sqrt{\frac{M \times 12}{H \times 2 \times 200 \times 2}}.$$

On déterminera ensuite le cube total de la maçonnerie suivant l'épure du tracé.

Pour le canal d'amenée, supposé d'assez grande longueur, nous prenons une pente de 0^m,0005 par mètre; il est en partie à ciel ouvert et en partie en souterrain.

La partie à découvert a la forme d'un trapèze et nous prenons la section trapézoïdale de meilleure utilisation, c'est-à-dire avec :

$$h = a \cos \alpha \quad \text{et} \quad h = 2R;$$

h distance entre la base supérieure et la base inférieure du trapèze, a la demi-longueur de la base supérieure qui est égale à celle d'un des côtés obliques, α angle du côté oblique ou du talus avec la perpendiculaire partant de la base inférieure, R le rayon moyen.

$$\text{Alors la section} \quad S = \frac{2a + l_1}{2} \times h;$$

$$p = 2a + l_1; \quad R = \frac{S}{p}; \quad \text{et} \quad U = \frac{Q}{S};$$

p périmètre mouillé, l_1 longueur de la base inférieure et U vitesse moyenne, qui ne doit pas dépasser $0^m,90$ à 1 mètre par seconde.

Nous supposons que le canal, à franchir une vallée de x mètres de profondeur sur l mètres de longueur, qui nécessite l'établissement d'un siphon métallique.

Pour calculer le diamètre qui doit débiter Q mètres cubes à la seconde, on admet une perte de $\frac{1}{100}$.

On a donc : Q mètres cubes ; $J = \frac{x}{100}$ et la demi-longueur du siphon $= \frac{l}{2}$.

$$\text{Alors : } D = \frac{\left(0,0025 \times \frac{l}{2} \times Q^2\right)^{\frac{1}{5}}}{J}$$

Pour l'établissement du barrage, il est nécessaire de mettre à sec la rivière et de détourner ses eaux. La galerie souterraine qui doit être exécutée à cet effet servira, une fois le barrage construit, de galerie de décharge pour l'évacuation des eaux de crue, évitant ainsi d'établir un déversoir de surface, disposition qui a l'avantage de favoriser la conservation et l'entretien du barrage en maçonnerie. On calculera cette galerie pour évacuer les eaux de crue, diminuées de la quantité débitée par le canal d'amenée, et en adoptant une vitesse assez élevée (3 à 4 mètres à la seconde) en raison du peu de temps que durent les crues et de la nature du roc.

Les vannes commandant cette galerie seront mues électriquement.

La chambre de mise en charge comportera deux compartiments dont les dimensions seront faciles à déterminer d'après les données du § 61.

Conduites forcées. — Nous connaissons la hauteur H de la chute et la longueur l d'une des conduites forcées.

$$\text{Nous avons donc : } J = \frac{2}{100} \times H,$$

J la perte de charge totale.

Comme première approximation de la valeur du diamètre de la tuyauterie, on a :

$$D = \frac{(0,0025 \times l \times Q^2)^{\frac{1}{5}}}{J}$$

Si on veut calculer D par la formule de Darcy, on a :

$$D = \sqrt[3]{6,4846 b_1 \times \frac{Q^2}{J}}, \text{ avec } b_1 = 0,000253 + \frac{0,00001294}{D}$$

Dans cette formule : J entre avec sa valeur par mètre courant.

Usine génératrice. — On constituera celle-ci pour une puissance envisagée d'ordre moyen (10 000 à 15 000 HP) à l'aide de groupes turbo-alternateurs de 3000 à 4000 chevaux chacun et deux groupes semblables de 1500 chevaux environ, dont un de réserve. La tension adoptée sera de 3000 volts. Deux groupes turbo-dynamos de 300 à 400 chevaux fourniront le courant d'excitation à la tension de 200 volts.

Les turbines seront du type Francis horizontal à injection partielle, avec régulateurs automatiques et régulateurs à main.

Les bâtiments constituant l'usine génératrice pourront être divisés comme suit : un bâtiment pour les machines, un pour le logement des transformateurs, magasins, ateliers et laboratoire, un pour les bureaux et habitation du personnel, enfin un pavillon pour la direction.

Le courant triphasé à 3000 volts et 50 périodes fourni par les alternateurs sera survolté à 30 000 volts par six transformateurs de puissance égale, à isolement à bain d'huile et refroidissement artificiel.

Le tableau de distribution sera divisé en trois parties; en haut seront les panneaux d'excitation et ceux des alternateurs (basse tension); au milieu, les panneaux de couplage des alternateurs, des interrupteurs primaires, des transformateurs, et enfin, en bas, enfermés dans des niches en béton armé, la haute tension, départs des lignes, interrupteurs, parafoudres, etc.

L'usine de secours comportera trois groupes turbo-alternateurs à courant triphasé à 3000 volts et trois groupes de transformateurs élévateurs à 30 000 volts pour la marche en parallèle avec l'usine génératrice hydraulique. On installera des chaudières multitubulaires vaporisant 16 kilogrammes environ de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.

75. Ligne de transport d'énergie électrique. — On sait qu'il s'agit d'un transport d'énergie à la tension de 30 000 volts et

50 périodes seconde. On divisera la ligne en plusieurs tronçons dont on relèvera les distances entre eux et on fera les produits des chevaux transportés par les distances.

Si on s'impose une perte d'énergie de 5 p. 100 par exemple, on calcule chaque tronçon proportionnellement au produit de la puissance transportée par le nombre de kilomètres qu'il représente. Soient : E eff. la tension entre fils (30 000 volts), I eff. le courant dans chaque conducteur de la ligne et $\cos \varphi = 0,85$, W la puissance aux bornes, l la longueur d'un fil de ligne, p la perte consentie et S la section d'un conducteur en millimètres carrés.

On appliquera la formule :

$$S = 1,75 \frac{W \times l}{E^2 \text{ eff.} \times \cos^2 \varphi \times p}$$

Et pour le premier tronçon il viendra :

$$S' = \frac{1,75 W + l'}{E^2 \text{ eff.} \times \cos^2 \varphi \times p}$$

l' la longueur de ligne correspondant à ce tronçon et p évaluée en pour cent et pour ledit tronçon.

On composera cette section S' au moyen de trois fils équivalant chacun au tiers de la valeur de S' , ces fils étant disposés en quantité et représentant une phase. Il sera facile alors de déterminer le poids de cuivre.

L'intensité du courant est donnée par :

$$I \text{ eff.} = \frac{W}{E \times \varphi} \text{ ampères.}$$

En opérant de la même façon on trouvera les valeurs correspondant aux autres tronçons de la ligne.

Pour les poteaux on pourra adopter des supports de 10, 12, 14 et 16 mètres de hauteur selon leurs dispositions. La portée moyenne pourra être prise de 40 mètres environ.

En tablant sur les chiffres usuels de rendement ci-après : turbo-alternateurs 0,80, transformateurs au départ 0,97, ligne 0,95, le rendement total aux bornes de transformateurs à l'arrivée sera de 0,74 en nombre rond.

La puissance réelle sera donc :

$$P \text{ chevaux} \times 0,74 = P'$$

Le nombre de kilowatts correspondant sera utilisé dans les transformateurs de la station à l'arrivée selon le genre de distribution adoptée.

76. Étude financière. — Le coût des divers travaux d'aménagement pourra se ranger d'après les catégories ci-après : travaux de captation hydraulique, usine génératrice, usine à vapeur de secours, ligne de transport d'énergie électrique, frais d'études, achat des riverainetés et des terrains.

De cette somme totale on déduira le prix du cheval installé et celui du cheval utilisable.

Les taux d'amortissement se présentent généralement comme suit : barrage, galerie de dérivation, 40 ans; chemins d'accès, maison de garde, canal d'amenée, chambre d'eau, bâtiments divers, 30 ans; siphon, conduites forcées, 20 ans; machines et appareils de l'usine hydroélectrique, de l'usine à vapeur, ligne électrique, 15 ans.

D'après le devis établi, on déterminera la somme totale affectée aux amortissements.

Puis on passera à l'évaluation des dépenses d'exploitation, qui comprendront les frais de personnel et de main-d'œuvre de l'usine hydroélectrique, de l'usine de secours, de la ligne de transport et de sa sous-station, de la direction et de l'administration, des frais de bureau, redevances, impôts et divers.

Les frais d'entretien des diverses installations et ouvrages ainsi que de la ligne de transport, avec toutes fournitures, seront évalués très minutieusement et comptés plutôt largement. Enfin on y ajoutera l'intérêt du capital à 6 p. 100 l'an.

On arrive ainsi au chiffre total des dépenses de l'entreprise.

Pour les recettes, le cheval-an de 11 heures peut être évalué à 500 ou 600 francs, en l'état actuel. On admettra que l'affaire, avant d'arriver à la période de plein rendement, demandera quatre à cinq ans à dater de la mise à exécution des travaux. Il conviendra donc de conduire l'entreprise avec un esprit de larges sacrifices pendant ces quelques premières années d'exploitation.

II. — Bilan des forces hydroélectriques mondiales.

77. **Richesse de la France en houille blanche.** — Les *Alpes françaises* constituent incontestablement le réservoir le plus riche en houille blanche. Les chutes aménagées de 300, 400 et 500 mètres de hauteur et plus y sont en nombre important, et quelques-unes d'entre elles atteignent 10 000 chevaux. Sur l'Arc, l'Isère, l'Arve, on a installé des usines à des puissances supérieures à 12 000 chevaux avec des chutes ne dépassant pas 100 mètres. La richesse hydraulique des départements des Alpes françaises est estimée à 3 millions de chevaux pour la force minimum d'étiage, et à 15 millions pour la force moyenne annuelle.

L'ensemble des forces hydrauliques en 1916 était de 650 000 chevaux; depuis il a été réalisé (ou en voie de réalisation) 400 000 chevaux, et il en est projeté 800 000, soit ensemble 1 850 000, correspondant à 16 millions de tonnes de charbon par an.

Le *Plateau Central* possède des usines d'environ 10 000 chevaux et d'autres de 2 000 à 5 000 sans grandes retenues, avec des conduites forcées, à l'instar du Massif Alpin. Les départements du Plateau Central sont susceptibles de fournir 1 million de chevaux en basses eaux et 2 millions en eaux moyennes. Les installations actuellement réalisées ou en cours de construction dépassent 200 000 chevaux.

Les *Pyrénées* se présentent avec des profils de vallées extrêmement raides à leur origine, qui favorisent la création des hautes chutes à faible débit, et c'est de ce côté que s'est surtout développée l'industrie des forces hydrauliques. En raison de la faible étendue des surfaces glaciaires, les étiages d'été des rivières sont aussi accentués et souvent de plus longue durée que les étiages d'hiver. Il en résulte que la création de réservoirs s'impose pour assurer à ces hautes chutes un rendement satisfaisant; elle est d'ailleurs facilitée par l'existence de nombreux lacs dans les hautes vallées, aux altitudes voisines de 2 000 m.

D'après des données certaines, les Pyrénées peuvent apporter à notre richesse hydraulique un appoint minimum de 1 200 000 chevaux, et comme parfaitement réalisables, environ 800 000 chevaux.

De grosses usines, dépassant 20 000 chevaux chacune, ont été créées sur les rivières torrentielles de cette région.

Le service des Grandes Forces hydrauliques a évalué à 4 600 000 chevaux la force hydraulique en basses eaux et à 9 ou 10 millions de chevaux, en régime moyen, la puissance hydraulique de la France.

D'après la Commission des Forces hydrauliques rattachée au Ministère des Travaux publics, l'armement des usines déjà installées en 1910 représentait une puissance effective de 770 000 chevaux (570 000 kwatts). Les usines en cours apporteront un supplément moyen de 550 000 chevaux (365 000 kwatts).

Enfin les disponibilités totales pour chacune des régions de la France sont évaluées comme suit : Sud-Est, 4 millions de chevaux ; Sud-Ouest, 1 500 000 ; Centre, 1 200 000 ; Est, 200 000 ; Rhône, 900 000 ; Rhin, 800 000 ; Loire, 300 000 ; Garonne, 300 000 chevaux.

On a compté qu'en fin 1922 la puissance des usines hydro-électriques installées dépasse 1 600 000 chevaux, soit 850 000 chevaux de plus qu'en 1894.

Dans cette augmentation de 850 000 chevaux, les distributions et les transmissions d'énergie entrent pour environ 306 000 chevaux, l'électrochimie et l'électrométallurgie respectivement pour 217 000 et 327 000 chevaux.

Les cours d'eau du domaine public sont capables de fournir une puissance de 2 460 000 chevaux, dont 1 170 000 dans le bassin du Rhône, 375 000 dans la Garonne, 325 000 dans le bassin de la Loire, et 500 000 dans les autres bassins.

78. Richesses des principales nations du monde. — Les forces hydrauliques mondiales appliquées à la production de l'énergie sous ses diverses formes dépassent de nos jours 10 millions de chevaux en chutes aménagées, contre une disponibilité de 75 millions de chevaux.

Dans ces chiffres, les États-Unis viennent en tête avec 5 millions de chevaux et une réserve disponible de plus de 13 millions, puis la Norvège avec 2 millions et 18 millions disponibles, suivie de la France et de l'Italie, la première avec 1 165 000 chevaux et 8 millions disponibles, la seconde avec 600 000 chevaux et 4 millions disponibles. La Suède arrive avec 650 000 chevaux et 675 000 à utiliser.

La Suisse suit avec près de 600 000 chevaux et une réserve de 3 millions. L'Espagne a aussi près de 600 000 chevaux en activité avec une disponibilité de 5 millions et demi de chevaux. L'Autriche se présente avec 550 000 chevaux et une réserve de près de 6 millions. L'Allemagne a 400 000 chevaux environ installés et en réserve 1 425 000. La Grande-Bretagne a 160 000 chevaux environ mis en service, avec une disponibilité d'environ 950 000 chevaux.

La Russie d'Europe a à peine effleuré sa colossale réserve de richesses hydrauliques, car on a évalué les forces dont elle peut disposer à 11 millions de chevaux.

III. — Législation et réglementation des cours d'eau.

A. — Forces hydrauliques.

79. Lois et décrets du Régime antérieur à la loi du 16 octobre 1919.

- 3 frimaire an VIII. — Article 103 de la loi. Code civil; articles 538, 561, 563, 614, 645, 713 et 714.
- 3 mai 1841. — Loi sur les expropriations pour cause d'intérêt général.
- 29 avril 1845. — Loi concernant les droits des riverains des cours d'eau.
- 31 juillet 1847. — Loi sur les droits d'appui et d'irrigation sur les cours d'eau.
- 23 octobre 1851 et 26 décembre 1884. — Instructions ministérielles sur les demandes en autorisation de prise d'eau.
- 8 avril 1898. — Loi définissant les droits de riveraineté sur les cours d'eau non navigables.
- 1^{er} août 1905. — Décret portant règlement d'administration concernant la loi du 8 avril 1898.
- 21 avril 1906. — Loi sur la protection des sites classés.
- 1^{er} juin 1906. — Circulaire ministérielle sur la police des rivières non navigables ni flottables.
- 13 juillet 1906. — Décret sur les redevances pour les concessions et prises d'eau.
- 1^{er} mai 1907. — Circulaire ministérielle complétant la circulaire du 1^{er} juin 1906.
- 9 avril 1908. — Loi sur les cours d'eau non navigables.
- 12 novembre 1908. — Loi fixant la détermination des cours d'eau du domaine fluvial.
- 28 septembre 1916. — Loi de finances autorisant la participation de l'État à l'établissement d'usines hydrauliques sur les cours d'eau des deux catégories.
- Octobre 1917. — Décret réformant le décret du 1^{er} août 1905.

LOIS ET DÉCRETS CONCERNANT LE RÉGIME ACTUEL

- 16 octobre 1919. — Loi relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique.
 31 octobre 1919. — Arrêté nommant la Commission spéciale pour l'application de la loi du 16 octobre 1919.
 6 février 1920. — Décret relatif à la composition et au fonctionnement du Comité consultatif des forces hydrauliques.
 13 février 1920. — Instruction relative à l'application de la loi du 16 octobre 1919.
 15 avril 1920. — Décret relatif aux attributions du personnel des Eaux et Forêts affecté au service technique hydraulique.
 30 juillet 1920. — Décret portant règlement d'administration publique en vue de l'exécution de la loi du 16 octobre 1919.
 30 juillet 1920. — Instruction portant modèle de règlement d'eau.
 5 septembre 1920. — Décret approuvant le cahier des charges type, en exécution de la loi du 16 octobre 1919.
 26 octobre 1920. — Arrêté réorganisant le Service des forces hydrauliques du centre de la France.

B. — *Distribution d'énergie électrique.*

80. Lois, décrets, circulaires et arrêtés.

- 15 juin 1906. — Loi sur les distributions d'énergie électrique.
 26 avril 1917. — Loi sur la participation du personnel aux bénéfices et à la gestion dans les entreprises de distribution d'énergie électrique.
 19 octobre 1919. — Circulaire interministérielle concernant le développement des réseaux électriques d'intérêt agricole.
 24 novembre 1919. — Circulaire ministérielle concernant l'index économique pour les distributions d'énergie électrique.
 21 décembre 1919. — Décret portant règlement d'administration publique pour l'application des articles 5 et 7 de la loi du 17 décembre 1917, relative aux établissements dangereux et insalubres.
 8 janvier 1920. — Arrêté fixant les conditions d'approbation des types de compteurs d'énergie électrique.
 17 janvier 1920. — Circulaire concernant la revision éventuelle des cahiers des charges des distributions d'énergie électrique en raison de la situation économique créée par la guerre.
 28 février 1920. — Décret organisant le service du contrôle des distributions d'énergie électrique.
 26 mars 1920. — Circulaire ministérielle concernant la revision des cahiers des charges. Fixation des salaires.
 28 mars 1920. — Circulaire ministérielle concernant la détermination des Index économiques, en application des instructions ministérielles des 24 novembre 1919 et 17 janvier 1920.
 3 avril 1920. — Circulaire sur le même sujet.
 9 avril 1920. — Circulaire ministérielle relative à la constitution de la Commission consultative d'énergie électrique pour la fixation des tarifs de l'énergie électrique.
 20 mai 1920. — Décret sur les distributions d'énergie électrique concernant

- le contrôle de construction et d'exploitation des réseaux à haute tension.
- 25 mai 1920. — Circulaire ministérielle relative à l'application des Index économiques (addition à celle du 3 avril).
- 28 mai 1920. — Circulaire relative à l'envoi du décret du 28 février 1920 modifiant le décret du 17 octobre 1907 sur l'organisation du contrôle des distributions d'énergie électrique, déjà modifié par le décret du 6 septembre 1912.
- 31 mai 1920. — Décret rendant applicables diverses formules de standardisation.
- 2 juin 1920. — Circulaire ministérielle relative aux mesures à prendre pour protéger la circulation en cas d'abatage d'arbres sur une route bordée par une canalisation électrique.
- 15 juin 1920. — Instruction ministérielle relative à la construction des réseaux ruraux de distribution d'énergie électrique.
- 15 juin 1920. — Proposition de loi concernant l'unification de la durée des concessions de distribution d'énergie électrique, et de la servitude forcée des passages des courants électriques.
- 25 juin 1920. — Loi relative à l'impôt sur le chiffre d'affaires.
- 30 juillet 1920. — Décret réglementant les formes et instructions des demandes en concession.
- 3 et 9 août 1920. — Décrets portant règlement d'administration publique pour l'application de la journée de 8 heures dans les entreprises de production d'énergie électrique.
- 4 septembre 1920. — Circulaire ministérielle fixant l'augmentation des salaires horaires moyens dans les entreprises de distribution d'énergie électrique en vue de la fixation de l'index économique.

IV. — Concessions et autorisations.

81. Réglementation des usines hydrauliques. Autorisations. Concessions. — La loi du 16 octobre 1919 classe les demandeurs en concessionnaires et en permissionnaires d'usine hydraulique.

S'il s'agit d'une demande en autorisation, le solliciteur doit justifier au préalable de la propriété de tout ou partie des droits de riveraineté ou des terrains dont il aura besoin pour l'établissement des ouvrages (art. 3 du décret du 30 juillet 1920).

La demande en autorisation ou en concession est définie par la puissance brute maximum de l'usine à établir sur le cours d'eau; si elle dépasse 500 kilowatts, on est en présence d'une régie par concession; si le chiffre est inférieur à 500 kilowatts, une simple autorisation suffira, sauf si la force est destinée à alimenter un service public, auquel cas la concession est exigible à partir de 150 kilowatts.

Les demandes en autorisation doivent être adressées à l'auto-

rité préfectorale, qui est compétente pour les rivières domaniales ou non. Cependant, pour les autorisations de plus de cinq ans sur les canaux de navigation ou les rivières canalisées, elles sont accordées par le ministère des travaux publics et par décret et, d'autre part, les autorisations sur les cours d'eau ne faisant pas partie du domaine public sont bien délivrées par le préfet, mais sous l'autorité du ministère de l'agriculture, le ministre des travaux publics étant aussi consulté. Dans tous les cas, le Conseil général du département sur le territoire duquel le cours d'eau existe, doit donner son avis.

Les arrêtés d'autorisation doivent être rendus dans les six mois du dépôt de la demande. Toutefois cette durée peut être augmentée de un mois, prévu à l'article 8, pour donner au pétitionnaire le temps de fournir les renseignements complémentaires qui peuvent lui être demandés par l'ingénieur, après la visite des lieux.

Le demandeur doit au préalable avoir traité avec tous les riverains ou propriétaires de parcelles. S'il rencontre à cet égard des résistances d'ordre inacceptable, il peut se prévaloir de l'article 17 de la loi et demander à l'État les facilités du régime de la concession.

Les formalités administratives pour l'établissement des ouvrages d'adduction sont à peu près les mêmes que celles qui étaient exigées par le décret du 1^{er} août 1915. La durée de l'autorisation est limitée à soixante-quinze ans.

En cas de retrait ou de modification de l'autorisation, par application des articles 14 et 45 de la loi du 8 avril 1908, les prescriptions nouvelles sont les mêmes que celles du décret de 1905, mais on ne procède pas à la visite des lieux. L'ingénieur en chef saisit immédiatement le préfet de ses propositions de mise à l'enquête. Les voies de recours contre le refus, le retrait ou la modification d'une autorisation restent les mêmes que sous l'ancienne réglementation. Pour les concessions, il faut distinguer le cas où la concession n'est pas soumise à une loi et celui où elle doit être votée par les Chambres.

Dans la première disposition, c'est-à-dire concession par décret, le demandeur a deux mois pour compléter le dossier après l'accusé de réception et trois pour produire les pièces nécessaires mises à l'enquête. Si les services locaux appelés en

conférence n'ont pas fait connaître leur avis dans le mois qui suit l'enquête, ils sont considérés comme acquiesçants. On peut normalement compter entre le dépôt de la demande et la publication du décret environ un an et demi.

La loi ne donne pas, en réalité, au concessionnaire le choix d'user à sa guise de l'expropriation ou des servitudes. C'est la nature ou la destination du terrain convoité qui détermine la procédure à suivre.

82. Formalités pour l'obtention des concessions et des autorisations. — Le plan parcellaire dressé, il est transmis au maire de la commune où les propriétés sont situées et il est déposé à la mairie. A ce moment, le maire avertit publiquement ses administrés de ce dépôt pour en prendre connaissance, et un registre est déposé où ils auront à consigner leurs réclamations ou observations, s'il y a lieu. De plus, il est notifié directement aux intéressés, par voie administrative, la nature des travaux projetés sur leur terrain. La loi d'ailleurs prescrit aux maires de certifier les notifications et affiches par la délivrance d'un certificat constatant qu'il a fait publier et notifier l'avis, conformément au décret. Il y joint un exemplaire de l'affiche et un exemplaire du numéro du journal dans lequel l'avertissement a été inséré.

Ce procès-verbal reste ouvert à la mairie pendant un délai de huit jours francs. A l'expiration dudit, le maire clôt et signe le procès-verbal.

Les réclamations au sujet de l'enquête parcellaire sont examinées par un commissaire enquêteur nommé par le préfet, qui donne son avis motivé après avoir convoqué et entendu les intéressés et discuté avec eux. Il remet immédiatement le procès-verbal qu'il a dressé, avec les pièces de l'instruction, au maire, qui le transmet à l'ingénieur en chef.

La visite sur les lieux est faite par l'ingénieur ordinaire désigné par l'ingénieur en chef chargé du service hydraulique, dans les formes établies par le décret de 1905. Cette visite consiste : en conférence à l'emplacement des ouvrages projetés et rédaction par l'ingénieur sur-le-champ d'un procès-verbal indiquant l'état des lieux, la fixation des repères adoptés, résultat des expériences déjà faites et des conventions amiables et des renseignements recueillis. L'ingénieur ordinaire ayant établi son

rapport à la suite de sa visite des lieux, il conclut soit à la prise en considération telle quelle, soit à un supplément de renseignements à fournir par le pétitionnaire. L'ingénieur ordinaire annexe à son rapport un projet de règlement avec une notice explicative, un plan et les nivellements.

Les pièces concernant les demandes comprennent :

1° Un extrait de la carte à l'échelle de 1/50000^e ou de 1/80000^e de la région où doit se faire l'établissement de la chute;

2° Un plan sommaire des lieux et des ouvrages projetés;

3° Le profil en long de la section du cours d'eau intéressé par les travaux, ainsi que celui de la dérivation;

4° Une note indiquant, avec calculs à l'appui, la puissance maximum et la puissance normale de la chute. (La puissance normale est celle qui correspond au produit de la dénivellation brute par le débit moyen; la puissance maximum qui correspond au débit maximum instantané que l'industriel veut dériver multiplié par la hauteur brute de la chute définit le caractère de l'état concessif ou d'autorisation; la puissance normale sert à définir si la concession sera accordée par une loi [50 000 kwatts] ou par un décret, et en même temps sert de base à la fixation de la taxe de statistique.)

5° Un mémoire descriptif indiquant : les dispositions principales des ouvrages les plus importants et les changements présumés que l'exécution des travaux et l'exploitation de l'usine pourront apporter au niveau et au régime des eaux, soit en amont, soit en aval; l'évaluation sommaire des dépenses d'établissement ainsi que celle des dépenses et recettes d'exploitation;

6° Une expédition des accords qui peuvent être intervenus entre les demandeurs et les collectivités visées à l'article 10 de la loi, soit au point de vue financier, soit à celui des réserves en eau et en force, ainsi que les accords qui peuvent être déjà conclus en vue des réparations en nature prévues à l'article 6 pour le payement des droits;

7° Un projet de tarif maximum des prix à percevoir par l'exploitant pour la vente de l'énergie. Cette obligation ne vise que les entreprises qui ont pour objet la vente de l'énergie au public. Les maximums comprendront une somme fixe par an et par kilowatt souscrit et une redevance proportionnelle par kwh.

livré. La circulaire ministérielle du 20 novembre 1919 fixe l'index économique à appliquer, auquel le concessionnaire devra recourir pour prévoir une révision des tarifs de vente. Cette révision concerne la fraction du tarif de vente correspondant aux dépenses d'entretien, de renouvellement et d'exploitation, et elle n'est admise par l'administration que si l'index économique subissait des variations considérables de l'ordre de grandeur d'un tiers ou de la moitié par suite de la variation des salaires;

8° Une note précisant les capacités techniques et financières du demandeur et justifiant qu'il remplit les conditions de nationalité prescrites par l'article 26 de la loi;

9° Au cas où le demandeur entend bénéficier des dispositions de l'article 7 de la loi, il doit joindre une note exposant les motifs et indiquant le chiffre de la subvention ou de l'avance sollicitée, car l'avance ou la subvention auront une répercussion sur les clauses financières insérées dans le cahier des charges de la concession.

Les dossiers doivent être établis en double expédition, et les demandes (dont l'une sur timbre) doivent mentionner : *a*) les noms des cours d'eau et ceux des départements et des communes sur lesquels les ouvrages devront être établis ou faire sentir leurs effets; *b*) les établissements hydrauliques placés immédiatement en amont et en aval; *c*) l'objet principal de l'entreprise (services publics ou usages privés); *d*) la durée probable des travaux; et *e*) la durée de concession demandée (soixante-quinze ans maximum).

Sur les cours d'eau domaniaux, le ministre de l'agriculture est consulté. Pour les cours d'eau qui ne font pas partie du domaine public, le ministre de l'agriculture reçoit une expédition complète du dossier.

Si le commissaire enquêteur n'a pas apporté de modifications au projet du concessionnaire, l'ingénieur en chef transmet immédiatement le dossier au préfet. Dans le cas contraire, les intéressés touchés par les modifications ont huit jours pour présenter leurs observations.

Les frais d'enquête de notification et d'affichage, exposés au cours de l'instruction ci-avant, sont aux frais du concessionnaire. Si les travaux projetés ont été déclarés d'utilité publique, il est procédé à l'enquête pour l'établissement des servitudes en

même temps qu'à l'enquête prévue par le titre 11 de la loi du 3 mai 1841 et dans les mêmes formes. C'est-à-dire que le jury d'expropriation sera compétent pour statuer sur les deux indemnités.

Le préfet, une fois en possession du projet modifié ou non, prend un arrêté pour désigner les parcelles frappées d'occupation ou à submerger au profit du concessionnaire et autorisant celui-ci à se servir des droits conférés par l'article 4 de la loi du 16 octobre 1919.

Cet arrêté est publié dans un des journaux de l'arrondissement ou du département, et affiché à la mairie par les soins du maire de la commune intéressée. En outre, chaque propriétaire reçoit notification de l'extrait de l'arrêté le concernant à son domicile réel ou élu, en la forme ordinaire des exploits. A partir de ce moment, les parcelles sont inaliénables, même à l'égard des tiers. Le tribunal, saisi, n'a plus qu'à statuer sur le chiffre de l'indemnité. Et même, si l'occupation des parcelles n'est pas permanente, le concessionnaire peut en disposer avant même que l'indemnité ait été fixée.

Si le concessionnaire invoque une procédure urgente (art. 4 de la loi du 16 octobre 1919, qui déclare applicables en l'espèce les articles 66 à 70 de la loi du 3 mai 1841), celle-ci doit être déclarée par un arrêté spécial du préfet.

83. Autorisation, approbation et récolement des travaux.

— La procédure ayant trait à l'autorisation, à l'approbation et au récolement des travaux est prévue par les articles 20 à 25 du décret du 30 juillet 1920.

Ainsi l'ingénieur en chef compétent autorise l'exécution des travaux sur le vu des projets qui lui ont été présentés par le concessionnaire et après conférence avec les intéressés. Au cas de désaccord, le ministre des travaux publics statue après avis du Comité consultatif. Le cahier des charges prévoit que certains travaux devront être approuvés et autorisés par le ministre des travaux publics.

Le récolement des travaux a lieu après la mise en service de l'usine. Si les travaux ne sont pas conformes aux dispositions autorisées, le ministre des travaux publics statue sur les mesures à prendre, d'accord avec le ministre de l'agriculture, au cas où l'usine est située sur un cours d'eau non domanial. Sur le

vu du procès-verbal, le préfet autorise la mise en service de l'usine.

Les obligations des riverains sont définies dans les décrets du 30 juillet 1920 portant réglementation des demandes en concession et de règlement d'eau.

Vis-à-vis des usiniers, ces documents visent les dispositions qu'ils doivent prendre pour l'exécution et la bonne tenue des canaux de décharge et de fuite, des grillages et échelles à poissons, des repères, des manœuvres des vannes de décharge et autres ouvrages, des manœuvres relatives à la navigation et au flottage, de la nature des eaux rendues, du curage des biefs et de leur entretien. Les concessionnaires doivent se soumettre à la surveillance des travaux au cours de leur exécution, et par suite permettre en tout temps l'accès sur les lieux des agents de l'Administration.

Celle-ci, usant de son droit supérieur de police, peut, dans l'intérêt général, retirer à n'importe quel moment, au permissionnaire, l'arrêté d'autorisation.

Les usines de 150 kilowatts et de 500 kilowatts pouvant changer de destination pour une catégorie d'entreprises, le permissionnaire ne peut faire cession totale ou partielle sans en obtenir l'autorisation du préfet.

La taxe de statistique qui frappe uniformément tous les kilowatts de puissance normale autorisés ou concédés avant ou après la promulgation de la loi est un véritable impôt.

Le permissionnaire n'a pas de redevances à payer sur les cours d'eau non domaniaux. Pour ceux-ci, c'est toujours le décret du 16 juillet 1906 qui est applicable pour les redevances, lequel fixe la redevance des prises consacrées à la force motrice au 1/10^e de la valeur locative de la force brute concédée. Le taux de la redevance est revisable tous les dix ans à dater de la date de l'exigibilité. Il peut être réduit si l'entreprise a pour objet un service public.

Les sanctions applicables aux concessionnaires ont trait aux infractions au règlement d'eau et à l'arrêté d'autorisation. Elles envisagent : les délais fixés dans l'arrêté pour l'exécution des travaux, le changement de l'état des lieux, sans autorisation, le chômage ou l'arrêt et l'abandon de son titre par le permissionnaire.

Lors du renouvellement de l'autorisation, l'État peut exiger soit l'abandon à son profit, et moyennant indemnité, de tous les ouvrages édifiés dans le lit et sur les berges, soit le rétablissement aux frais de l'industriel du libre écoulement des eaux.

Les usines autorisées antérieurement à la loi demeurent jusqu'en 1934 soumises au régime qui leur était antérieurement applicable, selon la loi de 1898 et le décret de 1905.

Vis-à-vis des riverains, leurs droits sont et demeurent expressément réservés.

Lorsque le bief n'est pas la propriété exclusive du permissionnaire, les riverains, s'ils le jugent préférable, peuvent d'ailleurs opérer le curage eux-mêmes et à leurs frais, au droit de soi et dans la moitié du cours d'eau.

Les droits particuliers de l'usage de l'eau, exercés ou non, donnent au concessionnaire l'obligation, sauf décision contraire du juge, de restituer en nature l'eau ou l'énergie utilisée, et, le cas échéant, de supporter les frais des transformations reconues nécessaires aux installations préexistantes, à raison des modifications apportées aux conditions d'utilisation.

DEUXIÈME PARTIE

PRODUCTION ET TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XIII

PRODUCTION ET TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

- I. GÉNÉRATRICES A COURANT CONTINU. — Caractéristiques des machines à courant continu. — Régulation et couplage des dynamos.
- II. GÉNÉRATRICES A COURANT ALTERNATIF. — Généralités sur le courant alternatif. — Nature des alternateurs. — Conditions principales réglant le fonctionnement des alternateurs. — Turbo-alternateurs.
- III. MOTEURS SYNCHRONES. — MOTEURS ASYNCHRONES ET MOTEURS ASYNCHRONES SYNCHRONISÉS TRIPHASÉS. — Moteurs synchrones. — Moteurs asynchrones. — Démarrage, régulation et rendement des moteurs asynchrones. — Moteurs asynchrones synchronisés.
- IV. MOTEURS GÉNÉRATEURS. — COMMUTATRICES. — Moteurs générateurs. — Commutatrices. — Convertisseurs de fréquence. — Sous-stations transformatrices.
- V. TRANSFORMATEURS STATIQUES. — Rôle et conditions de fonctionnement des transformateurs dans le transport de l'énergie électrique. — Calcul des pertes dans un transformateur.

I. — Génératrices à courant continu.

84. **Caractéristiques des machines à courant continu.** — Ces machines, en tant que productrices d'énergie électrique à haute tension, ne sont plus guère employées que dans la traction électrique et comme machines transformatrices, le transport à haute tension à courant continu n'ayant pas pris l'essor que l'on avait fondé dans le système Thury. Pour ces machines, la forme multipolaire avec pôles inducteurs extérieurs et induit intérieur mobile est presque exclusivement employée de nos jours. L'armature est à rainures et encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs induits, à l'abri des efforts radiaux

de la force centrifuge et des forces électromagnétiques. Ces induits, à l'effet d'éviter toute élévation anormale de température, sont munis de canaux de ventilation.

Les machines modernes ont été très perfectionnées sous le rapport de la commutation. La tension de commutation est devenue cinq à dix fois plus grande par suite de l'adoption des grandes vitesses (turbo-dynamos). Mais malgré tous les progrès réalisés dans la construction des porte-balais au collecteur, la vitesse et la puissance des dynamos sont limitées par la surface et la vitesse périphérique du collecteur.

Le mode d'enroulement le plus fréquent est l'enroulement imbriqué en parallèle, avec deux conducteurs par encoche et par lamelle. Il n'est pas rare maintenant de trouver des induits dont le fer travaille de 15 000 à 20 000 gauss et plus sans que la fréquence ait été diminuée.

Les relations qui symbolisent le mieux l'explication du fonctionnement d'une dynamo sont :

$$U = E - RJ \quad \text{et} \quad E = Kf(i - \alpha J);$$

U tension aux bornes, E force électromotrice induite, J le courant dans l'induit, i le courant d'excitation, R la résistance de l'induit, K un coefficient constant, et α un facteur que l'on suppose le même quelle que soit la valeur de i , pour un même courant J , qu'il soit débité en charge ou en court-circuit. Ces mêmes relations pour $J = 0$ (caractéristique à vide) donnent :

$$U = EKf(i).$$

Et pour $U = 0$ (caractéristique en court-circuit) :

$$Kf(i - \alpha J) = RJ;$$

d'où la possibilité de déduire U à l'aide de l'hypothèse faite sur α .

On peut, dans une dynamo, sans pôles supplémentaires ni aucun autre artifice, atteindre avec une bonne commutation une puissance de 1 500 kilowatts par mètre de diamètre d'induit.

Une dynamo a une valeur économique d'autant plus caractérisée qu'elle donne lieu à moins d'échauffement, c'est-à-dire à un plus grand rendement. Les pertes dans le cuivre ont lieu par effet Joule dans l'induit et dans les bobines série. Les pertes dans le fer dépendent des courants parasites et de l'phys-

térésis; celle provenant de cette dernière est proportionnelle au carré de l'induction maximum, à l'épaisseur du métal et à la vitesse de déplacement. La perte par résistance de contact des balais sur le commutateur est d'ordre assez complexe. Enfin les pertes par frottement et par ventilation dépendent surtout du plus ou moins de soin apporté dans la construction des organes mobiles de la machine.

Pratiquement on attribue aux pertes les chiffres suivants pour des machines dont la puissance varie de 50 à 500 kilowatts :

Dans l'inducteur (RI^2).....	1,5 % à 0,5 %
Dans l'induit (RI^2).....	4,5 à 1,5
Hystérésis.....	3,0 à 1,0
Courants de Foucault.....	0,6 à 0,4
Frottements.....	1,5 à 1,0

Le rendement diffère suivant la charge; nul à vide, il atteint son maximum à la pleine charge, mais il peut aussi être d'un ordre élevé à demi-charge et à trois quarts de charge. La forme générale de la courbe de rendement est telle que celle que montre la figure 150, qui montre également les caractéristiques

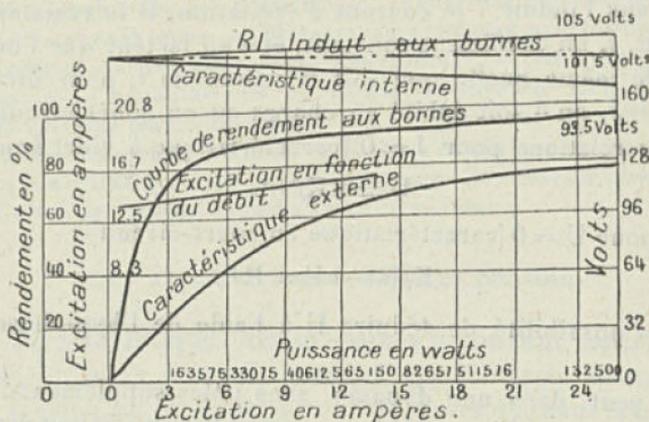


Fig. 150.

interne et externe d'une machine de 138 kilowatts sous 105 volts. Le rendement à pleine charge est de 93,4; à demi-charge, de 91,7, et à quart de charge, de 87,7.

Le poids spécifique des dynamos varie de 55 kilogrammes par kilowatt pour les faibles puissances à 35 kilogrammes pour

les machines de 50 kilowatts, à 30 kilogrammes pour celles de 100 kilowatts, à 28 kilogrammes pour celles de 500 kilowatts, et enfin à 25 kilogrammes pour les machines de 1000 à 2000 kilowatts.

Construction des dynamos. — On constitue le circuit magnétique des inducteurs au moyen d'un métal très perméable et en prenant soin de réduire au minimum la longueur du circuit et la réluctance offerte par les joints que font entre elles les parties traversées par les lignes de force. On constitue généralement les noyaux des inducteurs au moyen de feuilles minces de tôles de fer ou d'acier, de 0^{mm},1 à 1 millimètre au plus.

Les bobinages des inducteurs se font à même sur les noyaux ou sur gabarits disposés à part; avec les enroulements à bandes, le facteur d'utilisation est d'ordinaire plus élevé qu'avec les bobines. Les dispositions d'enroulement avec les bobines sont d'une grande variété. L'étude et la fabrication de ces dernières constituent un point très important de la fabrication des machines électriques.

Dans les dynamos, la dépense d'excitation varie entre 1/2 et 6 p. 100 de la puissance totale de la machine, et la surface de refroidissement en centimètres carrés par watt absorbé par l'excitation varie de 10 à 20.

La construction des induits avec rainures offre des avantages très appréciés. Ces bobines, préparées à l'avance sur des mandrins ou dans des moules, reçoivent des dispositions appropriées au genre d'enroulement adopté. Le nombre des rainures dépend du type d'enroulement de l'armature et de la quantité de lames du collecteur. Le rapport entre la section nette du cuivre et la section brute de la rainure varie de 0,5 à 0,8, étant d'autant plus réduit que la machine est à haute tension.

Les tôles d'induit, jusqu'au diamètre de 1^m,20 environ, sont découpées d'une seule pièce, isolées d'une manière convenable au moyen de papier ou de vernis et empilées sur croisillon d'induit. Elles sont ensuite serrées entre deux plateaux de fonte ou d'acier à l'aide de boulons qui, en général, ne traversent pas les tôles.

Les collecteurs du commutateur et des dynamos sont formés de segments en cuivre écroui quand on emploie des balais en charbon et en bronze phosphoreux très dur, lorsque les frot-

teurs sont métalliques. L'isolement électrique des segments entre eux se fait au moyen de lames de mica ou de micanite

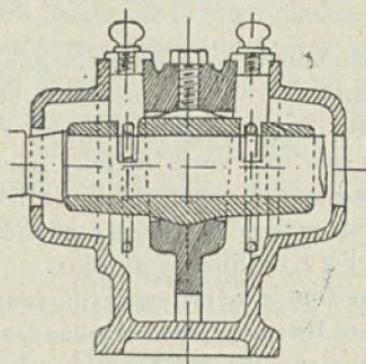


Fig. 151.

variant de 0,6 à 3 millimètres d'épaisseur, selon la tension de la machine. L'isolement du collecteur avec son support se fait à l'aide de carton comprimé (presspahn). Les fusées des arbres en acier pour les machines électriques sont cémentées, puis rectifiées. La généralité des machines électriques sont lubrifiées au moyen de bagues (fig. 151) plongeant dans un bain d'huile et entraînées par le mouvement de rotation de

l'arbre, fournissant ainsi un graissage automatique, et ne nécessitant, pour ainsi dire, aucune surveillance.

85. Régulation et couplage des dynamos. Essais. — L'accouplement en parallèle des machines shunt est des plus faciles à réaliser. La régulation se fait soit en modifiant la vitesse angulaire, soit en agissant sur le champ. Pour ce dernier cas, le rhéostat de réglage doit être établi de telle sorte que la machine puisse débiter son courant sous une tension constante aux bornes, étant donné que l'appareil à résistance doit, à pleine charge, se trouver en court-circuit. Pour le couplage en parallèle des machines compound, il faut employer un fil d'équilibre comme pour les dynamos série en parallèle.

Les méthodes d'essais des machines sont, selon que l'on se propose le tracé de la caractéristique externe ou l'évaluation du rendement: la méthode directe, la méthode par substitution, la méthode chronométrique ou d'amortissement et la méthode des « pertes séparées », ces deux dernières ne s'appliquant qu'à la recherche du rendement. Il existe d'autres méthodes où l'on opère à l'aide de machines couplées mécaniquement ou de machines couplées électriquement et mécaniquement (dans ce dernier cas la méthode est dite d'opposition). Ces méthodes sont celles de Fontaine-Cardew, de Potier, de Rayleigh-Kapp, de A. Blondel, de Hopkinson et de Hutchinson. En principe, elles

consistent à relier par accouplement élastique les arbres de deux génératrices identiques, l'une d'elles travaillant en réceptrice, le courant fourni par une source extérieure compensant les pertes. Pour les essais de température, la méthode par comparaison des résistances à chaud et à froid, c'est-à-dire par mesure des différences de potentiel et d'intensité, tend à se substituer à la méthode par vérification thermométrique.

D'après les règlements relatifs aux essais des machines électriques, le rendement peut être obtenu en mesurant la perte à vide et la résistance de l'induit. Dans ce cas, quand on veut avoir le rendement à pleine charge, il faut déterminer la puissance lors du fonctionnement à vide, en ayant soin de caler les balais suivant la ligne neutre, position qui correspond à la puissance minimum absorbée. On admet généralement comme échauffement limite une température de 40° à 45°.

On procède aussi à des essais d'isolement des circuits de l'induit et des inducteurs avec les masses métalliques de la machine. On peut aussi faire sur place des essais de survoltage pour déterminer la valeur propre des isolants. Dans les essais par « pertes séparées » ou de Swinburne, on peut admettre que la somme des pertes provenant de frottements magnétiques d'hystérésis et de courants parasites est la même à vide qu'en charge. On doit exiger d'une bonne machine qu'elle présente une stabilité parfaite pendant tout le temps de l'épreuve, qu'elle ne puisse se désamorcer, quel que soit le mode de chargement ou de déchargement du courant extérieur, et qu'elle marche seule ou accouplée.

II. — Génératrices à courant alternatif.

86. **Généralités sur le courant alternatif.** — On distingue le courant alternatif simple ou à une phase, le courant diphasé et le courant triphasé.

On représente les quantités alternatives par des vecteurs faisant, avec un axe d'origine fixe, des angles égaux à leur angle de phase à l'origine, en tournant avec la vitesse angulaire de la pulsation. Le courant biphasé ou diphasé peut se comparer à deux courants monophasés superposés, dont les forces électromotrices sont décalées de $1/4$ de période (90°). Les vecteurs

représentatifs des forces électromotrices sont perpendiculaires. Le courant triphasé devient ainsi la superposition de trois courants monophasés dont les forces électromotrices sont décalées de $1/3$ de période. Les vecteurs représentatifs des forces électromotrices ont entre eux des angles de 120° .

Si l'on considère trois points entre lesquels existe une différence de potentiel triphasée E , on peut disposer le système soit en triangle à la tension E , soit en étoile à la tension $\frac{E}{\sqrt{3}}$, et pour qu'il y ait égalité dans les trois branches, il faut que l'importance des trois circuits soit la même. La figure 155 montre les valeurs des courants et des tensions entre phases.

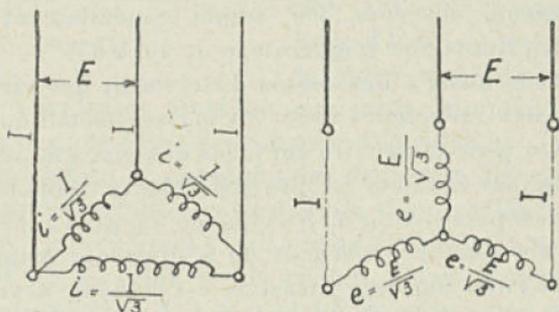


Fig. 152.

Dans le couplage en étoile, on a pour la valeur de la puissance développée :

$$W = \sqrt{3}ei \cos \varphi;$$

φ angle d'avance de la phase du courant sur celle de la tension ;
et dans le cas du couplage en étoile :

$$W = \sqrt{3}EI \cos \varphi.$$

Les relations entre les courants et les tensions dans les récepteurs et générateurs triphasés sont, selon les cas, celles désignées ci-après :

a) générateur et récepteur en étoile, e tension simple et E tension composée étoilée; génératrice : $I = i$; $E = e\sqrt{3}$; réceptrice : $i = I$ et $e = \frac{E}{\sqrt{3}}$;

b) générateur en étoile et récepteur en triangle; génératrice:

$$I = i; E = e\sqrt{3}; \text{réceptrice: } i = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ et } e = E;$$

c) générateur en triangle et récepteur en étoile; généra-

$$\text{trice: } I = i\sqrt{3}; E = e; \text{réceptrice: } i = I; e = \frac{E}{\sqrt{3}};$$

d) générateur et récepteur en triangle; génératrice: $I = i\sqrt{3}$;

$$E = e \text{ et } i = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ et } e = E. \text{ La puissance est toujours:}$$

$$W = \sqrt{3} E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

87. **Nature des alternateurs.** — Dans les alternateurs simples, tous les fils induits sont, suivant le moment, ou tous également actifs ou tous inactifs, et pour leur logement on emploie deux ou plusieurs encoches par pôle. Celles-ci, notablement plus grandes que dans les dynamos, sont soit complètement ouvertes, soit le plus souvent fermées ou demi-ouvertes. Dans les machines à haute tension, les encoches sont généralement fermées, garnies de tubes aussi complètement fermés, qui empêchent les étincelles de jaillir de l'enroulement au fer.

L'induit est bobiné de telle sorte que toutes les spires, supposées parcourues par un courant continu, tendent à magnétiser l'armature dans une seule et unique direction; cet enroulement peut être imbriqué ou ondulé avec bobines longues et courtes. L'induit, qui est presque toujours fixe, est le plus souvent du type à tambour. L'inducteur mobile ou rotor a ses pôles radiaux disposés à l'intérieur de la machine. Les noyaux des bobines inductrices sont constitués soit par des tôles minces isolées entre elles, soit par du fer forgé ou par de l'acier, soit enfin par une disposition en forme d'encoches périphériques permettant de n'avoir qu'une seule bobine inductrice.

La figure 153 représente schématiquement un alternateur monophasé avec inducteur fixe.

D'une manière générale si on appelle E la force électromotrice par phase, n le nombre de périodes par seconde, Z le nombre de fils actifs et f la fréquence $= \frac{n}{60}$, on a :

$$E_{\text{eff}} = \frac{K\Phi f Z}{10^8};$$

K coefficient dépendant du nombre d'encoches par phase et du rapport de la largeur du pôle à la largeur occupée sur l'induit par l'enroulement (K variant, selon les cas, de 1,45 à 2,02); Φ , nombre de lignes de force actives ou induction.

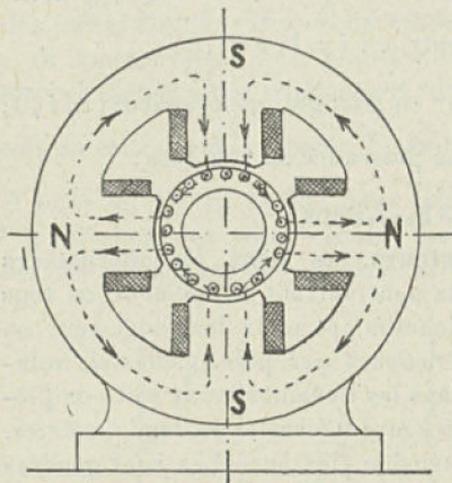


Fig. 153.

On excite les alternateurs soit par des courants continus, soit par des courants redressés.

Dans les alternateurs triphasés, dont la disposition générale est d'ailleurs identique à celle des alternateurs simples, l'intervalle entre deux pôles de même nom, intervalle correspondant à une période complète, est divisé en trois parties, chacune d'elles recevant une des

trois séries de bobines induites longues ou courtes (fig. 154).

Au lieu de placer les conducteurs d'une même section dans une seule rainure, on les dispose moitié dans une rainure et moitié dans la suivante, et même dans plusieurs rainures, disposition qui permet de construire des alternateurs de grande puissance, par suite d'une meilleure utilisation du flux.

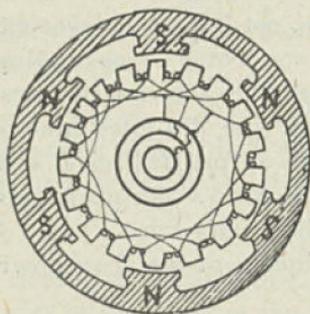


Fig. 154.

L'alternateur à pôles alternés est le plus usité de nos jours; le nombre des pôles varie de 12 à 24, ce qui avec les fréquences usuelles permet d'avoir des vitesses assez réduites.

Pour un alternateur donné, la chute de tension varie avec la charge et également avec le facteur de puissance du réseau, augmentant lorsque ce dernier diminue. C'est pourquoi la réaction d'induit et la dispersion augmentent beaucoup, lorsque le facteur de puissance diminue.

Le montage en étoile convient particulièrement pour les alternateurs et les moteurs triphasés dans les transmissions d'énergie pour que celle-ci s'effectue sous une tension $\sqrt{3}$ fois ou 1,73 p. 100 supérieure à la tension qui existe aux bornes de chaque enroulement de l'alternateur. En reliant le centre de l'étoile par un quatrième conducteur, l'intensité du courant

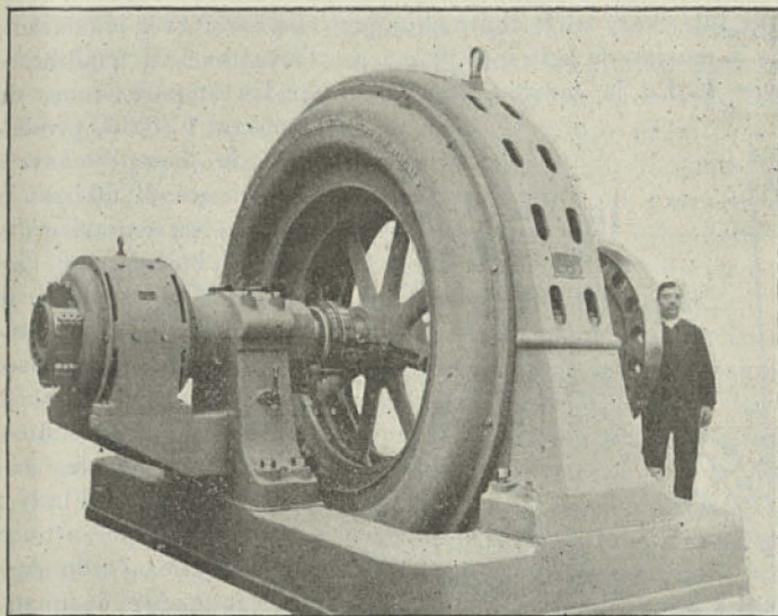


Fig. 155. — Alternateur triphasé pour accouplement à une turbine hydraulique (2000 volts, 250 tours, 650 kva.).

dans la ligne est réduite sous ce rapport à $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$, et le poids de cuivre nécessaire n'est que les 0,33 de celui qu'exige une distribution à courant monophasé.

88. Conditions principales réglant le fonctionnement des alternateurs. — La détermination de la chute de tension dans la construction des alternateurs joue un rôle des plus importants. Il importe surtout d'avoir les moyens nécessaires de prédéterminer cette chute de tension, et on a préconisé à cet effet des méthodes permettant de faire les mesures dans les ateliers de construction de matériel électrique. Les principales de ces

méthodes sont celles dues à Behn-Eschenburg, à Rothert, à Blondel, à Fischer-Hennen, à Heyland, à Potier, à Picou, à Arnold, à Niethammer, à Bauch et Guibert. Le diagramme des tensions d'une machine synchrone s'établit de la manière suivante, d'après la théorie bien connue de M. A. Blondel.

Soient : I le courant de l'armature, E_b la tension aux bornes de la machine, φ l'angle de décalage extérieur, ψ l'angle de décalage intérieur, IR la chute ohmique symphasée avec le courant, E_s la tension de self inductance de l'armature en quadrature avec I , E_d la tension engendrée par les ampères-tours du

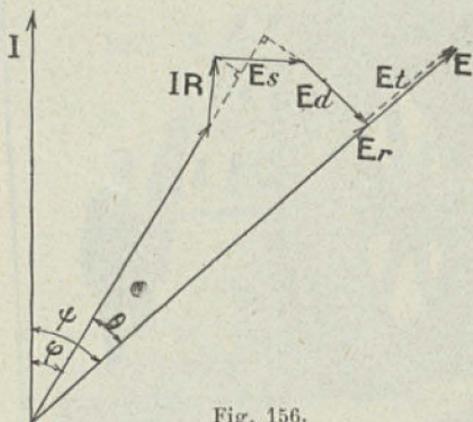


Fig. 156.

courant $I \cos \psi$, produisant le champ transversal, perpendiculaire à la force électromotrice fictive E induite par l'inducteur (fig. 156). $E_r = E - E_t =$ la force électromotrice symphasée avec E , induite par le champ qui résulte de la différence entre les ampères-tours de l'inducteur et les ampères-tours démagnétisants du courant $I \sin \psi$. La réaction de l'armature est formée de quatre composantes : IR , E_s et E_d sont indépendantes de la saturation, tandis que E_t est une fonction de la caractéristique d'excitation à vide; IR se trouve de la façon suivante : on mesure l'augmentation de la puissance consommée par le moteur qui entraîne la génératrice synchrone, tantôt en court-circuit et sous une excitation telle que le courant I qui passe dans son armature, tantôt non excitée et à circuit ouvert. E_s se trouve par la méthode Hobart, à savoir : une des phases de l'induit est parcourue par le courant I de la fréquence normale, emprunté à une source auxiliaire, et est placée coaxiale avec les pôles de l'inducteur; on mesure la tension aux bornes de la phase indiquée, le courant et l'énergie au moyen d'un wattmètre, et la tension aux bornes des bobines de l'inducteur produite par le champ alternatif traversant les pôles, ou d'une

bobine auxiliaire, embrassant un pôle tout auprès de l'armature.

Reste à fixer encore les deux autres composantes de la réaction de l'induit. On opère comme suit : la machine synchrone est mise en mouvement avec une vitesse correspondant à peu près à la fréquence normale. Le champ est non excité, mais l'induit est fermé sur une source auxiliaire de fréquence voisine de la génératrice. La réluctance du champ tournant étant maximum quand l'axe des ampères-tours de l'armature coïncide avec la zone neutre ($\psi = 0^\circ$) et minimum quand elle coïncide avec les pôles ($\psi = 90^\circ$), l'impédance de la machine change périodiquement. La composante déwattée de la tension est toujours la somme de E_s , force électromotrice produite dans l'armature par le champ de fuite à travers les encoches et par celui déterminé par la partie de l'induit qui se trouve en dehors du fer de l'armature, et de la tension induite par le champ tournant.

En lisant les trois instruments aux deux moments où la tension est minimum et maximum, on peut obtenir la composante déwattée de la tension ; en retranchant de celle-ci la force électromotrice E_s d'induction du courant correspondant, on obtient d'une part la valeur de E_s ($\psi = 0^\circ$) et d'autre part la valeur de E_t ($\psi = 90^\circ$) dans une machine non saturée. On déduit facilement de E_d , à l'aide de la caractéristique à vide, le nombre des ampères-tours diamagnétisants pour un courant déterminé et pour $\psi = 90^\circ$. Les quatre composantes étant connues, on peut construire sous toute sorte de charge le diagramme de M. Blondel.

Dans un alternateur ou un moteur synchrone l'onde de flux magnétique se déforme gravement quand la charge augmente, et cela d'autant plus que le facteur de charge est plus élevé ; cette déformation donne lieu à des harmoniques supérieurs dans l'onde de force électromotrice engendrée. Ainsi la réaction et l'inductance de l'induit ont pour résultat non seulement une perte de tension, mais encore font subir à la courbe de force électromotrice des alternateurs des effets qui amènent des phénomènes de résonance ayant pour cause la variation des harmoniques sous l'influence de la variation de la charge et des changements d'inductance et de capacité dus aux appareils employés.

Dans les alternateurs ordinaires, les harmoniques sont tous

de rang impair ; ceux d'ordre 3 et 5 sont introduits par les pièces polaires, tandis que les harmoniques d'ordre élevé proviennent de la denture. Le troisième harmonique est suffisant pour produire la résonance à un degré dangereux, s'il arrive à coïncider avec la fréquence du système. Les alternateurs asynchrones sont au nombre des moyens utilisés pour éviter les harmoniques, ce sont les amortisseurs les plus énergiques.

Pour se rendre compte de la valeur des harmoniques d'une

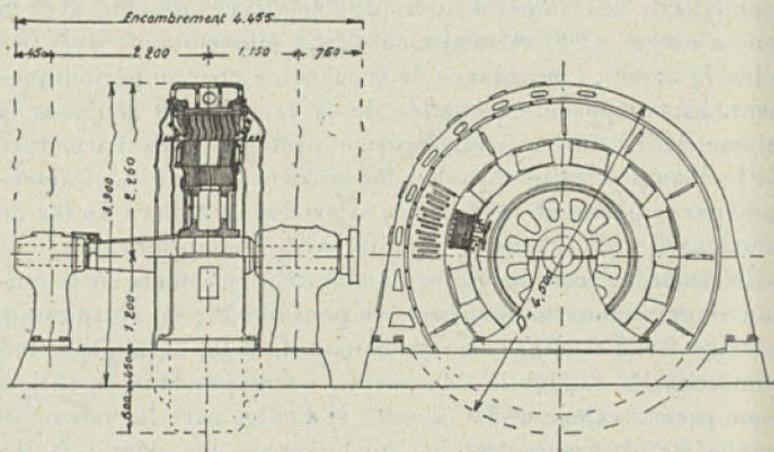


Fig. 157. — Alternateur triphasé Thomson-Houston, 7500 volts, 3000 kva. (Usine hydroélectrique de la Brillanne.)

force électromotrice complexe, on peut se servir utilement des ondographes ou oscillographes.

Le rendement des alternateurs s'obtient comme pour les dynamos, c'est-à-dire en mesurant les deux facteurs (puissance électrique utile et puissance mécanique dépensée), ou en évaluant la puissance utile et la puissance perdue. Les méthodes employées pour la détermination du rendement sont d'ordre direct ou d'ordre indirect.

Pour la mesure directe, on fait débiter l'alternateur sur une résistance variable, en mesurant au moyen d'un wattmètre la puissance électrique utilisée dans le circuit extérieur, et on évalue la puissance mécanique à l'aide d'un dynamomètre de transmission. Lorsque les circuits à dépense sont également chargés, la puissance utile est égale à trois fois la puissance moyenne d'un circuit, et la mesure ne se fait que sur un point.

Mais si les circuits ont des charges inégales, il faut faire une lecture sur chacun d'eux. Quand ceux-ci, tout en étant équilibrés, présentent de l'induction, la mesure de la puissance totale peut

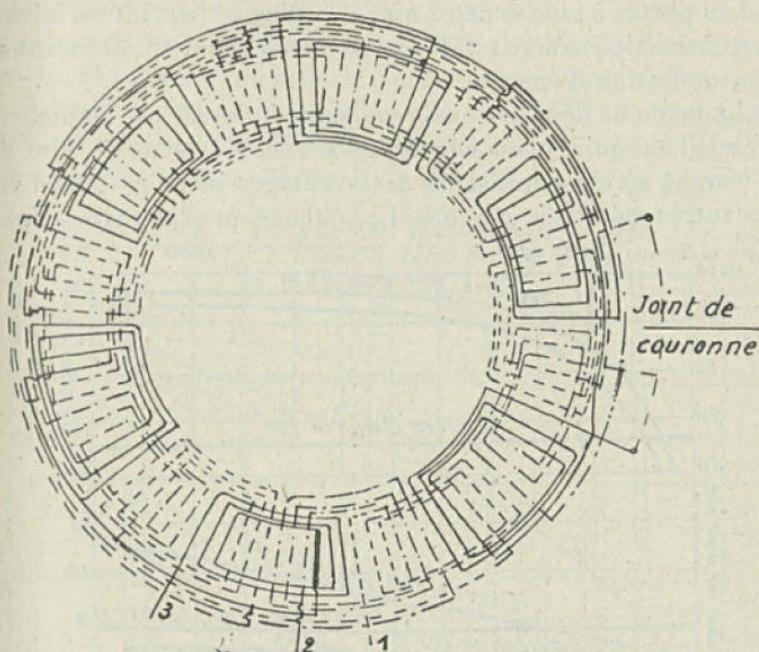


Fig. 158. — Diagramme du stator de l'alternateur de la figure 157.

être effectuée en une seule lecture que l'on multiplie par 3. Si on est en présence d'un montage en étoile, il faut que le centre de cette dernière soit accessible pour la mesure de la tension. Dans le cas d'un montage en triangle, l'un des côtés doit être abordable pour y brancher le gros fil du wattmètre pour la mesure de l'intensité. La méthode de ralentissement de Routin permet d'évaluer les pertes par frottement et ventilation.

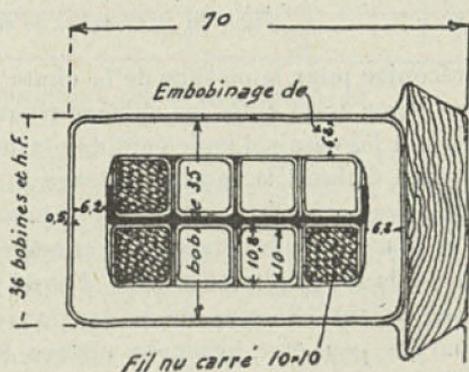


Fig. 159. — Encoches du stator.

Les figures 160 et 161 montrent les courbes de rendement d'un alternateur de 3000 kva. sous 7500 volts ainsi que les caractéristiques à vide et de court-circuit.

Les pertes à vide se déterminent le plus facilement en faisant marcher l'alternateur à vide, comme moteur, et en mesurant sa consommation d'énergie.

La méthode de mesure de rendement indiquée par les ateliers d'Oerlikon, qui est en concordance avec la méthode dite de « marche à vide », présente des avantages incontestables sur les autres méthodes connues. La méthode que cette même firme

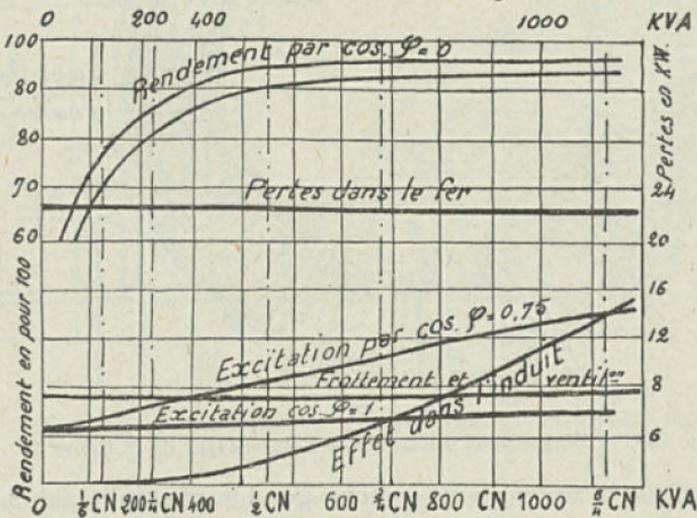


Fig. 160. — Courbes de rendement.

préconise pour la mesure de la chute de tension, conduit à un très léger écart entre les valeurs trouvées et la réalité.

Pour les essais d'isolement des enroulements à haute tension, on fixe d'abord la tension d'épreuve par plusieurs décharges obtenues successivement, avec certitude, au moyen d'un éclateur placé entre les électrodes et réglé à la distance correspondant à la tension (sinusoïdale) d'essai prescrite.

La valeur effective de la tension correspondant à ces décharges peut être observée chaque fois au voltmètre, et cette valeur effective est celle qui correspond réellement, dans l'essai entrepris, à la tension d'essai voulue et prévue par les garanties, de sorte que par la suite l'essai, et notamment

l'application de la surtension pendant le temps prévu, peut se faire avec le voltmètre seul, l'éclateur ne servant plus que de dispositif de sécurité.

La *régulation de la tension* des alternateurs a donné lieu à beaucoup de procédés, tels que ceux de Ganz, de Heyland, d'Anderson, de la Westinghouse, de Hutin et Leblanc, de Boucherot, de Dalmeson, de Steinmetz, d'Arnold, de Blathy, de Thury, de Dick, de Kennely et Whiting, de Chapmann, de Siemens-Schuckert, de Latour, de Tirril, d'Alexanderson et de Limb.

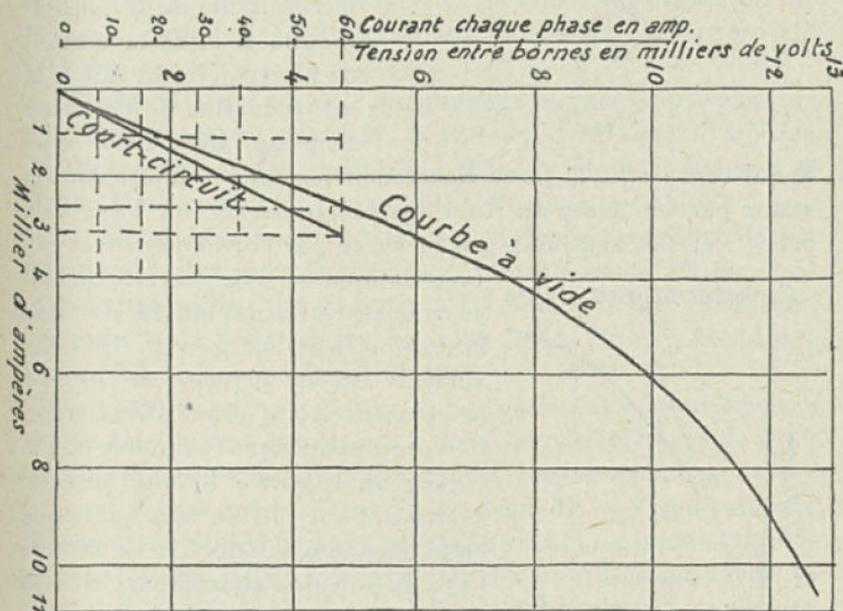


Fig. 161. — Caractéristiques à vide et de court-circuit.

Dans ces procédés on distingue ceux où on utilise le courant d'excitation qui est emprunté à l'alternateur et ceux où on fait appel à un dispositif mécanique agissant sur un rhéostat. Dans le cas d'un alternateur asynchrone, le courant nécessaire pour son excitation doit être produit en dehors de la machine. On peut alors avoir recours soit à un condensateur, soit à un alternateur synchrone, soit à un moteur synchrone surexcité¹.

1. Les caractéristiques d'un alternateur asynchrone sont que, pour une charge donnée, il marche à une vitesse bien définie, supérieure à celle du synchronisme; qu'il débite un courant watté qui représente la puissance

Le *compoundage* des alternateurs est une question qui a aussi été très étudiée et qui par conséquent a donné naissance à d'assez nombreux procédés.

Diagramme de fonctionnement d'un alternateur

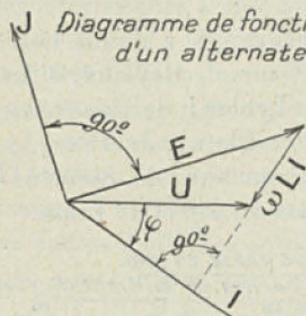


Fig. 162.

On sait, qu'abstraction faite de la résistance ohmique qu'on peut en général négliger, la tension aux bornes U d'un alternateur peut être considérée comme la résultante de la tension induite E et de la tension de résistance ωLi due à la self-induction de l'alternateur (fig. 162). Le vecteur

E qui représente la force électromotrice totale induite dans le stator par le champ du rotor est décalé de 90° sur l'axe J de celui-ci et son amplitude est mesurée par l'ordonnée de la caractéristique à vide correspondant au courant d'excitation I_d donnant la tension U en charge (fig. 163). Le vecteur ωLi est déphasé de 90° sur le courant. Au courant d'excitation I_d correspond sur l'excitatrice une tension alternative e . L'induit de cette excitatrice est calé de telle sorte que cette tension e soit décalée de 90° sur l'axe du pôle de l'alternateur; elle est par suite en phase avec E . Pour obtenir sur l'excitatrice la tension correspondante au courant d'excitation

Caractéristique à vide

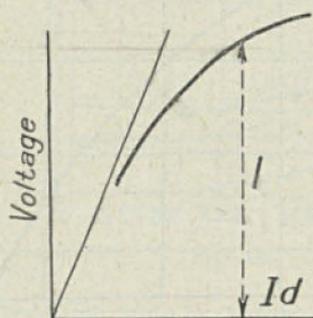


Fig. 163.

I_d , il suffit évidemment d'appliquer à ses bagues une tension alternative égale à e . Cette tension est donnée par le circuit de compoundage, lequel comprend un enroulement donnant une composante proportionnelle à U , et un autre enroulement don-

fournie par lui au circuit et qu'il reçoit du réseau un courant déwatté dont l'intensité dépend de la tension et de la composante wattée du courant; comme cette dernière varie en grandeur quand la charge de la machine varie, il faut disposer d'une machine pouvant fournir un courant déphasé en arrière et qui devra maintenir constante la tension du réseau.

nant une deuxième composante proportionnelle à la tension de réactance.

La méthode de compoundage des ateliers de Charleroi, qui est basée sur ce principe, est disposée pour que la résultante de ces deux tensions partielles soit précisément correspondante comme phase et comme amplitude à la tension alternative que développerait entre ses bagues l'excitation fonctionnant comme auto-excitation au régime considéré; de sorte qu'à ce régime, le circuit de compoundage n'a théoriquement pas à débiter et joue uniquement un rôle d'indicateur de la tension d'excitation. Si la caractéristique de l'excitatrice est convenable, cette propriété sera vraie pour tous les régimes.

Les autres procédés de compoundage connus sont ceux dus à M. Boucherot, à Ganz, à M. A. Blondel, à M. Latour, à Miles Walker, à Dalermont et Herdt, à Rice, à Roth, à Leblanc, à Dalivo Dobrewosky, à Crompton, à Parsons, à Seidner.

La puissance unitaire des alternateurs dépasse parfois 5000 kilowatts avec des intensités efficaces allant jusqu'à 300 ampères et des vitesses de 70 à 95 tours à la minute. Leur poids total varie de 80 à 100 kg. par kilowatt utile, pour descendre à 50 ou 60 kg. dans les fortes unités.

On a proposé des *dispositifs de refroidissement* pour les machines électriques, consistant à envoyer directement de l'eau dans certaines parties d'un alternateur munies de tubes, de cavités ou d'évidements. Dans le système dit « Frigowatt » de M. Follin, on utilise de l'eau refroidie par une machine frigorifique et on peut ainsi obtenir une certaine diminution de la surface du réfrigérant à cause du plus grand écart de température de l'air et de l'eau.

MM. Corblin et P. Brunet ont proposé de remplacer l'air par un gaz ou une vapeur aisément condensable. A cet effet on introduit de l'anhydride carbonique à une pression assez faible, comme 5 atmosphères à 20°, dans la machine et projeté autant que possible liquide sur les parties à refroidir. La vapeur qui se produit instantanément actionne une machine thermique qui transforme ainsi en travail une partie de la chaleur prise à l'alternateur, l'autre portion se retrouve dans l'eau sortant du condenseur de la machine récupérante.

89. **Turbo-alternateurs.** — Dans les alternateurs attelés

aux turbines à vapeur, le stator porte toujours l'enroulement induit à haute tension. La carcasse est en fonte enserrant les tôles magnétiques disposées par paquets; des barres de l'induit, isolées dans des capotes en mica, sont logées dans des encoches ouvertes ou fermées. Les parties frontales de l'enroulement sont très solidement calées sur des soutènements nombreux, pour rester le plus possible indéformables, les courts-circuits y développant des efforts considérables.

Le rotor ou inducteur est établi avec des tôles assemblées normalement à l'arbre, jusqu'à 1500 tours-minute. Pour les vitesses supérieures, il est d'une seule pièce, les encoches étant fraisées dans la masse. Les conducteurs sont empilés dans les encoches et fortement calés. Les parties frontales de l'enroulement sont maintenues dans des calottes en acier. Le tout forme un ensemble extrêmement robuste se comportant très bien aux grandes vitesses. Jusqu'à présent cependant on ne dépasse guère 250 volts comme tension de l'inducteur, en raison des difficultés d'isolement dues à la rotation et à l'échauffement. Le courant continu alimentant le rotor lui est fourni par deux bagues isolées en communication avec le courant d'une excitatrice en bout d'arbre ou par une source étrangère. Le refroidissement des turbo-alternateurs est généralement opéré par des ventilateurs insufflant de l'air, ces ventilateurs portés par l'arbre lui-même. Parfois l'air de la ventilation se meut en circuit fermé, en abandonnant ses calories à chaque passage dans un réfrigérant tubulaire à circulation d'eau. On peut aussi réfrigérer le stator par une circulation directe d'eau dans les tubes en cuivre; il en est de même, mais plus facilement, du rotor.

La tension admise pour les alternateurs est de 6000 volts, et généralement il convient de ne pas dépasser 15000 volts comme tension directe.

Actuellement un groupe de 35000 kw. par exemple fonctionnant à pleine charge avec de la vapeur à 25 kg. cm² de pression, surchauffée à 37°, est livré avec une garantie de 4400 kg. de vapeur correspondant à 3360 calories par kwh. aux bornes, qui équivaut à plus de 3 kg. de vapeur ou 2480 calories par cheval-heure indiqué.

Cependant les centrales actuelles avec leurs perfectionnements

de tous genres, consomment rarement, en marche industrielle, moins de 1 kg. de charbon par kwh. fourni aux barres du tableau, le charbon étant supposé avoir un pouvoir calorifique de 7500 calories. Ceci s'entend de centrales puissantes, car le chiffre de 1 kg. de charbon par kwh. fourni est encore considéré comme une exception, surtout pour les petites installations.

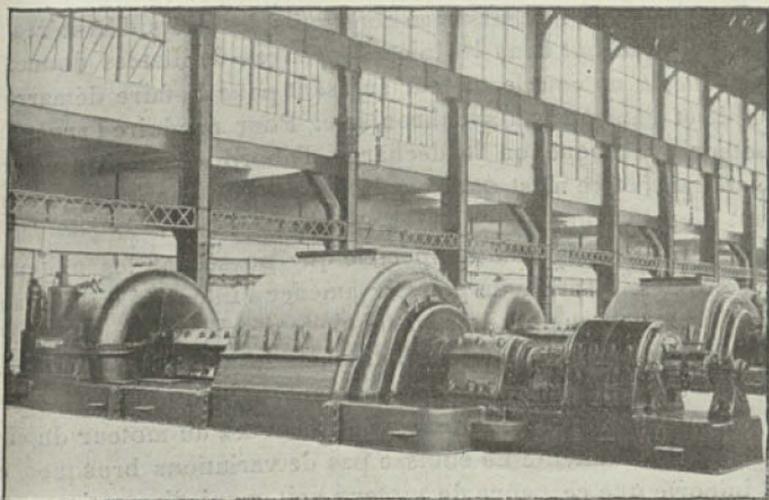


Fig. 164. — Groupe turbo-alternateur de 10 000 kw.

III. — Moteurs synchrones, moteurs asynchrones et moteurs asynchrones synchronisés triphasés.

90. **Moteurs synchrones.** — Les moteurs synchrones triphasés peuvent être établis avec inducteur fixe et un induit mobile ou réciproquement. Ils comportent les caractéristiques suivantes ; ils ne peuvent tourner qu'à une vitesse bien déterminée qui correspond à la fréquence du courant qui les alimente, vitesse qu'ils doivent d'ailleurs conserver sous toutes charges ; ils ne peuvent démarrer d'eux-mêmes, même à vide, car ils ne développent un couple qu'en marche synchrone, et les inducteurs doivent être excités par du courant continu. Ils sont sujets à décrochage en cas de surcharge brusque, à la production d'harmoniques si la courbe de force électromotrice n'est pas identique à celle de la différence de potentiel du réseau, à

pompage pouvant amener le décrochage dans le cas d'une fréquence variable du réseau.

La valeur minimum du courant absorbé est celle qui entraîne la perte minimum dans les enroulements de l'induit et dans la ligne d'aménée. Quand le courant d'excitation est plus grand que la valeur du courant maximum, que l'on peut considérer comme normale, on dit que le moteur est super ou sous-excité.

Dans certains moteurs bien construits, les effets d'hystérésis qui se produisent dans les pièces polaires feuilletées donnent naissance à un couple moteur suffisant pour le faire démarrer à vide et l'amener au synchronisme. Pour produire l'arrêt du moteur synchrone, on le décharge d'abord, ensuite on coupe le courant, et ce n'est que vers la fin que l'on supprime le courant d'excitation.

En raison de la qualité spéciale que possèdent les moteurs synchrones, à savoir de pouvoir amener l'intensité du courant d'alimentation en phase, ou même de le décaler en avant, on les emploie pour empêcher les effets nuisibles de la self-induction dus à d'autres moteurs, transformateurs, génératrices ou lampes à arc. Mais il faut que la tension aux bornes du moteur du circuit qui les alimente ne subisse pas de variations brusques, et il importe que ce genre de moteur soit muni d'amortisseurs à l'instar des alternateurs.

Le rendement des moteurs synchrones ne diffère pas de celui des bons alternateurs, puisque leur construction est identique et que les pertes sont les mêmes.

91. **Moteurs asynchrones.** — Les moteurs asynchrones à champ tournant sont aussi appelés moteurs d'induction. Le couple moteur de ces moteurs est proportionnel aux courants dans l'organe mobile ; mais ces courants étant eux-mêmes proportionnels au glissement, il en résulte que la puissance totale transmise en watts à l'organe mobile par l'organe fixe est également proportionnelle au glissement, et si b est une constante qui dépend de l'intensité du champ, du rayon du rotor, de la longueur ainsi que de la résistance des conducteurs, on peut écrire :

$$W = b(\omega - \omega') ;$$

W , puissance totale, $(\omega - \omega') =$ glissement.

A vide, l'organe mobile tourne presque synchroniquement

avec le champ, c'est-à-dire sans glissement. Par suite de la réductance de l'entrefer, le courant magnétique est toujours très considérable, et conséquemment la force électromotrice de réaction due aux fuites magnétiques.

Les hautes fréquences accroissent la valeur du facteur de fuites.

En pratique, les bobines sont constituées par des spires enroulées dans des encoches qui chevauchent les unes par rapport aux autres, ce qui fait que les variations du stator dans sa forme comme dans sa valeur maximum sont proportionnelles aux ampères-tours du stator.

Dans les induits des moteurs asynchrones triphasés, l'enrou-

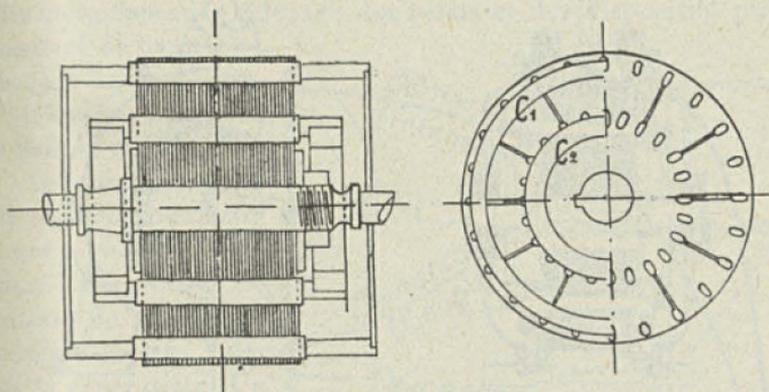


Fig. 165. — Induit de moteur Boucherot.

lement progressif est très usité, mais il est assez rarement employé pour les inducteurs. L'enroulement en court-circuit ou en « cage d'écureuil » de l'organe mobile permet de confiner d'une manière très simple le courant induit dans des passages parallèles à l'arbre; il est utilisé même dans des moteurs puissants, auquel cas le bobinage est approprié pour permettre l'introduction d'une résistance supplémentaire au moment du démarrage.

Le couple exercé par un moteur asynchrone est proportionnel au produit du courant induit dans le rotor en court-circuit et du flux magnétique; il est aussi proportionnel à la vitesse du glissement au-dessus ou au-dessous du synchronisme. Le moment du couple est proportionnel à l'intensité du courant produit et par suite au glissement.

92. **Démarrage, régulation et rendement des moteurs asynchrones.** — Les dispositifs de démarrage ont pour but de réduire l'intensité du courant de mise en marche à celle absorbée par le moteur, en développant la même puissance. Au démarrage, le couple moteur est directement proportionnel à la résistance du rotor.

Si l'on veut démarrer avec le couple de pleine charge, en n'absorbant également que le courant de pleine charge, il faut augmenter la résistance du rotor dans le rapport de la vitesse de synchronisme au glissement de pleine charge. Lorsqu'on ne

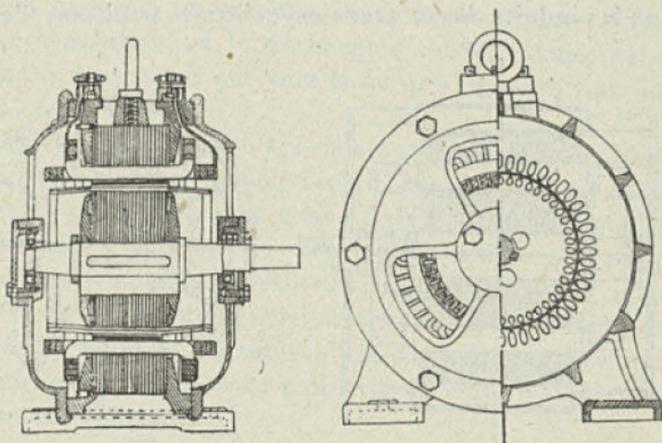


Fig. 166. — Moteur à courant triphasé de 10 chevaux.

veut démarrer qu'après la mise en vitesse et que l'on a en vue un bon rendement, on est conduit à n'avoir au démarrage qu'un couple suffisant pour vaincre les résistances passives du moteur à vide, et le glissement est beaucoup plus faible que dans le cas précédent. Le moteur alors fonctionne à une vitesse à peu près constante.

Pour le démarrage à vide des moteurs asynchrones de grandes dimensions, on relie les bornes du moteur à démarrer aux bagues d'un moteur asynchrone tournant à vide, le primaire de ce moteur étant relié au réseau; quand ce dernier est arrêté, le moteur principal se trouve dans les mêmes conditions que s'il était directement relié au réseau.

Quand les moteurs ont à démarrer en charge, on augmente la résistance de l'induit en donnant à ce dernier un enroulement à

trois phases et en le pourvoyant de bagues, de frotteurs et d'un rhéostat de réglage. Quand les moteurs sont de faible puissance, on peut les faire démarrer en les mettant directement sous courant. Si la puissance du moteur est élevée par rapport à l'énergie de la station qui l'alimente et si le moteur démarre avec une charge égale à la moitié de la charge normale, on fait le groupement en étoile pour le démarrage, de façon à avoir un flux plus intense et par suite un couple plus élevé; le groupement en triangle réalisé ensuite divise l'intensité par $\sqrt{2}$.

Dans les moteurs à bagues, il est aujourd'hui d'une pratique courante d'employer, pour les moteurs de quelque puissance, des mécanismes de relevage des balais et des dispositifs permettant de mettre les bagues en court-circuit lorsque le moteur a pris sa vitesse.

Au point de vue de la *régulation des moteurs* asynchrones, on peut faire varier la vitesse du moteur en faisant varier celle de la génératrice. Un deuxième moyen de réglage a lieu par la variation du nombre de pôles des moteurs. Mais une variation

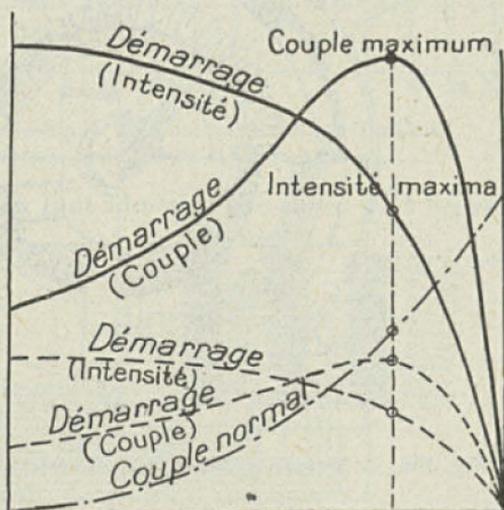


Fig. 167. — Courbes du couple moteur d'un moteur triphasé. Les traits pleins se rapportent au rotor couplé en triangle, et les traits pointillés au montage en étoile.

constante et continue de la vitesse ne sera réalisée qu'en intercalant des résistances dans le circuit de l'induit (fig. 168); dans ce cas on réduit le rendement du moteur, et, en outre, cette méthode a l'inconvénient de ne pas permettre une augmentation de la vitesse.

On peut opérer aussi par réglage de la tension primaire et réglage par insertion d'une tension déterminée dans le rotor. Pour obtenir un bon rendement, on doit faire fonctionner le moteur à une vitesse angulaire se rapprochant le plus possible

de celle du synchronisme; de là l'emploi des champs tournants multipolaires.

Pour certaines applications industrielles, il est important de pouvoir disposer de plusieurs vitesses sans trop sacrifier du rendement. C'est ainsi qu'on établit des moteurs ayant 5 à 6 vitesses. La figure 169 donne les caractéristiques d'un moteur triphasé à 6 vitesses (280 volts et 42 périodes seconde).

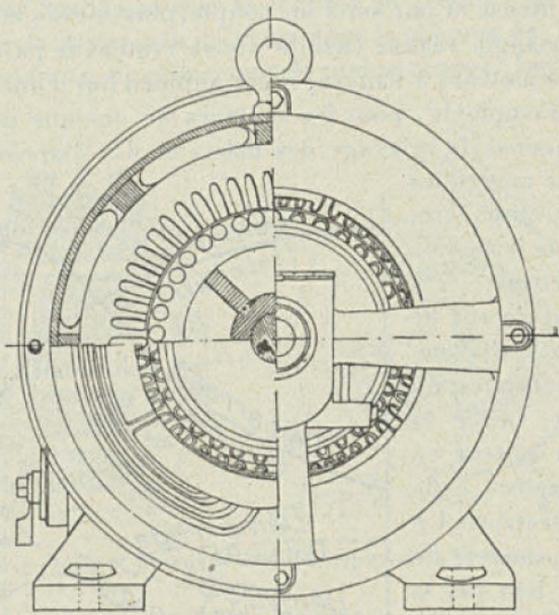


Fig. 168. — Moteur triphasé de 25 chevaux, système Brown-Boveri.

Un autre procédé du réglage de la vitesse consiste dans la construction de moteurs à collecteur et dans le montage dit en cascade (procédés Gorges, Brown, Boveri, Winter, Eichberg).

Rendement et essais des moteurs asynchrones. — Le courant à vide, dont la valeur est notable, constitue un désavantage appréciable du moteur triphasé par rapport à un moteur à courant continu. Les pertes d'énergie dans les enroulements primaire et secondaire augmentent avec la puissance du moteur et croissent comme le carré des intensités.

La figure 171 renseigne d'une façon très complète sur l'allure économique d'un moteur de 300 chevaux-vapeur, 1950 volts, 375 tours et 50 périodes.

Pour la durée des essais concernant l'échauffement, la sur-

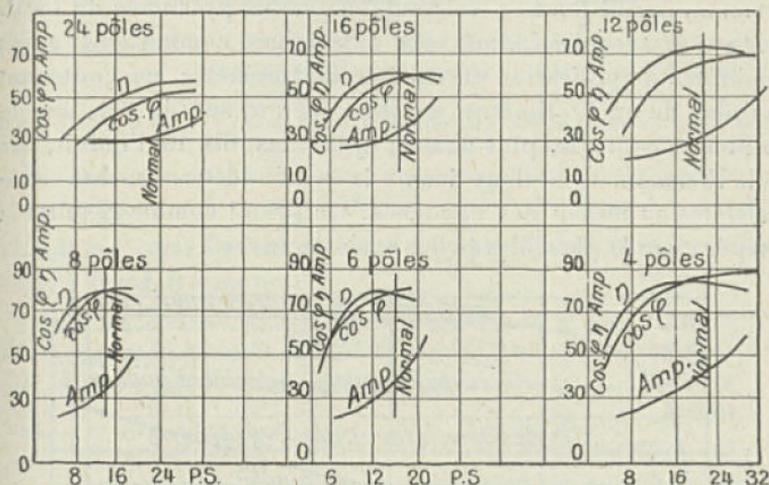


Fig. 169. — Caractéristiques d'un moteur triphasé Oerlikon à 6 vitesses pour 280 volts et 42 p.-s.

charge et l'isolement, on peut admettre une durée de 1 heure à

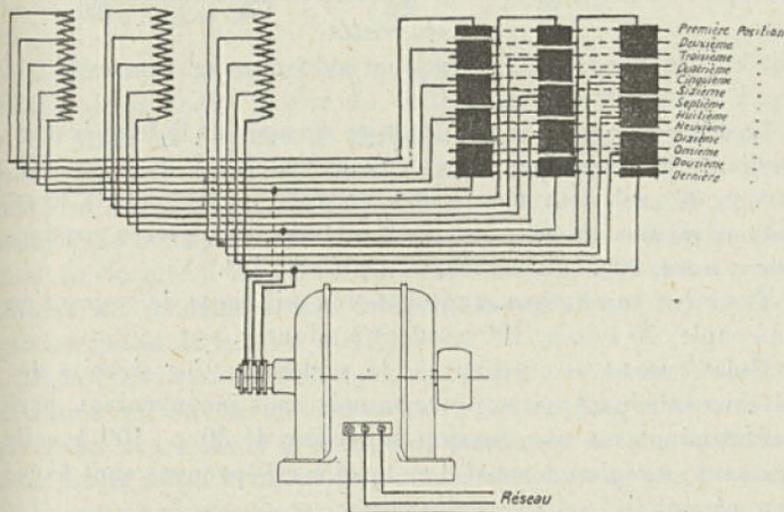


Fig. 170. — Schéma pour le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone par insertion successive de résistances dans les trois phases.

charge normale pour des machines de service intermittent, et 10 heures pour des machines à marche continue. La tempéra-

ture ambiante est admise à 35°. Si, durant l'essai, celle-ci varie, on prend pour sa valeur la moyenne présumée du local. La température des induits est déterminée comme suit, après 5 minutes d'application et avec le thermomètre, ne contenant pas plus de un centimètre de mercure : a) sur le fer, sur le point accessible le plus chaud ; b) sur les fils de l'induit, par trois thermomètres, dont deux à la sortie des encoches et le troisième au milieu des encoches. On prend comme résultat la température la plus élevée des trois lectures.

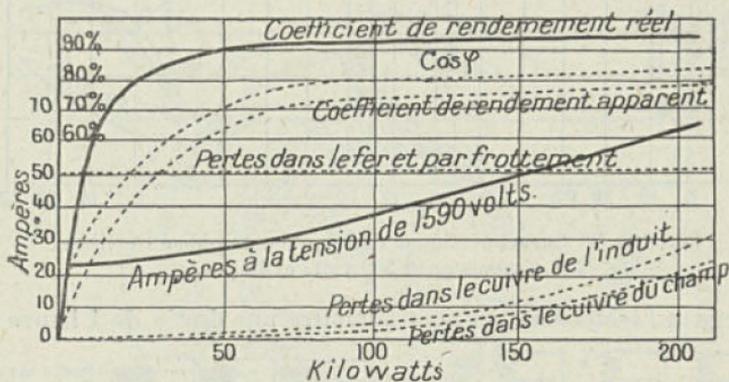


Fig. 171.

La différence entre la température mesurée et la température ambiante ne devra pas dépasser : enrroulements mobiles, 50°, 60° ou 80° selon la nature des isolants ; enrroulements fixes, mêmes valeurs augmentées de 10 p. 100 ; fers, pièces conductrices nues, 90° ; collecteurs, 60° ; paliers, 45°.

Pour les surcharges, augmentation minimum de courant ou de couple, 20 à 30 p. 100 pendant 5 minutes.

Relativement aux épreuves de surtension, les circuits des machines devront pouvoir être soumis, sans inconvénient, pendant 3 minutes à une tension supérieur de 30 p. 100 à celle agissant en régime normal. Les tensions d'épreuves sont fixées comme suit :

Tension normale.	Tension d'épreuve	
	à chaud.	à froid.
Jusqu'à 5 000 volts.	Le double de la tension normale, minimum 110 volts.	Le triple de la tension normale, minimum 500 volts.
5 000 à 10 000 volt ^s .	La tension normale augmentée de 5 000 volts.	La tension normale augmentée de 10 000 volts.
Au delà de 10 000 volts.	Une fois et demie la tension normale.	Double de la tension normale.

La durée pour l'essai à chaud sera de 30 minutes, et pour l'essai à froid, 5 minutes.

Quant au facteur de puissance normal, sous une tension ne différant pas de plus de 5 p. 100 de la tension normale, il ne doit pas être inférieur aux valeurs suivantes :

Puissance disponible sur l'arbre en chevaux.	Facteur de puissance. Moteurs triphasés.
1 à 1.5	0.70
1.5 à 5	0.75
5 à 10	0.77
10 à 15	0.80
15 à 20	0.82
Au delà de 20.	0.85

93. **Moteurs asynchrones synchronisés.** — On sait qu'en raison de la faible valeur du facteur de puissance que l'on relève dans les réseaux de distribution d'énergie électrique, par suite de la multiplication des transformateurs et des moteurs asynchrones, les exploitants de ces réseaux se voient obligés de mettre en service dans leurs usines centrales un nombre exagéré d'unités fonctionnant dans de mauvaises conditions de rendement. Un autre inconvénient est représenté par les chutes de tension élevées.

De là l'introduction de systèmes de tarifications de l'énergie dé wattée qui ont surtout pour but d'inciter chaque abonné à surveiller et à relever le facteur de puissance de son installation. De là aussi l'emploi de moteurs synchrones qui, comme on l'a vu, ne consomment pas d'énergie réactive à pleine charge et même à toutes les charges, à condition de sacrifier une diminution du rendement.

Les moteurs asynchrones synchronisés ont pour but de parer à certains inconvénients des moteurs synchrones, dont on ne

peut obtenir le démarrage que d'un moteur asynchrone en court-circuit, à condition toutefois de le munir d'amortisseurs convenablement réglés; d'autre part, pour des unités de moyenne et surtout de forte puissance, la mise en route ne peut se faire qu'avec un couple relativement faible et au prix d'un à-coup très brutal sur le réseau au moment de la mise sous tension. Le moteur asynchrone synchronisé, lui, démarre dans les conditions d'un moteur asynchrone et fonctionne ensuite normalement comme moteur synchrone. Dans l'établissement de ces moteurs, selon leur adaptation, il faut se rendre compte du couple à produire au démarrage, du courant qu'on peut absorber, du glissement, du rendement et de l'échauffement pour pouvoir établir le rotor qui tiendra compte de ces conditions.

IV. — Moteurs-générateurs. — Commutatrices.

94. **Moteurs-générateurs.** — Le procédé le plus simple de transformation de courant consiste à alimenter par le courant alternatif un moteur synchrone ou asynchrone qui actionne une dynamo. Dans ce système, on donne le plus souvent la préférence aux moteurs asynchrones à rendement élevé et à glissement faible, pour que la vitesse de rotation varie peu entre les limites extrêmes de la charge.

L'emploi des moteurs-générateurs s'impose lorsque la fréquence du courant est trop élevée et la puissance à transformer très grande, ainsi que lorsque la distribution est soumise à des variations brusques de charge qui occasionnent des variations brusques de tension.

Un moteur-générateur constitué avec un moteur synchrone peut toujours fonctionner avec un facteur de puissance égal à l'unité, ce qui n'est pas toujours possible avec une commutatrice, et il peut marcher pour n'importe quelle fréquence.

Le rendement à pleine charge d'un groupe générateur avec transformateur abaisseur est de 85 p. 100 dans les meilleures conditions.

Le moteur-générateur est surtout indiqué pour les réseaux de distribution très étendus, les longues transmissions d'énergie où la tension primaire varie dans de larges limites et qu'on veut avoir affaire à une machine robuste et de grande endurance.

95. **Commutatrices.** — Comme les moteurs-générateurs, ces machines ont pour but la transformation du courant alternatif, simple ou polyphasé, en courant continu, et réciproquement; mais la vitesse de ces machines n'a pu suivre la progression atteinte dans la construction des dynamos.

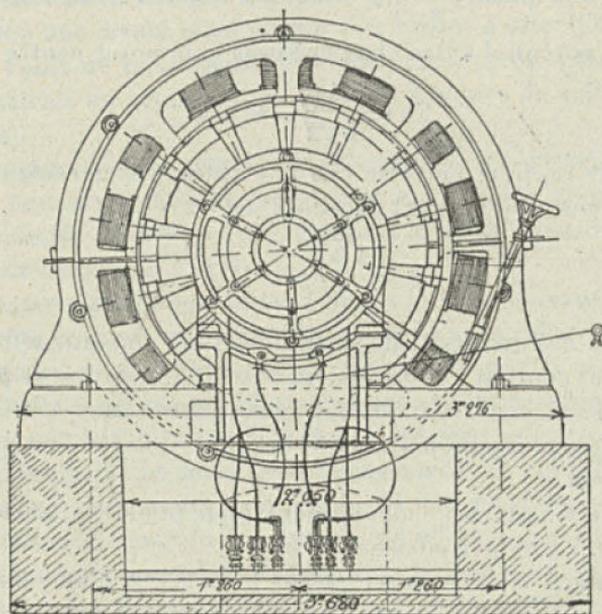


Fig. 172.

Les commutatrices (fig. 172) ont leur inducteur toujours disposé à l'extérieur, du type à pôles alternés et excités en dérivation et en compound au moyen du courant pris aux balais. L'induit, pourvu d'une part d'un collecteur, de l'autre de bagues de contact, est placé dans un champ magnétique multipolaire.

La différence de potentiel E , alternative entre deux bagues collectrices successives, ou tension polygonale d'une commutatrice triphasée, est donnée par la relation :

$$E_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = E = 0,613 E.$$

E , force électromotrice continue.

Le courant efficace dans la ligne est égal à : $\frac{2\sqrt{2}}{3} = 0,943$;
celui entre deux bagues adjacentes, $\frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 0,545$, et enfin ce-
lui dans une phase, $\frac{4\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 1,08$. La tension étoilée ou diffé-
rence de potentiel entre chaque bague et le point neutre est :

$$E_0 = \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,354.$$

Enfin le rapport entre le courant efficace I_0 circulant entre deux bagues et le courant continu I est :

$$I_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0,817 I.$$

D'après ces données, si on alimente une commutatrice avec du courant continu à 100 volts, on obtient du courant triphasé à 61,3 volts efficaces, et si on veut du courant continu à 700 volts, par exemple, il faudra fournir du courant triphasé à $700 \times 0,613 = 430$ volts.

Les commutatrices conviennent bien pour les basses fréquences (25 à 30 périodes-seconde).

Lorsqu'une commutatrice reçoit le courant d'un réseau de distribution à potentiel constant, pour régler la tension, il faut décaler l'intensité en avant ou en arrière de la tension en intercalant en série sur chaque conducteur une bobine de réactance. On peut rendre aussi le système auto-régulateur en composant le champ de la commutatrice par un enroulement en série. Pour faire croître la tension du courant continu, il faut augmenter celle du courant alternatif alimentant la commutatrice ; alors si cette dernière reçoit le courant d'une seule génératrice, on augmente graduellement la tension de l'alternateur à mesure que la charge augmente, tandis que l'excitation de la commutatrice est réglée de façon à conserver au facteur de puissance ($\cos \varphi$) la valeur de 1, ce dont on s'assure au moyen d'un phasemètre. On peut aussi arriver au même résultat en agissant sur l'excitation de la commutatrice. Il est aussi possible de régler la tension au moyen d'un transformateur muni de prises de courant en divers points du circuit secondaire.

L'addition de pôles supplémentaires aux commutatrices permet, pour une capacité donnée et pour des charges très variables, de construire des machines moins encombrantes, la commutation ne devenant plus une cause limitative de la charge.

Ordinairement, la ligne triphasée qui alimente les sous-stations est à une haute tension que l'on amène à une valeur modérée à l'aide de transformateurs statiques, et on associe à la commutatrice un groupe de démarrage (bobines de self ou survolteurs).

Les commutatrices présentent un rendement plus avantageux que les moteurs-générateurs, surtout aux faibles charges; on peut atteindre 90 à 92 p. 100, compris le rendement du transformateur-abaisseur.

Le démarrage des commutatrices est le plus souvent effectué par le côté continu, et l'accrochage sur le courant triphasé est fait au moment où la machine est en phase avec le réseau. La mise en marche d'une commutatrice, sa synchronisation et son couplage sur le tableau sont très rapides (une minute et demie à deux minutes). Une seule petite génératrice à courant continu peut suffire pour toute une usine. Si l'on ne dispose pas de courant continu pour le démarrage, on effectue celui-ci sur le courant triphasé en faisant démarrer la machine en moteur asynchrone. Lorsque la puissance de la commutatrice n'est pas hors de proportion avec la puissance moyenne de la station centrale, on peut brancher directement cette machine sur le réseau en la faisant démarrer en moteur synchrone à vide. Quelquefois on utilise un démarreur spécial monté en bout de l'arbre de la commutatrice.

Le plus souvent les sous-stations possèdent plusieurs commutatrices; on intercale alors un groupe générateur-moteur et l'on utilise le courant continu pour le démarrage. S'il y a tendance à emballement, on couple la commutatrice en parallèle avec un alternateur de fréquence variable.

On compte généralement sur l'inductance des appareils pour empêcher un courant trop intense de passer dans les commutatrices, entre le moment où un court-circuit se produit et celui où le disjoncteur coupe le circuit.

Quand on veut compounder ou hypercompounder faiblement

une commutatrice, on place une bobine de self-induction en série sur le courant alternatif.

Pour sous-compounder, c'est-à-dire augmenter la chute de tension d'une commutatrice, on emploie une bobine de self, mais en inversant les connexions des bobines inductrices série. On utilise ce système quand la commutatrice doit fonctionner en parallèle avec une batterie-tampon.

Le couplage en parallèle des commutatrices s'effectue aisé-

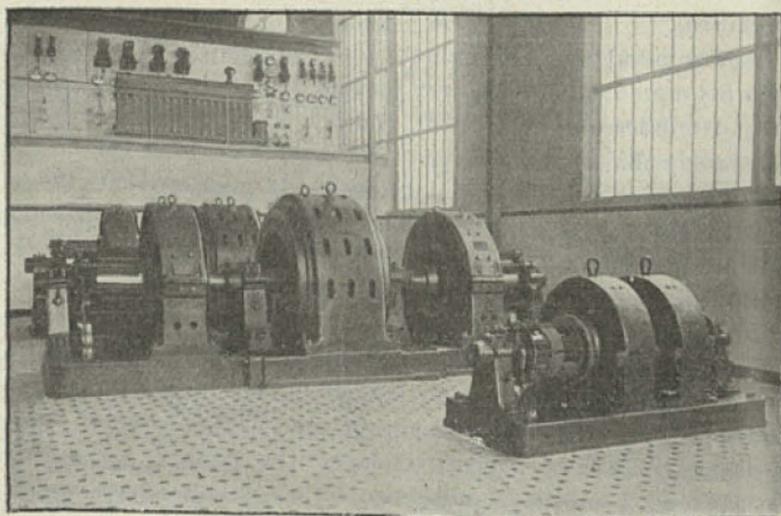


Fig. 173. — Groupe convertisseur de 1000 chevaux et survolteur de batterie.

ment tant sur le côté continu que sur le côté alternatif. Pour coupler plusieurs commutatrices devant alimenter en courant continu un même réseau, on procède comme pour les dynamos shunt ou compound, et la charge se répartit entre les machines suivant leur tension. Le réglage de la tension s'effectue en agissant sur la tension alternative, soit en réglant l'excitation de manière à compenser les chutes de tension dans l'induit, soit en déplaçant les balais sur le collecteur de façon à obtenir moins que le maximum de tension.

Pour le couplage sur le côté alternatif, il est préférable d'alimenter chaque commutatrice par un transformateur séparé,

ou tout au moins par des secondaires distincts lorsqu'on utilise une série de transformateurs.

Quand on a à mettre en parallèle une commutatrice avec plusieurs autres, lorsque la commutatrice a atteint la vitesse angulaire normale, on l'excite à l'aide du rhéostat. Si la tension s'établit dans le sens voulu, on synchronise d'après l'examen des appareils témoins de synchronisation, et l'on couple au moment propice. La synchronisation étant obtenue, on charge sur le côté continu et on vérifie le sens des bobines-série en les court-circuitant et en examinant les indications du voltmètre. La commutatrice est alors prête à fonctionner en parallèle par ses deux côtés.

Au point de vue du réglage de la tension on peut, comme nous l'avons déjà signalé, employer un survolteur alternatif (fig. 174), constitué par un alternateur calé à une des extrémités de l'arbre de la commutatrice et monté en série avec le courant alternatif alimentant la commutatrice.

Le rendement des commutatrices se détermine par l'une des méthodes précédemment indiquées ou décrites : directe, d'opposition ou des pertes séparées.

Convertisseur en cascade. — Cette machine, qui tient du moteur-générateur et de la commutatrice, permet d'obtenir le

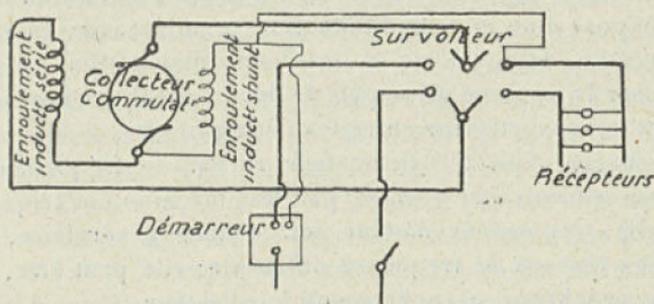


Fig 174. — Schéma de commutatrice avec survolteur.

démarrage en alternatif qui est impossible avec les commutatrices, ainsi que le démarrage en courant continu et avec moins d'à-coups qu'avec une commutatrice. D'autre part la mise en parallèle des convertisseurs en cascade ne présente aucune difficulté, et la tension continue ne subit pas de variations du

fait de celles de la tension ou de la fréquence du réseau alternatif. L'action des harmoniques supérieurs est peu sensible, et la commutation peut être rendue très bonne par l'adjonction de pôles auxiliaires. Le rendement du convertisseur en cascade est inférieur de 1 ou 2 p. 100 à celui d'une commutatrice, mais il reste supérieur à celui d'un moteur générateur, surtout aux marches à charge réduite.

Le démarrage du convertisseur en cascade est très simple; la machine non excitée peut démarrer comme un moteur asynchrone ordinaire; comme pour les générateurs à courant continu ordinaires, les convertisseurs peuvent être munis d'un enroulement compound. Les convertisseurs en cascade sont susceptibles de fortes surcharges, et leur rendement atteint 93 pour 100.

96. Convertisseurs de fréquence. — Un système transformateur de fréquence peut être constitué par deux machines synchrones couplées, de fréquence correspondant à celle de chacun des réseaux à faire travailler en parallèle; de ces deux machines, l'une agit comme moteur, et l'autre comme génératrice.

Il peut être aussi constitué par un moteur asynchrone et un générateur synchrone ou bien *vice versa* ou bien enfin par deux machines asynchrones. M. Heyland a aussi proposé un ensemble composé d'un moteur d'induction combiné avec un moteur à collecteur; dans ce cas sa meilleure disposition consiste à composer la machine principale de deux moteurs en cascade, en plaçant le convertisseur entre les deux moteurs.

La charge d'un transformateur rotatif de fréquence peut avantageusement être réalisée par une machine électrique que l'on relie, soit comme moteur, soit comme génératrice, à l'un des deux réseaux de fréquence différente; elle peut être, selon les cas, synchrone, asynchrone ou à collecteur.

97. Sous-stations transformatrices. — L'emploi des appareils de transformation du courant alternatif en courant continu va toujours en augmentant. La plupart des grands réseaux de traction à courant continu possèdent des installations de convertisseurs rotatifs, et pour les travaux électrolytiques le convertisseur rotatif est d'un grand secours.

Les transports de force comprennent toujours dans leurs

réseaux une ou plusieurs sous-stations de groupes moteurs-générateurs ou de commutatrices.

Les convertisseurs sont reliés aux transformateurs soit par un transformateur polyphasé avec enroulements connectés en étoile, ou en triangle, soit par des transformateurs statiques simples associés par trois.

Il peut y avoir avantage à installer des commutatrices compound munies de régulateurs automatiques de tension agissant sur l'excitation shunt. Les régulateurs agissant sur la tension d'un même groupe d'alternateurs sont asservis à fonctionner ensemble de façon à ne pas pouvoir rendre différentes les excitations en dérivation des diverses commutatrices.

L'augmentation du nombre de sous-stations a pour effet une réduction des feeders, ce qui est un grand avantage au point de vue économique. La propriété qu'ont les convertisseurs de pouvoir transformer du courant continu est utilisée dans les installations où l'on distribue simultanément du courant alternatif et du courant continu.

V. — Transformateurs statiques.

98. Rôle et conditions de fonctionnement des transformateurs dans le transport de l'énergie électrique. — Les transformateurs constituent un des organes les plus importants et les plus utiles pour le transport de l'énergie électrique. Dans les limites de la pratique, ces appareils fonctionnent d'une façon auto-régulatrice. Les règles qui dominent la construction des alternateurs et par suite leur emploi dans les installations peuvent se résumer comme suit : isolation parfaite des spires à haute tension et des bobines aussi bien entre elles que par rapport au fer et à l'enroulement secondaire; choix judicieux du nombre des spires des secondaires, ainsi que des dimensions et des connexions des bobines; refroidissement largement assuré et grande résistance de court-circuit pour les appareils de grande intensité.

Ce sont les types allongés (grande hauteur et noyaux relativement minces) qui, à égalité de poids et de rendement, donnent la plus grande surface de refroidissement et en même temps des résultats meilleurs quant aux effets de la dispersion du flux

magnétique. Les transformateurs doivent fonctionner avec le plus d'économie possible à vide ; à cet effet la réluctance des joints doit être réduite au minimum.

Pour régler convenablement la tension du secondaire, il faut prendre des transformateurs-abaisseurs donnant une tension plus élevée que la tension normale et installer des bobines à réaction pour réduire la tension à certains moments. En réglant le potentiel à l'usine, suivant la charge, et les bobines à réaction d'après l'énergie dépensée, on arrive à un fonctionnement satisfaisant de l'installation d'utilisation.

L'emploi de compensateurs permet de réaliser une économie sensible sur le prix des transformateurs, lorsqu'il n'y a aucun inconvénient à relier électriquement la haute et la basse tension ou lorsque les tensions primaire et secondaire sont peu différentes.

Dans les sous-stations de transformateurs servant de réceptrices aux usines génératrices, chaque groupe de transformateurs monophasés est logé dans un compartiment séparé dont les parois sont en béton armé. Le courant à haute tension arrive aux transformateurs par la partie supérieure de ces compartiments, et chaque conducteur est séparé de son voisin par une cloison en ciment. Les disjoncteurs automatiques placés à l'arrivée des conducteurs à haute tension, à rupture dans l'huile, sont logés dans des compartiments incombustibles ; il en est de même des transformateurs-réducteurs servant à fournir le courant d'excitation à basse tension aux électros de déclenchement des disjoncteurs. Les barres collectrices, les disjoncteurs automatiques et les interrupteurs à huile avec leurs transformateurs-réducteurs spéciaux sont généralement installés en sous-sol. La protection des transformateurs contre les décharges statiques pouvant provenir de la ligne à haute tension est assurée par des parafoudres et par des bobines de self. Pour parer aux accidents que pourraient occasionner des surtensions dangereuses, autres que celles dues aux décharges atmosphériques, le circuit secondaire de chaque transformateur-réducteur est muni de limiteurs de tension montés à la partie supérieure contenant les caisses renfermant les transformateurs. Ces limiteurs de tension sont reliés, d'une part, au point milieu de chaque enroulement du transformateur, et d'autre part à la terre.

Des interrupteurs spéciaux permettent d'effectuer le couplage en parallèle des transformateurs à haute tension.

Il est de la plus haute importance d'éviter tout danger pouvant provenir d'une communication entre le réseau à basse tension et celui à haute tension. Le moyen le plus efficace con-

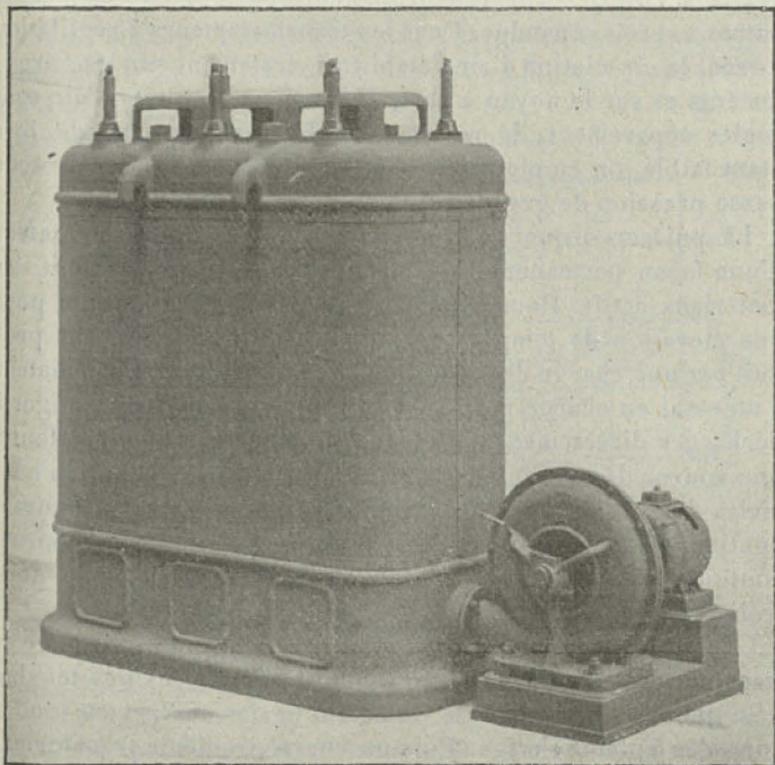


Fig. 175. — Transformateur triphasé, type ventilé.

siste à mettre simultanément à la terre l'enveloppe du transformateur et un point de l'enroulement secondaire, mais en n'opérant la mise à la terre qu'au moment précis où le courant à haute tension pénètre dans le secondaire.

Les transformateurs à noyaux sont préférables aux types cuirassés. On obtient une meilleure répartition du flux en disposant les trois colonnes suivant les sommets d'un triangle équilatéral.

Au point de vue du refroidissement des transformateurs, on n'installe parfois qu'un seul système réfrigérant pour toute une batterie de transformateurs. La méthode qui consiste à installer des réfrigérants et des pompes à huile individuels pour rendre les transformateurs indépendants et éviter ainsi qu'une avarie à l'un des appareils entraîne la mise hors service des autres, est très répandue. Dans les transformateurs à ventilation forcée, la circulation d'air s'établit généralement sur les enroulements et sur le noyau à part, et les deux courants d'air sont réglés séparément; la résistance offerte au passage de l'air étant faible, on emploie des ventilateurs pouvant fournir sous basse pression de grands volumes d'air.

La puissance que peut supporter un gros transformateur d'une façon permanente ne dépend que de l'échauffement des matériaux actifs. Pour déterminer la puissance maximum pour une élévation de température donnée ou l'échauffement produit par une charge donnée, il faut soumettre le transformateur à un essai en charge permanente. Comme on ne peut songer à décharger directement l'appareil, on relie le transformateur à une source de courant alternatif pour produire les pertes normales dans le fer, et on charge les bobines avec du courant continu; en général il faut deux tensions différentes au courant continu, une pour chaque enroulement. L'essai exige donc trois machines.

Une manière plus certaine consiste à faire fonctionner le transformateur à vide pendant quelque temps sous une tension telle que les pertes dans le fer soient égales aux pertes totales normales à pleine charge. Puis on court-circuite le transformateur et on le fait fonctionner avec des pertes de même valeur dans le cuivre. Ces charges alternatives agissent sur le transformateur jusqu'à ce que l'état permanent soit atteint. Mais la méthode pour charger artificiellement consiste à accoupler deux transformateurs, aussi bien par les enroulements à haute tension que ceux à basse tension. Dans un des circuits on intercale un petit transformateur réglable, ou bien dans un enroulement du transformateur on installe une bobine d'un nombre de tours plus ou moins grand suivant la chute totale de tension des deux transformateurs.

Dans les installations importantes on emploie souvent, pour

augmenter le rendement, plusieurs transformateurs au lieu d'un seul d'une puissance égale à leur somme, et on les met successivement en circuit et à pleine charge au fur et à mesure des besoins de la consommation. Un coupleur automatique met ou retire chacun de ces transformateurs. Dans les transformateurs bien établis la chute de tension varie de 1,5 à 3 p. 100 et n'atteint 5 à 6 p. 100 qu'avec une charge inductive; en fonctionnement, les variations de tension ne doivent pas dépasser 2 à 3 p. 100.

On admet d'une façon générale comme surélévation maxi-

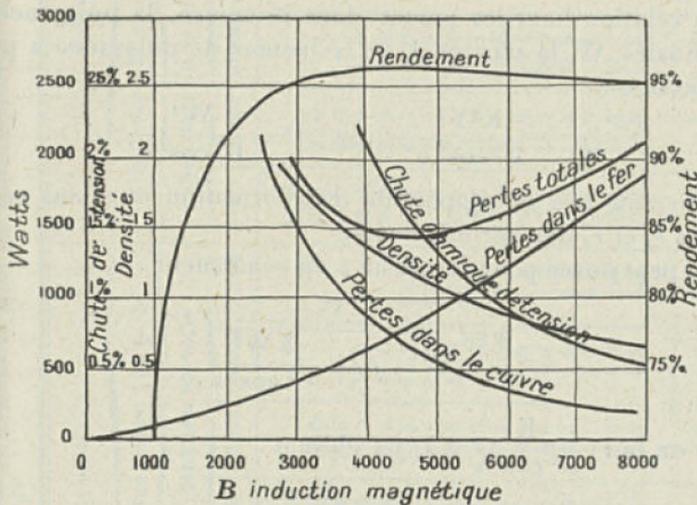


Fig. 176. — Caractéristiques d'un transformateur.

mum : 55° pour les enroulements, 65° pour le fer, la température ambiante étant supposée égale à 20°.

Comme rendement on peut admettre les chiffres suivants : 97 p. 100 à demi-charge, 97,5 p. 100 à trois quarts de charge, et 98 p. 100 à pleine charge.

Il se produit dans les transformateurs des ondes à front raide, à l'ouverture et à la fermeture d'un circuit, à la suite de surtensions dans le réseau. Il s'ensuit qu'il ne suffit pas de représenter un transformateur comme une simple self-induction; il faut en outre envisager leur capacité par rapport à la terre et même entre spires, ainsi qu'on le fait pour le calcul des lignes de transmission de l'énergie électrique:

Les tableaux ci-après résument les conditions de fonctionnement des transformateurs triphasés et monophasés normaux, à la tension d'alimentation indiquée et pour une courbe de tension pratiquement sinusoïdale. Pour les transformateurs triphasés, le rapport du courant à vide au courant de charge est égal à celui d'un transformateur triphasé d'une puissance 50 p. 100 supérieure.

99. **Calcul des pertes dans un transformateur.** — Appelons : p_c les pertes dans le cuivre, p_f les pertes dans le fer et W la puissance de l'appareil.

La relation liant les pertes dans le cuivre, la puissance au secondaire W , la tension U et le facteur de puissance a pour expression :

$$p_c = \frac{KW^2}{U^2 \cos^2 \varphi}, \quad \text{car} \quad I^2 = \frac{W^2}{U^2 \cos^2 \varphi};$$

K constante liée au rapport de transformation m et aux résistances r_1 et r_2 des enroulements.

On peut poser pour la valeur ρ du rendement :

$$\rho = \frac{W}{W + p_f + \frac{KW^2}{U^2 \cos^2 \varphi}}.$$

Si on fait : $\frac{K}{U^2 \cos^2 \varphi} = \lambda$, on obtient :

$$\rho = \frac{W}{W + p_f + \lambda W^2}.$$

Et le maximum de rendement est rempli lorsque :

$$W^2 = \frac{p_f}{\lambda} \quad \text{ou} \quad W^2 = \frac{p_f U^2 \cos^2 \varphi}{m^2 r_1 + r_2}.$$

ou : $p_f = (m^2 r_1 + r_2) I^2$.

Le maximum de rendement est donc atteint pour la puissance W ou pour la charge qui correspond à l'égalité des pertes fer et cuivre.

Le rendement croît avec la charge tant que cette dernière reste inférieure à la valeur ci-après :

$$W^2 = \frac{p_f}{\lambda} \quad \text{ou} \quad W = \sqrt{\frac{p_f}{\lambda}}.$$

TABLEAU I. — Rapport $\frac{\text{courant à vide}}{\text{courant en charge}}$ en centièmes pour les transformateurs à huile et refroidissement naturel.

PUISSANCE en kva.	PERTES RÉDUITES								PERTES NORMALES							
	fréquence : 25 p.-s.				fréquence : 50 p.-s.				fréquence : 25 p.-s.				fréquence : 50 p.-s.			
	tensions en volts				tensions en volts				tensions en volts				tensions en volts			
	5000	10000	15000	30000	5000	10000	15000	30000	5000	10000	15000	30000	5000	10000	15000	30000
1					14,0				32,0				28,0			
2	16,0				13,0	16,0			29,0	35,0			25,0	30,0		
3	15,5				12,5	15,0			28,0	32,0			23,0	27,0		
4	15,0	17,5			12,0	14,5	17,0		26,0	30,0	35,0		22,0	25,0	30,0	
5	14,5	16,0	18,0		11,5	14,0	16,0		25,0	28,5	32,0		21,5	24,0	28,0	
7,5	13,0	15,0	17,0		10,5	12,5	14,5	17,0	23,5	25,7	29,0		19,5	21,5	24,5	32,0
10	12,0	13,8	15,8	19,0	9,5	11,5	13,0	15,5	22,0	24,0	26,5	35,0	18,5	20,0	22,0	28,0
15	10,5	12,0	13,6	16,0	8,5	10,0	11,0	13,0	20,0	21,5	23,5	29,0	16,5	18,0	19,5	23,0
20	9,5	10,6	12,0	13,8	7,6	8,8	9,8	11,5	18,3	19,8	21,4	25,0	15,0	16,0	17,0	20,5
30	8,0	9,0	10,0	11,0	6,5	7,3	8,0	9,3	16,0	17,1	18,5	21,2	13,0	13,6	14,6	17,2
40	7,0	7,8	8,6	9,7	5,7	6,4	7,0	8,1	14,6	15,6	16,8	18,8	11,6	12,4	13,0	15,2
50	6,5	7,0	7,8	8,8	5,3	5,8	6,3	7,3	13,7	14,5	15,5	17,2	10,8	11,4	12,2	14,0
75	6,0	6,5	6,9	7,7	4,8	5,3	5,6	6,2	12,2	12,8	13,5	15,0	9,7	10,1	10,7	11,9
100	5,9	6,2	6,6	7,2	4,6	5	5,4	5,8	11,6	12,0	12,5	14,0	9,3	9,5	9,9	11,0
150	5,4	5,7	6,0	6,6	4,2	4,6	4,9	5,3	10,8	11,2	11,7	13,1	8,7	8,9	9,3	10,3
200	4,8	5,1	5,4	5,8	3,8	4,2	4,5	4,7	10,0	10,4	10,9	12,3	8,1	8,3	8,7	9,8
250 et plus						<i>moins que</i>										
	4,4	4,6	4,9	5,1	3,5	3,8	4,0	4,3	9,5	9,7	10,1	11,5	7,6	7,8	8,2	9,3

TABLEAU II. — Rapport $\frac{\text{courant à vide}}{\text{courant en charge}}$ en centièmes
pour les transformateurs à huile et refroidissement par eau.

PUISSANCE en kva.	Fréquence : 25 p.-s.		Fréquence : 50 p.-s.	
	tensions en volts		tensions en volts	
	15 000	30 000	15 000	30 000
300	11,5	12,5	10,0	10,7
400	10,8	11,5	9,3	9,9
500	10,2	10,8	8,6	9,2
750	9,1	9,5	7,5	8,0
1 000	8,7	8,8	7,2	7,4
1 500	8,3	8,3	6,7	6,8
2 000				
et plus	<i>moins que</i>			
	8,0	8,0	6,5	6,5

TABLEAU III. — Rapport $\frac{\text{courant à vide}}{\text{courant en charge}}$ en centièmes
pour les transformateurs à sec.

PUISSANCE en kva.	Fréquence : 25 p.-s.			Fréquence : 50 p.-s.		
	tension en volts			tension en volts		
	5 000	10 000	15 000	5 000	10 000	15 000
1	28,0			22,0		
2	26,0			21,0		
3	24,5	27,5		20,0	22,2	
4	23,5	26,0		19,0	21,0	
5	22,0	24,5	30,0	18	20,0	23,5
7,5	19,5	22,0	25,0	16	18,0	20,5
10	18,0	20,0	22,5	14,3	16,0	18,0
15	15,0	17,0	19,0	11,8	13,5	15,4
20	12,8	14,8	16,4	10,2	11,6	13,2
30	10,4	11,7	13,1	8,3	9,5	10,4
40	9,0	10,0	11,0	7,3	8,1	8,8
50	8,5	9,2	10,0	6,8	7,5	8,0
75	7,8	8,5	9,0	6,2	6,6	7,2
100	7,3	8,0	8,4	5,8	6,2	6,7
125	7,0	7,5	8,0	5,4	6,0	6,4

Pour toute valeur supérieure il décroît. Ainsi le rendement maximum d'un transformateur ne correspond pas toujours à la charge maximum, et c'est cette propriété qu'il convient d'utiliser dans la pratique.

Appelons t_c et t_f le taux ou pourcentage pour cent des pertes dans le cuivre et dans le fer de la puissance maximum ($W_{\max.}$) en fonctionnement normal, on aura :

$$p_f t_c W_{\max.} = \lambda W_{\max.}^2; \text{ d'où : } \gamma_w = t_c \frac{1}{W_{\max.}} \text{ et } \lambda W = t_c \frac{W}{W_{\max.}}$$

Pour cette charge W on a :

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{p_f}{W} + \lambda W}; \text{ ou : } \rho = \frac{1}{1 + t_f \frac{W_{\max.}}{W} + t_c \frac{W}{W_{\max.}}}$$

Et le rendement est maximum pour :

$$W = W_{\max.} \sqrt{\frac{t_f}{t_c}}$$

Si l'on admet que W ne peut être supérieur à $W_{\max.}$, on aura :

$$t_f = t_c; \text{ ou } p_f \leq p_c.$$

C'est-à dire que les pertes dans le fer doivent au plus être égales à celles dans le cuivre.

Alors le maximum de rendement a pour valeur :

$$W = W_{\max.}$$

Le transformateur travaille dans ce cas à son maximum de charge.

Si $t_f < t_c$, le maximum de rendement est donné par :

$$\rho_{\max.} = \frac{1}{1 + 2\sqrt{t_f t_c}}$$

$$\text{Et si } t_c = t_f : \rho_{\max.} = \frac{1}{1 + 2t_c}$$

En exploitation on se trouve en face de transformateurs fonctionnant ordinairement au-dessous de la pleine charge (petits postes distributeurs de ville), auquel cas il faut employer des appareils à faibles pertes dans le fer et à plus fortes pertes dans le cuivre, ou de transformateurs de centrales ou de sous-

station marchant presque constamment à pleine charge, et alors on doit choisir des appareils à pertes égales dans le fer et le cuivre.

On voit ainsi que la question des pertes dans les transformateurs constitue le critérium de leur fonctionnement. Pour une même puissance, les pertes à vide varient avec la tension adoptée au primaire, et elles sont d'autant plus élevées que celles du réseau primaire sont elles-mêmes plus importantes. D'autre part les pertes à vide pour une tension primaire déterminée sont relativement plus élevées pour des transformateurs de faible puissance que pour des appareils de puissance plus conséquente.

En ce qui concerne les pertes dans le cuivre, elles varient selon le mode d'utilisation du transformateur et arrivent à être à peu près indépendantes de la tension primaire et de la puissance dans certains cas.

CHAPITRE XIV

LIGNES ET RÉSEAUX DE TRANSPORT DE FORCE A HAUTE TENSION

- I. *Caractéristiques des lignes à haute tension.* — Conditions générales de fonctionnement des lignes de transmission d'énergie à grande distance. — Inductance, capacité et chute de tension. — Méthodes graphiques pour le calcul des lignes de transmission d'énergie électrique. — Calcul d'une ligne de transmission d'énergie à haute tension.
- II. *Supports des lignes.* — Tension mécanique des conducteurs. — Installation des conducteurs. — Poteaux en bois. — Calcul d'un poteau en bois. — Poteaux métalliques. — Calcul d'un pylône métallique. — Poteaux en ciment armé. — Calcul d'un poteau en ciment armé. — Protection et isolement des lignes.
- III. *Armement des lignes.* — Interrupteurs et coupe-circuits. — Isolateurs ordinaires. — Isolateurs suspendus. — Essais des isolateurs suspendus. — Parafoudres.

I. — Caractéristiques des lignes à haute tension.

100. Conditions générales du fonctionnement des lignes de transmission d'énergie à grande distance. — En raison des avantages propres qu'il possède, le courant triphasé s'est imposé pour le transport de l'énergie à grande distance. Le courant fourni par les machines génératrices est commodément porté à de très hautes tensions dans les lignes par des transformateurs statiques qui coûtent relativement peu et de surveillance peu dispendieuse. La transformation inverse, dans les stations secondaires, a lieu avec la même facilité. Mais la self-induction inhérente au courant alternatif affecte le rendement d'une façon très sensible et donne lieu à des perturbations dangereuses pour la conservation de la ligne.

Le facteur de puissance qui dépend de l'impédance et de la capacité est généralement de 75 à 80 p. 100; en d'autres termes, l'effet obtenu au moyen d'une force électromotrice minimum donnée est de 25 à 20 p. 100 inférieur à celui qu'il serait si l'impédance était égale à la résistance ohmique.

Dans l'établissement d'un transport de force, il est important que ni la fréquence fondamentale de la distribution ni celle d'un harmonique important ne coïncident avec la fréquence naturelle de la ligne, à cause des effets de résonance.

L'effet « corona » constitue une limitation sérieuse des transports à grande distance. Cet effet dépend, pour chaque diamètre des conducteurs, de leur écartement et de leur position, de l'altitude et des conditions atmosphériques. La pluie, le brouillard et les chutes de neige facilitent les manifestations. Le diamètre des conducteurs peut ainsi souvent être déterminé par les pertes corona plutôt que par l'économie de cuivre. D'autant plus que l'effet corona contribue à la dissipation des décharges à haute fréquence.

La réactance de la ligne limite également la puissance que l'on peut transporter, la chute de tension correspondant à une puissance transportée peut être diminuée en augmentant la tension; mais il faut se tenir dans les limites imposées par l'effet corona. D'autre part la réactance a pour effet de limiter l'intensité des courts-circuits.

On peut réduire la réactance de la ligne et en même temps augmenter sa capacité, en doublant les conducteurs, chaque phase comportant deux conducteurs de section moitié moindre et fixés au même isolateur. L'augmentation de la capacité permet de transmettre une plus grande puissance, sans augmenter la puissance des condensateurs synchrones.

La capacitance dépend de la section et de la disposition des conducteurs, de la fréquence et de la longueur de la ligne. La tension à l'extrémité de la ligne supposée ouverte peut devenir dangereuse. En outre le courant de charge peut être de l'ordre du courant normal d'énergie, et comme il doit être fourni par les génératrices, on trouve par exemple que pour transporter 150 000 kw. à 220 kilovolts à 553 kilomètres, à la fréquence de 60 p.-s., et avec deux lignes en parallèle, il faudra 200 000 kw. de courant de capacité. Ce courant étant en avance de 90° tend à rendre les génératrices auto-excitatrices et à rendre impossible tout réglage de l'excitation normale.

Mais on peut supprimer le déphasage en avant ou en arrière du courant en bout de ligne au moyen de condensateurs synchrones et la capacité joue le même rôle, avec cette différence qu'elle est uniformément répartie et qu'elle n'est pas réglable.

Il y a une charge pour laquelle la capacité compense exactement la self-induction à l'extrémité réceptrice. On préfère souvent, dans des lignes très longues, avoir un déphasage en avance au départ, nul au milieu, et en arrière à l'arrivée.

En ce qui concerne la fréquence, il faut adopter celle qui est la plus courante dans les distributions de la région. Pour la tension le chiffre le plus élevé admis actuellement est celui de 220 000 volts.

Une bonne méthode est celle qui consiste à tracer le diagramme rationnel des courants et des tensions aux deux extrémités de la ligne. On considère, dans ce diagramme, la tension aux bornes du côté haute tension du transformateur élévateur, et la tension, à l'arrivée, du côté basse tension du transformateur abaisseur. On n'a ainsi à tenir compte que de l'impédance de ce dernier, que dans une première approximation on peut supposer répartie le long de la ligne. On trouve ainsi qu'avec 220 000 volts à l'arrivée, il faut une capacité de 30 000 kva. aux condensateurs synchrones pour maintenir la

tension à 230 000 volts au départ sur une ligne de 560 kilomètres à vide. En charge normale, avec deux lignes transportant à la même distance 75 000 kv. chacune, il faut, pour maintenir 220 000 volts à l'arrivée avec un facteur de puissance de 0,85, que la puissance des condensateurs synchrones soit de 53 000 kva., la tension au départ étant maintenue à 220 000 volts.

Les couches de givre peuvent avoir une grande influence sur le fonctionnement des lignes de transport de l'énergie. Aux États-Unis, on a constaté des couches de givre de 40 mm. sur les conducteurs. Pour ne pas recourir à une construction prohibitive, on met en court-circuit un certain nombre de lignes, qu'on alimente avec des génératrices spéciales pour les échauffer à une température suffisante, pour éviter la formation du givre; les autres circuits reçoivent la charge nécessaire pour obtenir le même résultat.

Les éléments d'isolateurs à chaîne, à capacité, variant de façon à réaliser l'équirépartition de la tension, sont de plus en plus utilisés.

Sur les lignes à 220 000 volts, on est arrivé à ne plus faire usage ni du fil de protection à la terre ni des parafoudres; on s'en tient à la capacité considérable des lignes pour dissiper les décharges à haute fréquence.

On reconnaît, d'une manière générale, que l'emploi de moteurs synchrones sur les réseaux de distribution, et mieux de compensateurs synchrones à l'extrémité des lignes de transport, permet seul de maintenir entre le départ et l'arrivée une chute de tension faible, sinon nulle, et ceci à toutes charges et avec un facteur de puissance élevé. L'absence de compensation de la puissance active conduit à une variation de tension qui rend difficile ou même impossible l'interconnexion des centrales par les lignes. L'amortissement des installations de compensateurs synchrones s'effectue d'ailleurs assez vite par le jeu des économies réalisées en exploitation.

La question des isolateurs est d'une importance capitale pour la sécurité du fonctionnement des lignes à très haute tension. Elle soulève des problèmes qui relèvent, d'une part, du travail mécanique de la porcelaine, d'autre part, des propriétés isolantes de ce produit. Ces propriétés sont en dépendance étroite avec l'application d'une traction mécanique réduisant

les qualités électriques de l'isolateur. La répartition du potentiel le long des chaînes demande à être étudiée de très près en envisageant les procédés employés pour améliorer cette répartition et protéger la chaîne contre les effluves et les arcs.

M. Boucherot a tout récemment indiqué un nouveau mode de transmission par courants alternatifs dans lequel il préconise, pour certains cas, l'emploi de la transmission à impédance constante, dont nous donnons une relation plus loin.

Les liaisons téléphoniques dans les réseaux à haute tension viennent de s'enrichir d'un facteur nouveau, qui est celui de la téléphonie sans fil à ondes dirigées, qui a donné de bons résultats sur les lignes où elle a été employée.

Nous donnons ci-après les caractéristiques d'un transport d'énergie qui en résumant les conditions de fonctionnement dans l'état actuel des connaissances et de l'expérience acquises :

Puissance à transporter en kw.....	300 000
Tension à l'arrivée en kv.....	220
Fréquence.....	60
Longueur de la ligne en km.....	560
Lignes de pylônes.....	2
Circuits triphasés par pylônes.....	2
Section des conducteurs en mm ² (aluminium).....	305
Section de l'âme en acier en mm ²	39,5
Charge normale par circuit en kw.....	75 000
Charge maximum en kw.....	150 000
Facteur de puissance de la charge.....	0,85
Facteur de puissance au départ (charge normale).....	0,884
— — à l'arrivée —	0,983
— — — (charge maximum).....	0,894
Puissance nécessaire des condensateurs synchrones (charge normale) en kva.....	90 000
Pertes en ligne, charge normale, en kw.....	36 360
Pertes dans le fer des transformateurs (charge normale) en kw.....	6 000
Pertes dans les condensateurs synchrones (charge normale) en kw.....	3 600
Pertes totales (charge normale) en kw.....	45 960
Rendement de la transmission (charge normale)...	86,74

101. Inductance. Capacité et chute de tension. — L'inductance que présente une longue ligne de transmission est plus ou moins diminuée par la capacité de la ligne. Pour une ligne à deux conducteurs, la valeur de l'inductance L est donnée par l'expression :

$$L = \left(\frac{1}{2} + 4,605 \log \frac{D}{r} \right) 10^{-1} \text{ millihenrys.}$$

Pour une ligne triphasée et au cas où les trois conducteurs sont disposés dans un même plan :

$$L_g = L + \left(4,605 \log \frac{D_1}{D_2} \right) 10^{-1} \text{ millihenrys.}$$

Dans cette formule, L a la même valeur qu'avant ; D_1 est la distance entre les conducteurs extrêmes, et D_2 est la distance entre le conducteur du milieu et le conducteur extrême.

Lorsque l'espacement est le même entre les conducteurs extrêmes et le conducteur moyen ($D_1 = D_2$), la formule se réduit à :

$$L_g = L + 0,46 \log 2.$$

Quand les fils sont disposés en triangle, on a :

$$L_g = L + \left(2,3 \log \frac{D_{1,2} D_{1,3}}{D_{2m} D_{3m}} \right);$$

les indices des lettres indiquent les conducteurs auxquels se rapportent les distances.

Lorsque le triangle est équilatéral, la formule se réduit à :

$$L_g = L + 0,23 \log 3 = L + 0,011 \text{ millihenrys.}$$

L'effet corona que nous avons signalé au paragraphe précédent se produit autour de chacun des fils d'un champ magnétique dont la valeur à la distance R de l'axe du fil est approximativement :

$$H = \frac{U}{2R \log \frac{D}{r}}; \text{ en volts par centimètre;}$$

U tension entre fils, D leur éloignement et r leur rayon commun en centimètres.

A la surface extérieure des fils, ce champ a donc approximativement la valeur :

$$H = \frac{U}{2r \log e \frac{D}{r}}.$$

La perte d'énergie par effet corona peut se calculer par la formule suivante dérivée de celle de Faccioli :

$$P^1 = c \left[\frac{2}{\sqrt{3}} U - U^1 \right]^2;$$

$$\text{ou } P^1 = \frac{4}{3} c \left[U - \frac{\sqrt{3}}{2} U^1 \right]^2 = 1,33 c (U - 0,866 U^1)^2;$$

P^1 perte de puissance pour un conducteur d'une ligne triphasée, U tension de distribution, U^1 tension critique, c constante dépendant de la fréquence du courant et du diamètre des conducteurs.

La capacité d'une ligne de transmission d'énergie peut avoir une influence considérable sur la marche des alternateurs. Elle donne lieu, comme l'on sait, à l'existence d'un courant à vide, décalé en avant sur la force électromotrice, et à des courants de décharge très intenses au moment d'une rupture en charge ou en cas de fusion de fusibles. Elle peut aussi provoquer en certains points des relèvements de la tension, quand la ligne n'est pas chargée, par suite des conditions de résonance avec la self-induction du circuit. Par suite de sa capacité, la ligne exige un courant de charge de valeur déterminée pour maintenir la tension. Le courant à vide nécessité par la capacité se compose d'une composante énergéticque en concordance de phase avec la force électromotrice, qui compense les diverses parties de la ligne (effet Joule, pertes dans le diélectrique, etc.), et d'une composante énergéticque due à la capacité, qui est décalée d'un quart de période en avance,

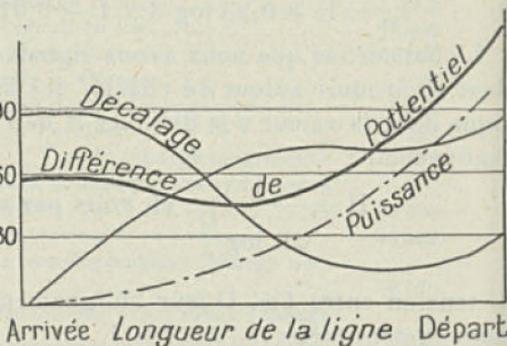


Fig. 177. — Caractéristiques du fonctionnement d'une ligne de transport de force.

par rapport à la force électromotrice de l'alternateur. A vide, celui-ci n'exige, pour obtenir la tension normale, qu'un courant d'excitation relativement faible, car c'est le courant de charge qui fournit le supplément. La figure 177 illustre les valeurs efficaces de l'intensité, de la différence de potentiel et du déca-

lage pour un cas pratique déterminé en supposant la ligne fonctionnant à vide. La courbe de puissance indique sa valeur moyenne en différents points de la ligne; cette valeur décroît progressivement en compensant les pertes en ligne.

Soient : C la capacité d'un conducteur cylindrique de rayon r , par rapport à un plan indéfini métallique qui lui est parallèle, cette distance étant représentée par $\frac{D}{2}$, cas identique à celui d'un conducteur ordinaire par rapport à la terre; on a pour la valeur de C , par unité de longueur, lorsqu'elle est exprimée en unités électrostatiques et que la ligne est aérienne dont la constante diélectrique est égale à l'unité, l'expression :

$$C = \frac{1}{2 \log e \frac{D}{r}}$$

Cette capacité a une valeur double de celle que le même conducteur présenterait par rapport à un autre conducteur parallèle placé symétriquement à la même distance $\frac{D}{2}$ du plan, mais du côté opposé, ayant une charge contraire à celle du premier. En rapportant la capacité au kilomètre de longueur (10^5 cm.) et en réduisant les logarithmes naturels en logarithmes décimaux, on a, pour une ligne triphasée :

$$C = \frac{0,0242 \cdot 10^{-10}}{2 \log 10 \frac{d}{r}} \text{ farads par kilomètre de conducteur;}$$

d et r en centimètres.

La capacité étant déterminée, on obtient la valeur de l'intensité du courant de charge dans le condensateur en appliquant la formule :

$$U_o = \frac{I_o}{\omega C} \text{ et l'on a : } I_c = \omega C U;$$

U valeur efficace de la différence de potentiel entre les armatures du condensateur, soit la différence de potentiel entre un conducteur et le centre de l'étoile (tension correspondant à une phase) pour une ligne triphasée; $\omega = 2\pi f$ (f fréquence).

Ceci s'applique au cas où la totalité de la capacité se trouve en un seul point sous la tension U ; mais elle est en réalité

répartie uniformément sur toute la longueur de la ligne. Ici les calculs sont longs et laborieux ; alors on a recours à la méthode graphique, par exemple pour le cas de la détermination de la valeur de la tension au départ, connaissant celle au point d'utilisation, étant admis que la capacité est placée en des points déterminés. Dans une ligne aérienne chargée, ayant de la capacité, on constate en chaque point de la ligne et pendant la durée d'une période des valeurs différentes pour l'intensité et la différence de potentiel.

Dans une ligne de transmission d'énergie électrique, la tension au départ doit être de valeur suffisante pour compenser les effets dus aux forces électromotrices de self-induction et d'induction mutuelle dans les conducteurs. La self a d'autant plus d'action que la ligne a une plus grande longueur et que les conducteurs sont plus éloignés les uns que les autres.

M. A. Blondel a fourni le premier le moyen de calculer la perte de tension produite par l'impédance des lignes par l'application de la formule :

$$u = \sqrt{\left(\frac{u'}{I} + \cos \varphi + \omega L \sin \varphi\right)^2 + (\omega L \cos \varphi - R \sin \varphi)^2}$$

u tension au départ de la ligne, u' celle à l'arrivée, R la résistance totale, I le courant et L l'inductance totale apparente.

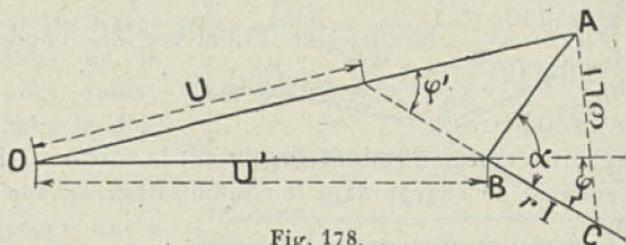


Fig. 178.

Le diagramme représenté par la figure 178 permet de déterminer facilement la chute de tension ($OA - OB$), l'angle de décalage φ entre le courant et la différence de potentiel, la tension u' étant donnée. Dans le cas d'une ligne à double fil, rI et ωLI sont doubles des valeurs pour un fil et, pour une ligne triphasée, rI et ωLI sont les valeurs trouvées pour un fil, mais u et u' sont les différences de potentiel étoilées et non entre fils.

En général, on s'arrange pour que les pertes soient très faibles, alors Bc est très petit et la chute de tension pouvant être prise égale à AB , on a :

$$u - u' = AB \frac{rI}{\cos \alpha}.$$

Dans ce cas, le rapport de la chute totale à la chute ohmique est : $\frac{1}{\cos \alpha}$. Quand $\cos \alpha$ est plus grand que $\cos \varphi$, le décalage à l'origine de la ligne est plus petit qu'à l'extrémité, et au cas contraire, il est plus grand ($\cos \varphi > \cos \alpha$), et alors, pour la même énergie à transmettre, l'intensité du courant doit être augmentée.

La chute de tension, en tenant compte de la capacitance, s'obtient au moyen de diagrammes dus à M. A. Blondel, ou méthodes graphiques que nous allons signaler.

La régulation de la tension en ligne est d'importance capitale. On peut la déterminer par la méthode suivante qui est assez simple. On a tout d'abord trois tensions à considérer : 1° tension aux bornes du circuit récepteur; 2° chute de tension en ligne; 3° tension au départ de la ligne. La chute de tension comprend la perte ohmique et la tension de réactance.

Le plus simple est de considérer le courant total des récepteurs comme composé de deux parties : la composante wattée et la composante déwattée, qu'on regarde chacune comme circulant isolément sur la ligne.

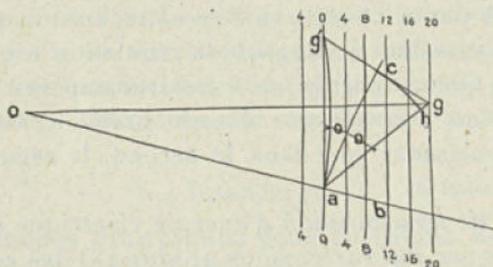


Fig. 179.

La composante wattée du courant récepteur est $I \cos \theta$ et celle déwattée $I \sin \theta$. Soit oa (fig. 179) la tension réceptrice (E), la chute de tension due à l'action de la résistance et de la réac-

tance de la ligne sur la composante wattée du courant récepteur est :

$$I \cos \theta \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$$

Dans la figure, ac représente en grandeur et en direction la tension perdue en ligne par la composante wattée du courant récepteur. On a aussi :

$$cg = I \sin \theta \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2},$$

qui représente en grandeur et en direction la tension perdue en ligne par la composante déwattée du courant récepteur. Le vecteur ag représente en grandeur et direction la tension perdue. Par suite og est la tension au départ (E_0) de la ligne, et ac figure la tension perdue en ligne par le courant de pleine charge. Si, de a comme centre et avec un arc de rayon égal à ac , on décrit un arc de cercle, pour une intensité de courant égale à celle de pleine charge, et un facteur de puissance correspondant à l'angle θ , la valeur de E_0 est donnée par oh . Enfin, si de O comme centre on décrit des arcs de cercle par les points $a, 4, 8, \dots$, la distance radiale entre deux arcs successifs sera de 4 p. 100 de la tension aux bornes du circuit récepteur. On voit par là que $ab = 8$ p. 100 de la tension réceptrice, c'est-à-dire que la perte RI^2 dans la ligne est de 8 p. 100 à pleine charge non inductive. La position du point c montre que la régulation de la ligne considérée, à pleine charge et pour un circuit de récepteur non inductif, est de 10 p. 100, c'est-à-dire que la tension au départ de la ligne doit être de 10 p. 100 plus élevée que la tension aux bornes réceptrices. A pleine charge, en kilowatts, à un facteur de puissance correspondant à l'angle θ , la régulation est de 20 p. 100 (point g); à pleine charge, en kilowatts-ampères, c'est-à-dire pour le même courant que dans le premier cas, avec même facteur de puissance que dans le second, la régulation est de 18 p. 100 (point h).

Les lignes de transmission d'énergie électrique peuvent être endommagées par des surtensions produisant des accidents dus à une action lente ou instantanée des phénomènes de surtension. Dans la première catégorie on relève les altérations des enroulements des machines, des isolants, des câbles. Les accidents dus à une action unique ou instantanée sont : les coups de foudre directs, les décharges à haute fréquence (les unes à haute ten-

sion par coups de foudre très voisins de la ligne, les autres à basse tension relative par les décharges conductives); les phénomènes de propagation à front raide et de grande amplitude; les phénomènes oscillatoires de grande amplitude quand la ligne se décharge comme un condensateur de faible capacité, et enfin les phénomènes statiques engendrés normalement dans des champs électriques terrestres et les phénomènes de résonance.

En résumé, on distingue les surtensions d'origine interne et celles d'origine externe, et comme phénomènes accidentels de surtension on doit citer: les courts-circuits, les arcs à la terre, les ruptures d'isolateurs, de fils, de câbles, les défauts d'isolement, les ruptures de coupe-circuits, les extra-courants. Quand la production d'une onde à front raide ou à grande fréquence détermine un claquage des bobines, on est en présence d'un cas grave, car il peut se produire un court-circuit dans la machine. La réflexion des ondes conduit d'ailleurs à des claquages fréquents des isolateurs en porcelaine, des interrupteurs, des transformateurs, des jonctions des lignes aériennes et des câbles souterrains.

Les élévations de tension dues aux décharges atmosphériques et à ses effets de résonance sont toujours brusques et très élevées. La période de résonance d'un circuit électrique est donnée par la relation :

$$T = \frac{2\pi}{1000} \sqrt{L.C.} = 0,00629 \sqrt{L.C.};$$

T période en secondes, L coefficient de self-induction en henrys et C capacité en microfarads. Si on ne tient compte que de la capacité du conducteur, on a, si l représente la longueur du conducteur en kilomètres, c' la capacité et l' le coefficient de self au kilomètre :

$$T = 0,00629 \sqrt{l'.c'}.$$

102. Méthodes graphiques pour le calcul des lignes de transmission d'énergie électrique. — La détermination des divers éléments entrant dans le calcul des lignes de transport de force donne lieu à des formules compliquées et laborieuses. Aussi a-t-on songé à utiliser des méthodes graphiques simplifiant les opérations tout en les rendant plus compréhensibles.

Pour se rendre compte de la propagation du courant le long du parcours des lignes, on les décompose en tronçons dont on détermine la résistance, la self, la capacité et au besoin les fuites, et l'on construit le graphique des courants et des tensions avec tous ces éléments. On a ainsi une vérification de la tension, de l'intensité et le moyen de suivre le phénomène en tous les points de la ligne. Ce qu'il s'agit de mettre en lumière, ce sont les effets secondaires, que l'on traduit à l'aide d'épures à grande échelle et avec le plus grand soin ; sans quoi on n'a de résultats que sur les effets principaux, ce que l'on se contente généralement de faire pour les lignes ordinaires.

M. Claveira a donné une méthode qui facilite considérablement les calculs quand on s'en tient à la détermination de la puissance à transmettre et du diamètre du conducteur.

M. A. Blondel a fourni des études d'un intérêt capital concernant les calculs relatifs aux caractéristiques qui régissent l'établissement et le fonctionnement des lignes à haute tension.

Nous ne pouvons ici que donner l'énumération de ces études traduites par des abaques : lignes de transmission à capacité variable ; lignes de transmission en tenant compte de la capacité et de la perdite réparties, en renvoyant le lecteur à notre ouvrage¹. Des applications pratiques illustrent ces données.

Nous signalerons aussi la méthode de M. P. Ferrier permettant d'avoir sur un seul graphique les variations des constantes de la ligne et de la distribution du courant en cours de route, les abaques de M. Barris, de Herdt, toutes questions exposées dans l'ouvrage précité dans le renvoi ci-avant.

Le lecteur pourra trouver à la même source de nombreux cas de calculs de transport d'énergie à longue distance.

L'abaque de M. Valensi permet de déterminer la réactance d'une ligne de transmission d'énergie électrique. Il part de la formule :

$$L \omega = 10^{-4} \left(0,5 + 4,604 \log \frac{D}{R} \right) \omega.$$

ω pulsation = $2\pi f$ (f fréquence) ; D distance du conducteur en centimètres ; R rayon du conducteur en centimètres.

1. *La Technique de la Houille Blanche*, tome III, 3^e édit., par E. Pacoret. Dunod éditeur, Paris.

L'échelle de gauche de l'abaque (fig. 180) porte une graduation d représentant le diamètre du conducteur en mm.; celle du milieu une graduation D représentant la distance du conducteur en cm., et celle de droite deux graduations, l'une représentant la réactance kilométrique $L\omega$ exprimée en ohms pour une fréquence de 50 p.-s., et l'autre le coefficient de self-induction totale exprimé en dix-millièmes d'henry.

Pour la construction de l'abaque, on trace sur AA' une échelle logarithmique de module ρ ; sur BB' une de module $\frac{\rho}{2}$ et sur CC' une de module C . En prenant sur l'échelle AA' une quantité L_1 , et sur l'échelle CC' une quantité L_2 , l'échelle BB' donnera le produit $L_1 L_2$. En conséquence, si on porte R rayon du conducteur sur la première échelle AA' , D distance des con-

Abaque pour le calcul de la réactance $L\omega$ pour $f = 50$ p.-s.

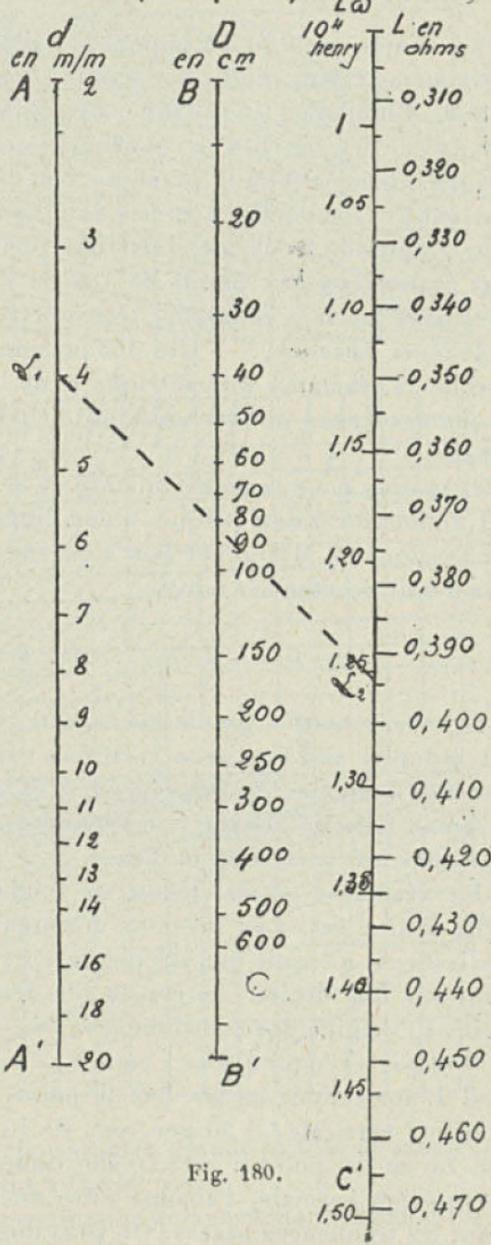


Fig. 180.

ducteurs sur l'échelle du milieu, une graduation régulière de l'échelle de droite donnera le logarithme $\frac{D}{R}$; en multipliant par 4,604 et ajoutant 0,5, on obtient la valeur de L en 10^4 henrys. Cette même valeur multipliée par $2\pi f$ donne la réactance.

MM. Blondel et Levanchy ont traduit leurs méthodes de calculs par des courbes en coordonnées cartésiennes auxquelles il faut finalement aboutir quand on veut résumer sous une forme pratique l'ensemble des régimes du fonctionnement d'une ligne de transmission d'énergie électrique pour choisir le régime le plus avantageux aux points de vue du rendement de la chute de tension ou de la puissance transportable.

Abaques Levanchy. — Ces abaques ont trait à la détermination de la réactance kilométrique et de la capacitance kilométrique des lignes de transmission d'énergie électrique à haute tension.

a) Abaque pour la détermination de la réactance.

L'induction kilométrique d'une ligne triphasée l a pour expression, en désignant par a le rayon des conducteurs et par d leur écartement moyen :

$$l = \left(0,5 + 2 \log e \frac{d}{a} \right) 10^{-4} \text{ henrys : km.} \quad (1)$$

La représentation graphique de cette relation à trois variables est indiquée sur le réseau cartésien constituant la partie médiane de la figure 181 qui reproduit en une réduction l'abaque original. Chaque courbe correspond à une valeur particulière attribuée à l'écartement moyen d .

La réactance ωl se déduit de l'inductance en multipliant celle-ci par $2\pi f$. Les inverses des fréquences sont portés en abscisses; il s'ensuit que les points correspondant à $2\pi f l = C^{te}$ sont sur une droite. Le réseau des droites ainsi tracées a un point à l'origine des coordonnées.

Soit par exemple : $a = 1$ cm.; $d = 7$ mm.; $f = 50$ périodes-sec. L'horizontale menée par le point A de l'abaque médian coupe la verticale $f = 50$ pér.-sec. de l'abaque de gauche en B. On lit en ce point : $\omega l = 0,426$ ohm-kilom. A cause de sa disposition spéciale, l'abaque offre une plus grande précision pour les fréquences basses. On peut donc, si l'on préfère, pro-

longer l'horizontale AB jusqu'à la verticale $f=25$ pér.-sec. Il suffit de lire la réactance en ce nouveau point B' et d'en dou-

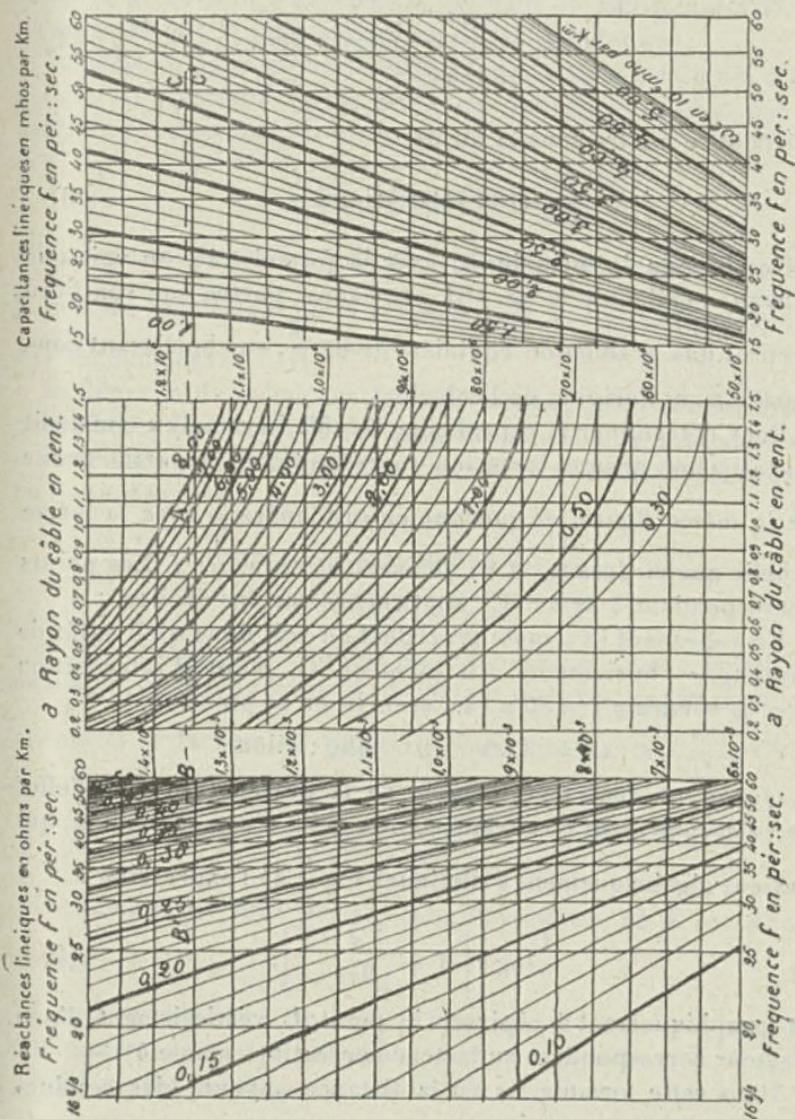


Fig. 181.

bler la valeur pour avoir une plus grande facilité de lecture, la réactance correspondant à $f=50$ p.-s.

b) Abaque pour la détermination de la capacitance kilométrique.

La capacité kilométrique d'une ligne triphasée c a pour expression approchée, quand on ne tient pas compte de l'effet du sol :

$$C = \frac{10^{-6}}{18 \log e \frac{d}{a}} \text{ farad : km.}, \quad (2)$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\frac{1}{C} = 10^6 \times 18 \times \log e \frac{d}{a}. \quad (3)$$

Comparons la formule (3) avec la formule (1), on voit que l'abaque médian de la fig. 181 peut aussi porter sur son bord vertical une graduation équidistante de $\frac{1}{C}$, en choisissant convenablement l'origine de l'échelle.

Pour déterminer la capacitance ωc , M. Levanchy a construit un troisième abaque cartésien représenté sur la partie droite de la même figure, en portant en ordonnées $\frac{1}{C}$ avec la même échelle que ci-dessus, et en abscisses la fréquence f . Les points correspondant à $2\pi/c = C^{10}$ sont encore sur des droites.

En reprenant l'exemple précédent on voit donc qu'il suffit de prolonger l'horizontale AB jusqu'en C, point d'intersection avec la verticale $f = 50$ p.-s., et on lit en ce point :

$$\omega c = 2,66 \times 10^{-6} \text{ mho : kilom.}$$

Quand on veut tenir compte de la présence du sol, l'effet de ce dernier peut être traité comme celui d'une correction, qui revient algébriquement à diminuer $\log \frac{d}{a}$ de l'expression :

$$\frac{1}{2} \log e \left[1 + \left(\frac{d}{2hs} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

et graphiquement à abaisser le point B verticalement d'une hauteur correspondant au facteur correctif (formule 4).

Dans cette formule, hs est la distance moyenne des conducteurs au sol.

Pour des hauteurs moyennes des conducteurs supérieures à 15 mètres, la correction est toujours négligeable.

103. Calcul d'une transmission d'énergie à haute tension.

— Nous donnons ci-après une étude d'un transport d'énergie d'après M. Baticle, dans une condition d'économie optimum. Le prix de revient à l'arrivée p est dans ce cas minimum, et on suppose que la puissance Q au départ est donnée.

La perte en ligne correspondant à la puissance maximum est : $y = \omega Q$ et appelant Q_m la puissance moyenne, la dépense à l'arrivée est mise sous la forme :

$$D = p_r Q_m + P_s + \beta E^n + \frac{\gamma Q}{\omega E^2}$$

$p_r Q_m$ dépense de production, P_s le prix des supports, $\beta E^n = P$ le prix de l'isolement de la transmission et $\frac{\gamma Q}{\omega E^2} = P_c$, le prix des conducteurs.

La dépense de métal, les frais de montage sont proportionnels à la section, laquelle est proportionnelle à la puissance et inversement proportionnelle au carré de la tension et à la perte en ligne. On a donc :

$$p_r = \frac{p_r Q_m + P_s + \beta E^2 + \frac{\gamma Q}{\omega E^2}}{Q_m (1 - \varpi_m)}$$

Si Q et ω désignent, au lieu de la puissance et perte relative maximum, la perte relative à un instant quelconque, on a, si la tension et le facteur de puissance sont constants : $\frac{\omega}{Q} = C^{te}$; donc on aura :

$$\frac{\omega_m}{Q_m} = \frac{\omega_{max.}}{Q_{max.}}$$

On pourra par suite écrire, dans l'hypothèse où E et $\cos \varphi$ varient peu : $P_c = \frac{\gamma Q_m}{\omega_m E^2}$.

L'expression de p_r' ne dépend ainsi que de ω_m . On cherche le minimum de p_r' , les variables indépendantes étant E et ω_m .

En dérivant par rapport à E , on a la condition :

$$n \beta E^{n-1} = \frac{2\gamma Q_m}{\varpi_m E^3} \quad \text{ou} \quad \frac{n}{2} P_1 = P_c.$$

En écrivant par rapport à ω on aura :

$$\frac{p_r Q_m + P_s + \beta E^n + \frac{\gamma Q_m}{\omega_m E^2}}{1 - \varpi_m} = \frac{\gamma Q_m}{\omega_m^2 E^2}.$$

Cette équation peut s'écrire :

$$p_r Q + P_s + P_i + P_c = \frac{P_c}{\varpi_m} (1 - \omega_m).$$

Si on tient compte de la valeur de P_i trouvée ci-dessus on a :

$$p_r Q_m + P_s + \frac{2}{n} P_c + P_c = \frac{P_c}{\varpi_m} (1 - \omega_m).$$

D'où :

$$P_c = \frac{n}{2} P_i = \frac{p_r Q_m + P_s}{\frac{1}{\varpi_m} - 2 - \frac{2}{n}}.$$

On peut tirer de ces équations la valeur de deux variables indépendantes ω_m et E . Elles s'écrivent en posant :

$$p_r Q_m + P_s = \alpha, \text{ partie fixe de la dépense :}$$

$$\frac{\gamma Q_m}{E^2} \frac{1}{\omega_m} = \frac{n}{2} \beta E^n = \frac{\alpha}{\frac{1}{\varpi_m} - 2 - \frac{2}{n}}.$$

On tire enfin :

$$\frac{1}{2\alpha} (2\gamma Q_m)^{\frac{n}{n+2}} (\beta n)^{\frac{n}{n+2}} = \frac{\omega_m \varpi_m^{\frac{n}{n+2}}}{1 - \omega_m \left(2 + \frac{2}{n}\right)}.$$

On peut facilement supposer $n = 1$.

Dans ces conditions on peut écrire :

$$\frac{1}{\alpha} \sqrt[3]{\frac{\gamma Q_m \beta^2}{4}} = \frac{\varpi_m}{1 - 4\omega_m} \sqrt[3]{\omega_m} = f(\omega_m);$$

et on aura :

$$E = \sqrt[3]{\frac{2\gamma Q_m}{\beta \varpi_m}}. \quad (1)$$

On peut calculer une fois pour toutes la valeur de $f(\omega_m)$ en fonction de ω_m , comme le montre la table ci-après :

ϖ_m	$f(\varpi_m)$	ϖ_m	$f(\varpi_m)$
0,01	0,00225	0,10	0,077
0,02	0,00590	0,15	0,195
0,05	0,02630	0,20	0,585

On voit que la condition d'économie conduit toujours à une perte moyenne inférieure à 25 p. 100. Si ω_m est donné ou ω , la formule (1) donne toujours la tension économique.

En résumé la portée économique d'une installation de transmission est proportionnelle au cube de la tension et inversement proportionnelle à la puissance à transmettre, la perte relative consentie étant donnée a priori.

Application. — Soit une ligne existante transportant à 20 kilomètres sous tension de 30 kilovolts une puissance maximum de 2000 kilowatts et 1500 kilowatts, puissance moyenne. La perte moyenne est de 2 p. 100, le $\cos \varphi$ est égal à 0,8 et le prix de la ligne de 200 000 francs (supports 50 000 fr., isolement 50 000 fr. et cuivre 100 000 fr.).

On doit déterminer la tension et la perte moyennes pour que le prix du kilowatt moyen à l'arrivée soit minimum. On a :

$$P_r Q_m = 2000 \times 1500 = 3\,000\,000$$

$$P_s =$$

$$\frac{50\,000}{3\,050\,000} = 3,05 \times 10^6.$$

$$\alpha =$$

$$\beta E = 50\,000; \beta = \frac{50\,000}{30} = \frac{5}{3} \times 10^3.$$

$$\frac{\gamma Q_m}{0,02 \times 30^2} = 100\,000 \text{ et } \gamma Q_m = 100\,000 \times 900 \times 0,02 = 1,80 \times 10^6$$

$$\begin{aligned} \text{On aura : } f(\omega_m) &= \frac{1}{3,05 \times 10^6} \sqrt[3]{\frac{2 \times 1,80 \times 10^6 \times 5^2 \times 10^6}{4 \times 3^2}} \\ &= \frac{1}{3,05} \sqrt[3]{2,5} = 0,0044. \end{aligned}$$

En interpolant, d'après le tableau de $f(\omega_m)$, on trouve :

$$f(\omega_m) = 0,016 \text{ et : } E = \sqrt[3]{\frac{2 \times 1,80 \times 10^6 \times 3}{5 \times 10^3 \times 0,016}} = 52 \text{ kv.}$$

$$\text{Prix de l'isolement : } P_i = 52 \times \frac{5}{3} = 86\,000 \text{ fr.}$$

$$\text{Prix du cuivre : } P_c = \frac{1,84 \times 10^6}{0,016 \times 52^2} = 43\,000 \text{ fr.} = 1/2 P_i.$$

Le gain est de 14 fr. par kilowatt.

Le prix de la ligne n'est donc plus que de 179 000 fr. Les conditions à observer d'après la règle de M. Baticle se résument

comme suit : a) si la perte relative d'énergie est donnée, la tension économique est telle que l'on ait la relation : prix des conducteurs égale prix de l'isolement $\times \frac{n}{2}$ (n est l'exposant auquel il faut élever le rapport des tensions pour avoir le rapport du prix d'isolement); b) si la tension est donnée, la perte relative d'énergie doit être telle que l'on ait : prix des conducteurs égale dépense totale \times perte moyenne relative à la puissance reçue; c) si l'on veut déterminer à la fois la perte relative et la tension économique, on doit combiner ces deux règles.

II. — Supports des lignes.

104. Tension mécanique des conducteurs. Calculs. Abaques. — Un bon principe en fait d'établissement des lignes aériennes est de calculer la tension des conducteurs pour la portée maximum et de la conserver pour les autres portées, et ce sont les flèches qui deviennent l'élément variable.

En pratique, on néglige la différence, assez faible d'ailleurs, entre les tensions du fil aux divers points d'une même portée et l'on base les calculs sur la tension au point le plus bas du fil qui prend à peu près la forme d'une chaînette.

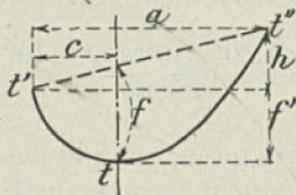


Fig. 182.

Soient t la tension unitaire (fig. 182) en kg. par millimètre carré; elle est la même quel que soit le diamètre du fil et elle ne dépend que de la densité, de la portée et de la flèche; p la portée en mètres (distance entre les supports supposés de niveau); f la flèche en mètres; δ la densité du métal employé (8,91 pour le cuivre et pour l'aluminium); dans le cas où on ne considère que le poids propre du fil et que la température est invariable, on a :

$$t = \frac{\delta \times p^2}{8000 \times f} \quad (1)$$

Pour déterminer la surcharge due au vent ou la tension unitaire résultante, on peut prendre la formule :

$$t = \frac{\delta' p^2}{8000 f^i} \quad (2)$$

δ' la densité fictive provenant de l'effet du vent sur le fil. On peut poser : $K = \frac{\delta'}{\delta}$. Alors la formule (2) s'écrit :

$$t = \frac{K \delta p^2}{8000 f^2}$$

L'influence de la variation de température se traduit par un allongement ou un raccourcissement du fil. Soient θ_1 degrés la température moyenne au moment de la pose du fil ; si la température croît et devient θ_2 , le fil s'allonge proportionnellement à la différence $\theta_2 - \theta_1 = \Delta\theta$, au coefficient de dilatation linéaire ($\omega = 0,000017$ pour le cuivre et $0,00023$ pour l'aluminium, et à la longueur primitive du conducteur l .

La nouvelle longueur l' est déterminée par l'expression :

$$l' = l (1 + \omega \Delta\theta).$$

La longueur l étant donnée par la formule :

$$l = p + \frac{8f^2}{3p},$$

on a :

$$l' = \left(p + \frac{8f^2}{3p} \right) (1 + \omega \Delta\theta).$$

Dans le cas d'une diminution de température, on a :

$$l' = \left(p + \frac{8f^2}{3p} \right) (1 - \omega \Delta\theta),$$

si l'on prend $\Delta\theta$ en valeur absolue ; c'est-à-dire qu'il faut prendre $\Delta\theta$ avec son signe.

Pour un calcul approché, on se donne p et f et on en déduit t par la formule :

$$t = \frac{\delta p^2}{8000 f^2}$$

Pour la surcharge due au vent on a :

$$t_k = \frac{K \delta p^2}{8000 f^2}$$

Pour la variation de température on prend :

$$l' = \left(p + \frac{8f^2}{3p} \right) (1 + \omega \Delta\theta);$$

on en déduit la flèche f' par la formule :

$$f' = \sqrt{\frac{3p}{8}(l' - p)}$$

déduite de $(l = p + \frac{8f^2}{3p})$ où l'on remplace l par l' et f par f' .

Cette flèche f' détermine la nouvelle tension t' que l'on tire de la formule :

$$t_k = \frac{K\delta p^2}{8000f'}$$

Ces diverses tensions (t , t_k et t'_k) doivent satisfaire aux conditions que nous signalons plus loin.

M. Blondel a donné dans son abaque universel (fig. 183) une expression graphique des tensions des fils de cuivre en fonction des portées, des flèches, des surcharges et des températures, en tenant compte de l'élasticité, ce dernier élément n'intervenant pas dans les formules ci-avant, à l'effet de les rendre plus simples.

Cet abaque est la représentation graphique de l'expression :

$$\omega\Delta\theta = \frac{p^2\gamma^2}{24} \left(\frac{1}{t'^2} - \frac{1}{t^2} \right) - \lambda(t' - t);$$

λ coefficient d'allongement = 0,000078 pour le cuivre.

Il faut en réalité calculer la tension du fil dans les conditions suivantes :

Fil tendu sous l'action de son propre poids (tension de pose aux diverses températures); fil tendu à la température moyennée de la région avec vent de 72 kg. par mètre carré de section longitudinale des pièces à section circulaire (hypothèse A de l'Administration); fil tendu à la température minimum de la région avec vent de 18 kg. par mètre carré de section longitudinale des pièces à section circulaire (hypothèse B de l'Administration).

Dans l'hypothèse la plus défavorable, c'est-à-dire celle où la tension est la plus forte, si q est la charge de rupture en kilog. par millimètre carré et t la tension du fil, le quotient $\left(\frac{q}{t}\right)$ ou coefficient de sécurité C ne doit pas être inférieur à 3 ou à 5 suivant que le fil est en traversée ou en alignement le long des routes; ces chiffres correspondent à $q = 15$ kg.

Pour calculer le coefficient de surcharge $\left(k = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)$, appelons d

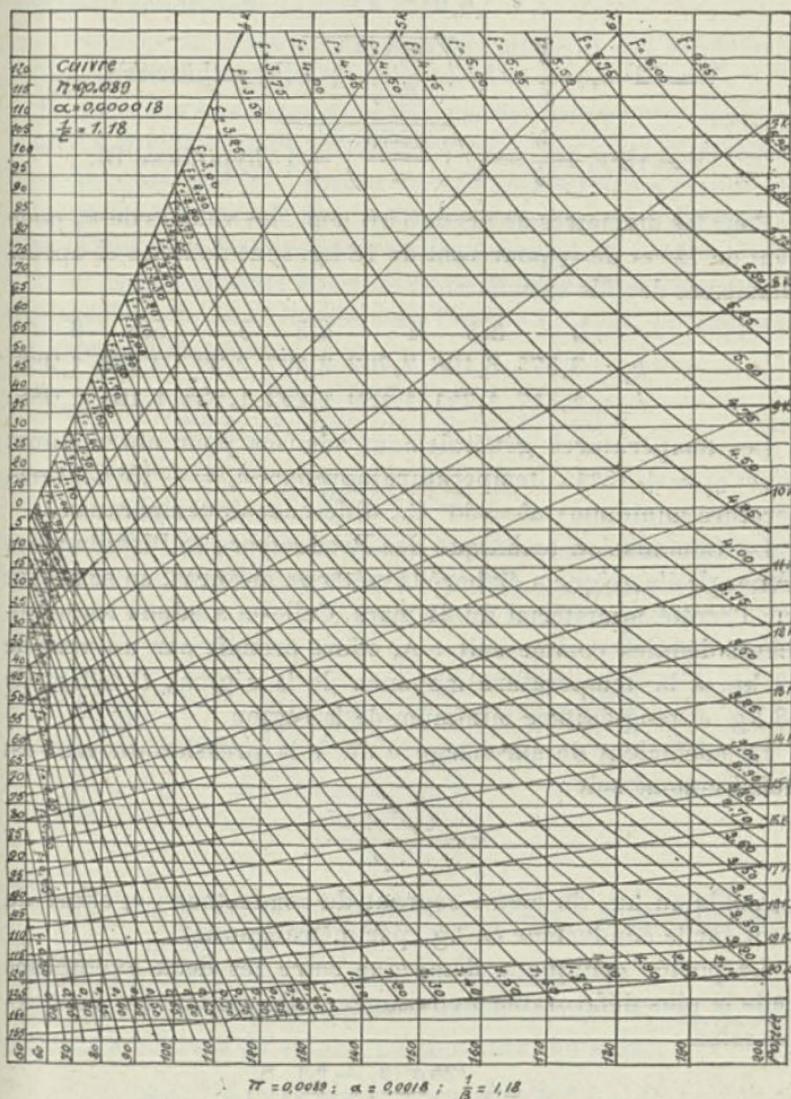


Fig. 183. — Abaque Blondel pour le calcul des flèches des inducteurs.

le diamètre du fil en millimètres, s sa section en millimètres carrés, V l'effort du vent en kg. par mètre carré de section lon-

gitudinale, on a :

$$k = \frac{\delta'}{\delta} \sqrt{\left(\frac{dV}{8,91 \times s}\right)^2 + 1} \quad \text{ou :}$$

$$V = 72^k k_1 = \frac{\delta'}{\delta} = \sqrt{\left(\frac{10,3}{d}\right)^2 + 1} \quad (\text{hypothèse A});$$

$$V = 18^k k_2 = \frac{\delta'}{\delta} = \sqrt{\left(\frac{2,575}{d}\right)^2 + 1} \quad (\text{hypothèse B}).$$

Pour les diamètres de fils de 3 à 6 mm., les valeurs de k_1 pour vent de 72^k et de k_2 pour vent de 18 kg. sont données ci-après. Diamètres des fils en mm. :

	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
k_1 :	3,575	3,108	2,762	2,497	2,29	2,123	1,986.
k_2 :	1,317	1,241	1,189	1,152	1,124	1,104	1,088.

Les températures généralement admises pour notre climat sont : $\theta_1 = +15^\circ \text{C.}$, température moyenne; $\theta_2 = -15^\circ \text{C.}$, température minimum; $\Delta\theta = 30^\circ \text{C.}$, différence de température.

La Commission technique des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique a élaboré la méthode ci-après, en se basant sur l'arrêté ministériel du 21 mars. Celle-ci a admis les hypothèses définies comme suit : A, effort produit par un vent de 72 kg. à la température moyenne de la région; B, effort de 18 kg. et température minimum de la région.

Le coefficient de surcharge σ dû à la pression du vent est défini comme suit :

$$\sigma = \frac{\sqrt{p^2 + v^2}}{p};$$

p , poids en kg. du mètre courant du conducteur; v , effort du vent sur le conducteur en kg. par mètre courant.

La portée critique x détermine entre les deux hypothèses celle la plus défavorable à envisager; elle est fournie par l'expression :

$$x = \sqrt{\frac{24a (\theta_1 - \theta_2) S}{(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) 10^{-6} \tau \delta}};$$

x portée critique en mètres, a coefficient de dilatation du métal employé, θ_1 température moyenne de la région, θ_2 température minimum, σ_1 effort du vent selon une des hypothèses

et v_2 selon l'autre hypothèse, τ tension unitaire maximum en kg : mm², S section droite du conducteur en mm² et δ diamètre du conducteur en mm.

Au-dessus de la portée x , c'est l'hypothèse A qui est défavorable; au-dessous, c'est l'hypothèse B.

La pose des conducteurs se détermine comme suit. Connaissant les coefficients de surcharge σ_1 et σ_2 des deux hypothèses A et B, ainsi que x , l'abaque de Blondel servira à établir les valeurs des tensions et des flèches de pose pour les différentes températures et les diverses portées prévues.

Pour la composante horizontale de la tension dans le cas du déplacement de la chaînette sous l'action du vent, on adoptera les formules suivantes :

$$\sin g = l \frac{\sqrt{p^2 + v^2}}{2ts}; \quad \text{tg } f = \text{tg } g \sin \alpha$$

et
$$\tau = 2tS \sin \left(f + \frac{\beta}{2} \right).$$

Les différentes valeurs indiquées dans ces formules sont spécifiées sur les dessins de la figure 184 ci-après :

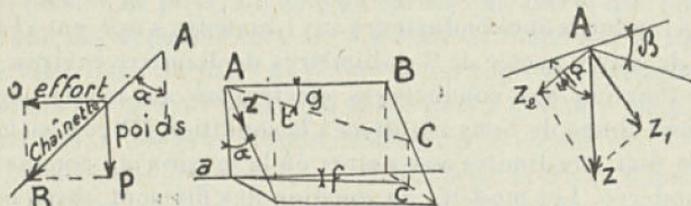


Fig. 184.

Z effort d'un fil sur le support en A, β angle supplémentaire du tracé au point A de la ligne.

Dans chacune des hypothèses on connaît v et t .

Soient : H la hauteur hors du sol du poteau, h_1, h_2, h_n les hauteurs au-dessus du sol des conducteurs, on aura :

$$ZH = Z_1 h_1 + Z_2 h_2 \dots + Z_n h_n = \sum_{i=1}^{i=n} Z_i h_i;$$

d'où
$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Z_i h_i}{H}.$$

En particulier pour n fils identiques, l'effort au sommet est :

$$Z = Z \frac{\sum h_i}{H}$$

On connaît Z ou Z_1 et on peut à l'aide des formules calculer les efforts de Z reportés au sommet et dus aux conducteurs pour les diverses portées l et les différents angles β dans le cas le plus défavorable.

105. Nature des conducteurs. — Dans les transports à très haute tension on est conduit à employer des conducteurs en cuivre avec âme en chanvre, à cause de l'effet corona. Une construction rationnelle des lignes exige autant que possible l'égalité de toutes les portées, car si les tensions unitaires à une température donnée peuvent être les mêmes dans toutes les travées, elles deviennent différentes dès que la température change.

Si on a des portées inégales, il faut n'y arriver que graduellement, de manière à reporter la différence sur une ou plusieurs portées adjacentes.

La disposition et la plantation des poteaux et pylônes se font comme il est expliqué plus loin.

Les ligatures des conducteurs aux isolateurs s'opèrent à l'aide de fil de cuivre recuit de 3 millimètres de diamètre environ.

La jonction des conducteurs électriques au moyen de la soudure donne de bons résultats à la condition d'être bien faite, et elle doit être limitée aux points où la tension du conducteur est modérée. Les modèles de jonction des fils sont assez nombreux, mais le manchon à cônes est un des plus employés.

Les jonctions des fils aériens en aluminium sont assurées par les épissures ordinaires sans le secours de la soudure ou par des manchons en aluminium mi-plat, et on soumet le tube à une torsion lors de la pose. Pour les ligatures, on emploie des attaches plates ou rondes, graissées à l'huile de vaseline neutre.

L'accroissement de diamètre et de section de l'aluminium, à égalité de distance entre fils, diminue l'inductance de la ligne qui abaisse la self-induction et permet de réduire notablement les pertes entre conducteurs à travers l'air par effet corona.

Les longues portées permettent l'amélioration de l'isolement électrique de la ligne, des expropriations moins coûteuses et

une meilleure répartition des chaînettes pour l'équilibrage des tensions des lignes.

Il est bon, dans les lignes de transport de force, d'admettre une distance d'au moins 10 mètres pour les fils les plus bas par rapport au sol et de faire supporter la ligne téléphonique par des poteaux distincts.

L'établissement des conducteurs se faisant autant que possible par un temps calme et à une température plus élevée que la température minimum, il est nécessaire de calculer la tension à donner à la pose ou celle que l'on fait marquer par le dynamomètre en tenant compte des excès de pression qui intervien-

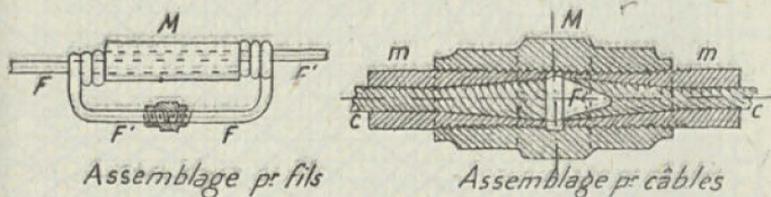


Fig. 185. — Ligatures et joints pour conducteurs aériens.

nent du fait des intempéries atmosphériques, et qui, ajoutés à la tension de pose, donnent un chiffre qui, autant que possible, ne doit pas dépasser celui de 8 à 9 kilog. Selon que la ligne est installée dans un pays de plaine ou en pays de montagne, c'est l'action des grands vents qui est le plus à craindre dans le premier cas, et les plus grands froids dans le second cas.

La méthode qui consiste à déterminer la flèche d'une partie de ligne en faisant osciller transversalement et en comptant les oscillations est plus commode que la détermination directe à l'aide d'un dynamomètre, en raison des secousses dues aux mouvements de la ligne qui déplacent continuellement l'aiguille de l'instrument. La ligne doit osciller d'un bloc et non être partagée en un certain nombre d'harmoniques supérieures; l'amplitude de l'oscillation ne doit pas dépasser 10° de chaque côté de la verticale. Les fils éroulés possèdent une résistance mécanique à la rupture double de celle des fils recuits, mais ils offrent moins de malléabilité pour la tension des conducteurs. Un fil supérieur à 8 millimètres de diamètre se tend mal, et on emploie rarement des câbles d'une section plus forte que 100 millimètres carrés, en raison de la difficulté pour les tendre

et de l'emploi d'isolateurs de trop grandes dimensions. Au-dessus, on dédouble la ligne. Pour les traversées des fleuves ou les grandes distances, on constitue les conducteurs par un fil ou câble d'acier.

M. Dussaugéy a dressé l'abaque (fig. 186). Dans cet abaque, le poids spécifique π_a est de 0,0027, le coefficient d'élasticité $E_a = 6,75 \times 10^3$ et le coefficient de dilatation $\alpha_a = 0,00023$.

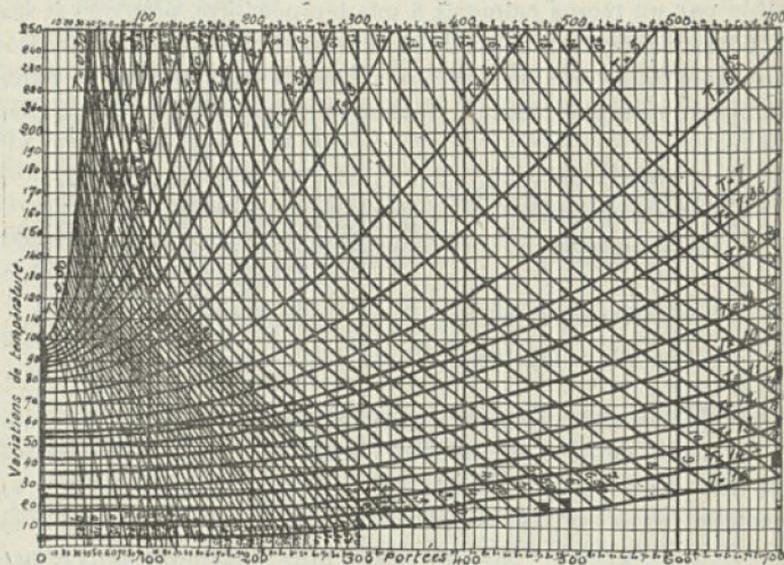


Fig. 186.

D'autre part, M. L. Potin a établi des monogrammes offrant le précieux intérêt d'obtenir à vue les valeurs des flèches prises par les conducteurs, au moment de la pose, de la nouvelle tension et de la nouvelle flèche correspondant à l'état de température du vent.

106. **Installation des conducteurs des lignes.** — Les canalisations électriques de transport de force doivent être étudiées et construites avec un soin spécial. L'effet des conditions climatiques est relativement plus grand pour les fils fins que pour les gros, et dans les mêmes conditions de flèche et de tensions initiales, le fil le plus fin ne donnera pas autant de sécurité qu'un fil plus gros. En ce qui concerne les conducteurs en alu-

minium, leur limite d'élasticité étant inférieure à 40 p. 100 à celle du cuivre, et les effets de dilatation étant plus importants, il s'ensuit qu'ils doivent être moins tendus qu'avec le cuivre, que la force latérale sur les poteaux de lignes et les tiges d'isolateurs due à la pression du vent est de 25 p. 100 inférieure avec les fils d'aluminium et que la force de traction sur les poteaux d'angle provenant de la tension des fils est aussi plus grande, abstraction faite de l'effet du vent.

La distance entre conducteurs est généralement calculée de telle sorte qu'en multipliant par 3,75 la tension en milliers de volts, on obtienne la distance en centimètres à laisser entre fils; cette règle semble donner toute sécurité au point de vue des décharges et pour des poteaux écartés de 30 à 70 mètres. Les chiffres suivants peuvent être pris pour une première approximation en ce qui concerne l'écartement des conducteurs :

20 000 volts	60 à 80 mètres	0·60 à 0·80
30 000 —	80 à 100 —	0·80 à 1·00
40 000 —	70 à 110 —	1·00 à 1·20
50 000 —	75 à 120 —	1·10 à 1·30
60 000 —	80 à 125 —	1·20 à 1·40

Le point de départ d'une ligne doit être assuré par un poteau de grande résistance pouvant supporter, comme les poteaux d'arrêt, toute la tension des câbles. En terrain plat on fait des ligatures sur les isolateurs tous les trois ou quatre poteaux, et en terrain en pente, à tous les poteaux. Lorsque les poteaux ne sont pas en ligne droite, si on appelle r le rayon de la courbe, T les tensions exercées des deux côtés, F la résultante de ces efforts, la distance limitée l_m est donnée par l'expression : l_m

$$= r \frac{F}{T}$$

De préférence on doit choisir pour le tracé des canalisations les lignes de plus grande pente du terrain, et une fois le tracé fixé et la longueur de la portée moyenne déterminée, on procède au piquetage préalable de la ligne, opération qui demande beaucoup de soin, de conscience et d'intelligence. On doit éviter de traverser les grands bois et de placer les poteaux en contrebas d'éboulis ou de rochers peu stables. Les lignes traversant les rivières sont subordonnées au mode de navigation, à laquelle

ils ne doivent apporter aucune gêne ou entrave; partout où il existe un chemin de halage, on ne peut planter ni clore qu'à 9^m,75 du halage et qu'à 3^m,25 sur le bord opposé. La hauteur minimum des fils au-dessus des plus hautes eaux navigables est de 8 mètres.

L'Administration ne tolère l'entreprise des lignes de chemins de fer que dans des cas exceptionnels. Le mieux d'ailleurs est de les éviter autant que possible, tant en traversée qu'en bordure. L'angle de traversée ne doit pas dépasser 30° et les conducteurs doivent être à deux mètres au moins des lignes télégraphiques ou téléphoniques existantes.

Lors de l'étude du piquetage, il est bon de consigner sur un carnet toutes indications relatives à la configuration du terrain, du climat des régions traversées, des fondations des appuis, à l'élagage des arbres et aux autorisations à demander soit aux propriétaires, soit aux administrations civiles et militaires.

On sait qu'en Amérique des portées considérables entre appuis, atteignant 2 kilomètres environ, ont été réalisées pour effectuer le franchissement de lacs ou de cours d'eau importants. Il est intéressant à cet égard de se rendre compte des portées admissibles en fonction de la charge de sécurité et du poids par unité de longueur de câble, en tenant compte de la surcharge additionnelle due à la neige et à la glace d'après les règlements en vigueur. Le tableau suivant peut servir de guide pour une telle évaluation.

Matière charge de sécurité en kg. cm ² section en mm ² .	Fer. 1 600	Acier. 2 000	Aluminium. 900	Cuivre. 1 600
	Portée en mètres.			
25	820	1 010	570	780
150	1 690	2 090	2 090	1 560
240	1 910	2 360	1 960	1 740
310	2 020	2 480	2 170	1 830

La flèche dans chaque cas atteint un tiers environ de la portée correspondante, soit 700 mètres pour une distance d'appuis de 2000 mètres environ; ce chiffre peut être réduit à 150 mètres environ si l'on utilise de l'acier ou du bronze de résistance élevée (charge pratique 4000 kg. par cm²).

107. **Poteaux en bois.** — Les principaux bois injectés qu'on utilise pour les poteaux servant de supports aux fils aériens électriques sont : le sapin, le pin et le chêne pour les traverses.

En Amérique, on emploie plus particulièrement le cèdre, dont la durée est très longue. Les poteaux doivent non seulement résister aux efforts qui proviennent de la traction propre des fils combinée avec le vent, la température ou la neige, mais encore supporter sans affaiblissement les effets des intempéries climatologiques.

Les procédés de conservation des poteaux consistent en principe à introduire dans les pores du bois une solution antiseptique qui a pour effet principal de diminuer considérablement la combustion lente de la substance ligneuse, cause de destruction quand le bois est exposé à l'air libre.

Les injections sont pratiquées soit avec de la créosote, soit avec du sulfate de cuivre, soit avec du bichloruré de zinc ou avec un mélange de chlorure de zinc et de créosote. On s'adresse aussi au chlorure de mercure (kyanisation), à la carbonisation, à l'immersion dans un bain de paraffine, à l'injectol, mélange d'hydrocarbures et de produits antiseptiques.

L'imprégnation a lieu soit par infiltration, soit par immersion en vase clos.

108. **Calcul des poteaux en bois et des ferrures.** — Dans le cas d'un alignement droit, les tensions n'intervenant pas, on n'a à considérer que l'effort du vent sur les poteaux et l'effort du vent sur les fils.

Pour tenir compte du cas de rupture des fils d'un côté du poteau et de la pourriture du bois, on prend un coefficient de sécurité $c \geq 10$. Appelons V effort du vent en kg. par mètre carré de surface plane diamétrale, D diamètre du poteau à l'encastrement en mètres, V_p effort du vent sur le poteau; on a :

$$V_p = \frac{D+d}{2} H.V. \text{ kg.};$$

d diamètre du poteau à l'extrémité, en mètres.

Et si h_p est la hauteur hors sol du centre de gravité de la partie hors sol du poteau :

$$h_p = H - H \frac{D+d}{3(D+d)}.$$

Le moment fléchissant M_p à l'encastrement est dû à l'effort du vent sur le poteau :

$$M_p = V_p h_p \text{ (kg. m.)}; M_p = H^2 \left[V \frac{D+d}{2} \left(1 - \frac{D+2d}{3(D+d)} \right) \right].$$

Pour les efforts du vent sur les fils soient :

V_1 et V_2 l'action du vent en kg. par mètre carré de surface diamètre dans les hypothèses A et B (§ 104) et on prend le cas le plus défavorable; h_g la hauteur du centre de gravité du polygone dont les sommets sont constitués par les isolateurs; M_f le moment fléchissant correspondant et V_f l'effort du vent sur les conducteurs, on a :

$$V_f = l \sum_{i=1}^{i=n} 0,00 \delta_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right), \delta_1 \text{ diamètre des fils en mètres ;}$$

$$M_f = lh_g \sum_{i=1}^{i=n} \delta_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) 10^{-1} \text{ et } M_t = M_p + M_f = lh_g \sum_{i=1}^{i=n} \delta_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) 10^{-3} +$$

$$VH^2 \frac{D+d}{2} \left(1 - \frac{D+2d}{3(D+d)} \right).$$

Si les conducteurs sont identiques, on a :

$$lh_g \sum_{i=1}^{i=n} \delta_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) 10^{-3} = n lh_g \delta 10^{-3}$$

Le module de la section à l'encastrement est :

$$\mu = \frac{\pi D^3}{32}.$$

Et le travail du bois est donné par :

$$\frac{M_t}{\mu} 10^{-4} \text{ kg./cm}^2.$$

Le coefficient de sécurité est fourni par la relation :

$$\frac{\theta \mu}{M_t}, \theta \text{ résistance des bois à la rupture.}$$

Pour les poteaux d'angle, nous représentons par α les angles minima pour lesquels on peut utiliser un poteau seul sans hauban ni contre-fiche et où la fatigue du bois est plus petite que la contrainte maximum. On suppose que les parties adjacentes sont réduites et égales entre elles.

L'effort de tension a pour valeur :

$$2 \sum_{i=1}^{i=n} t_i S_i \sin \left(f_i + \frac{\beta}{2} \right) \text{ (vent compris).}$$

L'effort du vent sur le poteau est V_p .

Les moments fléchissants correspondant à l'encastrement ont pour expression :

$$M_t = 2h_t \sum_{i=1}^{i=n} t_i S_i \sin \left(f_i + \frac{\beta}{2} \right) V_p h_p;$$

h_t hauteur au-dessus du sol du centre du polygone constitué par les isolateurs, avec les efforts de tension sur les fils appliqués en chaque sommet.

Étant donnée la grande valeur du coefficient de sécurité qui a été pris, on peut ne se préoccuper que de f , et alors :

$$M_t = 2h_t \sum_{i=1}^{i=n} t_i S_i \cos \frac{\alpha}{2} + M_p; \quad \text{d'où : } \frac{\cos \alpha}{2} = \frac{M_t - M_p}{2h_t \sum_{i=1}^{i=n} t_i S_i}.$$

L'équation d'équarrissage est :

$$M_t = \frac{I}{D} \theta = \frac{\pi D^3}{32} \theta.$$

Donc :

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{\pi D^3 \theta - 32 [+M_p]}{64 h_t n S}.$$

Pour un poteau donné et une ligne donnée, on obtient :

$$\frac{\pi D^3 \theta - 32 [+M_p]}{64 h_t n S} = A = C^{10} \text{ et } \frac{\cos \alpha}{2} = A \frac{1}{t}. \quad (1)$$

Pour chaque type de poteau prévu et chaque valeur de la portée l , on calcule A . On connaît t par la formule (1) on a $\frac{\cos \alpha}{2}$ et par suite α .

Si cet angle α du tracé dépasse les valeurs limites trouvées, on a recours à une jambe de force, à un hauban ou à deux poteaux jumelés. On peut admettre que l'effort maximum que l'on fait supporter à un poteau d'angle est celui appliqué dans le cas où $\alpha = 90^\circ$.

De plus on admet que les parties adjacentes sont égales et on néglige l'angle f .

Les deux tensions actives ont pour valeur commune :

$$\sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i.$$

Et la valeur résultante a pour expression :

$$\sqrt{2} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i.$$

Soient (fig. 187) L la distance du pied de la jambe de force à l'axe du poteau et h_j la hauteur hors du sol du point d'appui de la jambe contre le poteau, la résultante R a pour valeur :

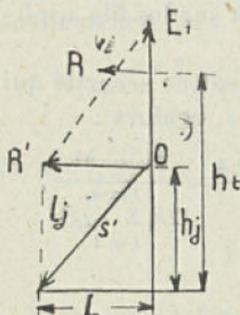


Fig. 187.]

$$R = \sqrt{2} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i, \text{ et elle est à } h_i \text{ de la base.}$$

Mais on peut remplacer son action par la force R' :

$$R' = \sqrt{2} \frac{h_i}{h_j} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i, \text{ appliquée en } o.$$

Pour le travail à l'extension du poteau, la composante axiale est donnée par l'expression :

$$\sqrt{2} \frac{h_i h_j}{h_j L} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i = \sqrt{2} \frac{h_i}{L} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i = F_1.$$

Et si s est la section moyenne du poteau, on a pour la valeur du travail :

$$\frac{\sqrt{2} h_i}{s L} \sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i; \text{ d'où le taux de sécurité.}$$

Pour le travail de la jambe à la compression, la force agissante est fournie par :

$$\sqrt{(\text{résult.})^2 + (\text{compos. axiale})^2},$$

$$\text{ou : } \sqrt{2} h_i \left(\sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i \right) \frac{l_j}{h_j L} = F_2.$$

l_j longueur de la jambe hors du sol.

Soient : s' la section moyenne de la contre-fiche en mm^2 , $k=0,02$ pour le bois, $m=2, 0$ travail du bois en kg./mm^2 , L et h_j en mètres, F_r en kilog., I_m moment d'inertie minimum de la section en cent. à la puissance (cm^4).

La formule de Résal donne :

$$\frac{\sqrt{2} h_i l_j}{s' h_j L} \left(\sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i \right) \left[1 + \frac{k (L^2 + h_j^2) s'}{m I_{\text{minim.}}} \right],$$

$$\text{ou } \frac{\sqrt{2} h_i l_j}{s' h_j L} \left(\sum_{i=1}^{i=n} S_i t_i \right) \left[1 + \frac{k l_j^2 s}{m I \min.} \right],$$

d'où on déduit le taux de sécurité.

Si l'on voulait tenir compte de l'action du vent sur les fils et sur le poteau, il suffirait d'appeler R la résistance globale obtenue en composant les forces :

$$l \sum_{i=1}^{i=n} V_i, 2 \sum_{i=1}^{i=n} S_i t \frac{\sqrt{2}}{2} (f=0) \text{ (c'est R et } V_p),$$

déjà calculées et appliquées parallèlement aux points situés aux distances h_v , h_i et h_p du sol. Si les fils sont identiques, on a :

$$F_1 = \sqrt{2} \frac{n S_i h_f}{L} \text{ et } F_2 = \sqrt{2} \frac{n S_i h_f l_j}{L h} = \frac{l_j}{h_j} F_1.$$

En ce qui concerne les poteaux jumelés d'après un théorème classique :

$$I_{xy} = I_{oo'} + \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{5\pi D^4}{64}.$$

Pour les deux poteaux, le moment d'inertie de la section d'encastrement est (fig. 188) :

$$\frac{5\pi D^4}{32}; \text{ d'où le module } \frac{I}{D} = \mu = \frac{5\pi D^3}{32}.$$

On adopte pour μ une valeur plus petite que $\frac{\pi D^3}{10}$. En se plaçant dans le cas envisagé précédemment, le poteau a résisté à l'encastrement à la flexion $R h_i$.

$$\text{Le taux de travail du bois est : } \frac{R h_i 10}{\pi D^3}.$$

On a ainsi aisément le coefficient de sécurité. Enfin pour un poteau haubanné, on calcule le poteau comme dans le cas de la jambe de force. Mais ici la force F_2 fait travailler le hauban à la tension et F_1 soumet le poteau uniquement à une compression.

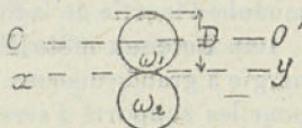


Fig. 188.

Tenant compte du coefficient de sécurité, on admet une charge pratique unitaire ρ pour le métal composant le hauban. La section s' du hauban est donnée par :

$$s' = \frac{F_2}{\rho}$$

Comme pour la jambe de force, on place naturellement le hauban dans le plan bissecteur du dièdre α .

a) *Ferrure*. — Pour chaque cas particulier, on calcule le moment d'inertie $\frac{I}{n} = \mu$ de la section d'encastrement MN, trous déduits (fig. 189). Soient Z_1 l'effort total du à la tension du fil et

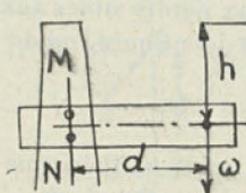


Fig. 189.

à l'action du vent sur l'isolateur, ω le poids de la ferrure, plus le poids de l'isolateur, et plus le poids du fil dans deux demi-portées.

Le moment total a pour valeur :

$$Z_1 h + \lambda \omega = M_t$$

Si θ est le taux de la résistance à la rupture du métal en kilog. par cent. carré, et c le coefficient de sécurité adopté (3 ou 5), on a :

$$\frac{M_{max.}}{\mu} = \frac{\theta}{c}; \quad \text{d'où } M_t = Z_1 h + \lambda \omega = \mu \frac{\theta}{c}$$

Or M_t est connu.

Par suite : $\mu = \frac{M_t c}{\theta} = f$ (dimensions de la ferrure). On se fixera une des dimensions, et cette dernière équation déterminera l'autre.

b) *Tige ou support*. — En opérant de même, on a :

$$M_t = Z_1 h; \quad \mu = \frac{M_t c}{\theta}$$

Ici h désignera la distance du fil à la section moyenne et μ le module d'inertie de ladite section.

109. *Poteaux métalliques*. — Pour les transmissions d'énergie à grande distance on emploie des supports à treillis tant pour les supports d'arrêt que pour ceux en alignement et ceux de concentration de lignes.

La résistance du métal employé, généralement l'acier doux, permet de faire les pylônes très légers; les pièces qui les composent, qui peuvent être démontées à volonté, sont toujours faciles à transporter isolément et à remonter sur place, et,

moyennant certaines précautions, leur entretien est peu important lorsque les barres qui les composent ont été galvanisées au préalable.

La base des pylônes ordinaires a généralement $1\text{ m.} \times 1\text{ m.}$ et leur fondation exige $2^{\text{m}},30$ à $2^{\text{m}},35$ de béton de chaux hydraulique.

Pour le calcul du massif de fondation on suppose que le massif de maçonnerie est simplement posé sur un plan horizontal, ce qui revient à négliger le frottement et la poussée sur les faces latérales des terres où il se trouve logé. Dans ce cas le poids et les dimensions du massif doivent être suffisants pour que son moment de stabilité soit supérieur au moment de renversement maximum. Pour ce dernier on lui donne une valeur égale à la somme des moments fléchissants à la base du pylône. Cette dernière, reposant sur une maçonnerie, doit avoir une valeur suffisante pour que la pression par centimètre carré ne dépasse pas les chiffres suivants : béton de ciment, 6 à 12 kg. par cent. carré; chaux, 4 à 5, et gravier, 3 à 4.

Chaque pylône est soigneusement mis à la terre ou mieux relié à un fil de terre général, qui est lui-même mis à la terre en des points convenables, tous les quatre ou cinq pylônes.

Les tours en acier (pour les très grandes portées) sont construites avec des éléments transportables, et le montage en est fait sur place. Le dressage ou levage se fait comme pour les

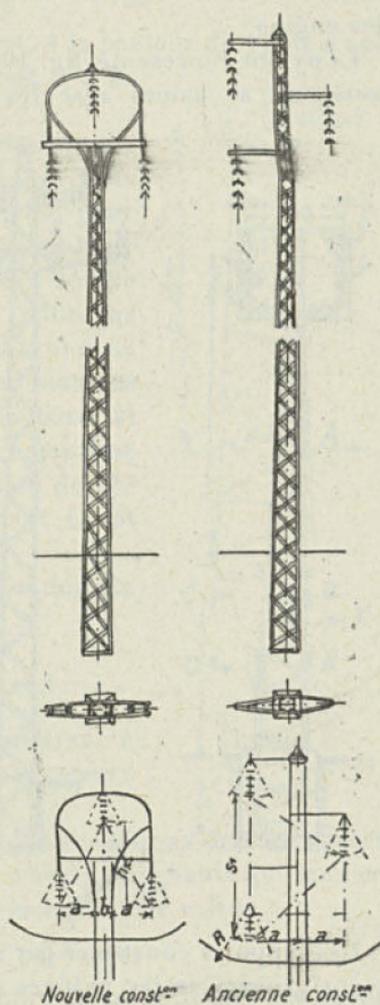


Fig. 190.

pylônes, soit avec un poteau auxiliaire, soit avec un chariot spécialement organisé à cet effet ou à l'aide d'une chèvre fixe ou montée sur roues avec treuil à engrenages disposé au pied des engins.

Le pylône représenté (fig. 190) est disposé pour recevoir des isolateurs à chaînes avec les trois chaînes symétriquement

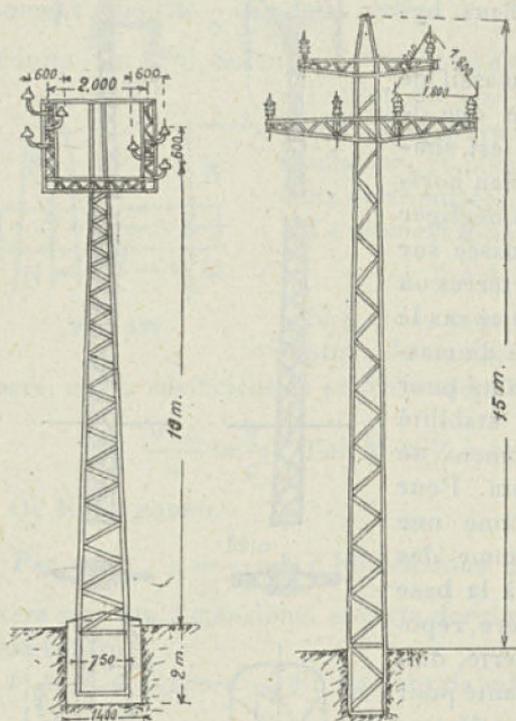


Fig. 191.

placées par rapport à l'axe du support et aux trois sommets d'un triangle équilatéral.

Les poteaux métalliques dits « élastiques » paraissent tout indiqués pour les lignes à tracé régulier et avec des portées uniformes (traversées de plaines).

Lorsque les lignes sont doubles, l'entretoisement de ces deux lignes séparées permet l'allègement des poteaux, tout en leur donnant une plus grande assise favorable à leur stabilité.

Les supports constitués par des poutrelles peuvent remplacer avantageusement les pylônes en treillis pour les efforts qui ne dépassent pas 1000 kg. au sommet dans une direction horizontale. L'Administration impose pour les fers constituant les pylônes de l'acier doux représentant une résistance de 42 kg. par mm² et un allongement de 20 p. 100 au moins.

110. Calcul d'un pylône métallique. — Soit F la résultante de la traction des conducteurs.

Si on prend comme centre des moments le nœud A (fig. 192), on

à la relation :

$$2Ta - Fh = 0; \text{ d'où } T = \frac{Fh}{2a};$$

T effort résistant dans un montant, h la hauteur du point d'application et a la distance du nœud A à la cornière opposée.

On a ainsi l'effort maximum développé à l'encastrement, soit une compression pour les montants A et B et une extension pour les montants C et D. On doit en outre tenir compte de l'action du vent quand il souffle dans la direction de la flèche F' ; alors les montants de la face BC sont tendus et ceux de la face AD comprimés. En combinant les deux actions (traction des conducteurs et du vent) le montant A se trouve comprimé au maximum, et il y a complication de résistance au flambage, et le montant C est tendu au maximum.

Le moment fléchissant dû à l'action du vent sur les fils a pour valeur :

$$M = \left(72 \text{ kg.} \times d \times \frac{l}{2} \times n \right) \times h;$$

d diamètre des conducteurs en mètres, l portée en mètres, n nombre de conducteurs et h en mètres.

La surface offerte au vent par les croisillons des deux faces (ces croisillons ont à résister aux efforts tranchants qui tendent à cisailer le support transversalement) a pour valeur :

$$S = 2 \times n' \times l' \times c' = x;$$

S surface en mètres carrés, n' nombre de croisillons, l' longueur moyenne des croisillons en mètres, et c' côté de la cornière constituant un croisillon, en mètres.

La surface offerte au vent par les montants des deux faces est :

$$S' = 4 \times h' \times c'' = x';$$

h' hauteur totale au-dessus du sol en mètres, c'' côté de la cornière constitutive des montants, en mètres.

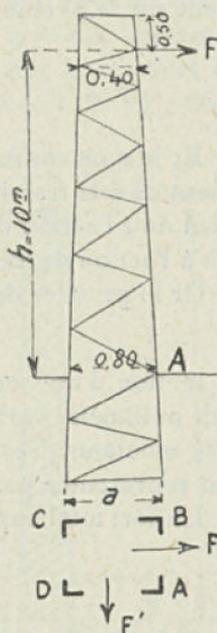


Fig. 192.

L'effort du vent sur le pylône a pour expression :

$$120 \text{ kg.} \times (x + x') = y.$$

On admet que le centre de poussée de cet effort s'applique à la moitié de la hauteur. Le moment fléchissant dû à l'action du vent sur le pylône est :

$$M_v = y \times \frac{h'}{\frac{h}{2}}.$$

Et le moment de renversement total M_r se compose du moment dû à la traction des conducteurs plus le moment fléchissant dû à l'action du vent sur les fils (soit M), plus le moment dû à l'action du vent sur le pylône (soit M_v).

Or le premier de ces moments (M_t) a pour valeur :

$$M_t = (s \times n \times \theta) \times h;$$

s section d'un conducteur en millimètres carrés et θ tension par millimètre carré (traction). La section nette d'une cornière des montants (c'est-à-dire déduction faite du vide des rivets), est représentée par s'' .

L'effort total supporté par un montant est :

$$\frac{M_r}{2a}.$$

Et la charge unitaire est par suite :

$$\frac{T}{s''} \text{ kilog. par mm}^2.$$

Et le coefficient de sécurité est : $K = \frac{45}{\frac{T}{s''}}$.

L'effort tranchant le plus grand sur les croisillons est produit par la tension des conducteurs, lequel est le même sur toute la hauteur du support. Si les croisillons sont inclinés de 45° sur l'horizontale, l'effort développé dans chacun d'eux est :

$$F = \frac{T}{2 \cos 45^\circ}.$$

Et la charge unitaire a pour valeur l'effort F divisé par la section nette du fer du croisillon. Le taux de travail des rivets est le rapport de l'effort F à leur section.

111. **Poteaux en ciment armé.** — Ce genre de support se fait plein, tubulaire ou évidé. Il évite dans une certaine mesure les inconvénients des poteaux en bois et de ceux entièrement en métal; en particulier il est beaucoup moins conducteur de l'électricité que ces derniers, mais il a le défaut d'être très lourd et il est difficile de l'utiliser en dehors des poteaux implantés le long des routes. Un poteau devant résister à un effort de 500 kg. à 8 mètres au-dessus du sol pèse plus de 1000 kg., alors qu'un pylône métallique dans les mêmes conditions ne pèse que 300 kg.

L'armature de ces poteaux est, en général, constituée par des barres droites en acier rond et par une spire de fil d'acier ligaturée sur ces barres longitudinales. La profondeur de la fouille pour la plantation est d'environ le sixième de la hauteur totale du poteau.

Le calcul des poteaux se fait conformément aux prescriptions de l'arrêté ministériel du 20 octobre 1906, en tenant compte à la fois de la résistance de l'armature métallique et de la partie du béton qui travaille à la compression, en négligeant la résistance de la portion de béton travaillant à l'extension.

112. **Calcul d'un poteau en ciment armé.** — Soient : r et r_1 les réactions horizontales (à la surface au niveau du sol et au fond de la fouille), h_2 la distance de l'axe autour duquel le poteau tend à tourner à la fouille, M le moment pour un point quelconque du poteau.

Les valeurs de r et de r_1 sont données par les formules suivantes (fig. 193) :

$$r = \frac{F}{BH} + \frac{6M}{BH^2}; \quad r_1 = \frac{F}{BH} - \frac{5M}{BH^2};$$

F somme des forces extérieures agissant au-dessus de la fon-

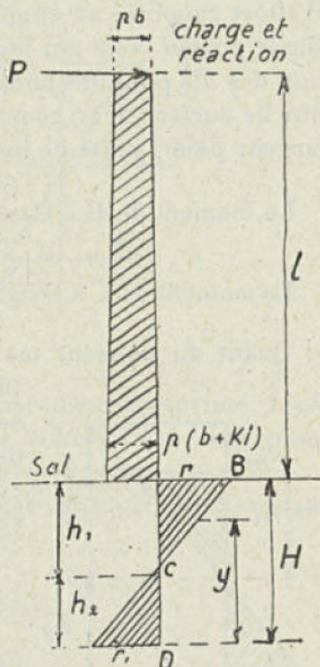


Fig. 193.

dation et M moment de ces mêmes forces par rapport à la section située à $\frac{H}{2}$ du sol; B largeur supposée constante du poteau dans la fouille.

r et r_1 étant connus, on a : $h_2 = \frac{r_1}{r+r_1} H$.

Le moment de A à B = $Px + p \frac{bx^3}{2} + p \frac{kx^3}{6}$;

P effort rapporté au sommet des charges concentrées agissant sur le poteau (vent sur les fils pour les alignements droits, traction des fils pour les poteaux d'angle), p effort du vent sur l'unité de surface, b largeur au sommet, k accroissement de cette largeur pour l'unité de longueur.

Le moment de B à C = $B \left[\frac{r_1 h_2}{2} \left(y - \frac{h_2}{3} \right) - \frac{r}{6h_1} (y - h_2)^3 \right]$.

Le moment de C à D = $Br_1 \left(\frac{y^2}{2} + \frac{y^3}{h_2} \right)$.

Quant au moment maximum, il a lieu dans la section mn (fig. 194) située à $y = 2h_2$; pour cette section, l'effort tranchant, égal à la différence des deux triangles hachurés, est nul. Ce moment maximum a pour valeur :

$$M_{\max} = \frac{Br_1 h_2}{2} \times \frac{4}{3} h_2 = \frac{2Br_1 h_2}{3}.$$

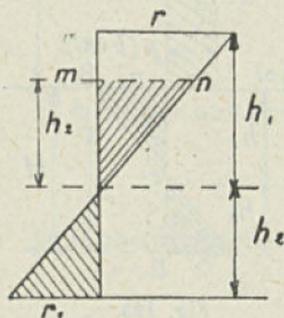


Fig. 194.

Données : b largeur du poteau en cent., h largeur du poteau en cm, R le travail du béton en $\text{kg.} \cdot \text{cm}^2$, R le travail de l'acier en $\text{kg.} \cdot \text{cm}^2$, ω l'armature symétrique, m rapport des coefficients

d'élasticité de l'acier et du béton ($m = \frac{E_a}{E_b}$), x distance de l'axe neutre au parement comprimé (fig. 195).

D'après la loi de Hooke on a la relation :

$$\frac{R_b}{x} = \frac{R_a}{\frac{m}{h-x}}.$$

En prenant le dosage de 300 kg. de ciment au mètre cube, $R_a = 45$, $R_b = 1200$ et en faisant $m = 15$ on obtient : $x = 0,36 h$.

L'effort de compression (en prenant les fers de compression au centre de gravité du béton comprimé) a pour valeur :

$$F = R_b \frac{bx}{2} + m\omega \frac{bx}{2} + m\omega R_b \frac{2}{3};$$

$$F = \frac{45 bx}{2} + 450\omega. \quad (1)$$

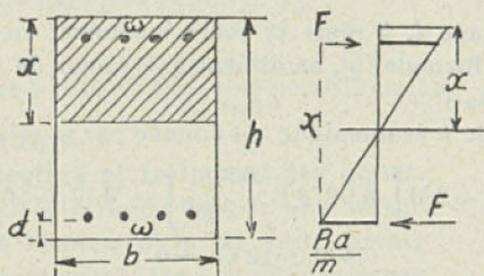


Fig. 195.

Son point d'application est à x du parement comprimé. L'effort de tension a pour valeur : $\omega R_a = 1200\omega$ (2). Son point d'application est le centre de l'armature de tension.

Le moment résistant de la section est égal à $M = Fz$, z étant le bras de levier du couple élastique :

$$z = h - \frac{x}{3} = 0,88 h;$$

d'où : $M = F \times 0,88 h. \quad (3)$

Des équations (1) (2) et (3) on tire :

$$\omega = \frac{M}{1058h}, \quad b = 0,0878 \frac{M}{h^2} \quad \text{et} \quad h = 0,296 \sqrt{\frac{M}{b}}.$$

Ces relations permettent de calculer les trois valeurs ω , b et h , connaissant l'une d'entre elles.

Pour avoir la section la plus économique, prenons comme prix d'un centimètre de poteau (au point où le moment est maximum) :

$$P = (h + d) b B + 2C (h + d + b) + 2\omega f;$$

d distance de l'axe des fers au parement extérieur (de 3 à 5 centim.), B prix d'un cm^3 de béton, C prix d'un cm^2 de coffrage, f prix d'un cm^3 d'acier.

En remplaçant dans cette formule b et ω par les valeurs précédemment trouvées, on obtient :

$$P = 0,0878 \frac{M}{h} B + \frac{0,0878 dMB}{h^2} + 2Ch + 2Cd \\ + 0,1756 \frac{M}{h^2} C + \frac{Mf}{529h}. \quad (5)$$

En se donnant d , h reste la seule inconnue; en annulant la dérivée de la formule (5), on obtient une valeur de h que donne le minimum de P .

La valeur de h économique est donnée par la relation :

$$h^3 2C - hM \left[0,0878 B + \frac{f}{529} \right] - M (0,1756 dB \\ + 0,3512 C) = 0 \quad (6)$$

En général à cette valeur de h correspond une largeur très faible de b ; on vérifie donc si elle est suffisante pour résister aux efforts perpendiculaires.

Application numérique. — Soit un poteau de 6 mètres de hauteur rentrant de 1^m,50 en terre; l'effort au sommet est de 400 kg. et on admet un vent de 100 kg. par mètre carré.

Comme première approximation, on prend b égal à 10 au sommet et 16 à la base. Alors :

$$M = 400 \times 675 + 0,10 \times 10 \times 100 \times 375 + \frac{0,06 \times 6}{2} \\ \times 100 \times 275 = 297\,450 \text{ kg./cm.}; \\ F = 400 + 0,10 \times 6 \times 100 + \frac{0,06 \times 6}{2} \times 100 = 478 \text{ kg.}; \\ r = \frac{478}{16 \times 150} + \frac{297\,450 \times 6}{16 \times 150^2} = 5^k,152; \\ r_1 = \frac{478}{16 \times 150} - \frac{297\,450 \times 6}{16 \times 150^2} = -4^k,762; \\ h^2 = \frac{4762}{4762 + 5152} \times 150 = 72^{\text{cm}},2;$$

$$M_{\max} = 2 \frac{16 \times 4762 \times \sqrt{72,2^2}}{3} = 264\,500 \text{ kg./cm.}$$

En prenant le béton à 100 fr. le m³, $B = \frac{1}{10\,000}$; le coffrage à 158 fr. le m², $c = \frac{15}{10\,000}$

et l'acier à 0,80 le kg., $f = \frac{62}{10\,000}$; la formule (6) donne :

$$h^3 - 1820 h - 54\,000 = 0;$$

d'où

$$h = 53 \text{ cm. et } b = 0,0878 \frac{2\,645\,000}{53 \times 53} = 8,2 \text{ cm.};$$

soit 9 centimètres.

113. Protection et isolement des lignes.

— Il est très difficile de donner une valeur définie pour l'isolement qu'on doit obtenir sur une ligne aérienne. On a vu sur des lignes en fonctionnement l'isolement s'abaisser à moins de 5 megohms par kilomètre. On peut déceler les défauts ou parties faibles de la ligne en déterminant ces points par la manœuvre successive des sectionneurs. Pour procéder à la recherche des défauts sur la ligne principale, il faut rendre celle-ci indépendante de l'usine et du réseau qu'elle dessert. On a alors à examiner si le défaut provient d'un contact entre les conducteurs (défaut de câble à câble) ou s'il est dû à un contact de conducteur avec la terre. Les stations d'essais permettent d'isoler la ligne (ou le tronçon) de chaque côté ou de la mettre à la terre.

Lorsqu'une ligne n'est pas sous courant, on la coupe au milieu, en réunissant

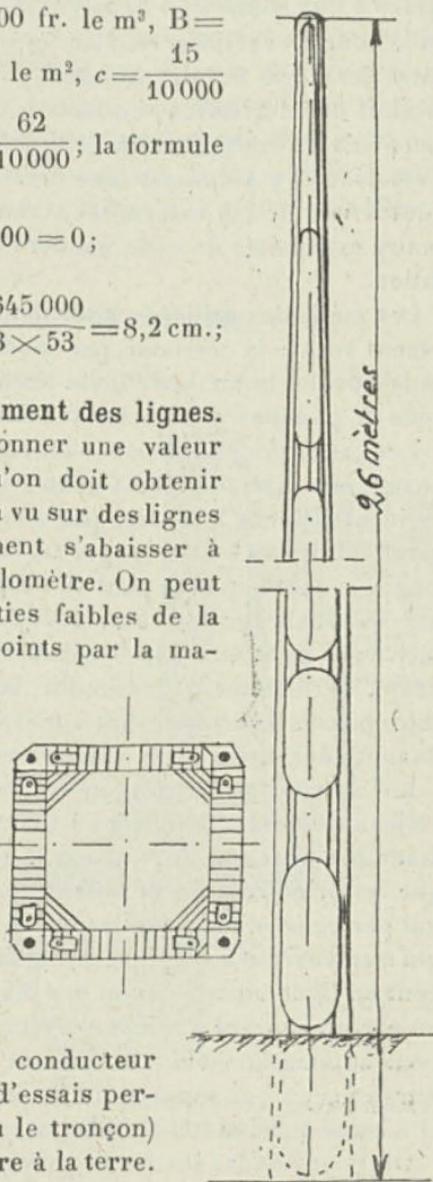


Fig. 196. — Type de poteau en ciment armé.

les extrémités à la terre, et l'on envoie du courant dans la ligne. La partie défectueuse de la ligne est vérifiée jusqu'à ce que l'on arrive à une connexion de terre, dans une des stations d'essais où le courant est observé. Par ce procédé, le défaut est localisé entre les deux dernières stations d'essais utilisées. Quand se produit une dérivation, on isole la ligne d'une façon analogue; on envoie du courant et on localise le défaut entre deux stations d'essais. S'il y a contact sans dérivation à la terre, on isole la ligne à une de ses extrémités, tandis qu'on la met à la terre à l'autre extrémité; de cette manière le contact devient une dérivation.

Les méthodes utilisées pour la recherche des défauts d'isolement sont : la méthode par la chute de tension, la méthode de la boucle, la méthode de la perte de charge, méthodes dont nous ne pouvons donner ici que l'énumération.

Les cas de fonctionnement anormal se présentent notamment quand, sur circuit à point neutre isolé, une des phases se met accidentellement à la terre par un arc oscillant. La décharge au parafoudre peut se prolonger au delà du temps, cependant très long, pendant lequel il peut en supporter l'intensité, mais qu'il convient d'abrèger par un signal d'alarme. Un enregistreur de décharges peut être placé concurremment avec le signal d'alarme, permettant de recueillir la trace de toute surtension entre phases se déchargeant à travers le parafoudre, ou encore de toute décharge entre phase et terre.

Les moyens préventifs contre les ruptures des conducteurs aériens sont essentiellement à fonctionnement automatique. On distingue ceux qui provoquent le sectionnement du fil de façon que les brins rompus ne soient plus chargés d'électricité, ceux qui par court-circuit font sauter le disjoncteur de l'usine, ceux qui manœuvrent mécaniquement l'interrupteur, ceux qui déchargent en ligne en actionnant des disjoncteurs par une dérivation ou par un courant à fréquence élevée, et enfin ceux qui suppriment automatiquement le courant en actionnant des disjoncteurs et ceux qui suppriment le courant en cas de contact d'un fil à basse tension (télégraphe) avec le fil à haute tension.

On peut joindre les fils de protection par leurs extrémités à la ligne principale par l'intermédiaire de résistances, plombs fusibles, etc.; mais dans ce cas ils sont isolés de la terre. Dans

le circuit de dérivation ainsi pratiqué, on intercale le relais d'un interrupteur automatique qui coupe instantanément la communication entre la ligne et les machines, aussitôt qu'un changement a lieu dans l'intensité du courant traversant le relais. Pour les autres parties de la ligne, on dispose sur les poteaux des fourches en fer reliées à la terre, sur lesquelles le fil cassé par accident vient tomber. On peut aussi placer, de chaque côté de l'isolateur, une petite fourche au milieu de laquelle le fil tendu passe dessus; la fourche, qui est fixée à la tige de l'isolateur, est reliée elle-même à la terre.

III. — Armement des lignes.

114. **Interrupteurs et coupe-circuits.** — On a été amené à combiner les interrupteurs pour les rendre capables de jouer le rôle de coupe-circuits automatiques ou de disjoncteurs. Aujourd'hui le disjoncteur et l'interrupteur se complètent tout mutuellement; quand deux appareils sont adjoints, c'est le disjoncteur qui est fermé le premier, puis alors seulement l'interrupteur; de sorte que le premier protège le circuit, si, au moment où ce dernier est établi, un phénomène anormal se manifeste. Réciproquement, le disjoncteur ne pourrait être mis sans danger en ligne sur un circuit fermé, à moins d'être combiné de façon que l'opérateur ne pût le tenir fermé si le courant a une intensité excessive. Une fois fermé,

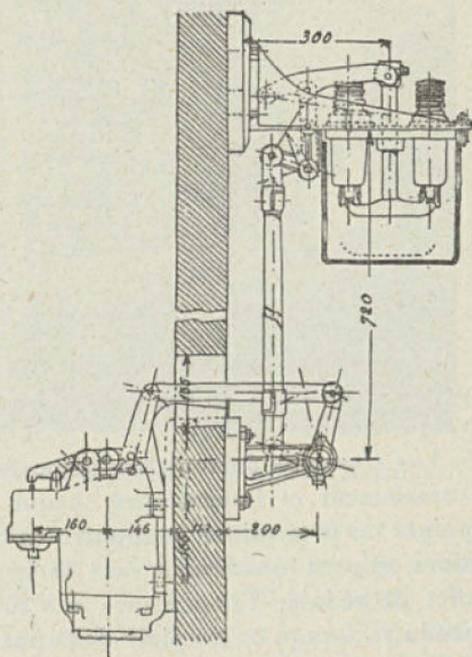


Fig. 197. — Interrupteur à haute tension commandé par moteur électrique.

à moins d'être combiné de façon que l'opérateur ne pût le tenir fermé si le courant a une intensité excessive. Une fois fermé,

le disjoncteur reste tel aussi longtemps qu'aucune perturbation n'en provoque le déclanchement, et c'est avec l'interrupteur que s'effectuent les manœuvres. Mais on a été amené à confondre ces deux appareils chaque fois que l'interrupteur ne devait fonctionner que peu fréquemment; de là sa transformation en appareil automatique. Les interrupteurs à haute tension peuvent se classer en trois catégories : les appareils à grande distance de rupture dans l'air; ceux à rupture sur cornes et ceux à rupture dans l'huile.

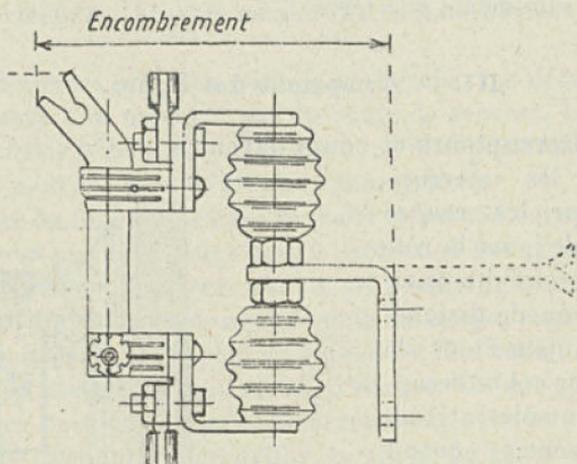


Fig. 198. — Sectionneur de lignes à couteau.

Le soufflage magnétique est très avantageux, mais il faut préparer un écart suffisant entre les pièces de rupture, si l'on veut éviter des insuccès.

Les appareils doivent être disposés pour rompre l'arc horizontalement et interrompre chaque conducteur en plusieurs points ou déterminer la rupture dans un récipient d'huile, et alors on peut fonctionner sans danger. L'huile a en outre pour effet de réduire l'importance des surtensions qui peuvent se produire lorsqu'on emploie des appareils à interruption dans l'air, fait qui s'explique par la plus grande durée de l'arc.

Les interrupteurs à huile peuvent se diviser en quatre catégories : les appareils à cuves et à fermeture et ouverture à la main par un jeu de câbles en acier ou un jeu de tringles et de leviers (1000 à 5 000 volts); les appareils à cuves et à fermeture

à main, mais à ouverture mixte, pouvant se faire à volonté, à main par une tringlerie ou automatiquement à l'aide d'un solénoïde (1000 à 10 000 volts); les appareils à cuves et à fermeture et ouverture automatiques à l'aide de deux solénoïdes distincts, avec manœuvre éventuelle à la main (5000 à 20 000 volts); enfin les interrupteurs à plongeurs et cuves multiples (une pour cha-

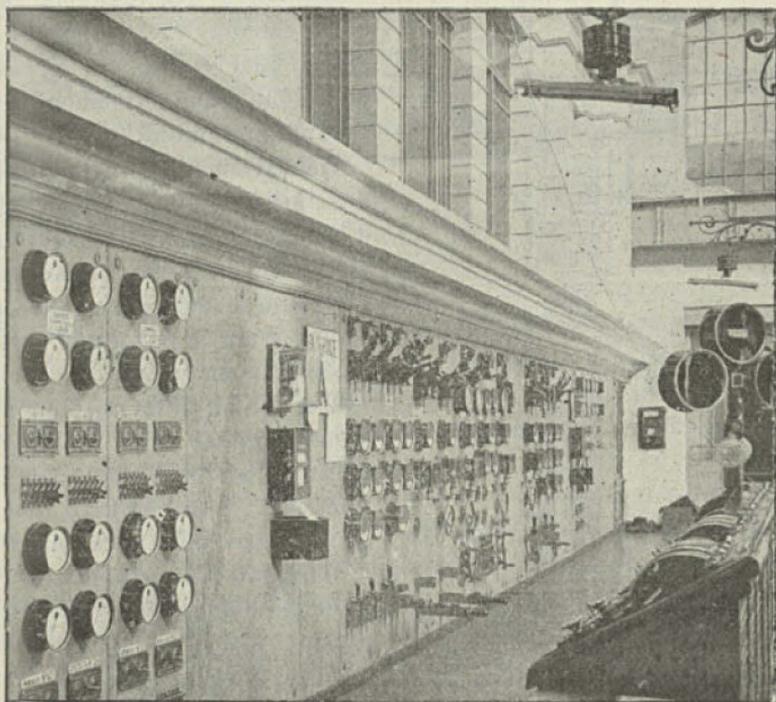


Fig. 199. — Tableau et pupitre de distribution d'une centrale électrique.

que pôle) pour les grandes puissances, avec manœuvres d'ouverture et de fermeture pour un moteur unique pour les deux mouvements (10 000 à 50 000 volts, 2 000 à 6 000 kilowatts).

Les interrupteurs à cornes sont très employés. La fig. 200 montre un de ces appareils monté sur poteaux avec commande par tringle.

Les déclencheurs automatiques se font à maxima, à minima, à tension nulle et à courant de retour; ceux à maxima servent à protéger les installations de tous genres contre les surcharges;

ceux à tension nulle sont employés pour les gros moteurs, ordinairement en concurrence avec les déclancheurs à maxima; enfin les déclancheurs à courant de retour, fonctionnant lorsque la transmission d'énergie s'arrête. Le contrôle de l'électroaimant est direct ou indirect, c'est-à-dire que dans le second cas on fait usage d'un relais inséré sur le circuit principal conductivement ou inconductivement.

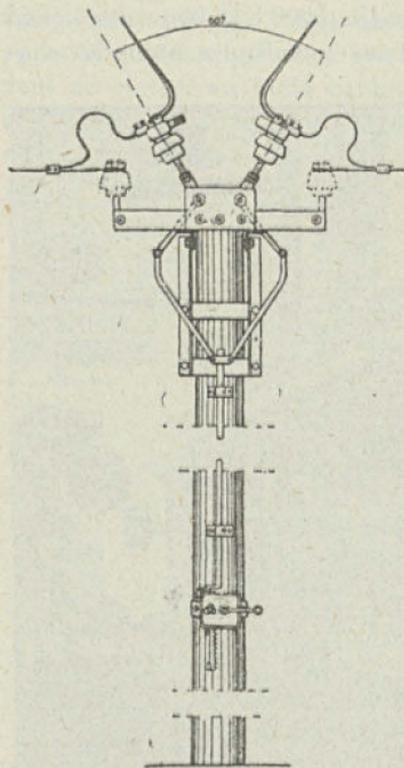


Fig. 200. — Détail de construction d'un interrupteur aérien à haute tension.

Relativement à l'installation des interrupteurs, il convient d'intercaler des résistances en shunt ou en série quand on ouvre ou ferme le circuit, ou de limiteurs munis d'une forte résistance en série.

Dès qu'un interrupteur se trouve exposé à un échauffement de 40° au-dessus de la température ambiante, il fonctionne dans un état anormal.

L'emploi des *sectionneurs*, dont la construction est identique à celle des interrupteurs aériens à haute tension, est particulièrement usité, pour les passages d'aérien en souterrain, aux traversées pour

voies ferrées ou routes de grande communication, aux abords des postes et des stations centrales. Ils sont exigés à l'entrée et à la sortie de chaque agglomération et à l'origine de toute dérivation. Ils ne sont appelés à rompre en charge qu'exceptionnellement.

L'importance d'un court-circuit se produisant après l'interrupteur, dans une centrale, peut être évaluée en considérant qu'un disjoncteur à haute tension est suffisamment établi pour qu'il y ait une constante de temps appréciable de l'ordre de

0,20 seconde environ et que ce temps est suffisant pour que le régime du court-circuit soit établi. La valeur de ce court-circuit fixe la puissance à rompre.

Pour dimensionner convenablement un interrupteur à haute tension, il y a lieu d'examiner les facteurs qui peuvent influencer sur la capacité de rupture, tels que la distance entre pièces sous tension et la masse, la distance de rupture, la hauteur d'huile au-dessus des contacts, la vitesse de rupture, le nombre de ruptures et la tension d'emploi.

M. Vedoveli a présenté la formule empirique suivante pour la détermination de la puissance de rupture d'un appareil correspondant à un dimensionnement normal des différents éléments spécifiés ci-avant :

$$P = \frac{VD_r \sqrt{H} \sqrt[3]{N_r d}}{\sqrt[3]{400 + T}};$$

P puissance de rupture en K. V. A. ; D_r distance de rupture totalisée en cm. ; H hauteur d'huile au-dessus des contacts en cm. ; N_r le nombre de ruptures ; d plus petite distance de la masse en cm. ; T tension d'emploi en volts ; V coefficient de rupture ; et 400 est une constante.

La vitesse de rupture est la plus difficile à réaliser des conditions que nous avons énumérées, si l'on ne veut pas arriver à des appareils nécessitant des efforts de manœuvre considérables, et c'est là surtout que la qualité de l'appareil se révèle.

Relais automatique. — Dans ces appareils auxiliaires des interrupteurs, le fonctionnement du dispositif provoquant le déclenchement peut avoir lieu comme suit : fonctionnement instantané à maxima et à retour de courant ; fonctionnement temporisé à retard variable avec la charge ; fonctionnement à maxima ou ampèremétrique ; fonctionnement à retour d'énergie ou wattmétrique ; fonctionnement temporisé ou à retard constant et relais de blocage.

Le principe de l'action différée est résolu des façons suivantes : fil chaud, mouvement d'horlogerie, piston de graphite se déplaçant dans un tube fermé contenant une huile spéciale, solénoïde dont le noyau presse une boîte à air, solénoïde soumis à l'effet amortisseur d'un dash-pot, à deux liquides, dispositif

électromagnétique sans dash-pot, dispositif basé sur le phénomène de la tension superficielle.

115. Isolateurs ordinaires. — Les isolateurs retardent le bénéfice acquis par les progrès obtenus dans le matériel utilisé pour l'établissement des lignes d'énergie à haute tension. L'isolateur idéal pour les hautes tensions devrait pouvoir s'accommoder de tous les climats et fonctionner aussi bien avec du brouillard que couvert de poussières et de dépôts salins; il devrait alors par suite avoir aussi peu de cavités abritées que possible, de façon à éviter l'accumulation de ces dépôts. La con-

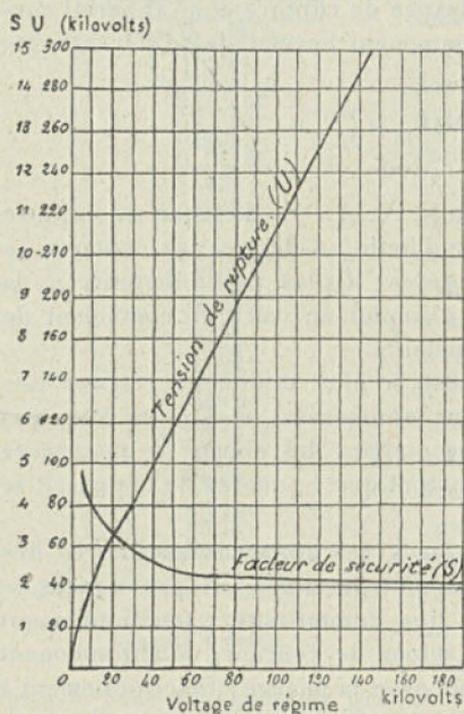


Fig. 201.

duction préconisée des cloches à angle aigu, c'est-à-dire présentant des plans très inclinés pour l'écoulement des eaux (types Paderno, Delta, etc.). Un bon isolateur doit posséder en outre une rigidité électrostatique suffisante, une ligne de fuite aussi grande que possible, une résistance mécanique telle que l'appareil résiste aux efforts de rupture provenant de la tension

conduction massique (conductibilité) dans les bons isolateurs doit être absolument négligeable.

La conduction superficielle ou dispersion qui se produit par l'humidité et les poussières existe toujours dans une mesure plus ou moins grande, et enfin la perforation peut toujours se produire et la disruption (ou perforation du diélectrique air) n'a lieu qu'aux tensions très élevées. La disruption étant grandement facilitée par la pluie, il faut donc tendre à repousser celle-ci de l'isolateur; de là la

de la ligne et enfin offrir un isolement persistant même par les pluies les plus intenses.

Les isolateurs travaillant mal à la traction, on doit d'une manière générale ne leur faire supporter que des efforts de compression. La résistance mécanique des isolateurs en porcelaine est de 4000 kg. par centimètre carré à la compression et 1700 kg. à la traction, mais ils résistent mal aux chocs.

La figure 201 donne en fonction de la tension du réseau les facteurs de sécurité généralement employés (rapport de la tension que peut supporter l'isolateur à la tension d'utilisation). Pour les isolateurs à haute tension, on a intérêt à se rendre compte de la valeur du courant qui traverse l'isolateur quand il est soumis à la tension normale de la ligne dans les diverses conditions de service auxquelles il peut être soumis.

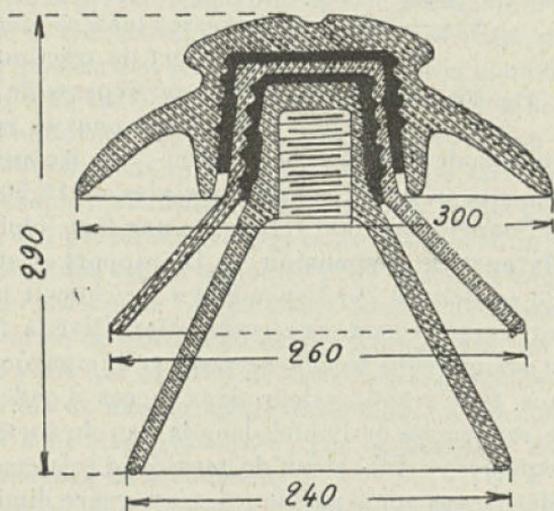


Fig. 202. — Isolateur en verre. Tension 50 000 volts.

Actuellement les isolateurs pour les tensions élevées sont construits en plusieurs parties, et ces pièces sont ou scellées ensemble avec un mastic spécial au moment de la pose, ou bien on effectue ce scellement lors de la fabrication. En France, on peut livrer de nos jours des isolateurs à cloches résistant normalement à 70 000 volts.

Pour résister à de plus hautes tensions, on a imaginé de

réaliser des isolateurs en forme de chapelet (fig. 203) vertical, dits isolateurs suspendus ou à chaînes. Dans ce cas la matière

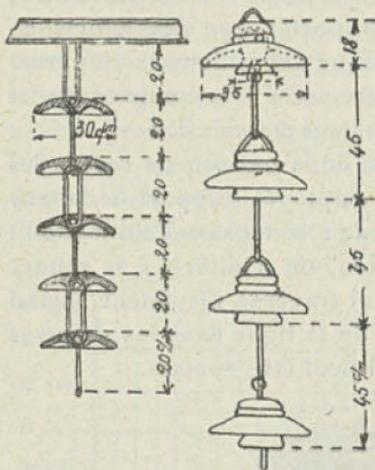


Fig. 203.

isolante travaille à la compression, et on place de distance en distance, à droite et à gauche des deux conducteurs, des isolateurs horizontaux de façon à éviter le balancement. Ces isolateurs peuvent être placés dans toutes les directions et être gardés en service en cas de rupture de un ou plusieurs maillons. Les chapeaux des isolateurs sont soutenus par des colliers et des étriers métalliques assez tenaces pour résister à un effort de traction de 3000 kg., ce qui dépasse de beaucoup tout ce qui peut se rencontrer

sur les lignes modernes de transmission. Tels isolateurs de ce genre à éléments en série, n'ayant pas plus de 1^m,50 de haut, ont pu fonctionner à 220 000 volts sous une forte pluie.

116. Isolateurs de suspension. — Le rapport existant entre la tension d'éclatement correspondant à un choc et la tension d'éclatement caractérisant une onde alternative à fréquence normale est désigné sous le nom de rapport d'impulsion; il peut acquérir une très grande valeur dans le cas d'ondes à front raide; il se rapproche de l'unité dans le cas de surtensions à « basse fréquence ». La valeur de tension d'éclatement, sous l'effet des décharges atmosphériques, n'est guère diminuée par la pluie. Ce fait décroît notablement les chances d'avarie survenant aux isolateurs comme conséquence de perturbations dérivant d'ondes à front raide.

Pour les usages de la pratique, il importe que le rapport d'impulsion soit faible pour l'intervalle d'éclatement d'un parafoudre et, par contre, élevé pour les isolateurs de ligne et les isolateurs tubulaires de bornes d'appareils.

La tension d'éclatement d'un isolateur de ligne ou d'un isolateur tubulaire d'appareil diminue en même temps que la den-

sité de l'air et de la température. Aux grandes altitudes où la pression barométrique est basse, les tensions d'éclatement sont plus faibles qu'au niveau de la mer. En règle générale, la tension d'éclatement décroît sensiblement dans la même proportion que la densité de l'air.

Le rapport existant entre les tensions d'éclatement à 60 p.-s. à sec et sous pluie demeure à peu près constant, malgré les variations de densité de l'air.

Lorsque le dépôt sur un isolateur, poussière, sel marin, etc., vient à s'imprégner d'humidité, la tension d'éclatement baisse d'une façon considérable, surtout quand l'humidité est due au brouillard ou résulte d'une condensation. Dans les essais sous pluie, les tensions d'éclatement observées varient notablement avec la résistance de l'eau employée.

Aux tensions présentement utilisées, le problème de l'isolation d'une ligne de transmission est, avant tout, d'ordre mécanique, et ce n'est qu'avec des procédés de fabrication conduits avec le plus grand soin qu'il est possible de réaliser des échantillons de qualité uniforme, assez durs, non cassants et non poreux.

C'est généralement après un laps de temps variant de trois à cinq années que les isolateurs en porcelaine, même sélectionnés, commencent à présenter des signes de détérioration rapide qui apparaissent sous forme de fêlure progressive et augmentation de porosité. Mais pour les isolateurs formés d'éléments assemblés sous forme de chaînes au moyen de ligatures, on a constaté que l'on n'avait pas observé de détérioration effective après un service de dix années, et même davantage, ce qui confirme que les fêlures sont bien provoquées par la dilatation des ferrures ou des matériaux de scellement.

L'absorption de la vapeur d'eau paraît due, pour une plus grande part, à un phénomène analogue à la respiration. La présence de matériaux de scellement formant comme une sorte d'ép onge humide doit être donc considérée à ce point de vue comme désavantageuse.

On doit admettre comme indispensables les essais électriques et mécaniques, ainsi que ceux destinés à donner des indications sur l'uniformité de qualité de la porcelaine relativement à sa porosité.

Essais des isolateurs suspendus. — L'essai à 60 p.-s. ou essai

à la fréquence de service est certainement le meilleur pour toutes les applications en général; il est très pratique, et il est possible de le reproduire toujours dans des conditions identiques avec une grande précision. Il est le plus efficace de tous, qu'il s'agisse d'isolateurs neufs ou usagés. On réalise avec lui d'une façon prompte le percement d'isolateurs poreux ayant déjà absorbé de l'humidité. On n'a recours en général aux mesures de résistance que pour découvrir les isolateurs poreux ou fissurés ayant absorbé de l'humidité.

Les essais à haute fréquence avec ondes amorties sont d'un emploi fréquent. Dans la majorité des cas la fréquence adoptée est de l'ordre de 100 000 p.-s. Son action peut être assimilée à celle d'une série de chocs; elle assure nettement l'existence de fissures dans les jupes en raison de la nature de la décharge correspondante qui est caractérisée par la tendance à suivre la surface de l'isolateur.

L'essai d'impulsion est utilisé pour déterminer des constantes se rapportant aux caractéristiques de construction des isolateurs.

Les essais à haute fréquence avec ondes amorties ont pour conséquence de provoquer le claquage des isolateurs à une tension relativement très basse, par suite de l'effet Joule produit; la condition correspondante ne se rencontre pas dans les lignes de transmission.

Pour les mesures de tension oscillantes, il convient d'employer l'éclateur à sphères. En particulier pour les tensions à 60 p.-s., on fait usage de l'éclateur à sphères, d'un transformateur-abaisseur de tension ou d'une bobine de voltmètre avec un voltmètre de crête. L'une des bornes est mise à la terre.

Suivant l'opinion généralement admise maintenant, un isolateur doit être établi de manière à pouvoir supporter l'éclatement répété sans que le percement s'ensuive. Le rapport entre les tensions d'éclatement et de percement devra, en conséquence, comporter un facteur de sécurité suffisant, de manière que l'éclatement ne soit point susceptible de porter atteinte aux propriétés isolantes des isolateurs.

C'est un fait connu que la tension d'éclatement d'un isolateur suspendu est inférieure à la somme des tensions similaires correspondant à chacun des éléments constitutifs, et le pourcentage

le plus élevé est enregistré par l'isolateur disposé dans le voisinage immédiat de la ligne.

Sur les fig. 204 et 205 on reconnaît, à l'examen de la ligne pointillée, le pourcentage revenant à chaque maillon ; au cas d'une répartition uniforme, il serait de 10 p. 100. Pour des chaî-

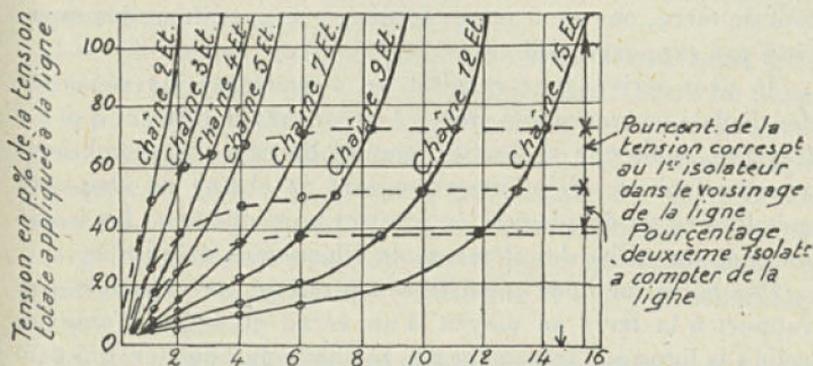


Fig. 204.

nes constituées de plus de cinq maillons, le pourcentage correspondant à l'isolateur le plus rapproché de la ligne est toujours d'environ 30 p. 100. La valeur du rapport varie d'ordinaire entre 20 et 30 p. 100 suivant le modèle d'isolateur, et pour un modèle déterminé, suivant les caractéristiques de la porcelaine employée. L'effort électrique maximum par élément augmentant dans la proportion même de la tension, on voit combien il importe de tenir compte du facteur signalé.

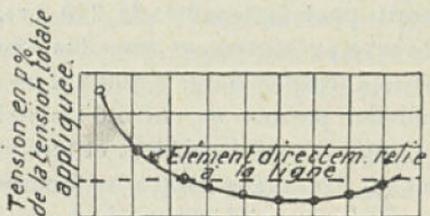


Fig. 205.

A 100 kw., l'effort s'exerçant sur l'isolateur voisin de la ligne est de 17,4 kw. ; à 230 kv., il serait de 38 kv.

Ce sont les courants de capacité qui sont la cause de l'inégalité de répartition de la différence de potentiel. Si i est le courant traversant le premier isolateur, le courant de capacité parcourant le second à partir de la ligne est $i - i_1$, i_1 désignant la grandeur de courant de la capacité de terre, et ainsi de suite, soit $i - 2i_1$, $i - 3i_1$, etc. Le courant, et par conséquent la

chute de tension, présente la valeur maximum pour le premier isolateur; le courant ensuite décroît pour chaque élément de la valeur du courant de capacité de terre correspondant à un seul isolateur. Pour corriger l'inégalité de répartition en cause, il suffit donc de supprimer l'effet du courant de terre, ou, en d'autres termes, celui résultant des capacités par rapport au sol.

On peut arriver à ce résultat en augmentant les capacités des isolateurs successifs dans la grandeur du courant qui les traverse; mais elle nécessite l'emploi de capacités combinées avec un isolant solide, insertion dans la chaîne de chapeaux métalliques ou de plaques en contact immédiat avec les isolateurs où on utilise des éléments de dimensions différentes.

Une autre méthode consiste à neutraliser les capacités par rapport à la terre au moyen d'un écran en forme d'antenne relié à la ligne ou, autrement dit, méthode du bouclier, qui permet une répartition excellente de la tension. Les capacités en jeu par rapport à la terre peuvent être considérées comme résultant de l'existence fictive d'une antenne reliée au sol et s'étendant tout le long de la chaîne d'isolateurs. En pratique, on emploie des boucliers. Dans une chaîne munie d'un tel dispositif l'effort électrique maximum correspondant à un élément serait, pour la tension de 220 kv., inférieur à celui que l'on observe présentement avec des chaînes ordinaires assurant un service irréprochable à 100 kv. et au-dessous. La méthode du bouclier permet en outre d'empêcher la production d'effluves en contact avec la chaîne, et tend à éloigner de la chaîne l'arc venant éventuellement à se former, et évite que celui-ci provoque la fusion du fil conducteur.

Jusqu'ici on a admis que le résultat le plus intéressant obtenu en réalisant une répartition uniforme de la tension consistait dans la possibilité de réduire la longueur des chaînes d'isolateurs, par suite de l'augmentation corrélative de la valeur de la tension d'amorçage de l'arc pour un même nombre d'éléments. En fait, il importe davantage de diminuer la grandeur de l'effort électrique qui s'exerce sur les éléments situés dans le voisinage immédiat de la ligne.

La tension d'éclatement à sec et sous pluie des isolateurs décroît à peu près proportionnellement avec la pression baro-

métrique. Le problème de l'isolement des lignes aux hautes tensions envisagées devient donc d'une solution plus difficile aux altitudes élevées.

117. **Parafoudres.** — Ces appareils sont destinés à protéger les lignes de transmission d'énergie contre les surtensions provenant des décharges atmosphériques.

Les décharges atmosphériques se manifestent sous trois formes principales : un coup de foudre éclatant entre un nuage et la terre, qui parcourt un conducteur sur une plus ou moins grande longueur ; un coup de foudre éclatant entre deux nuages ou entre un nuage et la terre, qui produit une perturbation dans les conducteurs de la ligne ; enfin un nuage fortement chargé, se trouvant au-dessus de la ligne, qui induit dans les conducteurs une charge électrostatique et élève considérablement son potentiel.

La décharge peut être oscillante (premier cas) et, dans les deux autres cas, elle paraît être toujours oscillante ; dans les deux cas elle rencontre dans les conducteurs une impédance de valeur supérieure à leur résistance ohmique. Une décharge oscillante cherche à se diriger vers la terre par le trajet qui présente la plus faible inductance, de là sa tendance à suivre des intervalles d'air plutôt qu'à traverser une bobine. Elle peut provoquer un court-circuit dans toute l'installation, et, pour peu qu'il ait une certaine durée, peut causer des avaries aux machines et arrêter le fonctionnement de tout ou partie de l'installation.

La ligne est soumise à la tension la plus élevée au point le moins élevé du nuage inducteur ; la tension diminue en deçà et au delà, dès qu'on s'éloigne de ce point. Cette observation montre l'utilité des parafoudres de ligne.

Un système complet de protection contre les décharges atmosphériques doit satisfaire aux conditions suivantes : protéger la ligne des décharges directes des coups de foudre frappant la ligne ; empêcher que les décharges oscillantes passent directement du conducteur à l'appui ou à la terre ; empêcher que les décharges atteignent les appareils du tableau, les génératrices et leurs transformateurs, enfin que les parafoudres ne produisent des courts-circuits. D'autre part, il faut préserver l'installation contre les effets industriels des décharges qui se produi-

sent dans le voisinage des appareils à protéger. A l'entrée des lignes dans les centrales, les sous-stations et les postes de transformateurs on met, pour protéger les machines et les appareils, des limiteurs de tension capables de déformer les ondes dangereuses ou d'écouler à la terre les surtensions de grande amplitude ou bien de les refouler sur la ligne. Ces appareils ne doivent laisser passer le courant du réseau qu'en quantité aussi faible que possible et pendant un laps de temps très court, et

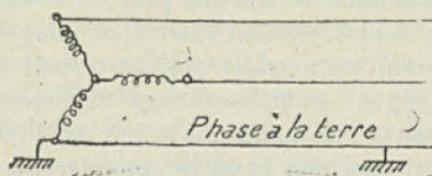


Fig. 206.

leur fonctionnement ne doit laisser engendrer, à leur tour, des perturbations et des surtensions dans la ligne.

Un bon moyen d'éviter les effets des coups de

foudre directs est de placer un fil au-dessus de la ligne à protéger. Cependant dans les installations triphasées on peut éviter ledit fil en mettant directement l'une des phases à la terre (fig. 206), et dans celles à point neutre à la terre on se sert avec avantage de ce dernier comme fil de terre (fig. 207).

Dans les lignes à très haute tension, on a remarqué qu'elles avaient beaucoup de tendance à se protéger d'elles-mêmes à cause de l'effet couronne. Il faut dans ce cas faire fonctionner

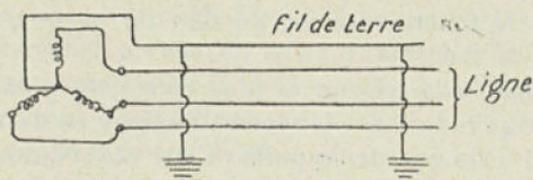


Fig. 207.

la ligne au voisinage de la tension critique.

Les cinq types de parafoudres les plus ordinairement employés sont ceux à cornes, à espaces

multiples, à jets ou à colonne d'eau, ceux dits électrolytiques et enfin ceux à condensateurs.

Ces divers appareils, selon leur mode de fonctionnement, peuvent être classés en : parafoudres à circuit de terre continu, parafoudres à circuit de terre avec une discontinuité et parafoudres avec circuit de terre à discontinuités multiples.

Les parafoudres sont, en principe, constitués par deux parties, séparées par une résistance ohmique ; l'une des parties est reliée

à la terre, et l'autre au conducteur à protéger. La résistance ohmique doit avoir une valeur telle qu'elle s'oppose au passage du courant à faible fréquence qui parcourt la ligne. La résistance du câble de terre doit être très faible et sans self. On a conseillé de mettre les parafoudres en série sur les conduc-

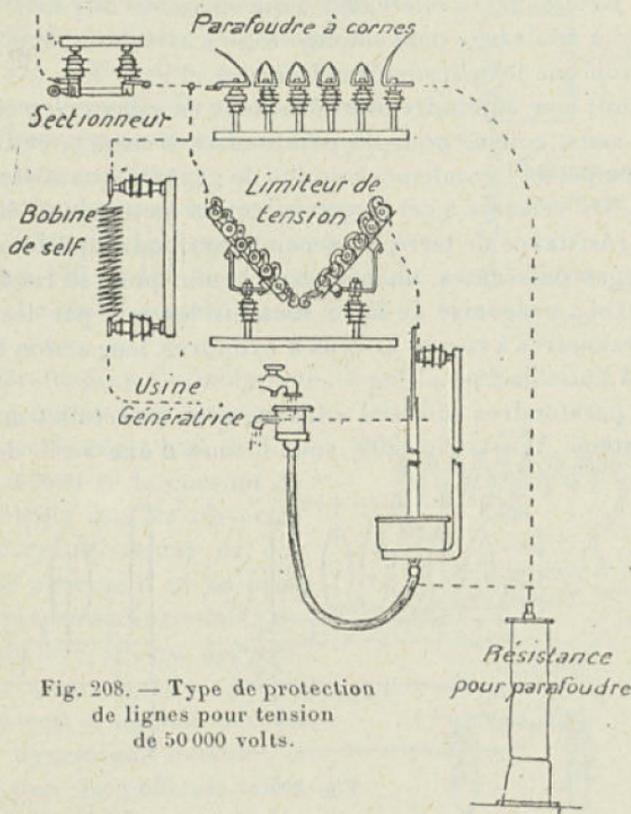


Fig. 208. — Type de protection de lignes pour tension de 50 000 volts.

teurs, mais pourvus d'un dispositif de mise de la ligne à la terre. Dans tous les cas, il est indispensable de protéger les parafoudres eux-mêmes par l'adjonction d'une résistance dont la valeur dépend de la tension de la ligne et de la dimension des machines à garantir.

Pour les *parafoudres à cornes*, il est nécessaire, d'une part, d'intercaler une assez grande résistance sur le circuit de terre, et d'autre part, de laisser entre les cornes un large intervalle. La valeur de la résistance à intercaler dans le circuit de terre

dépend également de la capacité et de la self-induction de ce circuit.

L'écartement des bases des cornes doit être notablement supérieur à la distance explosive correspondant à la différence de potentiel normale entre le conducteur à protéger et la terre.

Les *parafoudres à intervalles d'air multiples*, dits aussi à cylindres ou à rouleaux, peuvent être réglés avec beaucoup plus de précision que les parafoudres à cornes.

On doit leur adjoindre une résistance en série assez considérable; mais, comme pour les parafoudres à cornes, cette résistance empêche l'écoulement rapide de grandes quantités d'électricité. On remédie à cet inconvénient en mettant en dérivation sur la résistance de terre un second parafoudre qui fournit des décharges puissantes, un nouveau chemin pour se rendre à la terre. On a préconisé de faire soutenir les uns par les autres les parafoudres à cornes et ceux à cylindres, leur action se complétant l'une l'autre.

Les parafoudres en métal anti-arc avec intervalles multiples du système Wurtz (fig. 209) sont formés d'une série de petits

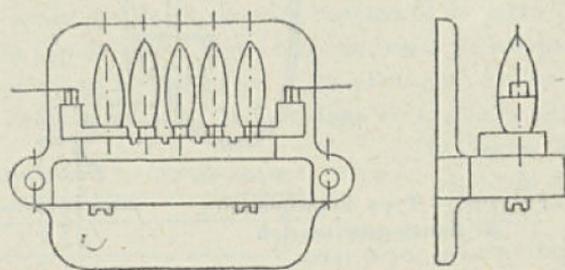


Fig. 209.

cylindres métalliques séparés par des intervalles de $0^{\text{mm}},8$; le nombre de ces cylindres est déterminé par la tension de la ligne et doit être suffisant pour qu'un arc ne se produise après une décharge statique. Une modification de ce genre de parafoudre consiste dans l'adjonction d'une plaque de terre vis-à-vis des intervalles les plus rapprochés de la ligne, comme le montrent les schémas (fig. 210 et 211).

Les *parafoudres électrolytiques* sont assez couramment employés en Amérique. Il en existe deux types; basés sur le même

principe de l'extinction de l'arc par une force contre-électromotrice : le déchargeur électrolytique à cuve et le déchargeur électrolytique à pellicule d'aluminium. La résistance ohmique du premier est à peu près nulle, quelle que soit la tension appliquée ; celle du deuxième est très grande jusqu'à 350 à 400 ohms par élément, valeur pour laquelle elle ne laisse passer que 1 ampère environ : au delà elle s'annule brusquement.

Le parafoudre à cuve est conjugué avec un éclateur réglé pour s'amorcer vers 120 à 150 p. 100 de la tension de service. La cuve remplit le rôle de souffleur d'arc.

Les parafoudres électrolytiques à pellicule d'aluminium doivent être munis d'un intervalle d'air en série réglé bas, si l'on ne veut admettre le courant de perte notable qui les traverse.

Les caractéristiques de ces appareils sont qu'il ne se produit, après les avoir soumis à un potentiel élevé, aucune décroissance de tension, bien que la pellicule soit traversée par un courant dynamique notable, et d'autre part la pellicule offre l'aptitude à modifier son épaisseur proportionnellement à la tension appliquée.

On monte les parafoudres électrolytiques (fig. 212) en série avec des parafoudres à cornes ou des parafoudres à rouleaux, et dans ce dernier cas pour les lignes à très haute tension.

Les parafoudres ou limiteurs à condensateurs sont en principe

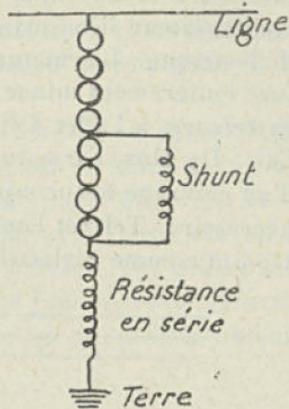


Fig. 210.

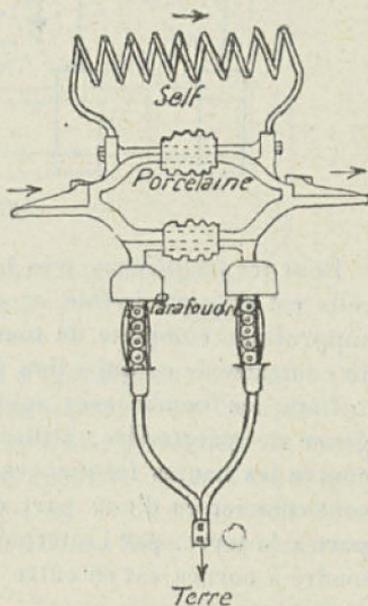


Fig. 211.

constitués par un tube de verre à col renforcé, fermé à la partie inférieure et ouvert à la partie supérieure, la résistance du condensateur diminuant considérablement sur les bords du diélectrique. L'armature intérieure se compose d'une argentine entièrement mince obtenue chimiquement, ainsi que celle extérieure, à l'effet d'éliminer complètement l'interposition de l'air. De plus, l'armature extérieure est elle-même recouverte d'un cuivrage beaucoup plus épais, qui lui donne la consistance nécessaire. Tel est l'appareil que Moscicki a imaginé et mené à point comme réalisation.

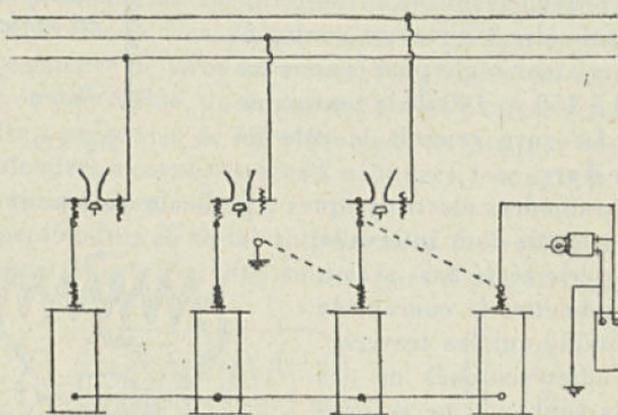


Fig. 212.

Pour les fréquences très basses, la résistance de ces appareils est presque infinie, ce qui a l'avantage de permettre la suppression complète de tout intervalle d'éclatement en série, au contraire de ce qui a lieu pour les limiteurs électrolytiques.

Dans les nombreuses applications qui ont été faites de ce genre de parafoudre, utilisé comme dispositif de protection contre les hautes fréquences, les batteries de condensateurs sont connectées d'une part directement à la ligne, et d'autre part à la terre, par l'intermédiaire d'une résistance; un parafoudre à cornes est en outre disposé en parallèle avec les condensateurs.

Les *parafoudres* ou *limiteurs d'eau* ou à *colonne* ont l'avantage d'être peu coûteux; il existe un grand nombre de modèles de ce genre de parafoudre, et tous peuvent fonctionner sans inter-

position d'un éclateur, qui est susceptible de donner lieu à des résonances. Ils sont surtout efficaces contre les surtensions dues aux charges statiques, et ils réalisent un système excellent pour mettre une installation d'une façon permanente à la terre.

Ils sont constitués par un jet d'eau ascendant ou descendant, contenu dans un tube sur toute la longueur et lancé contre un bouclier métallique. Le jet d'eau relie une phase à la terre, et on règle sa résistance en modifiant sa longueur. D'autres forment de véritables nappes d'eau de grande surface. On utilise soit de l'eau courante ou de la même eau que l'on reprend dans un bassin au moyen d'une pompe et telle qu'on puisse obtenir le refroidissement suffisant de l'eau.

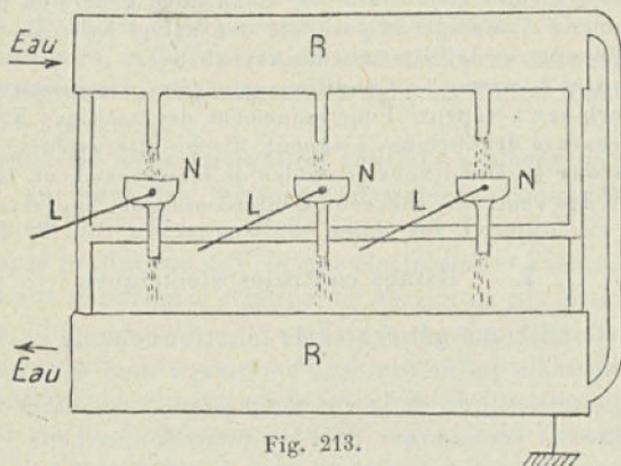


Fig. 213.

La figure 213 montre un genre d'installation où chaque pôle est mis à la terre par une résistance liquide constituée par deux colonnes d'eau s'écoulant librement, d'une part, entre un réservoir R alimenté par une conduite spéciale et trois entonnoirs N reliés chacun à un des pôles, et d'autre part entre ces entonnoirs et un second réservoir R'; les deux réservoirs sont reliés ensemble et à la terre.

On reproche aux résistances liquides une trop grande résistance ohmique, la fuite ou évaporation de l'eau, le gel et bris des récipients et la projection du liquide hors des récipients en cas de violentes décharges.

La tendance actuelle est de remplacer ces résistances par des cylindres en carborundum. D'autre part, pour diminuer l'influence de la capacité des lignes et appareils, on a proposé d'apporter aux installations un facteur de sécurité de plus, en plaçant près des machines des condensateurs entre fils et terre (éléments Mosciki).

CHAPITRE XV

USINES CENTRALES ET RÉSEAUX

- I. *Usines centrales électriques.* — Conditions générales de fonctionnement. Couplage en parallèle des usines hydroélectriques. Fonctionnement des alternateurs asynchrones.
- II. *Centrales à vapeur.* — Conditions générales d'exploitation. Rôle des turbines à vapeur. Fonctionnement des turbines à vapeur. Condenseurs des turbines à vapeur. Turbo-alternateurs.
- III. *Réseaux.* — Conditions générales de fonctionnement. Interconnexion des centrales. Réseaux d'interconnexion. Super-centrales.

I. — Usines centrales électriques.

118. Conditions générales de fonctionnement. — Les stations centrales qui ne font que l'éclairage sont soumises à une variation périodique de la consommation désavantageuse pour le rendement économique de l'exploitation, car cette variation varie suivant les saisons et suivant les heures de la journée. Un diagramme journalier quelconque de la puissance instantanée présente des maxima et autant de minima différents, et on peut noter que les maxima et les minima ne se présentent pas, en toutes saisons, aux mêmes heures de la journée.

La relation entre la capacité de l'usine et la nature du débit est des plus importantes, car c'est d'elle que dépend la continuité dans la production de la puissance. La présence de réservoirs hydrauliques ou électriques, de machines thermiques auxiliaires exerce, comme l'on sait, une influence très nette sur le fonctionnement de l'usine, de même que sur le facteur de charge. Le meilleur moyen de régularisation, et par suite le

meilleur prix de revient, peut être déduit des graphiques de débit hydraulique et des graphiques de variation de charge, suivant l'utilisation à laquelle est destiné le courant. Le problème dans sa généralité consiste à rechercher les meilleurs moyens pour passer les pointes.

Toute amélioration dans la conduite des usines centrales se traduit par une diminution des frais d'exploitation, qui conservent dès lors un caractère permanent. Telle est, pour les usines hydroélectriques, l'idée de constituer chaque unité de puissance par un groupe « turbo-alternateur-transformateur » qui, tout en simplifiant l'installation, influe d'une façon notable sur le rendement économique de l'installation.

Pour le relèvement du facteur de puissance des réseaux par machines synchrones, on peut préconiser l'utilisation d'alternateurs en repos ou de réserve, comme moteurs synchrones compensateurs, et la répartition rationnelle du courant réactif entre certaines usines génératrices dans les limites d'une bonne marche en parallèle.

Le problème de la tarification consiste à porter un examen attentif sur tous les facteurs, aussi bien économiques que techniques, qui influent, d'une part, sur l'emploi, et d'autre part, sur la production de l'énergie électrique, et à tenir compte, suivant son importance relative, de chacun de ces facteurs.

Les stations centrales ne vendent pas uniquement suivant le prix de revient avec un même pourcentage de bénéfice; elles font intervenir le service rendu, qui dépend des avantages particuliers que le consommateur trouve à employer l'énergie électrique. Il s'ensuit que le tarif ne peut pas être uniforme pour tous les consommateurs, et les exploitants sont toujours maîtres de leurs tarifs et par suite des rabais qu'ils peuvent consentir sur les tarifs maxima. Divers systèmes de tarification sont appliqués dans ce cas.

L'emploi de relais dans les réseaux étendus est considéré comme indispensable par beaucoup de techniciens, mais la détermination d'un type et leur installation en des points judicieusement choisis nécessitent au préalable la connaissance des courants de court-circuit s'établissant dans les différentes sections. On doit donc s'assurer qu'en ces points la continuité de l'exploitation sera assurée. A cet effet les relais devront

être réglés de manière à couper effectivement une ligne avariée pour tout défaut se produisant sur ladite ligne, même à son point extrême le plus éloigné, tout en restant inertes en cas de dérangement survenant à un embranchement de sous-station.

119. Couplage en parallèle des usines hydroélectriques.

— Les réseaux d'énergie électrique alimentés par deux ou plusieurs usines sont de nos jours très répandus. On se trouve en présence, d'une part, d'usines productrices dont le débit varie suivant certaines conditions, et d'autre part, de centres de consommation où la quantité d'énergie absorbée varie dans des conditions très différentes et, pour régulariser le rapport entre le débit des usines et la consommation du réseau de distribution, il faut adopter un mode de fonctionnement régulier et continu des usines génératrices qui comporte le maximum d'économie. La marche en parallèle des usines est une solution qui satisfait le problème, à condition que tout fonctionne régulièrement.

Les paragraphes qui suivent donnent toutes indications utiles à cet égard.

120. Fonctionnement des alternateurs asynchrones. —

On reconnaît aujourd'hui la supériorité des alternateurs à pôles alternés. Dans les alternateurs spécialement destinés à alimen-

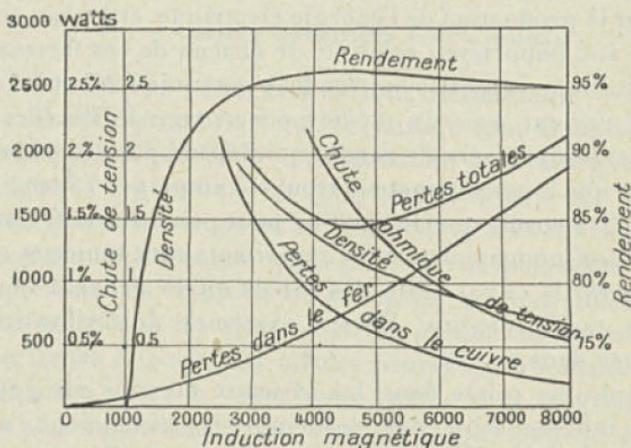


Fig. 214. — Caractéristiques de fonctionnement d'un alternateur.

ter des moteurs, il convient de saturer non seulement les extrémités des pièces polaires, mais aussi le noyau du système inducteur.

Au point de vue des courts-circuits et de la résonance, les alternateurs asynchrones présentent un contraste absolu avec les alternateurs synchrones. Avec les premiers, dans le cas d'un court-circuit, la tension tombe à zéro, et ils ne fournissent ainsi aucun courant; il n'y a pas tendance à introduction des plus hauts harmoniques formant résonance. Au contraire avec les alternateurs synchrones, il y a accroissement subit de courant

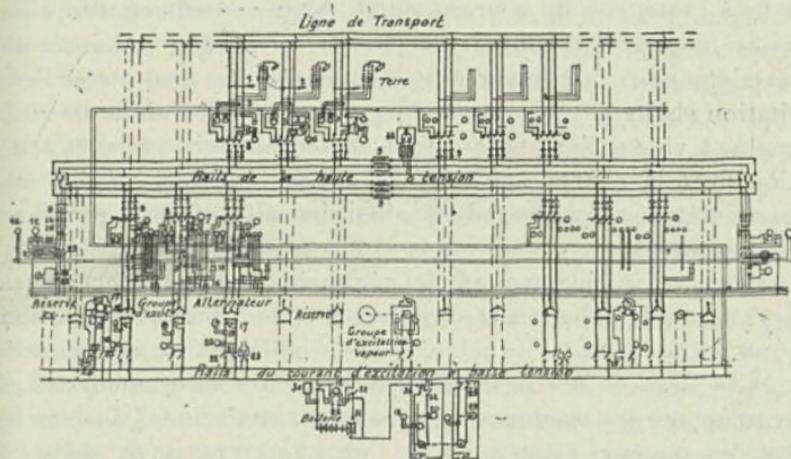


Fig. 215. — Schéma général des connexions d'une usine centrale (courant triphasé).

- 1, parasurtension; 2, appareil de court-circuitage; 3, transformateur de courant
- 4, relais à action différée à maximum; 5, ampèremètre alternatif; 6, transformateur de tension; 7, compteur triphasé; 8, interrupteur à huile; 9, couteaux à main; 10, phasemètre; 11, wattmètre; 12, voltmètre; 13, fiche de contact bipolaire; 14, coupe-circuit; 15, transformateur triphasé; 16, fiche de synchronisation; 17, rhéostat de champ; 18, ampèremètre continu; 19, shunt; 20, compteur continu; 21, résistance d'extra-courant de rupture; 22, interrupteur unipolaire; 23, interrupteur bipolaire à double direction; 24, rhéostat de démarrage; 25, interrupteur automatique à maximum; 26, commutateur de voltmètre; 27, appareil de comparaison de vitesse; 28, lampe; 29, interrupteur tripolaire; 30, ampèremètre enregistreur; 31, additeur-disjoncteur double; 32, interrupteur automatique à maximum et à renversement; 33, indicateur de terre.

ou choc, et, à cause de la réaction de l'armature vers la charge, les ondes sont distordues et très variables avec l'amplitude et la charge du courant, de sorte qu'il y a introduction d'harmoniques de résonance. Les alternateurs asynchrones sont tout indiqués pour la commande par turbines; au double point de vue mécanique et électrique, ils s'adaptent parfaitement à la marche à grande vitesse, et leur construction s'y prête beaucoup mieux

que les alternateurs synchrones, et le prix en est sensiblement plus réduit.

On constate que le facteur de puissance d'un alternateur asynchrone peut être rendu pratiquement constant depuis la demi-charge jusqu'à 25 p. 100 de la surcharge, c'est-à-dire que l'intensité du courant magnétisant nécessaire à l'alternateur, pour toutes ses charges usuelles, est pratiquement proportionnelle à l'intensité du courant watté. Alors, en admettant qu'on puisse négliger le courant de charge du réseau, si l'on a un certain nombre de commutatrices en marche, on peut régler l'excitation shunt de chacune d'elles de façon à obtenir la tension voulue à vide et l'excitation série, de façon à faire varier la tension avec la charge suivant telle courbe que l'on voudra, les commutatrices compoundant ainsi les alternateurs par leur excitation série.

Dans une usine génératrice équipée avec des alternateurs asynchrones, l'absence d'excitatrices et de circuits d'excitation rend les connexions du tableau très simples et les manœuvres très faciles; on n'a pas à synchroniser les alternateurs. Les régulateurs des machines motrices sont commandés du tableau par des moteurs électriques, et l'on peut répartir la charge à volonté entre les divers alternateurs sans avoir à régler l'excitation pour maintenir constant le facteur de charge, comme il faut faire avec les alternateurs synchrones. Lorsque le réseau possède une capacité considérable, il ne faut pas prendre des alternateurs trop faibles, sinon le courant de charge du réseau tendrait à surexciter les machines et par suite à élever leur tension jusqu'à saturation magnétique.

II. — Centrales à vapeur.

121. **Conditions générales d'exploitation.** — Les prix d'installation par kilowatt sont dans le rapport de 1 à 4 environ (actuellement 800 à 900 fr. contre 3 000 à 3 500 fr. par kilowatt) pour des installations de 100 000 kw. de puissance à 1 000 kv. Les consommations de charbon par kw.-h. net sont, dans les mêmes conditions, dans le rapport de 1 à 2 (1 kg. contre 2 kg. de charbon par kw.-h. net). Les autres dépenses d'exploitation sont dans le rapport de 1 à 6. Enfin les prix de revient du kw.-h.

net sont dans le rapport de 1 à 3 environ, en tenant compte des charges financières.

On voit donc le grand intérêt qu'il y a à employer des unités de grande puissance.

On doit s'attacher, dans l'installation des centrales, à réduire au minimum les manipulations qui donnent lieu à la formation des fines; à prévoir : la possibilité d'emploi de qualités très diverses de charbon pour donner le maximum de souplesse à la centrale; pour le concassage et le broyage du gros après criblage préalable, des appareils aussi souples que possible pour faire de bons mélanges de charbon de qualité différente; enfin la possibilité de stocker et de prendre des précautions contre la combustion spontanée du charbon.

Si l'installation peut se faire à proximité d'une rivière, il est préférable de relier l'usine à la rivière par des galeries noyées tant pour l'aller que pour le retour, l'évacuation étant conduite assez loin de l'entrée d'eau pour éviter le mélange de l'eau chaude à l'eau froide.

On admet actuellement une seule chaufferie, composée d'unités de 2 000 m² de surface de chauffe et produisant de 60 000 à 80 000 k. de vapeur à l'heure. La chaufferie est disposée d'un seul côté de la salle des machines. On prévoit une réserve d'environ 25 à 35 p. 100 de l'importance de l'installation.

Il y a avantage à placer les groupes turbo-générateurs perpendiculairement à la longueur de la salle des machines et au-dessus des galeries d'eau de condensation (condensation par surface).

On construit actuellement à l'étranger des groupes turbo-alternateurs atteignant 70 000 kw. de puissance. Il semble qu'il y ait avantage, à partir de 4 unités, à avoir des groupes de puissance uniforme. On construit des alternateurs atteignant la tension de 15 000 volts.

L'utilisation maximum théorique d'une centrale est de 8760 heures, mais pratiquement elle dépasse rarement 3 000 heures par an.

La valeur d'une calorie n'est pas la même en tous les points du circuit d'une centrale; ainsi pour une centrale de 50 000 kw., on trouve : à l'arrivée du charbon 1; à l'entrée des grilles 1,4; dans la vapeur sortant des chaudières 2,3, et aux bornes des

génératrices électriques 19,5. (Ces résultats sont basés sur un prix de 100 fr. la tonne du charbon à 7 000 calories, un rendement de 80 pour 100 pour les chaudières et l'emploi de bonnes turbines à vapeur.)

On emploie maintenant des chaudières à volume réduit et à forte vaporisation par mètre carré de surface de chauffe. Le timbre des chaudières s'est successivement élevé de 10 kg. à 25 kg. par cent. carré, portant le rendement thermique de 0,323 à 0,363, et le volume spécifique de la vapeur passant de 198,2 à 82,9.

On sait que la surchauffe de la vapeur à pression constante a pour effet d'améliorer le rendement économique des machines. Elle intervient aussi pour abaisser dans une certaine mesure la température des gaz à la sortie. On atteint actuellement 425 ou 450° comme température dans les surchauffeurs de vapeur et les tuyauteries.

Les économiseurs en tubes d'acier commencent à s'implanter en France.

On peut réchauffer l'eau dans l'économiseur à une température d'autant plus voisine de la température d'ébullition qu'on aura un régulateur d'alimentation plus parfait. On a fréquemment préconisé l'utilisation de l'air chaud provenant du refroidissement des alternateurs comme air comburant dans les foyers des centrales. Quoi qu'il en soit, ces appareils semblent devoir devenir des échangeurs des plus intéressants pour les chaufferies, à cause de leur prix relativement modéré, de leur légèreté et de leur peu d'encombrement.

Au point de vue du tirage, l'expérience a montré que le soufflage sous grille a l'avantage de donner, toutes conditions égales, une allure plus chaude que le tirage simplement aspiré, et notamment de permettre l'utilisation des charbons de plus mauvaise qualité.

Depuis une vingtaine d'années, les foyers mécaniques se sont peu à peu implantés dans les chaufferies. On emploie les types à chaînes sans fin, et les types à chargement inférieur sont les plus couramment utilisés.

122. Rôle des turbines à vapeur. — Les turbines à vapeur jouent un rôle important dans les usines de secours à vapeur, où elles ont à peu près supplanté les machines à piston pour

l'entraînement des génératrices d'électricité; d'ailleurs elles s'imposent dans les cas de régime de marche constant et à pleine charge, où leur rendement industriel est très élevé. Le remplacement du mouvement alternatif dans les machines génératrices de vapeur a permis une diminution d'encombrement, une amélioration du rendement mécanique, une constance du couple moteur et enfin une réduction du graissage et de l'entretien. En outre on a pu construire des unités d'une puissance que l'on ne peut demander aux machines ordinaires.

Au point de vue thermique, on peut pousser aussi loin que l'on veut la détente de la vapeur, et de plus on y utilise mieux la surchauffe, car la vapeur se trouve moins réduite par la condensation à l'admission. La turbine à vapeur permet de supprimer les lourds massifs de fondation, l'emploi direct de l'eau de condensation sans entraînement d'huile et enfin d'utiliser un vide très élevé, condition excellente pour le rendement thermique de la machine.

La turbine à vapeur exige, par contre, une vitesse de rotation excessive.

On construit de nos jours des unités atteignant 70 000 kilowatts.

Les turbines à action sont celles qui actuellement offrent les plus grands avantages et qui, par conséquent, sont les plus employées.

123. **Fonctionnement des turbines à vapeur.** — On divise les turbines en machines à *action*, où l'énergie potentielle de la vapeur est transformée totalement en énergie cinétique dans des tuyères ou des distributeurs fixes, la vapeur agissant sur les aubes mobiles par sa vitesse seule, et en machines à *réaction*, où on détend partiellement la vapeur dans des distributeurs fixes, partiellement dans des aubages mobiles, la vapeur agissant sur ceux-ci à la fois par sa vitesse et par sa détente.

Sauf dans des cas spéciaux et pour de faibles puissances, on n'emploie plus guère la turbine à un seul étage de pression. Elle est alors toujours à impulsion.

Les turbines à réaction pure, c'est-à-dire celles dont tous les aubages récepteurs, aux étages successifs de pression, fonctionnent suivant le principe de la turbine à réaction, étaient très en vogue il y a quelques années. Depuis, les turbines à action,

soit à action pure, soit à action dans la partie à haute pression, et à réaction dans la partie avoisinant le condenseur, se sont peu à peu imposées, grâce à leurs avantages, qui consistent à moins d'étages de pression, en l'absence de la poussée axiale due à la réaction, à la possibilité de ménager des jeux importants entre parties fixes et parties tournantes, et leur rendement est aussi bon que celui des turbines à réaction.

De nos jours, la plupart des constructeurs adoptent l'une des formules suivantes : action pure à tous les étages avec, à chaque étage, une roue réceptrice portant une seule couronne d'aubes ; action pure avec des roues à chutes de vitesse soit aux étages supérieurs seulement, soit à tous les étages ; action et réaction combinées, la partie amont de la turbine comportant un ou plusieurs étages à action, avec roues simples ou à chutes de vitesse, et les étages de la partie aval étant à réaction.

Dans la construction des unités de grande puissance, on est parfois conduit, pour ne pas donner aux dernières roues des dimensions excessives, à faire travailler la vapeur dans une turbine à haute pression, puis dans une ou plusieurs turbines à basse pression qui peuvent être ou sur le même arbre, ou entièrement séparées. Les groupes les plus puissants construits aux États-Unis dans ce style paraissent être de 70 000 kilowatts divisés en trois corps.

Une turbine comprend une enveloppe, divisée en plusieurs pièces assemblées solidement, notamment suivant un plan diamétral. On adopte pour la partie haute pression l'acier coulé, ce qui donne plus de sécurité.

Dans cette enveloppe sont calées des directrices ou distributeurs fixes portant des ailettes en acier, entre lesquelles la vapeur prend la vitesse et la direction voulues pour agir sur les aubages mobiles.

Celles-ci sont actuellement presque toutes portées à raison d'une ou plusieurs rangées, solidement encastrées par des disques ou roues en acier de choix ayant la forme de solides d'égale résistance. Ces roues sont clavetées sur un arbre en acier accouplé directement à l'arbre de l'alternateur. La rotation se fait dans des paliers garnis d'antifricition et graissés sous pression.

Le condenseur et un certain nombre d'appareils accessoires

établis en vue de l'automatisme et de la sécurité de marche complètent la turbine.

La pression de vapeur à employer pour les turbines a longtemps paru limitée à 15 ou 16 kg. cm². Aujourd'hui la limite de pression est de beaucoup reculée (jusqu'à 25 kg.). Pour la même raison, la température de la vapeur, qu'on limitait autrefois à 325°, peut être portée actuellement à 400°. Les grandes vitesses sont toujours les plus favorables. Elles permettent de diminuer les pertes internes, de réduire le nombre des étages et d'améliorer le rendement dynamique. Certaines turbines modernes de grande puissance atteignent des vitesses linéaires de 325 mètres-seconde à l'extrémité des aubages. On construit actuellement des unités à 35 000 kw. pour la vitesse de 1 500 tours minute et 10 000 kw. pour 3 000 tours minute. La limite paraît être de 5 000 t. m. pour 5 000 kw.

Les étages de pression des turbines à action sont séparés l'un de l'autre par des diaphragmes en fonte portant les aubages distributeurs en acier spécial. Dans les étages de vitesse ou de réaction, les aubages

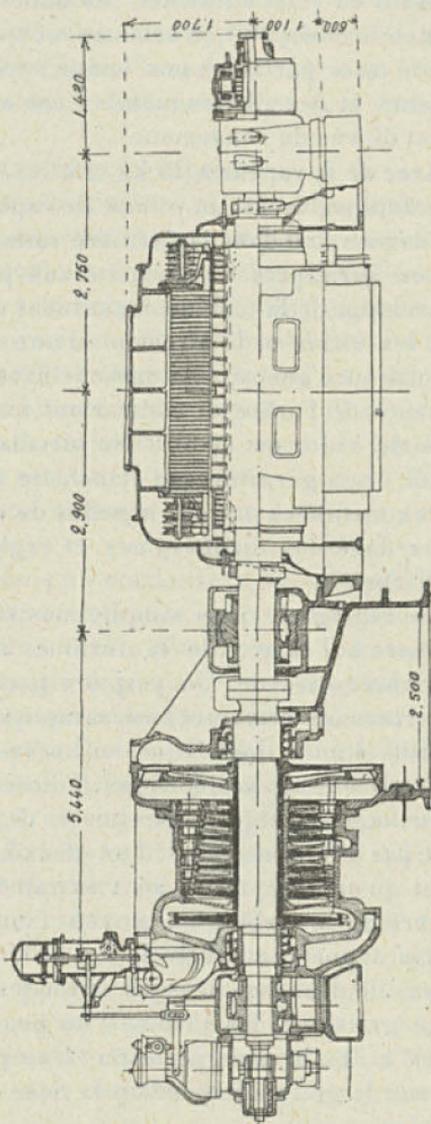


Fig. 216. — Turbo-alternateur de 20 000 K. V. A.

distributeurs sont généralement portés par l'enveloppe elle-même. Les roues portant les aubages mobiles se font le plus souvent en acier au nickel; les aubes des roues motrices sont soit en bronze, soit en acier au nickel.

Un tracé parfait et une bonne exécution des aubages distributeurs et des ailettes mobiles ont une importance capitale au point de vue du rendement.

Avec de la vapeur à 25 kg. cm^2 et un vide de 97 p. 100, chiffres déjà pratiqués, un volume de vapeur à l'entrée de la machine est devenu 750 dans la dernière roue.

Les garnitures d'étanchéité aux points où l'arbre traverse l'enveloppe de la turbine constituent un problème assez délicat. On les forme ordinairement d'une série de lames de bronze spécial ou d'anneaux de carbone fixes, ajustés à une très faible distance de l'arbre et contrariant le passage de ce fluide. Du côté du vide, on établit une circulation de vapeur ou même d'eau. Les garnitures d'étanchéité entre étages de pression sont constituées par des lamelles de cuivre ou de laiton encastées dans des diaphragmes et réglées à une faible distance de l'arbre.

Le réglage le plus simple consiste en l'étranglement de la vapeur à l'entrée de la turbine au moyen d'une soupape équilibrée spéciale. On y ajoute parfois un jeu de soupapes à ouverture ou fermeture automatique suivant la charge. Ces dispositifs sont actionnés par un servo-moteur à huile sous pression placé sous la dépendance directe d'un régulateur à force centrifuge. Quelquefois celui-ci, de très faibles dimensions, agit par l'intermédiaire d'un deuxième relais. Le régulateur ainsi qu'un tachymètre sont entraînés, à vitesse réduite, par l'arbre de la turbine au moyen d'engrenages hélicoïdaux. On arrive à une régulation de 5 p. 100 de la variation de vitesse en cas de décharge brusque et totale.

Le graissage des turbines un peu importantes se fait toujours à l'huile sous pression. Une pompe à vapeur auxiliaire permet le graissage pendant la mise en marche et l'arrêt de la turbine.

On a commencé à utiliser, dans les grosses turbines, l'eau condensée pour la réfrigération de l'huile.

Dans les petites turbines, l'ordre de rendement est de

60 p. 100, et dans les turbines puissantes on atteint 84 à 85 p. 100.

Les types de turbines les plus connues sont : la turbine Parsons, la turbine Laval, la turbine Zoelly, la turbine Electra, la turbine Rateau, la turbine Curtis, la turbine Melms et Pfeningner, la turbine Eyermann, la turbine Bréguet, la turbine Brown-Boveri.

124. **Condenseurs des turbines à vapeur.** — A un mètre carré de surface correspondent 8 à 10 kw. dans les condenseurs bien établis. Dans les grandes installations, on attelle la pompe de circulation à une petite turbine à vapeur échappant soit dans la turbine principale, soit à son condenseur. On réalise ainsi l'indépendance d'un auxiliaire essentiel. Avec une vitesse d'eau de 1^m,50 à 2 m. à la seconde à travers les tubes, on évite les dépôts, même avec des eaux boueuses, dans lesdits tubes; quant au nombre de parcours ou de trajets aller et retour de l'eau au travers du condenseur, il n'est jamais supérieur à quatre. Pour éviter l'attaque des tubes, on mélange à l'eau de faibles doses d'acide chlorhydrique.

Pour maintenir le vide dans un condenseur, on sait qu'il faut en extraire les gaz, que la réfrigération ne saurait éliminer. C'est le rôle de la pompe à air. On n'emploie plus maintenant pour jouer ce rôle de pompes à piston; la pompe rotative Leblanc, les éjecteurs de vapeur ou les trompes à eau sont les moyens actuellement employés. On extrait l'air dans la partie la plus froide du condenseur, où il est le plus réduit comme volume et où il n'est chargé de vapeur qu'au minimum. Une petite partie du faisceau tubulaire est même consacrée spécialement à ce refroidissement de l'air.

L'évacuation de l'eau condensée provenant de la vapeur doit être faite constamment, pour ne pas perdre de surface réfrigérante. C'est le rôle de la pompe d'extraction, actuellement presque toujours centrifuge, et entraînée soit par le même moteur que la pompe de circulation, soit par un moteur électrique séparé. Cette pompe doit toujours être en charge sur le condenseur.

On peut juger de l'importance capitale de la condensation par les données suivantes : si on prend comme point de comparaison le vide à 98 p. 100, on perd 7,2 p. 100 en marchant à

96 p. 100 de vide; 11,5 p. 100 en marchant à 94 p. 100 et 14,8 p. 100 en marchant à 92 p. 100 de vide.

Après s'être détendue dans la turbine, en fournissant du travail, la vapeur passe au condenseur, où elle reprend immédiatement l'état liquide, grâce à l'intervention d'une masse d'eau froide qui absorbe la chaleur dégagée par ce changement d'état.

Les condenseurs à mélange ne sont pour ainsi dire pas employés dans les machines de quelque puissance. Avec les condenseurs à surface, l'eau condensée peut être recueillie et renvoyée aux chaudières.

Le vide atteint dans un condenseur a pour limite maximum la valeur correspondant à la tension de la vapeur d'eau assurée à la température d'entrée de l'eau froide. Un vide poussé ayant une grande importance pour la consommation de vapeur des turbines, on admet actuellement des coefficients très élevés pour la dépense d'eau de condensation.

Avec les condenseurs à mélange on dépensait 30 à 35 kg. d'eau par kilog. de vapeur à condenser; avec les condenseurs à surface on adopte rarement moins de 60 kg. et on va quelquefois jusqu'à 100 kil. d'eau de circulation par kil. de vapeur à condenser. Le travail de pompage supplémentaire nécessité par cet excès d'eau est largement récupéré. La solution la plus favorable consiste à emprunter l'eau de circulation à une rivière et de la lui restituer par siphonement, d'autant plus que l'eau des réfrigérants donne un vide moins bon que l'eau des rivières.

Le faisceau tubulaire d'un condenseur doit être parfaitement étanche. La tendance actuelle est de choisir des tubes très petits comme diamètre, entre 16 et 25 mm. de diamètre intérieur.

On arrive actuellement à faire des condenseurs de très grandes dimensions, ayant jusqu'à 4 000 ou 5 000 mètres carrés de surface et condensant 150 000 à 200 000 kgr. de vapeur à l'heure.

La thermodynamique assigne une limite supérieure au rendement d'une machine quelconque fonctionnant entre les températures extrêmes θ (admission) et θ' (condenseur). C'est le rapport $\frac{\theta - \theta'}{\theta + 273}$, rendement du cycle de Carnot correspondant à ces températures. Pour augmenter le rendement du cycle des turbines à vapeur, on doit d'une part agir sur θ et θ' et d'autre part se rapprocher autant que possible du cycle de Carnot.

Un moyen pour augmenter le rendement du cycle des turbines consiste à réchauffer l'eau d'alimentation au moyen des prises de vapeur opérées à chaque étage de pression; l'accroissement du coefficient économique du cycle est d'autant plus grand que la pression initiale de la vapeur employée (pression aux chaudières) est plus élevée.

Une conséquence des prélèvements de vapeur dans la turbine est qu'on peut réduire la surface du condenseur, et cela d'autant plus que le prélèvement est plus important.

On peut penser dès maintenant que l'importance des réchauffeurs avec prélèvements augmentera au détriment de celle des économiseurs, ces derniers étant de plus en plus remplacés, comme récupérateurs à la suite des chaudières, par les réchauffeurs d'air.

125. **Turbo-alternateurs.** — La généralité des alternateurs pour turbines à vapeur appartiennent au type synchrone et le plus souvent à pôles intérieurs. La nécessité de réduire au

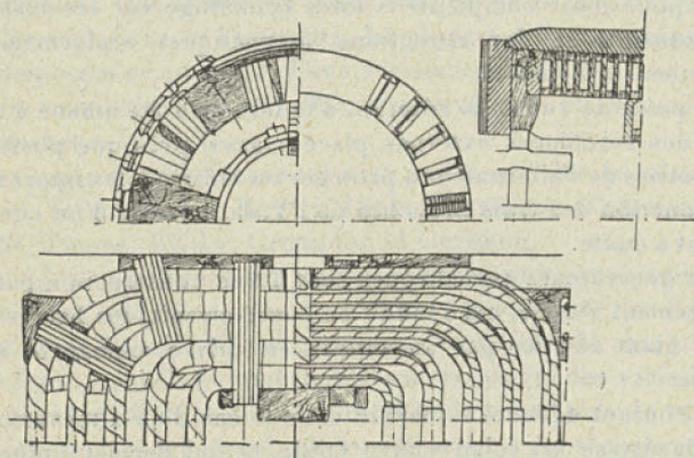


Fig. 217. — Inducteur cylindrique pour turbo-alternateur.

point de vue mécanique les dimensions des alternateurs-turbines a conduit nécessairement à admettre pour ces machines des réactions notablement supérieures à celles des machines normales. Le coefficient d'auto-régulation est par suite très élevé, et réciproquement le rapport de l'intensité en court-circuit à l'intensité normale, pour l'excitation en charge, est géné-

ralement faible, rapport qu'il n'est pas rare de voir descendre au-dessous de 1,5.

La construction des inducteurs tournant à grande vitesse exige des soins particuliers. On fait appel à des pôles saillants, généralement massifs, soit à des enroulements répartis dans des encoches à la surface d'un noyau cylindrique, constitué souvent par des plaques épaisses.

Dans tous les cas le noyau est divisé, transversalement à l'arbre, en un certain nombre d'éléments séparés par des entretoises formant cheminée de ventilation. Il est toujours feuilleté et en disques d'une seule pièce. L'effort maximum est toujours au centre près de l'arbre. Les bobinages pour les inducteurs sont généralement exécutés directement sur les armatures, et la fixation dans les encoches est simplement obtenue au moyen de coins en métal. On fait aussi les enroulements inducteurs avec enroulements répartis tout en préparant les bobines sur formes. Pour les rotors à pôles saillants, le montage demande de grands soins pour tenir compte de la force centrifuge sur les masses individuelles et des attractions magnétiques uniformément réparties sur celles-ci.

Au point de vue de la réaction d'induit, on a été amené à utiliser des réactances externes placées aussi près que possible des bornes de l'alternateur à protéger ou encore à les intercaler à la jonction des trois branches de l'Y, dans le cas d'un enroulement à étoile.

Les générateurs asynchrones sont d'une construction particulièrement simple, avec induit en court-circuit, les barres du rotor étant réunies par un anneau en cuivre emmanché à la presse.

Le courant déwatté à fournir dans le cas d'un alternateur à grande vitesse est relativement faible, ce qui permet d'obtenir un $\cos.$ compris entre 0,92 à 0,98. La mise en parallèle est très simple et instantanée. Ces machines ont le grand avantage, en cas de court-circuit dans le réseau, de n'introduire ni résonance ni surtension et de fournir à toute charge une tension sinusoïdale. Elles fonctionnent également comme amortisseurs pour les surtensions.

III. — Réseaux.

126. **Conditions générales de fonctionnement.** — Avec les réseaux de grande étendue il a fallu prendre des dispositions spéciales pour assurer aux points d'utilisation une tension constante. Les moyens dont on dispose à cet effet sont de deux sortes : le réglage de la vitesse des turbines et le réglage de la tension des alternateurs. Ainsi que nous l'avons vu, la vitesse est rendue constante par des régulateurs commandés par des servo-moteurs actionnés soit directement par l'eau de la chute, soit indirectement par l'huile à une pression déterminée.

Les régulateurs automatiques de la tension électrique se divisent en régulateurs de champ pour maintenir constante la tension de la centrale, en régulateurs d'excitation pour obtenir la constance de la tension des alternateurs, et en régulateurs du courant principal pour la constance de la tension d'un point principal de la distribution assez éloigné de la centrale, malgré les variations de l'intensité. La plupart de ces régulateurs se composent en principe d'une résistance, d'un relais et d'un moteur auxiliaire avec renvoi de mouvement ou mécanisme enclancheur.

Les types de régulateurs les plus usités sont les régulateurs Thury, Tirrit, Brown-Boveri, Dick, Schwaiger, Dalemont et Herdt, Thume, Blathy, Crompton et Oerlikon.

Mais les régulateurs des usines ne suffisent pas toujours, et il arrive qu'une ligne secondaire branchée sur l'une des lignes principales fonctionne de sorte que les variations de charge sur cette ligne secondaire amènent à son extrémité des variations trop grandes. Dans ce cas, on corrige le défaut à l'aide de transformateurs dont les circuits secondaires sont en série avec les lignes dans lesquelles il faut compenser la perte de charge. Le premier de ces transformateurs est alimenté par les transformateurs de potentiel du réseau principal.

Le réglage électro-mécanique convient tout particulièrement bien aux groupes électrogènes conduits par des turbines hydrauliques (procédé L. Routin).

L'application des accumulateurs électriques aux installations à courant alternatif peut dans certains cas donner de bons

résultats. D'une façon générale, les appareils égalisateurs utilisés pour les applications de cette nature sont constitués par un moteur-générateur, une batterie d'accumulateurs reliée au côté continu du générateur et une dynamo auxiliaire. Le réglage est automatique et se fait à l'aide d'un relais agissant sur une résistance au moyen d'un régulateur Thury. Un autre système consiste à insérer dans la ligne un transformateur-série alimentant une commutatrice dont l'intensité du courant débité est proportionnelle à celle fournie en alternatif, réglant ainsi l'excitation de la dynamo principale à courant continu.

Quant aux transformateurs, il faut autant que possible réduire leur perte de tension en charge, ce qui revient à réduire le plus possible la dispersion magnétique. Il faut d'autre part employer des récepteurs peu inductifs, les inégalités de tension provenant du déséquilibre des charges croissant de façon très rapide quand le $\cos \varphi$ diminue.

Les moteurs asynchrones triphasés produisent sur les réseaux deux effets opposés : ils chargent également les trois phases, ce qui est favorable, mais, d'autre part, ils déphasent le courant, ce qui est nuisible. Les moteurs triphasés synchrones convenablement excités sont d'un emploi excellent au point de vue de la chute de tension.

La *mise à la terre* du point neutre dans les réseaux triphasés offre de grands avantages, mais aussi des inconvénients. Dans un réseau non mis à la terre, presque toutes les perturbations donnent lieu à de graves dangers.

Le fil neutre d'un réseau triphasé doit être mis à la terre en un seul point à travers une résistance appropriée; on réalise ce mode d'installation en disposant un commutateur sur le fil de terre et en ne mettant en communication avec la terre que le point neutre d'un seul des alternateurs. On peut actionner le commutateur soit à la main, soit d'une façon automatique. Au point de vue de la connexion avec le sol, on observe qu'elle doit être directe si l'isolement de la ligne est insuffisant et si le matériel est construit de façon à supporter les efforts dus aux courts-circuits; sinon il faut introduire une résistance dans la communication avec le sol pour diminuer les chocs mécaniques causés par les courts-circuits sur une seule phase.

L'économie qui résulte du *retour par la terre* dans un sys-

tème de transport d'énergie à grande distance peut devenir considérable; mais les effets d'induction par les terres, d'induction magnétique, les effets d'électrolyse, les courants parasites témoignent contre cet emploi, au moins dans l'état actuel de la question.

Étant donnée la nature de la charge, le facteur de puissance de la transmission doit être, en vue de son relèvement, l'objet de précautions de toutes sortes. A cet effet il est d'un bon effet d'installer sur le réseau des sous-stations de condensateurs synchrones de puissance appropriée. Dans le même but, en périodes de basses eaux, alors que les régions avoisinant les centrales hydroélectriques doivent être alimentées par des centrales thermiques très éloignées, il est de pratique constante de faire fonctionner un certain nombre de génératrices à la station hydraulique pour fournir le courant réactif local nécessaire et réaliser un régime de tension plus favorable.

127. Interconnexion des centrales. — Dans ce cas il faut s'appliquer à obtenir les résultats suivants : réduction de la charge instantanée pour avoir le maximum de charge dans chaque centrale; diminution du nombre des unités de réserve nécessaire dans chaque centrale; utilisation pour une même puissance d'agrégats plus puissants; suppression de la marche à charge restreinte des agrégats.

Pour le premier cas la charge des pointes ne se produit pas simultanément dans toutes les centrales desservant une région. On sait que ce sont les pointes qui déterminent la puissance à donner à l'usine, puissance qui est égale à la charge maximum instantanée prévue, plus la réserve. On peut compter de ce fait sur une amélioration de 25 p. 100 sur le fonctionnement individuel des petites centrales, et la diminution de la réserve peut être estimée de 15 à 20 p. 100. L'interconnexion des centrales du type éclairage avec des centrales de tramways ou de force motrice pourrait réduire de 25 p. 100 au moins la charge totale maximum et conséquemment la puissance installée et de 10 p. 100 la réserve en puissance sans diminution de la production totale annuelle. Par suite le prix du kilowatt-heure pourrait être réduit de 20 à 25 p. 100. Par le fait de grandes centrales mieux installées, en définitive le prix du kilowatt-heure pourrait être abaissé de 30 à 40 p. 100.

Les grandes centrales nouvelles ne devront d'abord remplacer que les extensions éventuelles des centrales existantes dont tout développement ultérieur serait arrêté. Dans l'avenir, au fur et à mesure de la mise hors service des centrales en marche, les nouvelles usines génératrices se substitueraient progressivement à elles.

Les facteurs caractéristiques, les conditions de charge des centrales existantes pourraient être immédiatement améliorés par l'interconnexion et l'intégration instantanée, une quantité considérable de kilowatt-heures permanents ou semi-permanents étant susceptibles d'être livrés à bas prix, en raison du caractère résiduel de ces disponibilités. Les centrales thermiques du Nord, du Pas-de-Calais et de l'Alsace apporteraient leur contingent, et les pointes de consommation seraient assurées par les centrales thermiques de la périphérie de Paris. En Amérique il existe déjà de grands réseaux d'interconnexion groupant ensemble une puissance génératrice de plus de 300 000 chevaux. On a reconnu en effet que la fusion commerciale et technique des différentes sociétés de production permet de profiter sur toute l'étendue du territoire, et pour un rendement meilleur des installations, de la différence des heures locales en utilisant les chutes d'eau au mieux de leur débit et que l'électrification ne peut en être financièrement que facilitée. Dans ce but on songe à installer non seulement les appareils accessoires, mais les machines elles-mêmes et le tableau à l'air libre.

Le gouvernement des États-Unis étudie un réseau de distribution générale d'énergie englobant des régions suffisamment peuplées et possédant de nombreuses usines, telles que celles entre Boston et Washington. L'énergie sera demandée à de grandes centrales thermiques installées sur le carreau des mines et à des centrales hydroélectriques existantes ou à créer.

En France, il convient de citer l'initiative prise par la Société de transport d'énergie des Alpes, qui comprend la réunion des principales sociétés de distribution d'énergie de cette région, représentant 580 000 kilowatts. Ce magistral réseau permettra de solidariser les usines hydroélectriques des diverses régions, tandis que de puissantes usines thermiques régulariseront la production de tout l'organisme.

128. Réseaux d'interconnexion. — Quand on a groupé les

chutes d'une même région en vue de leur meilleure utilisation des pentes et des débits de leurs cours d'eau, on réunit ces usines par un réseau d'interconnexion avec les usines des régions voisines. Il s'entend que ces usines sont régularisées

- Lignes 10000-15000 volts. Capacité de transmission 40.000-50000 KVA
 - - - - - en projet, construites ou en service
 - - - - - Capacité de transmission 80000-100000 KVA en construction
 - - - - - en service ou en projet
 + + + + + 150000-200000 volts. Capacité de transmission 80000-100000 KVA.
 Rhône-Paris et Rhin-Paris
 ——— 45000-70000 volts en service ou en construction
 - - - - - en projet.

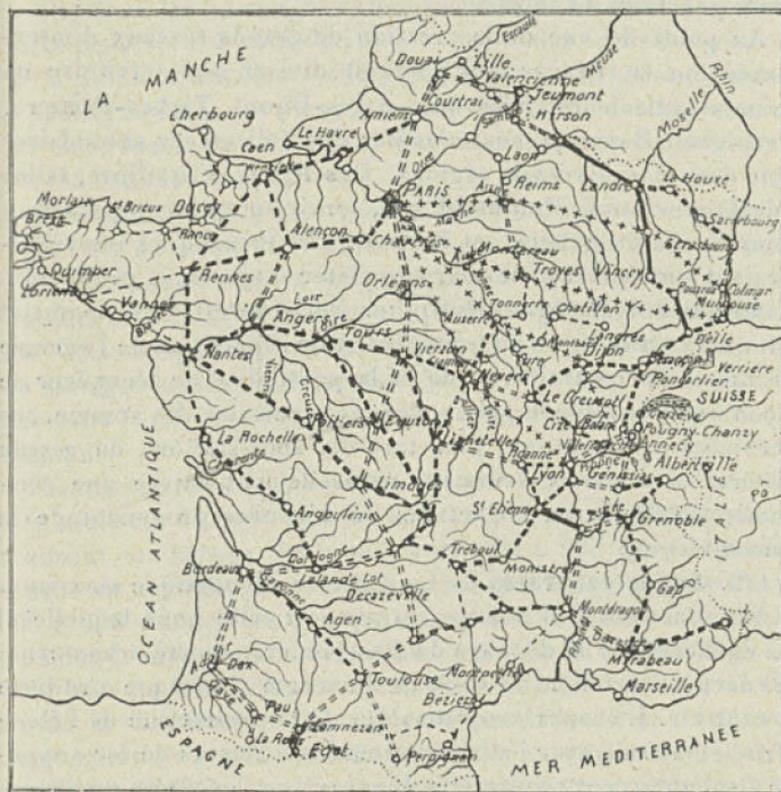


Fig. 218. — Carte des grands réseaux d'énergie électrique de la France.

autant que possible par des réservoirs artificiels ou naturels constituant des réserves annuelles, saisonnières, hebdomadaires ou quotidiennes.

Ces réseaux d'interconnexion ont pour effet de réaliser la sommation des utilisations instantanées. Dans ce but on doit

obliger tout concessionnaire de force hydraulique d'utiliser un débit correspondant à celui semi-permanent, et s'il ne peut se mettre dans cette condition, l'État doit y pourvoir d'office.

Les usines hydroélectriques sont reliées entre elles d'une façon hydraulique par la nature de leurs régimes instantanés, comme nous l'avons expliqué. Elles se prêtent secours comme cela existe déjà, mais il y a lieu en plus de prendre toutes mesures pour que tous les résidus soient amenés à des collecteurs généraux d'énergie.

Au point de vue de la création de grands réseaux d'interconnexion en France, on pourrait diviser son territoire en grands collecteurs, tels que Arles-Dijon, Tarbes-Poitiers, Perpignan-Bayonne, soutenus par des collecteurs secondaires pris dans ces diverses régions. Des lignes d'équilibre, telles que Dijon-Paris, Poitiers-Paris, serviraient de compensation pour le réseau général, et les centrales thermiques interviendraient journalièrement pour compléter et ajuster la production naturelle de l'énergie électrique. Paris serait ainsi le nœud national tout indiqué de transport et de répartition de l'énergie de toutes les centrales, et de là la possibilité de récupérer de façon sensible toute la production des centrales. En somme, ces dernières deviendraient plus tard des sous-stations du réseau général. Les tarifs devraient naturellement suivre une économie parallèle aux réductions de dépenses provenant de la concentration.

129. **Super-centrales.** — La distance économique maximum de rayonnement des super-centrales est celle pour laquelle il y a égalité entre la dépense du charbon transporté transformé en énergie électrique et celle de l'énergie électrique produite en centrale. La super-centralisation de la production de l'électricité combinée avec l'alimentation des chemins de fer supposée électrifiée peut rendre très économique le coût du transport de cette énergie aux distances d'une longueur déterminée.

Dans ces centrales de grande envergure, il y a lieu d'appliquer tous les progrès tendant à la marche économique tant de la station elle-même que des réseaux en dépendant. Ainsi on munira les parafoudres de bobines de choc, et pour ces derniers on fera appel aux appareils en aluminium avec mise à la terre du point neutre. Une observation journalière du rendement des

usines centrales permettra mieux de saisir les économies possibles que par l'étude mensuelle, qui vient avec beaucoup de retard sur les événements. Le relevé et l'interprétation des diagrammes fournis par les divers appareils permettront d'augmenter le rendement dans un certain rapport.

Au point de vue de la clientèle la plus nombreuse possible à apporter aux réseaux de telles usines, il y a lieu de signaler l'intérêt que présente le développement, l'application de l'électricité dans les campagnes pour l'éclairage et surtout pour la force motrice. Par suite de l'actionnement des outils de la ferme, de la diffusion des monte-charges, des ascenseurs, des machines à débiter le bois, des pompes pour l'irrigation, des chemins de fer électriques, on arriverait à diminuer les tarifs toujours trop élevés dans les campagnes.

L'emploi du téléphone pour l'interconnexion des centrales joue un rôle de premier plan. Mais on réaliserait un réel progrès par l'adoption de la télégraphie et de la téléphonie sans fil. En effet un circuit téléphonique spécialisé permettrait d'établir une liaison rapide entre les stations, ce qui peut être très utile quand elles sont très éloignées l'une de l'autre, et de réduire par suite la durée d'interruption du courant sur la ligne à haute tension.

Les liaisons entre une centrale et ses sous-stations peuvent être réalisées au moyen de la radiotélégraphie à l'aide de postes réalisant facilement des portées de 200 à 500 kilomètres. La source de courant peut être une batterie d'accumulateurs de 300 à 400 volts ou un groupe convertisseur réalisant la même tension. L'antenne peut être réalisée par un fil ou par deux fils parallèles de 50 à 100 mètres environ placés à proximité des fils de la distribution d'énergie et parallèles à ces derniers. Cette solution permettrait d'établir facilement une solidarité, par l'intermédiaire des lignes de l'État, entre toutes les centrales du pays. Mais une loi est indispensable pour permettre l'usage de la télégraphie sans fil pour les liaisons industrielles et commerciales.

Il existe déjà d'assez nombreuses installations de super-centrales ou réunion de diverses centrales dépendant d'un même réseau.

L'installation du Rand sud-africain compte 175 centrales ou

postes de coupures à haute tension et 412 sous-stations. Le facteur de puissance moyen est de 72 p. 100 pendant le jour et 70 p. 100 pendant la nuit. Les grosses génératrices fonctionnent sous la tension de 5 000 volts, et les courants par phase diffèrent entre eux de 5 à 10 p. 100.

Dans le Wurtemberg on prend des dispositions pour la création de centrales hydro-électriques destinées à alimenter tout le royaume, actuellement desservi par 500 centrales de faible

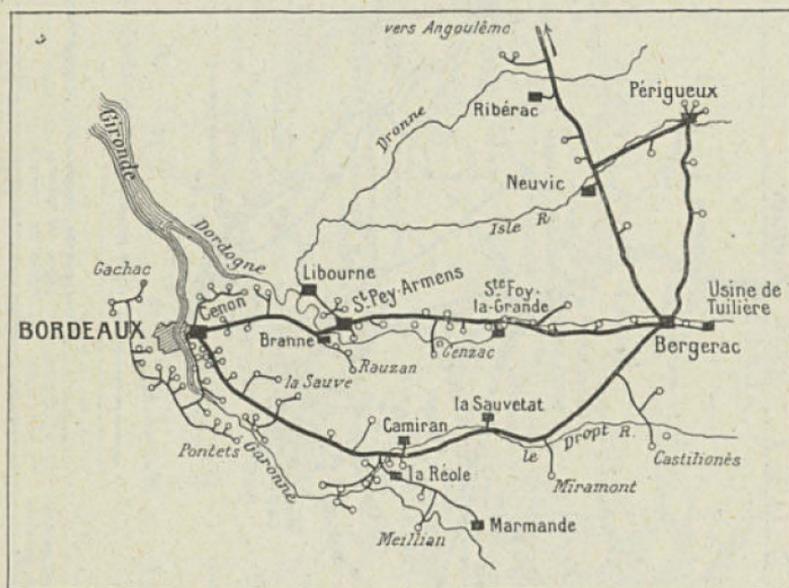


Fig. 220. — Réseau du Sud-Ouest.

puissance. D'après le projet, la production devrait monter de 40 millions de kilowatt-heures en 1920 à 208 millions en 1924. La puissance moyenne serait fournie par des centrales hydro-électriques, et les pointes par des turbines à vapeur et des moteurs à gaz.

En Amérique les puissantes installations de Litte Fallo et de Long Lake, qui comportent des turbines Morrés de 9000 chevaux, sont reliées entre elles et à d'autres usines tant hydrauliques que thermiques. La tension de la ligne principale est de 110 000 volts, et elle alimente 32 sous-stations.

Les usines de la New England Power Company englobent

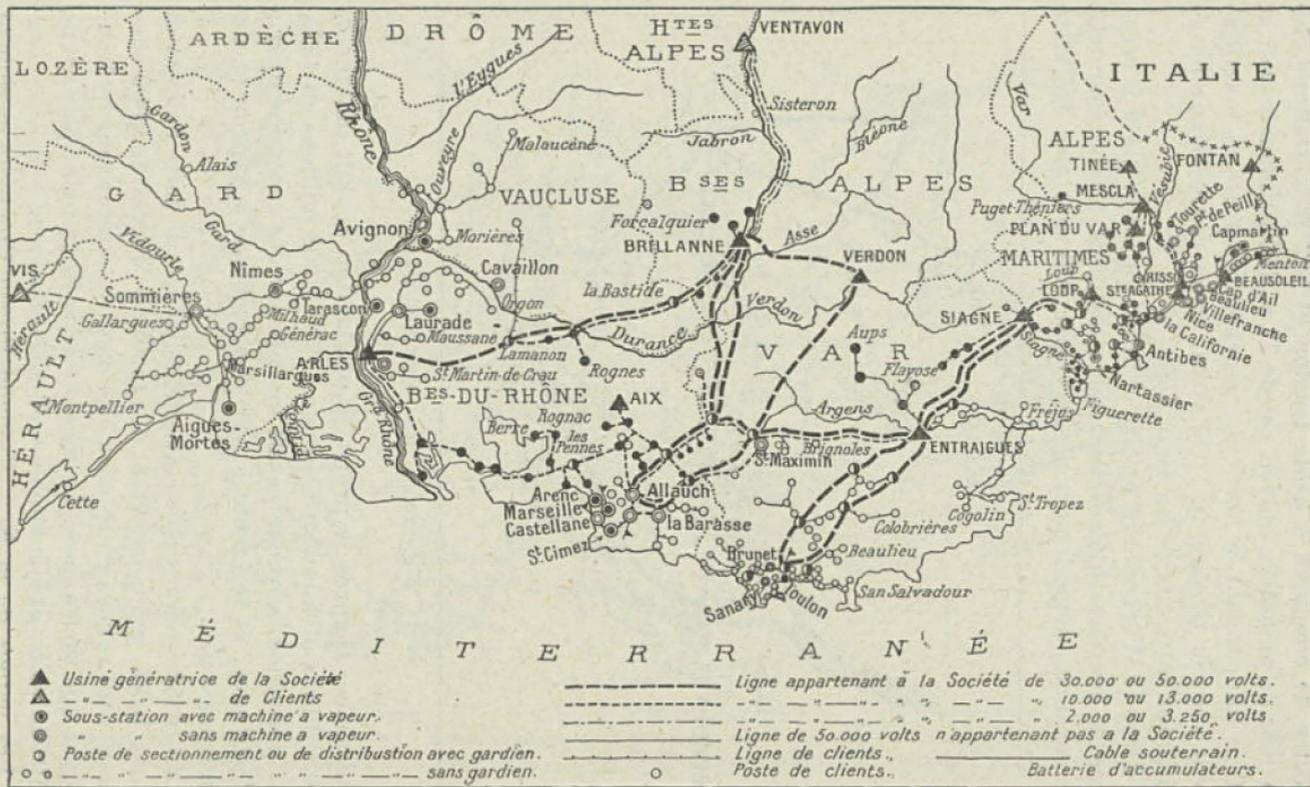


Fig. 221. — Réseau du Littoral Méditerranéen et du Sud-Électrique.

toutes les centrales destinées à desservir les États de Massachusetts, Rhode Island et Connecticut. La puissance totale des usines génératrices est de 500 000 kilowatts. La plupart des sous-stations nouvelles sont installées à l'air libre. On est arrivé à diminuer l'importance des courts-circuits en introduisant automatiquement entre les barres de départ et les feeders une réactance qui est remise hors circuit lorsque le disjoncteur du feeder défectueux a déclanché. On a aussi à porter une attention soutenue à l'état des isolateurs suspendus.

Comme mesures principales à prendre pour la bonne marche des super-centrales, on indique que les génératrices constituées par des alternateurs à très haute tension soient connectées en parallèle sur des barres-omnibus formant boucle par l'intermédiaire de bobines de réaction absorbant en charge environ 5 p. 100 de la tension. Comme moyens de simplification, on ne mettrait qu'un interrupteur par machine; en cas d'accident à un de ces appareils, la puissance disponible est diminuée ainsi de la fraction correspondant au nombre d'unités en service.

Une autre disposition préconisée et qui est meilleure consiste en un double jeu de barres-omnibus et à intercaler dans le système principal des réactances de 5 p. 100 insérées entre chaque couple de machines et les feeders. Quant aux barres-omnibus supplémentaires, on les partage en sections au moyen d'interrupteurs et on dispose des sectionneurs sur les barres-omnibus principales entre chaque groupe de 4 alternateurs.

Au surplus, on pourra appliquer les prescriptions signalées au § 127 qui portent sur les améliorations à apporter au fonctionnement des réseaux des centrales électriques.

TROISIÈME PARTIE

UTILISATIONS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE XVI

TRACTION ÉLECTRIQUE. ÉLECTROCHIMIE. ÉLECTROMÉTALLURGIE.

- I. *Traction électrique.* — Avantages de la traction électrique. — Systèmes de traction. — Usines hydroélectriques pour la traction des chemins de fer.
- II. *Electrochimie.* — Dissociation électrolytique. — Conductibilité des électrolytes. — Décomposition électrolytique et polarisation. — Phénomènes caractérisant la décomposition. — Electrolyse aqueuse des alcalis et du chlore. — Fabrication des hypochlorites. — Fabrication des chlorates et des perchlorates. — Fabrication de la soude. — Affinage du cuivre. Electrolyse ignée. — Avantages du four électrique. — Propriétés de l'arc électrique. — Classification des fours électriques. — Fabrication des électrodes. — Fabrication du carbure de calcium. — Production de l'azote. — Fabrication de la cyanamide. — Fabrication de l'aluminium.
- III. *Electrosidérurgie.* — Avantages du four électrique en sidérurgie. — Types de fours utilisés en électrosidérurgie. — Fabrication des ferro-alliages. — Hauts fourneaux électriques. — Réglage des fours électriques.

I. — Traction électrique.

130. **Avantages de la traction électrique.** — Les principaux avantages que l'on reconnaît à la traction électrique sont : la rapidité des démarrages, les surcharges accidentelles brusques et répétées que le moteur électrique peut supporter sans inconvénient, la facilité des manœuvres de mise en marche et d'arrêt, l'instantanéité d'arrivée du courant, l'économie réalisée dans la centralisation en une seule station de toute la production nécessaire aux besoins d'exploitation, d'où résulte une réduction de frais de main-d'œuvre, d'entretien et de surveillance.

Au point de vue des chemins de fer, la traction électrique permet de faire face à une augmentation de trafic irréalisable avec la vapeur, de réaliser une économie toujours plus grande sur les dépenses d'exploitation, d'utiliser des forces hydrauliques sans emploi et de rendre les pays qui n'ont pas de charbon plus indépendants de l'étranger.

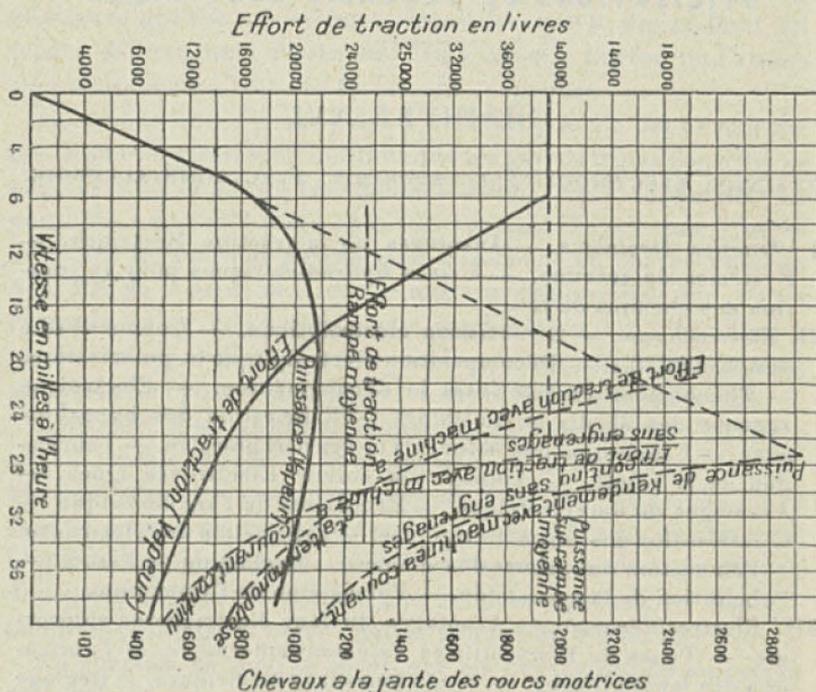


Fig. 223.

La comparaison de la traction électrique avec celle à vapeur montre que l'adhérence des locomotives à vapeur est faible en proportion de leur poids total, ce qui entraîne à multiplier les essieux. La locomotive électrique, au contraire, possède un couple moteur très élevé au démarrage et un grand rendement en raison de l'indépendance des essieux, que l'on peut multiplier sans trop d'inconvénient et qui servent par suite à augmenter l'adhérence. La fig. 223 permet de juger rapidement des conditions générales de fonctionnement des locomotives à vapeur et électriques. A puissance égale ou même supérieure, le poids

des locomotives électriques est nettement inférieur à celui des locomotives à vapeur. D'autre part l'effort de traction par tonne de poids total est beaucoup plus élevé avec les locomotives électriques.

L'électricité s'adaptant bien aux fortes rampes, on peut, de ce chef, abréger les tracés, et en particulier le matériel à bog-

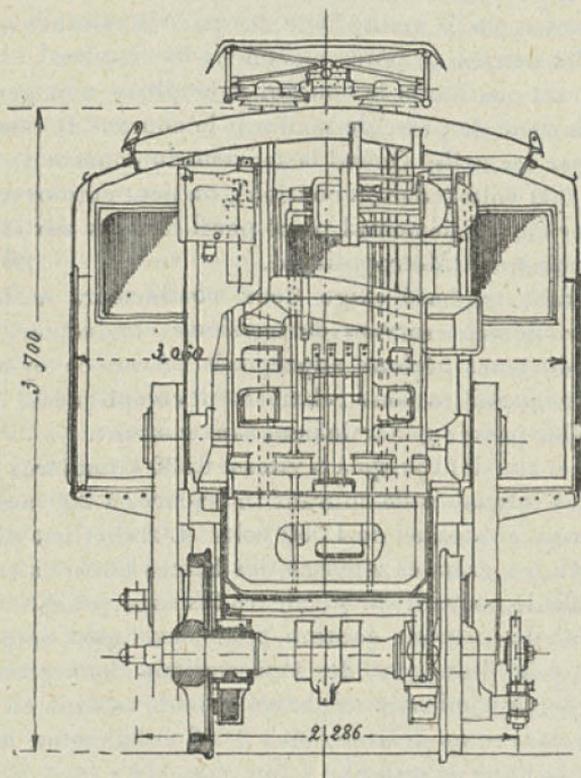


Fig. 224. — Locomotive électrique.

gies à l'avantage de passer facilement dans les courbes de faible rayon.

131. **Systèmes de traction.** — L'exploitation des tramways urbains et suburbains est caractérisée par l'emploi de voitures automotrices isolées ou accompagnées d'une ou deux remorques légères. Les lignes de tramways interurbains utilisent soit le trolley, soit le troisième rail.

Les chemins de fer électriques sont caractérisés par l'emploi

de trains lourds composés de plusieurs voitures ayant des départs relativement espacés, une vitesse commerciale plus élevée que celle des tramways et un nombre beaucoup moins grand d'arrêts. En locomotion, la tendance actuelle est de substituer aux trains remorqués par une locomotive des trains constitués par des voitures toutes automotrices. De cette façon l'adhérence utile est augmentée par la multiplicité des parties rendues motrices, et on se débarrasse du poids mort de la locomotive.

Le courant continu et le courant monophasé n'exigent qu'un seul conducteur de prise de courant, le courant de retour s'effectuant par les rails. Quand la tension du courant ne dépasse pas 500 à 600 volts (courant continu), on peut employer comme conducteur un troisième rail placé parallèlement aux rails de la voie de roulement (Métropolitain).

Le courant triphasé exige deux conducteurs aériens, les rails de roulement servant de troisième conducteur, ou bien trois conducteurs aériens superposés. Avec ce système de traction les aiguilles sont relativement compliquées, et on est obligé de les passer généralement sans courant.

Le trolley convient jusqu'à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure et pour des intensités de courant inférieures à 200 ampères et des tensions au-dessus de 1000 volts. L'archet est plus commode pour les grandes vitesses, les hautes tensions et permet de recueillir le courant sur plusieurs fils superposés.

L'emploi du courant continu pour des lignes importantes conduit à l'établissement de sous-stations convertissant les courants de transmission triphasés à haute tension en courant continu à la tension désirée 500 à 3000 volts, selon les dispositions de la ligne de travail.

La distribution du courant alternatif simple ne nécessite que des groupes transformateurs statiques n'exigeant presque pas de surveillance; mais le matériel de l'usine doit être beaucoup plus important à cause du facteur de puissance qui est souvent très faible; en outre il est impossible d'employer des batteries-tampons, si utiles pour passer les pointes brusques d'intensité.

Le développement continu des puissances concentrées sur les unités motrices électriques a fait surgir de nouveaux modes de commande des essieux des locomotives électriques par les moteurs, à l'effet d'éloigner le moteur le plus possible du sol.

Ainsi la tendance actuelle consiste à utiliser le châssis pour recevoir le ou les moteurs avec commande des essieux par bielles ou par arbres intermédiaires, si les réductions de vitesse le rendent nécessaire. On a un rendement meilleur et un moindre coût d'établissement.

Les locomotives électriques modernes ont trois, quatre, cinq ou même six essieux, selon leur puissance. Celles articulées et formées de deux moteurs accolés et celles articulées et doubles sont très prisées, surtout pour les fortes puissances.

On semble reconnaître que l'emploi de plusieurs moteurs, avec transmission par engrenages, est préférable à celui d'un moteur avec transmission par bielles.

132. Usines hydroélectriques pour la traction des chemins de fer. — Les usines hydroélectriques servant à la traction des chemins de fer doivent être installées de telle sorte que le rapport de la puissance maximum à la puissance moyenne soit 2,6, c'est-à-dire que les usines doivent pouvoir fournir un maximum instantané de 2,6 fois la puissance moyenne, et c'est sur ce maximum que doit s'établir le coût des usines, des lignes de transport, etc.

Parmi les grandes forces hydrauliques dont on peut disposer, il faut choisir celles pour lesquelles l'adaptation de la production d'énergie à la demande du réseau peut se faire dans les meilleures conditions techniques et les plus économiques, par exemple en s'adressant à celles qui peuvent accumuler l'eau non utilisée pour le service afin d'arriver autant que possible à un réglage qui permette de donner presque instantanément un débit d'eau proportionnel à la demande d'énergie. Comme combinaison, on peut s'adresser soit à une haute chute avec bassin naturel d'accumulation ou artificiel en amont pouvant répondre à toutes les conditions de l'exploitation, soit à une chute à basse pression et à gros débit sans accumulation fournissant la partie constante de l'usine avec une chute à haute pression pour les pointes avec accumulation immédiate fournissant la partie variable. Dans cet esprit, en France, les forces hydrauliques des Alpes, qui donnent une puissance supérieure en été, pourraient être avantageusement combinées avec des forces de régime du Plateau Central et du Jura.

Les usines aménagées par la Compagnie des chemins de fer

du Midi dans la région pyrénéenne ont été basées sur le minimum des cours d'eau utilisés avec réservoirs pour accumulation journalière et grandes chambres d'eau formant volant pour parer aux irrégularités momentanées, démarrage des trains, simultanéité d'ascension de courtes rampes par plusieurs trains, etc.

II. — Electrochimie.

133. **Dissociation électrolytique.** — On divise les corps conducteurs du courant électrique en *conducteurs inaltérables*, tels que les métaux, et en *conducteurs altérables ou électrolytes*, tels que les sels fondus et les dissolutions des sels, acides et bases dans l'eau ou dans certains autres dissolvants. La décomposition d'un électrolyte par le passage du courant électrique porte le nom d'*électrolyse*.

Dans toute opération de ce genre, le métal est libéré au pôle négatif, le métalloïde au pôle positif; aucun phénomène apparent ne se produit entre l'électrode positive ou *anode* et l'électrode négative ou cathode. On sait que le récipient dans lequel on effectue l'électrolyse s'appelle *voltamètre*.

Pendant une électrolyse, seul le corps dissous est décomposé par le courant, et le dissolvant reste intact; on peut donc considérer que le corps dissous a subi une modification dans sa constitution. D'après Arrhénius, les *ions*¹ portent des charges électriques positives ou négatives s'équilibrant de sorte que la dissolution ne présente aucune électrisation apparente.

Un ion porte un nombre de charges égal à sa *valence*, et ce nombre peut être supérieur à deux. Le rapport des molécules dissociées au nombre des molécules dissoutes est appelé *coefficient de dissolution*.

On appelle *chaleur de dissociation* la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par le composé passant de l'état dissous non ionisé à l'état d'ionisation complète. Quand la dissociation est accompagnée d'un dégagement de chaleur, toute élévation de température détermine une diminution du coefficient de dissolution, et quand il y a absorption de chaleur, toute élévation de température détermine une augmentation de ce coefficient.

1. Les ions chargés positivement sont appelés ions électropositifs ou cations; ceux chargés négativement sont appelés électronégatifs ou anions.

Toutes les solutions acides sont neutralisables par les bases, et toutes les solutions des bases neutralisent les acides. Les bases ou les acides forts sont beaucoup plus ionisés que les acides ou les bases faibles.

Faraday a posé les lois suivantes : a) Le poids d'électrolyte décomposé par un courant est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyse ; b) Si on désigne par M la molécule-gramme de la substance dissoute, n le nombre de valences qui dans une molécule de cette substance unissent l'ion ou les ions électro-positifs à l'ion ou aux ions électro-négatifs, Δ le poids d'électrolyte décomposé par le passage de un coulomb (Δ exprimé en grammes), on a :

$$\Delta = \frac{1}{96570} \times \frac{M}{n}.$$

Si on désigne par α l'atome-gramme du métal et par ν sa valence dans le composé considéré, on a :

$$\frac{m}{n} = \frac{\alpha}{\nu} \quad \text{et par suite :} \quad \Delta_1 = \frac{1}{96570} \times \frac{\alpha}{\nu} \times m,$$

m nombre de coulombs du courant.

Le nombre $\frac{1}{96570}$ représente le poids d'hydrogène mis en liberté par le passage de un coulomb.

Le nombre de charges portées par un ion quelconque est égal à la valence de cet ion.

L'ampère international représente l'intensité d'un courant constant qui, traversant un voltamètre à azotate d'argent, met en liberté 0,001118 gr. d'argent par seconde.

Quand les ions, au contact des électrodes, ont perdu leur charge, ils reprennent immédiatement leurs propriétés chimiques ordinaires; alors l'ion libéré peut exister à l'état libre ou il ne peut exister à cet état.

Lorsque les réactions secondaires ne régénèrent pas le corps électrolysé, l'électrolyte s'appauvrit et la perte de substance dissoute résultant alors de l'électrolyse porte le nom de « perte faradique ». Dans la majorité des cas cette perte se partage inégalement entre les deux régions anodique et cathodique.

Le nombre de transports d'un ion considéré est le rapport du poids de la quantité d'un ion qui passe d'un compartiment dans

l'autre et le poids de la quantité de cet ion qui est libérée dans le même temps. La somme des nombres de transports de l'anion et du cation d'un même électrolyte est égale à l'unité.

Hittorf a établi que lorsque les ions se déplacent sous l'action du champ électrique produit par les électrodes, il peut arriver, suivant les cas, que les vitesses de l'anion et du cation soient égales ou que ces vitesses soient différentes.

La perte anodique est proportionnelle à la vitesse du cation, et la perte cathodique proportionnelle à la vitesse de l'anion. Et les nombres de transport sont proportionnels aux vitesses des ions.

134. **Conductibilité des électrolytes.** — La loi d'Ohm ($E = RI$) est applicable aux électrolytes. La mesure de la conductibilité des électrolytes s'opère par la méthode industrielle de Kohbrausch ou par la méthode plus précise de Fusch et Lippmann. Dans ce dernier cas, on monte en série avec l'électrolyte une résistance considérable et on effectue la mesure en un temps aussi court que possible. La fig. 225 montre le dispositif ordinairement employé.

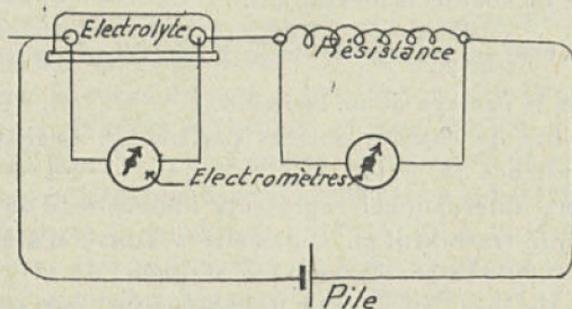


Fig. 225.

Soient : I l'intensité du courant qui parcourt le circuit, R la résistance additionnelle connue, x celle de l'électrolyte ; on a :

$$I = \frac{E_1}{x} \quad \text{et} \quad I = \frac{E_2}{R}.$$

Par suite :

$$\frac{E_1}{x} = \frac{E_2}{R} \quad \text{ou} \quad x = \frac{RE_1}{E_2}.$$

En général la conductivité d'un électrolyte augmente avec la

température. L'expérience montre que la conductivité moléculaire croît quand la dilution augmente et qu'elle tend vers une limite déterminée qui correspondrait à une dilution infinie. Pour une quantité donnée de substance dissoute, la conductivité moléculaire d'un électrolyte est proportionnelle au nombre d'ions qu'il contient.

135. Décomposition électrolytique et polarisation. — On sait qu'en électrolyse, on transforme de l'énergie électrique en énergie chimique, au contraire de ce qui se passe dans les piles. Le principe de la conservation de l'énergie permet de calculer la force électromotrice minimum nécessaire pour décomposer un électrolyte donné.

Appelons F la quantité d'électricité 96 570 coulombs ($F = 1$ Faraday), J l'équivalent mécanique de la chaleur, q quantité de chaleur qui serait dégagée par les transformations chimiques inverses de celles que produit le passage de F pendant l'électrolyse, x la force électromotrice minimum nécessaire pour pouvoir décomposer l'électrolyte.

On pose : $Fx = Jq$;

$$\text{d'où : } x = \frac{Jq}{F} = \frac{41\,909}{96\,570} = 0,4349.$$

Dans le cas où il ne se produit pas de réactions secondaires, le fonctionnement du système électrode-solution est réversible si le potentiel de décharge de l'ion considéré est égal en valeur absolue au potentiel électrolytique correspondant.

La polarisation qui est l'indice de l'apparition d'une force contre-électromotrice provenant de la présence sur les électrodes des produits de la décomposition se présente sous deux cas principaux : l'électrode considérée s'est recouverte d'un corps solide ou d'une couche gazeuse. L'énergie totale dépensée dans une électrolyse se détermine de la façon suivante.

Soient : E la force électromotrice appliquée aux bornes d'un voltamètre, e la tension de décomposition électrolytique, R la résistance de l'électrolyte, I l'intensité du courant, t le temps de passage du courant; on a :

$$EIt = eIt + RI^2t.$$

Si on désigne par ρ le rendement chimique total on a :

$$\rho = \frac{eIt}{EI} = \frac{e}{E}.$$

Or $E = e + RI$; donc $\rho = \frac{e}{e + RI}$.

Pour calculer approximativement la tension de décomposition, on applique assez couramment en électro-chimie appliquée la formule de Thomson :

$$\varepsilon = 0,0433 Q;$$

ε tension de décomposition en volts et Q la somme algébrique, évaluée en grandes calories et rapportée à l'équivalent-gramme du principal ion réagissant, des quantités de chaleur absorbées et dégagées par l'ensemble des réactions qui se produisent dans l'opération électrolytique.

Électrochimie et électrometallurgie par voie humide.

136. Phénomènes caractérisant la décomposition. — Les causes qui entrent en jeu sont : l'influence de la température et de la concentration, la densité de courant, l'emploi d'électrodes déterminant des surtensions, enfin l'emploi de catalyseurs.

D'une façon générale on obtient des oxydations au voisinage de l'anode et des réductions au voisinage de la cathode. La dépolarisation est réalisée soit par addition de dépolarisants, soit par agitation du bain.

Lorsqu'on électrolyse un sel avec une anode soluble du même métal, le courant a pour effet de transporter ce métal de l'anode à la cathode. On emploie alors comme cathode la pièce sur laquelle on veut produire le dépôt.

Ainsi s'exécutent les opérations galvanoplastiques, le cuirage, le nickelage, l'électrozingage, etc.

L'acidité du bain utilisé augmente la conductivité de ce dernier. La concentration du sel électrolysé augmente la compacité du dépôt, et l'agitation du bain produit le même effet, ainsi que l'élévation de température. La densité de courant à la cathode bien conduite au cours d'une opération permet une distribution régulière du dépôt du métal sur la surface.

Pour opérer l'extraction électrolytique des métaux de leurs minerais on utilise l'une ou l'autre des méthodes suivantes :

a) emploi du minerai comme anode soluble; b) transformation chimique du minerai permettant de le faire passer en solution et électrolyse de cette solution.

Les matériaux les plus usuellement employés pour la construction des cuves sont : le ciment ou le béton armé recouvert de paraffine, le fer ou la fonte, le bois doublé de plomb, l'ardoise, le grès, le granit ou la lave de Volvic. On isole les cuves électriquement du sol qui les supporte.

Les cathodes industrielles sont ordinairement constituées à l'aide des substances suivantes : le carbone graphitisé, le fer ou la fonte, la magnétite artificielle, le platine.

En galvanoplastie on se sert comme cathode d'un moule de l'objet à reproduire, le plus souvent en gutta-percha ou en gélatine, substances rendues conductrices par métallisation.

Pour les opérations consistant à recouvrir un métal d'un autre, où ce dernier se rend à la cathode, les pièces sont le plus souvent placées dans un panier tournant mis en communication avec le pôle négatif et plongeant dans l'électrode (nickelage du fer).

Les électrodes peuvent être unipolaires ou bipolaires; les premières ne peuvent jouer que le rôle d'anode ou de cathode, tandis que les secondes sont à la fois anode et cathode.

Les matières les plus usuellement employées pour les diaphragmes sont la porcelaine poreuse, la toile d'amiante et le ciment poreux. Le principal inconvénient des diaphragmes est d'augmenter d'une façon assez considérable la résistance du bain et par suite d'abaisser le rendement de l'opération.

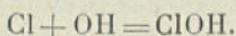
Mis à part le développement considérable du raffinage du cuivre et de la précipitation électrolytique de l'or et de ses solutions cyanurées, les progrès en électrolyse sont restés loin de ceux réalisés en électrothermie et en électrometallurgie.

Cependant l'électrolyse du fer a fait l'objet de nombreuses recherches. La société *Le Fer* a mis au point un procédé permettant de fabriquer directement à partir d'anodes en gueuses de fonte, soit des tuyaux, soit des tubes de fer électrolytiques. En outre le procédé Sherard Cowper-Coles permet non seulement d'extraire le fer pur de ses minerais, mais encore de l'obtenir directement sous la forme désirée : tôle, tube, fil, ce qui

supprime le laminage, l'étirage, la coulée. On peut partir soit de la fonte, soit du minerai de fer.

137. **Électrolyse aqueuse des alcalis et du chlore.** — On opère sur une dissolution d'un chlorate alcalin. Le chlore se dégage à l'anode tandis qu'à la cathode le sodium ou le potassium réagit sur l'eau en donnant un alcali et un dégagement d'hydrogène.

La réaction qui se produit est définie par l'équation :



Les procédés utilisés sont ceux avec diaphragme, ceux avec cathode de mercure et ceux dits par circulation.

Les électrolyseurs à diaphragme sont ceux de Griesheim-Elektron, Kellner, Spilker et Lævøe, Lesueur, Hargreaves-Bird, Richard et Holland.

Dans l'électrolyseur *Griesheim-Elektron* (fig. 226), les anodes

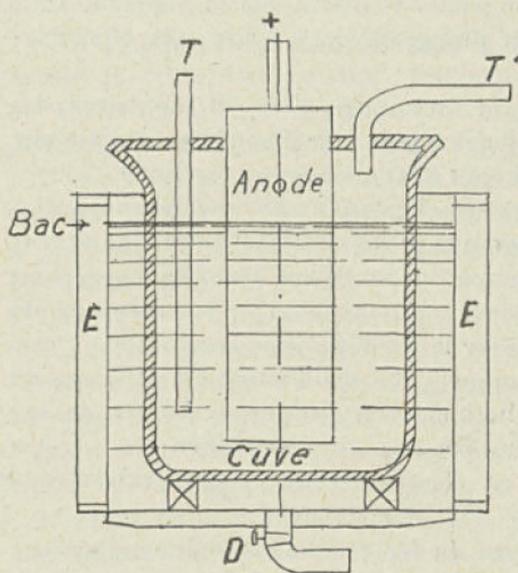


Fig. 226.

sont en magnétite, les cuves en ciment poreux qui servent de diaphragmes et d'un grand bac en fer formant cathode. L'alimentation en saumure se fait dans les compartiments anodiques par le tube T, et le chlore s'échappe par le conduit T', et enfin l'alcali par la décharge D. Un courant de vapeur à 90° circule à l'intérieur d'une double paroi E le long des faces latérales.

Les électrolyseurs à cathode de mercure consistent à former un amalgame du métal alcalin libéré avec la couche de mercure. On décompose cet amalgame hors de l'électrolyseur en présence de l'eau, ce qui donne de l'alcali qui ne peut plus réagir

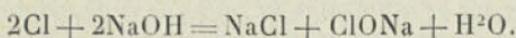
sur le chlore. Le mercure purifié est utilisé de nouveau comme cathode.

Les principaux procédés basés sur ce principe sont les électrolyseurs Solvay et Castner-Kellner.

Dans le procédé à la cloche ou par gravité, l'anode est placée sous une cloche conductrice par sa partie extérieure, qui sert de cathode.

L'alcali se rassemble à la partie inférieure de l'appareil et on le fait écouler de telle sorte que sous la cloche le liquide s'éloigne de l'anode avec une vitesse déterminée.

138. Fabrication des hypochlorites. — Comme on peut obtenir par électrolyse une production simultanée de chlore et d'alcali, si on laisse alors diffuser l'alcali de telle façon qu'il vienne entourer l'anode, lorsqu'on opère à froid on obtient la réaction :



Le résultat est un hypochlorite. Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut employer une saumure fortement concentrée, que l'on peut augmenter en utilisant des anodes en platine; le rendement est amélioré en opérant avec de grandes densités de courant à l'anode et à la cathode et en additionnant le bain de chlorates alcalins.

Les électrolyseurs les plus connus sont les appareils Hermitte, Schuckert, Corbin, Haas et Cœttel, Stepanow, Brochoki, Volgesand, Schoop.

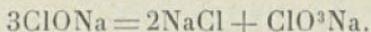
Dans l'appareil Hermitte, la cuve est en fonte galvanisée, les anodes en platine disposées dans des cadres en ébonite, les cathodes en zinc et en forme de disques montés sur des arbres rotatifs. L'hypochlorite formé s'écoule au fur et à mesure de sa production.

La solution utilisée dans les électrolyseurs Haas-Cœttel est le chlorure de sodium de 4° à 6° B., et les électrodes bipolaires sont en charbon.

La dépense d'énergie par kilogramme de chlore est de 5,4 HP pour la concentration de 3 grammes de chlore par litre, et de 12,3 HP pour la concentration de 10^{gr},6 de chlore par litre.

139. Fabrication des chlorates et perchlorates. — On opère comme pour l'obtention des hypochlorites, mais au lieu

de marcher à froid on maintient une température assez élevée. Lorsque la température est atteinte, l'hypochlorite se transforme en chlorate d'après la réaction :



Pour la fabrication des chlorates on utilise les appareils Gall et de Montlaur, Gibbs et Franchot.

Le procédé Gibbs et Franchot comporte des grilles de cuivre recouvertes d'oxyde de cuivre. L'hydrogène naissant réduit cet oxyde, et la chaleur dégagée par la réduction de ce dernier suffit pour maintenir le bain à la température nécessaire. Le liquide en se refroidissant dépose le chlorate produit.

Les perchlorates s'obtiennent par l'électrolyse des chlorates alcalins ou alcalino-terreux, en opérant à basse température et avec une forte densité de courant. On ne fabrique électrolytiquement que les perchlorates de sodium et de calcium, qui servent par voie chimique à former les perchlorates de potassium et d'ammonium.

140. Fabrication de la soude. — Les procédés Jablochkof, Roger, Hoepner, Grabau, consistent à électrolyser à chaud du chlorure de sodium, la température étant maintenue par une source extérieure. Le sodium surnage et est enlevé, à la fin de l'opération, à l'état globulaire ou de vapeur. Les électrolyseurs Vautin et L. Hulin emploient également le chlorure de sodium. La cathode est constituée par du plomb fondu. On obtient un alliage de plomb et de sodium et on extrait ce dernier par distillation. Le sodium traité par l'eau permet d'avoir de la soude caustique et de recueillir le plomb, qui peut ainsi servir à une nouvelle opération.

La densité de courant varie de 60 à 100 ampères par décimètre carré; la différence de potentiel aux bornes du bain est de 8 volts et la dépense réelle de 15 kilowatts-heure par kilog. de sodium.

Dans le procédé Castner, on emploie comme électrolyte de la soude caustique, comme anode du charbon et comme cathode du fer. La cuve est en fer, et la solution est maintenue à la température de 20° C. au-dessus de son point de fusion. La chaleur est demandée partie au courant et partie à une source extérieure. La dépense d'énergie réelle est de 16 kilowatts-heure par kilog. de sodium métallique.

Nous citerons, à titre documentaire, les procédés Hargreaves, Tonnsend et de la cloche dont nous avons donné la description en traitant de la fabrication du chlore.

141. **Affinage du cuivre.** — Le principe de l'opération consiste à prendre comme anode soluble le cuivre à affiner, et on utilise comme cathode du cuivre pur. L'électrolyte consiste en une solution de sulfate de cuivre mêlée à de l'acide sulfurique, et le courant transporte le cuivre de l'anode à la cathode.

Les boues restant dans le bain ou schlamms sont traitées pour l'extraction des métaux précieux qu'elles peuvent renfermer, principalement l'argent et l'or.

La densité de courant varie durant le cours de l'opération, mais elle a une valeur assez faible. Une insufflation d'air dans l'électrolyte permet de récupérer des arsénates qui se précipitent.

On obtient électrolytiquement des tubes de cuivre sans soudure en employant comme cathode un mandrin cylindrique dont les bases sont rendues non conductrices. Les procédés utilisés pour l'affinage du cuivre sont les électrolyseurs Elmore, Copwer-Cowles, Marchese, Siemens et Halske, Borchers, Frank et Gunther et de Perreux Lloyd.

Dans le procédé Elmore, l'anode est constituée par une masse de cuivre en forme d'U (fig. 227), et la cathode est un mandrin

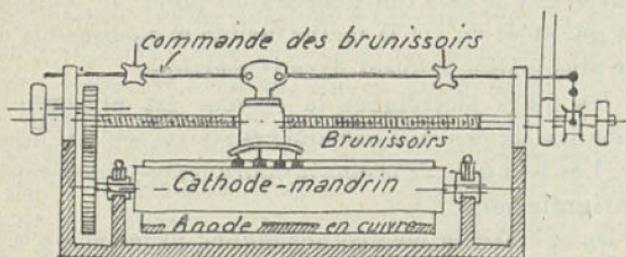


Fig. 227.

en acier poli recouvert d'une couche de graphite et qui reçoit son mouvement d'une transmission par engrenages. On comprime la matière déposée à l'aide de brunnisoirs soumis à une certaine pression; ces derniers se déplacent longitudinalement au moyen d'une vis dont le changement de rotation et par suite celui de translation des brunnisoirs a lieu au moyen d'un

embrayage et de courroies droites et croisées. M. Copwer-Cowles, par une rotation rapide de la cathode, a poussé la densité jusqu'à 20 ampères par décimètre carré.

Le procédé Loszczmski permettrait d'extraire directement le cuivre du minerai. On transforme le minerai en sulfate et on électrolyse la solution en employant des anodes de plomb recouvertes d'une enveloppe adhérente de tissu de coton. Le procédé Lafontaine donne les mêmes résultats.

On fabrique également le cuivre électrolytique en traitant des mattes riches tenant 72 et 80 pour 100 de cuivre. Le courant nécessaire est de 50 ampères par mètre carré de surface de cathodes et on opère à une température de 50° à 60° avec une différence de potentiel que l'on maintient au-dessous de 1 volt.

142. Électrolyse ignée. — On sait que les sels fondus constituent en général de bons électrolytes. D'autre part les sels solides, au voisinage de leur point de fusion, ont une conductivité telle que le courant peut alors décomposer le sel. La conductibilité des sels fondus est généralement plus élevée que celle des électrolytes dissous et elle augmente rapidement avec la température. Mais le rendement du courant diminue rapidement avec l'élévation de la température; il augmente avec l'écartement des électrodes d'abord très rapidement, puis très lentement avec la densité du courant.

Les mélanges de sels ont toujours un point de solidification plus bas que celui du sel le moins fusible et quelquefois de celui du sel le plus fusible entrant dans le mélange.

Dans les fours électriques la chaleur est produite par la consommation du courant par une résistance solide, liquide ou gazeuse. Les lois qui régissent le courant électrique sont appliquées intégralement.

Pour les opérations électrothermiques usuelles on a l'habitude de chiffrer la consommation d'énergie en déterminant celle correspondant à l'unité de poids du produit fabriqué ou le poids du produit effectivement obtenu par unité d'énergie consommée.

Il faut, pour déterminer la quantité de chaleur à fournir pour produire l'unité de poids du produit, connaître la quantité dépensée pour la transformation chimique qui s'opère dans le four, qui s'ajoute aux chaleurs d'échauffement de tous les pro-

duits solides, liquides et gazeux, obtenus à partir des matières premières, aux chaleurs de fusion et à celles de volatilisation.

143. Avantages du four électrique. — Les fours électriques, le four à arc en particulier, permettent d'obtenir des températures beaucoup plus élevées qu'avec les autres fours, ce qui permet d'obtenir des réactions plus complètes et plus rapides, et en outre des réactions qui n'auraient pu être opérées dans les autres fours industriels.

Le four électrique permet d'employer certains réactifs peu fusibles, de donner à la plupart des corps fondus une grande fluidité, de régler facilement la température, et enfin d'obtenir un rendement calorifique élevé.

Le travail d'élaboration des produits à traiter s'effectue le plus souvent d'une façon très régulière, et l'absence d'oxygène améliore la qualité de ces produits.

La résistance électrique est variable dans tous les fours; en général elle est élevée au début d'une opération pour devenir faible à la fin, et pour obtenir un dégagement de chaleur il faut faire souvent varier la tension aux bornes.

L'on sait que l'on applique indifféremment le courant continu et le courant alternatif à l'alimentation du four électrique. Le réglage dans le four triphasé est beaucoup plus facile que dans les autres, car si, pour une cause quelconque, un des arcs vient à s'interrompre, le four continue à fonctionner, les deux autres marchant en série. Ceux-ci peuvent se connecter soit en triangle entre les trois charbons, soit en étoile entre les charbons et une plaque conductrice fonctionnant comme point neutre, qui peut, si l'on veut, être réuni au point neutre des alternateurs. On a, par ce système, trois arcs au lieu d'un seul, ce qui permet d'obtenir une sphère d'irradiation bien plus grande et plus uniforme.

Le grand rendement du four électrique a été constaté et expliqué depuis longtemps par la concentration possible des opérations dans un espace des plus réduits, et en outre, les pertes par émission sont notablement moindres que celles des fours dans lesquels le véhicule thermique est gazeux.

La densité de puissance D' dans un foyer de four électrique à résistance est le nombre de watts dépensés par centimètre cube de matière à traiter par le courant électrique. Si D repré-

sente la densité de courant on a : $D' = \frac{\rho I^2}{D^2}$ pour l'expression de la densité de puissance, où le coefficient de résistivité ρ de la couche de matière constituant le foyer ne varie pas pendant le cours de l'opération. La densité de puissance joue dans une fusion ou une réaction un rôle des plus importants, étant le facteur principal de la température obtenue dans le foyer.

En ce qui concerne l'industrie sidérurgique, le four électrique, en l'état actuel, supprime le four à cimentation, marche de pair avec le four à creuset, remplace le four Martin, et vient heureusement compléter le four Bessemer, en permettant dans tous les cas d'obtenir un métal homogène plus pur et pouvant être coulé très fluide. Ainsi, dans les fours électriques pour l'acier, la source d'énergie est permanente, avantage essentiel par rapport aux convertisseurs à vent dans lesquels l'élaboration de l'air exige, par crainte de refroidissement, l'emploi de réactifs thermogènes et une préparation incompatible avec la précision que l'on est en droit de souhaiter.

144. Propriétés de l'arc électrique. — On sait que l'arc électrique se produit tant au moyen du courant continu qu'avec le courant alternatif. Dans ce dernier cas la stabilité de l'arc est d'autant plus grande que la fréquence du courant employé est plus élevée. Mais il est toujours moins stable que l'arc à courant continu dans les mêmes conditions de fonctionnement. On doit autant que possible éviter la formation de l'arc dans un air agité.

D'autre part les champs magnétiques perpendiculaires aux arcs sont défavorables au maintien d'un arc normal. Le déplacement de l'arc par suite de soufflage magnétique a lieu dans une direction unique si l'arc est obtenu au moyen d'un courant continu, et dans des directions changeant à chaque demi-période si ce courant est alternatif.

La formation d'arcs interrompus peut se produire dans les fours à électrodes horizontales reliées à un générateur monté en série avec une bobine d'induction convenable et longue, à proximité des électrodes et à angle droit avec leur direction horizontale ; on établit ainsi un puissant champ magnétique. L'arc développé entre les électrodes se trouve être immédiatement attiré vers le haut ou vers le bas, et en conséquence interrompu ; en

même temps qu'un nouvel arc en ligne droite se forme entre les électrodes, lequel est également attiré au dehors. La vitesse de formation, de déplacement et d'interruption est si grande, qu'il se forme plusieurs milliers de ces arcs par seconde.

145. Classification des fours électriques. — D'une manière générale, on classe les fours électriques en trois grandes catégories : les fours à arc, les fours à résistance et les fours d'induction.

Les fours à un arc marchent pour la plupart à 50 volts et les fours à deux arcs en série, 100 volts (arcs de 40 millimètres de hauteur environ).

Sous un autre rapport, on peut dire que le four électrique se rattache à deux types : le four à sole conductrice, ayant une ou plusieurs électrodes montées en quantité, et celui où la sole n'est pas ou n'est que partiellement utilisée pour la conduite du courant; alors ce dernier est amené par deux électrodes ou plusieurs paires d'électrodes de polarités différentes. Le premier genre de four est adopté généralement lorsqu'il est possible d'employer une sole composée de graphite aggloméré, et le second dans presque tous les cas où il s'agit, dans le but d'éviter la présence du carbone dans le produit à obtenir, de constituer une sole neutre ou même affinante. Les fours à soles conductrices non carburées se divisent en sole à conductibilité simple et en sole à conductibilité mixte.

Pour les soles de la première catégorie, elles sont obtenues soit par un fond de four entièrement métallique, ou par un ou plusieurs pôles métalliques noyés dans une maçonnerie non conductrice, ou enfin au moyen d'un *pisé-conducteur*.

Fours à arc. — Lorsque les crayons ou électrodes ne sont ni l'une ni l'autre en contact avec la substance à traiter et que celle-ci n'est pas léchée par l'arc, on comprend que le chauffage de la matière n'a lieu qu'à la surface. Il convient dans ce cas d'agiter la substance en donnant au four un mouvement convenable.

Quand les électrodes ne sont pas de même en contact avec la matière à chauffer, mais que celle-ci est touchée par l'arc, celui-ci peut se produire uniquement entre les électrodes (four à un seul arc), ou on obtient deux arcs, se produisant entre chaque électrode et la matière, cette dernière fermant le circuit (four à deux arcs).

Les fours à arc sont peu utilisés. Leur température est à 3500° et leur marche est assez régulière au commencement de leur mise en marche; au bout de quelque temps, le fonctionnement se régularise et l'arc devient silencieux.

Fours à résistance. — Dans ce système de fours, la matière à chauffer est en contact avec les électrodes de l'arc, et ils sont dits à « résistance superficielle » quand on localise le chauffage, en raison de la faible résistivité du bain métallique, à la couche de laitier qui surmonte le bain; les fours sont dits à « résistance centrale » quand on plonge les électrodes dans la masse à chauffer, la chaleur dégagée par l'effet Joule devant traverser cette masse avant de se disséminer par rayonnement.

Le four prend le nom de « four à cathode » lorsque l'une des électrodes est constituée par la sole dudit four.

Avec ces fours il est plus facile de régler la température suivant les besoins de l'opération, car la quantité de chaleur croît proportionnellement à la résistance du circuit et au temps pendant lequel celui-ci agit. Ils fonctionnent généralement à une tension de 20 à 25 volts. On obtient une température de 2 200° avec un rendement de 35 p. 100 de l'énergie absorbée.

Fours à induction. — Un tel système de four est composé, en principe, d'un creuset de forme circulaire dont la matière qu'il renferme constitue le circuit secondaire d'un transformateur statique (le secondaire n'est ainsi composé que d'une seule spire) et dont le circuit primaire est formé par une bobine comme à l'ordinaire. La scorie qui surnage n'est chauffée que par rayonnement et conductibilité calorifique du métal. Ce système de four, comme on le voit, permet la suppression des électrodes, de plus il est d'un réglage facile et il peut être alimenté par un courant à haute tension.

Les fours à induction se divisent en fours simples, dans lesquels la fusion dans le secondaire est déterminée seulement par induction, et en fours combinés, dans lesquels l'échauffement se fait par résistance, ou bien dans lesquels le secondaire n'est constitué qu'en partie par le conducteur fluide.

Dans les fours simples, le métal et la scorie sont couplés en parallèle dans le secondaire (fours Colby, Kjellin, Hiorth), ou la borne primaire est en forme de disque (fours Ferranti, de Frick, Schneider, Gin, Vallin).

Les fours de la seconde catégorie sont caractérisés par ceux de Roechling-Rodenhauer et Hiorth.

Les fours à induction se prêtent à toutes les opérations sidérurgiques, depuis l'épuration des aciers Siemens-Martin, Bessemer ou Thomas, jusqu'à l'extraction. Le réglage de la température du bain nécessaire pour le procédé métallurgique s'obtient en augmentant ou en diminuant la tension aux bornes de la bobine primaire du transformateur. Dans les types de petits fours, les bobines primaires sont connectées soit en étoile, soit en triangle, au moyen d'un simple transformateur, tandis que dans les fours à forte charge, le réglage de la tension s'opère par un diviseur réglable (auto-transformateur) (fours Kjellin, Gin, Girarder Street, Schneider, Roechling-Rodenhauer).

146. Fabrication des électrodes. — Dans la plupart des cas on se sert d'électrodes en carbone; parfois on emploie un aggloméré de carbone et d'oxydes ou carbures métalliques, ou, dans des cas très rares, on utilise la matière à traiter comme électrode fondante.

Les électrodes en carbone ont ordinairement la forme de prismes à section cubique dont la longueur varie entre 0^m,30 et 0^m,70. On dispose les électrodes de grande section à l'aide de plusieurs tronçons réunis en faisceau.

La matière composant les électrodes de carbone s'obtient en broyant et pulvérisant un mélange composé d'anthracite, de coke, de pétrole et de charbon de cornue. La poudre ainsi obtenue est malaxée avec du brai sec et du goudron de houille déshydraté, et cette pâte est moulée et comprimée à la presse ou à la presse-filière. Puis on soumet le produit ainsi obtenu à la cuisson en élevant progressivement la température, qui peut atteindre environ 1500°. On soumet de même les électrodes à un refroidissement lent.

La résistivité du graphite étant environ quatre fois moindre que celle du carbone ordinaire et le graphite s'oxydant plus difficilement que le carbone ordinaire, ces qualités remarquables ont été utilisées pour la transformation du carbone amorphe des électrodes en graphite. De cette façon on peut admettre dans ces dernières un courant plus intense et obtenir une usure moins rapide des électrodes. Ainsi la densité de courant peut aller jusqu'à 20 ampères par centimètre carré.

L'incorporation dans la pâte des électrodes de corps étrangers, tels que la silice, l'oxyde de fer ou d'alumine, améliore notablement le rendement des électrodes.

Les procédés de graphitisation actuellement usités sont ceux de Girard et Street et de Acheson.

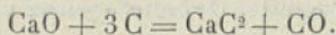
Le dernier de ces procédés consiste à porter les électrodes à graphitiser à une haute température dans un four électrique fermé. Les électrodes sont placées sur une couche de poussier et elles y jouent le rôle d'une résistance centrale. La densité de courant peut atteindre 40 ampères par centimètre carré. La transformation en graphique demande environ vingt-quatre heures.

Pour éviter l'usure par oxydation des électrodes, on les enduit d'une couche de dolomie agglomérée avec du brai et du goudron, ou simplement d'une tôle de fer. Ces produits de protection disparaissent avec les électrodes.

Les connexions des électrodes doivent être établies très soigneusement, car elles ont une influence directe sur la durée des électrodes et sur les frais d'entretien. Lorsque la densité de courant est considérable, on refroidit les contacts au moyen d'une circulation d'eau. Parfois on utilise des systèmes permettant à l'électrode de glisser à volonté entre les surfaces d'arrivée du courant.

La détermination d'une section convenable pour les électrodes est une des questions les plus importantes qu'aient à résoudre les consommateurs. Cette section est déterminée avant tout par la densité de courant, et l'expérience est, pour ainsi dire, le seul guide. Les électrodes utilisées dans les fours à arc Heroult, Girod, Keller, peuvent supporter 5 ampères environ par centimètre carré, avec une surcharge momentanée de 6 à 7 ampères par centimètre carré, section de (400 × 400) millimètres carrés.

- 147. **Fabrication du carbure de calcium.** — Cette fabrication, qui s'obtient par le four électrique, est basée sur la réaction suivante à la suite d'un mélange de chaux et de charbon :



La chaux employée doit être très pure et le charbon être poreux et n'avoir qu'une faible teneur en cendres. Le mélange

se fait dans la proportion de 56 pour 100 de chaux et 36 p. 100 de charbon. Préalablement à leur introduction dans le four, les matières sont concassées en morceaux ayant environ la grosseur d'un œuf. La température de fusion du carbure de calcium est très élevée et dépasse même 3000°. La coulée du carbure est particulièrement malaisée et il y a eu lieu de prendre certaines précautions, telles que le chauffage du trou de coulée au moyen d'un arc additionnel, l'augmentation de la densité de courant à travers la sole du four, et en donnant une grande capacité aux fours. On opère soit à four continu, soit à four intermittent; mais la première façon est de plus en plus usitée. C'est-à-dire que l'on opère par coulée, ce que l'on voulait éviter par la seconde disposition.

Dans l'état actuel de la fabrication du carbure de calcium, on emploie pour produire 1 000 kg. de carbure, 875 kg. de chaux et 562 kg. 5 de charbon, la différence représentant l'oxyde de carbone disparu. Le mélange de chaux et du charbon en morceaux concassés et les produits en présence restent dans les mêmes proportions, un léger excès de chaux favorisant la réaction. La chaux doit contenir le moins possible de silicates et de phosphates.

Les fours utilisés pour la fabrication du carbure de calcium comprennent ceux dans lesquels le produit retiré de l'appareil est à l'état liquide (coulées), et ceux où le carbure est sorti du four à l'état solide après refroidissement (pains).

Les fours les plus utilisés sont : le four Bullier, le four Keller et Leleu, le four Siemens et Halske, le four Memno, le four de Froges, le four Knapp et le four de l'Electro Gas Company (Niagara Falls), le four Ducasse.

Dans la presque unanimité des cas, les fours sont basés sur la formation d'un arc voltaïque entre une ou plusieurs électrodes mobiles, et la masse en fusion placée dans la cuve est plus ou moins conductrice suivant la température à laquelle on la porte.

Le dispositif à une seule électrode convient pour des puissances inférieures à 500 HP; mais si le nombre des chevaux mis en jeu augmente, il vaut mieux adopter plusieurs électrodes ainsi que le courant triphasé.

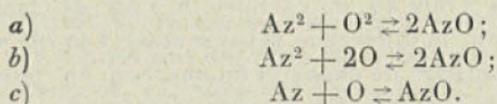
À l'égard des variations périodiques de la résistance intérieure des fours, dues aux variations de température, aux

phénomènes d'ionisation variables qui accompagnent les variations périodiques du courant, il y a lieu de prendre certaines précautions convenables dans la conduite des fours, sinon l'arc peut prendre un caractère d'instabilité et une résistance fortement variable influant le facteur de puissance, qui s'en trouve considérablement modifié.

Pour chaque four et chaque disposition de circuits, il y a une fréquence pour laquelle $\cos \varphi$ atteint son maximum, et le four fonctionne dans des conditions plus économiques.

148. Production de l'azote. — La fixation de l'azote s'obtient par la formation d'un produit azotique (AzO) ou par la préparation de la cyanamide calcique ($CaCAz^2$).

Pour l'obtention de l'azote on utilise les réactions réversibles suivantes :



Ces réactions s'obtiennent au moyen de l'arc électrique.

Les fours électriques utilisés à cet effet sont basés sur les principes suivants : produire une chambre de flamme très étroite afin d'obtenir la stabilité de l'arc et de ne pas soumettre les parois à un échauffement trop élevé; disposer les électrodes, qui sont en fer ou en cuivre, pour que celles-ci conservent toujours le même écartement initial; souffler constamment l'arc au moyen d'un courant d'air; obtenir un débit gazeux moindre que celui que produirait le maximum d'acide azotique pour une dépense donnée d'énergie électrique; enfin le refroidissement doit avoir lieu brusquement, surtout au débit.

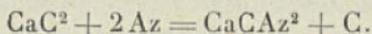
Les fours les plus connus sont : le four Schönner, le four Frank et Caro, le four Bradley et Lavejoy, le four Bikelland et Eyde et le four Rowalski et Mosciki.

Le four Schönner est du type à flamme, laquelle se développe dans le tube central de l'appareil; l'électrode est disposée à l'extrémité inférieure dudit tube; l'électrode et le tube sont en fer, celle-ci étant refroidie par un courant d'eau circulant dans une enveloppe en cuivre. L'arc électrique produit s'allonge jusqu'à la partie supérieure du tube par le jeu d'une insufflation d'air partant de la partie inférieure.

L'air avant d'être introduit dans le tube a atteint une température de 500° environ et il a un mouvement tourbillonnaire permettant d'assurer un contact intime avec l'arc et de maintenir ce dernier au centre du tube jusqu'au moment où il doit arriver dans la région du travail. Une circulation est établie dans la région supérieure du tube à l'effet d'obtenir le refroidissement rapide des gaz.

Le rendement du four se présente comme suit : 3 p. 100 de l'énergie utilisée pour la formation de l'acide azotique, 50 p. 100 absorbée par l'eau de refroidissement, 30 p. 100 récupérée dans les chaudières par le retour des gaz et 17 p. 100 perdue par rayonnement.

149. **Fabrication de la cyanamide.** — Pour obtenir ce produit on fait porter de l'azote sur du carbure de calcium chauffé au rouge. L'opération se traduit par la réaction :



Le terme CaCAz^2 est l'expression de la cyanamide calcique.

Le carbure est d'abord chauffé à 900° par effet Joule et en disposant d'une résistance centrale. Une fois la réaction établie, elle se poursuit sans continuer le chauffage plus longtemps.

Le procédé Pauling repose sur l'emploi d'arcs à flamme éclatant entre des électrodes recourbées comme celles des parafoudres à cornes. A chaque demi-période du courant alternatif, s'allume à la partie inférieure la plus étroite un arc qui est chassé vers le haut par les gaz chauds. Pour obtenir ces flammes constantes de grande énergie avec la plus faible tension possible, on peut employer le dispositif d'allumage représenté (fig. 228).

Les électrodes principales sont disposées de telle façon qu'un jet d'air de 40 millimètres de lar-

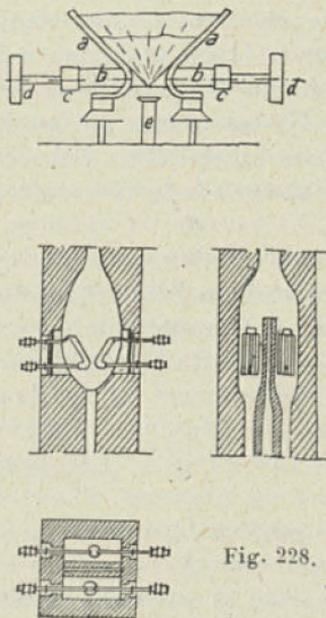


Fig. 228.

geur passe à la partie la plus étroite, et le réglage de la flamme est obtenu très facilement.

Les électrodes sont en fer; elles sont refroidies par circulation d'eau. Le refroidissement des gaz de la flamme se fait par l'emploi d'air dit de circulation qui est envoyé latéralement dans la partie supérieure de la flamme.

Les fours utilisés pour la production du carbure de calcium sont des fours à arc ordinaires ou des fours à résistance. La sole du four constitue l'un des pôles, et l'autre est formé par une ou plusieurs électrodes mobiles qui s'engagent verticalement dans le four. Une électrode supplémentaire sert à chauffer le trou de coulée.

Le courant alternatif se comporte mieux que le courant continu dans ce genre de four.

150. Fabrication de l'aluminium. — Ce produit s'obtient en soumettant à l'action du four électrique un mélange de cryolithe et d'alumine, allié à du fluorure de calcium, du chlorure de sodium ou du fluorure d'aluminium. En principe l'alumine seule est décomposée par le courant; la cryolithe, le fluorure de calcium, le chlorure de sodium, le fluorure d'aluminium jouent le rôle de fondants. La température de fusion de l'alumine est de 2000°, et celle de la cryolithe de 980°.

Pratiquement, on fait fondre d'abord la cryolithe, puis on ajoute l'alumine. Les fondants supplémentaires permettent d'abaisser la température du bain vers 700 à 750°.

La bauxite ou alumine hydratée, la cryolithe ou fluorure double d'aluminium et le spath fluor ou fluorure de calcium ont besoin d'être soumis à une préparation avant leur emploi. Par le traitement de la bauxite on obtient de l'alumine au moyen des procédés Bayer, Serpek ou Hall. Dans le premier cas, la bauxite amenée à l'état de poussier est traitée dans un autoclave par une solution concentrée de soude caustique à la température de 150° environ. Il se forme de l'aluminate de sodium que l'on met en présence d'une certaine quantité d'alumine hydratée cristallisée. L'alumine se dépose et la soude caustique est mise en liberté; puis on déshydrate l'alumine obtenue par caténation.

Dans le second procédé on chauffe au four électrique un mélange de bauxite et de charbon sur lequel on fait passer un courant d'azote, et on obtient un azotate d'aluminium, lequel

est traité en autoclave par une solution étendue de soude caustique donnant de l'aluminate de sodium et de l'ammoniaque. L'aluminate de sodium se décompose en alumine et en soude caustique.

Enfin le procédé Hall consiste à mélanger de la bauxite à du charbon, mélange que l'on traite au four électrique. Le charbon réduit l'oxyde ferrique, la silice, l'acide titanique et une petite quantité seulement d'alumine. Les alliages se déposent au fond du four, et l'alumine pure surnage.

Pour le traitement de la cryolithe naturelle, on la sépare de ses gangues par un tirage mécanique et magnétique. On peut d'ailleurs obtenir de la cryolithe artificielle en traitant du fluorure de calcium par de l'acide sulfurique.

Les fours employés pour la fabrication de l'aluminium sont caractérisés par les dispositions suivantes : le fond des fours sert de cathode et les anodes restent suspendues au-dessus. La cuve étant d'abord vide, on y place, vis-à-vis des anodes, des blocs de charbon avec lesquels on met ces anodes en contact. Ces blocs étant portés au rouge sous l'action du courant électrique, on verse de la cryolithe, puis les autres fondants. Quand le volume du bain est suffisant, on enlève les blocs de charbon et on ajoute de l'alumine. On peut suivre la marche du four par le jeu des tensions du courant ; en marche normale, la tension aux bornes du four est d'environ 8 volts ; quand cette tension atteint 20 volts, c'est que l'alumine n'est pas en quantité suffisante dans le bain.

On extrait l'alumine du four soit par coulées, soit par enlèvement au moyen de louches en fer. On sépare l'aluminium du produit sorti du four par simple décantation. Pour obtenir de l'aluminium pur, on soumet celui-ci à une seconde fusion dans des creusets de graphite.

III. — Électrosidérurgie.

151. **Avantages du four électrique en électrosidérurgie.** — On obtient à l'aide du four électrique des aciers spéciaux très supérieurs à ceux que fournit la sidérurgie ordinaire en partant des matières premières. La haute température que l'on peut produire permet d'employer des laitiers très basiques qui don-

ment lieu à une déphosphoration et à une désulfuration très avancées. D'autre part, cette circonstance met dans d'excellentes conditions les réactions d'affinage.

L'absence d'atmosphère oxydante est un élément important pour l'obtention de métaux de grande pureté.

Si le four électrique est utilisé comme convertisseur, sa supériorité est encore plus accusée, car ici la température n'est pas liée à la composition du bain, et on peut prolonger l'affinage jusqu'au moment où on reconnaît que le produit est tel qu'on le désire. Puis l'absence de soufflage permet d'avoir des aciers renfermant moins de gaz occlus que les aciers que fournit la sidérurgie ordinaire.

Au point de vue de la qualité, les aciers électriques ont une résistance mécanique supérieure à celle des aciers au creuset. En outre, ces aciers se comportent mieux à la trempe ainsi qu'au forgeage.

Les ferro-alliages nombreux que l'on obtient au four électrique sont de qualité très appréciée; d'ailleurs nombre d'entre eux n'avaient pu être préparés par les procédés anciens.

La fonte que l'on obtient en partant du minerai de fer est aussi plus pure que celle préparée dans les hauts fourneaux; il suffit de savoir à cet égard que le charbon, dans le haut fourneau électrique, ne sert exclusivement que pour effectuer la réduction.

Quand le four électrique remplace un convertisseur, il permet une notable économie de ferros.

Les fours principaux utilisés en électrosidérurgie sont les suivants : fours Stassano, fours Heroult, fours Girod, fours Gin, fours Kjellin, fours Saladin (Schneider), fours Rochling-Rodenhauser, Chaplet, Fuck, Niorth.

152. Types de fours utilisés en électrosidérurgie. — Le *four Stassano*, qui est du type à arc, comporte quatre électrodes, et les arcs jaillissent au-dessus de la matière. Le four a une position inclinée et il a un mouvement tournant permettant d'agiter la masse de façon à produire une bonne répartition thermique.

Des ouvertures différentes sont aménagées pour la sortie de la matière, pour le chargement du four et pour l'expulsion des gaz, qui se produisent dans la chambre de fusion pendant le

travail; cette dernière ouverture est pratiquée de telle sorte que l'air atmosphérique ne puisse circuler librement dans la chambre de fusion, et qu'en ouvrant la porte il ne s'établisse des courants d'air. Avec de telles dispositions, le temps nécessaire pour produire les réactions est réduit au minimum, de manière qu'on peut toujours travailler à pleine charge et obtenir le maximum de l'énergie employée.

La consommation moyenne d'électrodes par tonne d'acier produit s'élève à 10 kg.

Le *four Heroult*, qui est du type à arc, se présente avec deux arcs qui jaillissent chacun entre l'une des électrodes et la substance à chauffer, celle-ci fermant le circuit. L'échauffement provient à la fois de ces arcs et de l'effet joule produit dans la couche de scorie.

On évite, dans la marche du four, de mettre les électrodes en contact avec cette couche, afin d'éviter la formation d'impuretés dans le bain métallique.

Dans le four oscillant Heroult (fig. 229), la source de chaleur réside dans la couche de scories même, à quelques millimètres seulement de la surface de réaction. Le bain fluide forme la couche supérieure du contenu du four, et on a réussi à trouver la construction d'une couverture qui résiste à la chaleur rayonnante.

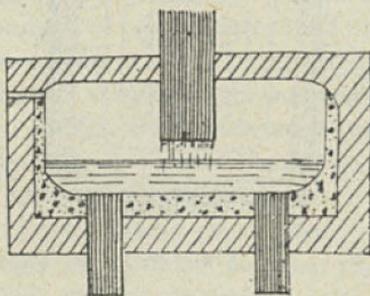


Fig. 229.

Une fois l'acier au point, le four est basculé par un dispositif hydraulique. Il verse le métal généralement dans une poche.

Four Girod. — Dans ce four (fig. 230), l'une des électrodes est en contact avec la matière à chauffer et l'arc jaillit entre cette matière et l'autre électrode. Il se produit donc le même échauffement que dans le four Heroult.

Le four Girod tel qu'il est installé à l'usine d'Ugine est monté sur tourillons et bascules par engrenages. L'amorçage après chaque coulée se fait d'une façon très régulière, et le réglage du début, avec la matière froide est beaucoup plus facile qu'avec les électrodes en série, même s'il y a plusieurs électrodes, le

réglage se faisant sur l'intensité au moyen de régulateurs automatiques.

La disposition spéciale des électrodes et des pièces de contact procure des avantages que

n'ont pas les fours à électrodes dès que l'on veut opérer sur des riblons froids. Dans ce cas, aussitôt après avoir chargé le creuset du four, l'électrode supérieure est abaissée jusqu'à ce qu'elle repose sur l'amas des riblons; le circuit est fermé et le courant passe sous la forme de multiples petits arcs qui éclatent entre les diverses parties de la masse entière, du centre vers la périphérie des riblons. On peut ainsi alimenter le four soit au moyen de métal fondu, soit au moyen de riblons froids.

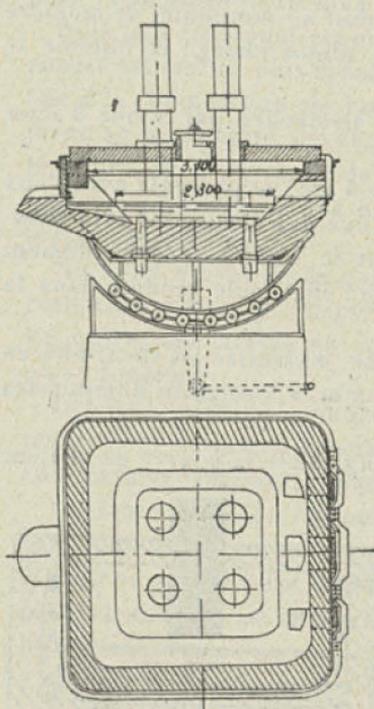


Fig. 230.

Les fours de 2,5 tonnes consomment 300 kilowatts sous 60 et 65 volts; ceux de 12 tonnes absorbent 1 000 à 1 200 kilowatts sous 70-75 volts. Si l'on admet une perte de 10 à 11 p. 100 de

la charge métallique par oxydation ou évaporation, l'énergie nécessaire pour obtenir une tonne d'acier dans le premier type est de 900 à 1 000 kilowatts-heure, et dans le second, de 800 à 900 kilowatts-heure.

La consommation des électrodes de charbon est environ de 12 à 15 kilog. par tonne d'acier.

Dans le four Girod à creusets, ceux-ci sont placés dans des compartiments séparés les uns des autres, et aussi de l'extérieur, par des cloisons qui forment résistance électrique, et dans lesquelles passe le courant. Dans certains fours les creusets sont chauffés individuellement, ce qui permet d'atteindre une température plus élevée. Des résistances électriques

placées au-dessous du creuset forment le fond de chaque compartiment. On obtient dans ces fours une température constante.

Four Gin. — C'est un four à résistance. Il est constitué par un canal long et étroit en forme de serpentin. Les électrodes consistent en blocs d'acier de grande section, refroidis intérieurement par une circulation d'eau.

La fig. 231 représente un four absorbant 7 200 kilowatts (60 000 ampères sous 120 volts) et pouvant produire, par affinage de fonte liquide, 35 tonnes d'acier en vingt-quatre heures. Le

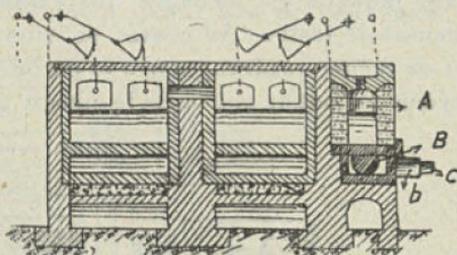


Fig. 231.

chauffage et les opérations de réduction et d'affinage sont faits dans des capacités différentes; elles ont lieu dans des cuvettes A qui communiquent entre elles et avec les prises de courant B, continuées par les conducteurs concentriques *b* et *c* et par les canaux de chauffage proprement dits. Le métal une fois fondu remplit le canal aboutissant à une cuvette pour arriver à l'orifice de coulée, de façon qu'il y ait constamment une circulation de fonte liquide dans toutes les parties du four.

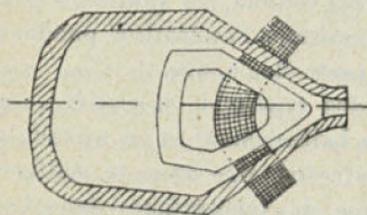


Fig. 232.

Four Saladin (Schneider). — Dans ce système de four (fig. 232), qui est du type à induction, le circuit secondaire est constitué par un canal étroit dont les deux extrémités débouchent à des niveaux différents

dans un creuset qui ferme le circuit, disposition qui permet la production d'un métal très homogène. La vitesse de circulation de ce dernier peut atteindre plusieurs mètres par seconde.

On a cherché à réaliser dans cet appareil le principe des chaudières à circulation d'eau dans les tubes passant entre les branches du noyau magnétique, en chauffant par induction un tube relié à un réservoir et rempli de métal fondu pour

provoquer et entretenir la température nécessaire dans le bain métallique.

L'appareil permet d'obtenir de grandes masses de métal et un affinage comme dans le four Stassano.

Four Kjellin. — Ce four est aussi du type à induction (fig. 233). Il consiste en une construction en matière réfractaire dans laquelle est ménagée une rainure circulaire servant de creuset de fusion. Au centre se trouve un noyau feuilleté en fer de forme quadrangulaire et entouré de fils de cuivre. Une tuyère permet de refroidir le circuit primaire.

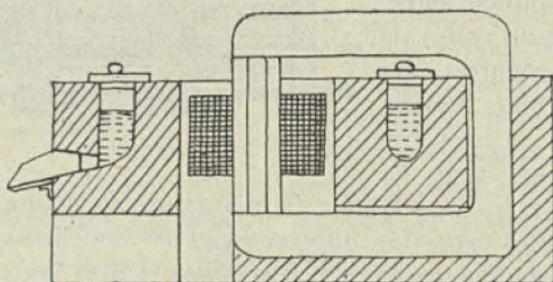


Fig. 233.

Pour mettre l'appareil en jeu, on procède par la méthode scrap process; on charge la rigole avec de la fonte et des riblons de fer; puis une fois la masse fondue, on ajoute un peu de fer manganésé (spiegel); on continue l'opération pendant une demi-heure et l'acier est prêt pour être coulé.

Pour obtenir une circulation plus rapide de la matière, on donne aux fours un mouvement de balancement et on introduit d'une façon intermittente un corps réfractaire dans la matière fondue, de façon que la différence de température dans les canaux à la chambre de fusion devienne très faible.

Four Rochling-Rodenhauser. — Ce four (fig. 234) comporte un enroulement primaire et deux circuits induits, savoir le métal et l'enroulement extérieur des bobines. Ce dernier est connecté à des plaques polaires qui font passer un courant auxiliaire à travers la chambre d'affinage. Elles ont une résistivité assez élevée.

Le nouveau four triphasé Rochling-Rodenhauser, qui est de forme circulaire, est assez analogue au four monophasé. Les

fil des trois enroulements induits sont connectés : d'une part au point neutre, d'autre part, et pour chacun d'eux, à l'un des contacts des parois intérieures de ce four. Celui-ci est muni de trois portes de chargement, par lesquelles on introduit le métal, soit à l'état liquide, soit en grenailles, ainsi que les matériaux additionnels. Les culasses de la carcasse magnétique ont une forme spéciale en fer à cheval, qui n'établit pas de connexion

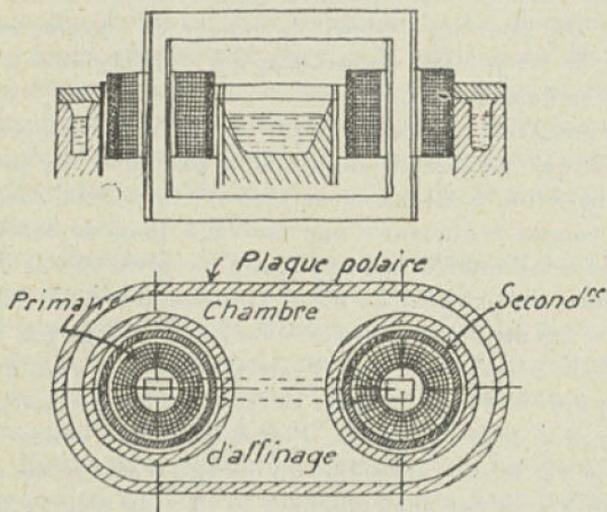


Fig. 234.

magnétique directe entre deux des noyaux, et ce dispositif a pour but de créer à travers le bain métallique un brassage énergétique de la masse du métal en travail. Le four est animé d'un vif mouvement de rotation. Pour vider le four de sa charge métallique, on l'incline en avant, et on n'a qu'à recueillir dans des poches le métal sortant du trou de coulée.

Ce qui distingue particulièrement ce four, c'est sa simplicité de construction, sa grande surface de chauffe libre, sans encombrement d'électrode, l'accès facile du travail et surtout le brassage automatique du bain de métal.

153. **Fabrication des ferro-alliages.** — Les fours utilisés à cet effet sont en général les mêmes que ceux que nous avons décrits et utilisés pour l'affinage. On emploie parfois des électrodes fondantes qui fondent au contact d'un bain qui con-

tient une substance capable de transformer utilement la matière de cette électrode.

On cherche à obtenir, dans la fabrication des alliages du fer, des produits à teneur extrêmement élevée de l'alliage et à faible teneur en carbone.

Le *ferrochrome* est l'alliage à peu près le plus employé comme addition fixe dans la fabrication des aciers spéciaux. La teneur en carbone varie de 1 à 7 pour 100 pour l'acier à outils, et de 7 à 10 p. 100 pour les essieux, la teneur en chrome étant en moyenne de 65 p. 100. On produit des ferrochromes à 66° de Cr et 0,6 seulement de C.

Pour l'obtention de ces derniers, on opère d'abord la réduction électrique de l'oxyde du métal à produire, en présence d'une proportion convenable de silice. On utilise ensuite ce siliciure comme réducteur d'une nouvelle quantité d'oxyde, ou on soumet ce silicium à une oxydation en présence de l'oxyde ou d'un composé oxygéné du métal à obtenir. La réduction pour silicium se fait dans un four à résistance et l'affinage par l'oxyde dans un four à induction et self-circulation. On peut aussi se servir du four ordinaire à deux électrodes en série dans lequel les électrodes sont coulantes, c'est-à-dire que celles-ci sont constituées par le siliciure même qu'il s'agit d'affiner, tandis que le bain est fourni par des composés oxydés du métal à libérer.

Les autres produits obtenus au four électrique sont les ferromolybdènes, les ferrotungstènes, les ferrotantales, les ferro-nickels, les ferrosiliciums, les ferromanganèses.

Ces alliages sont mieux fondus, plus homogènes que les produits obtenus au cubilot. Ils sont livrés à des prix assez bas pour permettre non seulement la fabrication des produits spéciaux, mais encore pour la fabrication des aciers industriels qui, de plus en plus, sont demandés avec des garanties de résistance élevée.

Les ferrosiliciums s'obtiennent avec facilité au four électrique. Les fours utilisés sont ceux à une seule électrode mobile, les fours à deux électrodes série avec ou sans sole conductrice, les fours triphasés à trois électrodes mobiles, les fours triphasés à deux électrodes mobiles et enfin les fours à résistance sans électrodes mobiles. On arrive à obtenir des composés contenant jusqu'à 98 p. 100 de silicium et d'une grande pureté. Ils se

préparent en traitant au four électrique un mélange de minerais, de fer (ou de riblons), de quartz et de coke, correspondant à la quantité de carbone juste nécessaire pour réduire l'acide silicique.

Les heureux résultats obtenus par l'introduction des ferroalliages dans la fabrication de l'acier ont conduit les métallurgistes fondeurs à essayer ces mêmes produits dans la fonte.

On utilise à cet effet les ferromanganèses, les ferrosiliciums, les ferrophosphores et les ferrotitanes. Le ferromanganèse durcit la fonte, élimine le soufre et il agit comme désoxydant. Le ferrosilicium augmente la douceur de la fonte et diminue sa résistance. Les fontes surchauffées dans les fours peuvent être régénérées avec une addition suffisante de ferrosilicium, le silicium désoxydant la fonte, jusqu'à les rendre de nouveau propres au moulage.

Le ferrophosphore sert à élever, par additions dans la poche, la teneur en phosphore des fontes dont on veut augmenter la fluidité pour les moulages minces, par exemple. Enfin le ferrotitane employé en petites quantités sert à expulser les gaz absorbés par le métal fondu; l'expulsion du titane, qui passe dans les scories, permet d'avoir une fonte douce.

154. Hauts fourneaux électriques. — Le haut fourneau électrique a un meilleur rendement que le haut fourneau ordinaire, car l'absence de souffleries présente une économie importante. Dans les fours à résistance on constate néanmoins que la dépense d'électrodes est souvent très onéreuse. D'autre part l'énergie électrique est beaucoup plus coûteuse que le coke ou le charbon en quantités correspondantes. Il s'ensuit que les hauts fourneaux électriques qui produisent de la fonte en partant du minerai ne peuvent concurrencer les hauts fourneaux ordinaires que dans les régions où on peut disposer de l'énergie électrique à bon marché et où le prix du coke est élevé.

Soit un minerai à transformer en fonte dans un haut fourneau électrique. Il faut connaître : *a*) les poids de minerai, calcaire et charbon à charger pour faire 100 kilog. de fonte; *b*) le pourcentage de la composition des gaz; *c*) le poids et le pourcentage de la composition de la scorie. Le poids de charbon de bois nécessaire est celui qu'il faut pour donner assez de carbone fixe destiné à la réduction de l'oxyde de fer et de la silice, et de

plus pour fournir le carbone qui sera contenu dans la fonte. La silice de la scorie sera celle qui est dans le minerai, le fondant et le combustible moins celle qui est réduite en silicium. Les gaz contiendront le carbone fixe du charbon de bois à l'état de CO, l'acide carbonique provenant du fondant et la matière volatile produite par le charbon de bois.

Au point de vue du soufflage par tuyères, la meilleure solution consiste à employer celui-ci dès qu'on constate une accumulation de combustible. Cette combinaison du haut fourneau et du four électrique, telle qu'on la rencontre par exemple dans le dispositif de Taylor, est susceptible de donner les meilleurs résultats.

Les types de hauts fourneaux électriques les plus utilisés sont : les fours Keller, les fours de Ludvika, de Tinfos, de Lindblad, de Stalhane et Groenwall, de Dorsey et Lyon, de Toussaint-Levoz et de Nathusius.

Four Keller. — Ce type de four est du système à résistance. Il (fig. 235) comporte deux groupes à deux électrodes chacun, ces deux groupes étant disposés en série et constituant quatre foyers séparés.

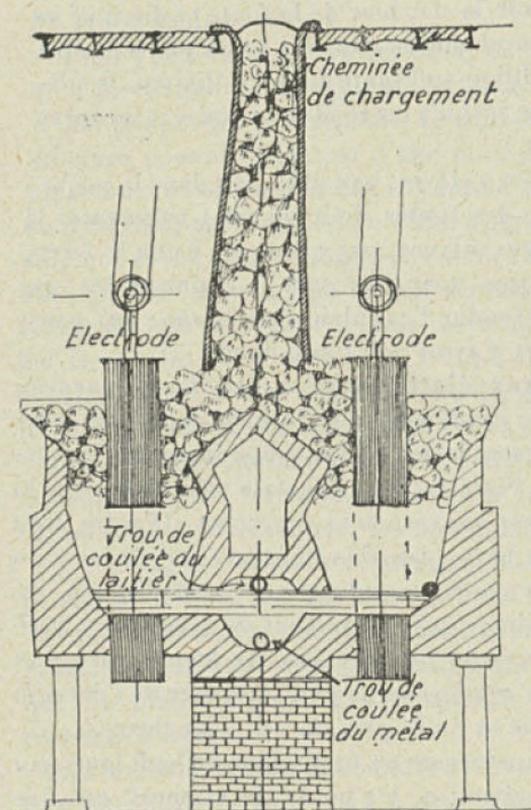


Fig. 235.

Le mélange de minerai, de charbon et de fondant est versé par le haut ou guculard, et la coulée du métal se fait soit dans une poche, soit dans un mélangeur.

La tension est maintenue entre 25 et 30 volts. Le four d'affinage qui fait partie de l'installation du haut fourneau ne contient que le métal fondu et les matières servant à l'affiner. Pour régler la température, on agit sur les deux électrodes du four et, pour oxyder le métal, on se sert plus particulièrement de l'oxyde de fer. La tension est maintenue entre 50 et 75 volts dans le foyer.

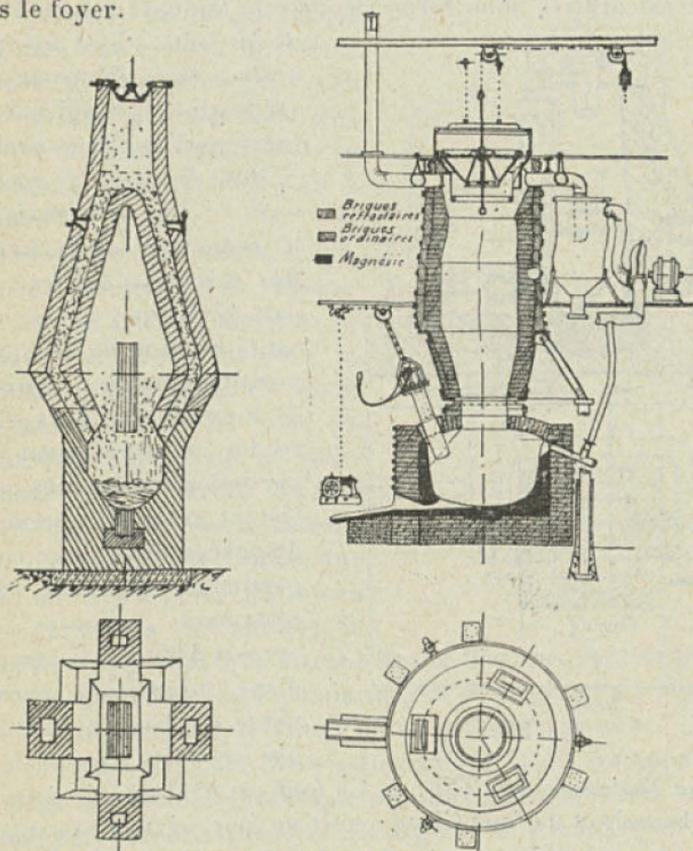


Fig. 236.

Fig. 237.

Four Toussaint-Levoz. — On utilise un four cylindrique avec voûte en dôme dans lequel on introduit le métal en fusion, les électrodes négatives étant disposées de façon à être en contact électrique avec la partie supérieure du bain qui se trouve, ainsi que les laitiers, amené à une température très élevée assurant un bon affinage.

Four de Tinfos (fig. 236). — Cet appareil tient à la fois des fours ouverts à électrodes et des fours à cheminée de réduction préalable des minerais par les gaz dégagés de la réaction.

Haut fourneau de Donnarfvet. — La forme générale de cet appareil (fig. 237) rappelle celle du haut fourneau ordinaire, mais le creuset a des dimensions plus considérables. L'énergie électrique est utilisée sous forme de courant triphasé à la tension

de 40 volts. C'est un type à arc à trois électrodes. Il est destiné à produire de la fonte que l'on affine ensuite.

Haut fourneau de Groenwall. — Ici on a envisagé la réduction et la fusion des minerais de fer. La caractéristique de ce four est la réunion de deux dispositifs connus : amenée de courant par deux électrodes complètement ou partiellement fondues consistant en métal obtenu et disposées dans deux compartiments (fig. 238), complètement séparées du creuset de fusion ; entretien d'une circulation permanente de bas en haut des gaz produits dans le four.

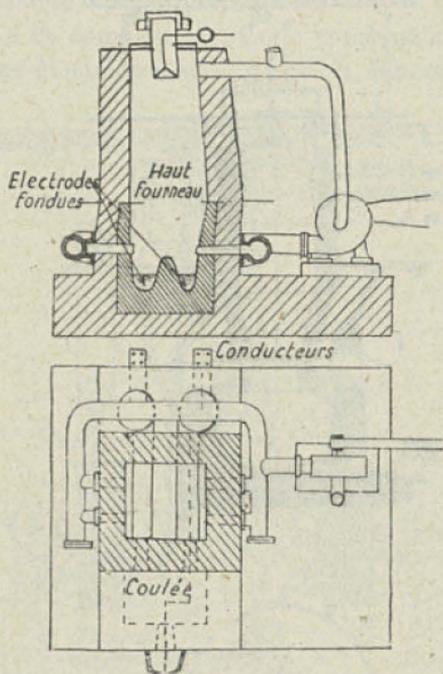


Fig. 238.

Four Nathusius (fig. 239). — Ce four est une combinaison du four Heroult et du four Girod ; c'est un four mixte à résistance. A la partie supérieure sont suspendues trois électrodes de charbon dont les extrémités inférieures sont proches de la couche de laitier ; trois électrodes d'acier sont noyées dans la sole du four. Il ne passe pas de courant des électrodes au bain métallique directement, mais seulement par l'intermédiaire de la moitié environ de l'épaisseur de la tôle qui agit comme résistance. Il est alimenté par du courant triphasé à 110 volts.

155. Réglage des fours électriques. — Les électrodes en

charbon des fours électriques sont généralement suspendues à l'aide de treuils que l'on commande électriquement ou mécaniquement à l'effet d'obtenir des manœuvres précises et rapides.

Pour régler la tension, les électrodes du même pôle sont manœuvrées simultanément; s'il y a seulement inégalité de la tension entre les deux pôles, on effectue un déplacement simultané et inverse des électrodes de chaque pôle. On réalise ainsi par une seule manœuvre une réversibilité de la tension électrique d'un pôle à l'autre¹.

Lorsqu'on a recours à un moteur électrique, le réglage du four a lieu en mettant, à l'aide d'un commutateur, le moteur de commande du treuil en marche, dans un sens ou dans l'autre, suivant les indications des appareils de mesure, qui contrôlent la marche de l'opération. On conçoit que les fours électriques, en raison des variations très subites de

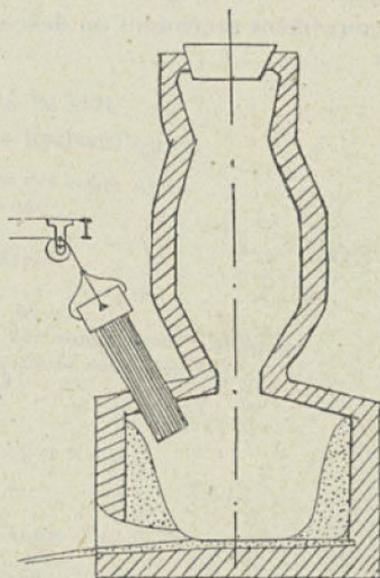


Fig. 239.

courant auxquelles leur marche donne lieu, peuvent se prêter à un réglage économique par le moyen de régulateurs automatiques, tels que celui de Thury universellement connu.

Les Etablissements Brown-Boveri ont établi un appareil de réglage à marche hydraulique pouvant se manœuvrer soit à la main, soit automatiquement. Le réglage à la main résulte de la manœuvre d'un robinet de distribution à trois voies en relation avec le cylindre de réglage dont le piston est conjugué avec des leviers et un moufflage à contrepoids.

On passe du réglage à la main à celui automatique en ouvrant deux robinets après avoir ramené le levier de distribution du robinet à trois voies à sa position neutre.

1. *Les Appareils de levage, de manutention et de transports industriels*, par E. PACORET. — Tomes I et II. Dunod éditeur, 1922.

Les organes principaux qui entrent en fonction dans ce cas sont, pour chaque électrode, un régulateur automatique à action rapide et une soupape de distribution. Le réglage se fait à courant constant. Suivant le déplacement du régulateur automatique, le piston se meut de façon que l'eau entre dans le cylindre de réglage et en sort, ce qui imprime à l'électrode un mouvement ascendant ou descendant.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE.....	VII
--------------	-----

PREMIÈRE PARTIE

Aménagements hydrauliques.

CHAPITRE PREMIER. — Étude générale des cours d'eau.....	1
1. Forme des profils des cours d'eau.....	1
2. Classification des cours d'eau.....	3
3. Caractères constitutifs des torrents.....	4
4. Alimentation des cours d'eau.....	6
5. Effets des glaciers.....	8
6. Charrois des dépôts des eaux des cours d'eau torrentiels....	9
7. Détermination des hauteurs de pluie annuelles.....	11
8. Effet des forêts.....	12
9. Action des lacs.....	13
<i>Débits des cours d'eau.</i>	
10. Débits d'étiage.....	14
11. Débits moyens.....	15
12. Coefficients d'irrégularité des cours d'eau.....	16
CHAPITRE II. — Jaugeage des cours d'eau.....	19
13. Jaugeage par flotteurs.....	19
14. Echelles hydrométriques.....	21
15. Jaugeage au moyen des hydromètres.....	24
16. Tarage des moulinets.....	28
17. Jaugeage par déversoirs.....	32
18. Jaugeage par vannes.....	39
19. Jaugeage du débit des conduites forcées.....	42
CHAPITRE III. — Hydrographie. Hydrologie.....	47
20. Représentation graphique des débits des cours d'eau.....	47
21. Influence des eaux pluviales et importance des crues.....	49
22. Prévisions d'annonces des crues.....	51
23. Classification des réservoirs de retenue d'eau.....	53
24. Réservoirs de crues.....	54
25. Réservoirs d'étiage.....	55
26. Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques.....	62
CHAPITRE IV. — Conduites forcées.....	67
27. Formules usuelles pour la détermination du diamètre des conduites.....	67
28. Diamètres en tenant compte de leur valeur économique.....	70
29. Nature des conduites forcées.....	76

30. Résistance des conduites forcées métalliques.....	83
31. Coups de bélier. Calculs. Etude d'ensemble de la théorie.....	87
32. Dispositifs de protection contre les coups de bélier.....	97
33. Tracé et pose des conduites forcées.....	100
34. Calculs. Applications numériques.....	105
CHAPITRE V. — Barrages.....	107
35. Rôle des barrages.....	107
36. Digue en terre.....	112
37. Barrages en béton ordinaire et en béton armé.....	114
38. Barrages métalliques.....	118
39. Barrages mobiles.....	118
40. Barrages automatiques.....	123
41. Gros barrages en maçonnerie. Barrages-réservoirs.....	128
42. Capacité des réservoirs.....	132
43. Stabilité des barrages.....	133
CHAPITRE VI. — Canaux.....	150
44. Mouvement de l'eau dans les tuyaux.....	150
45. Formes des canaux.....	153
CHAPITRE VII. — Aménagement intégral du Rhône.....	159
46. Régime du Rhône.....	159
47. Usines existantes et usines projetées sur le Haut Rhône.....	161
48. Usines projetées sur le Rhône moyen.....	168
49. Navigation et irrigations.....	172
50. Organisation financière.....	173
CHAPITRE VIII. — Turbines hydrauliques.....	177
51. Classification et appropriation des turbines.....	177
52. Théorie des turbines centripètes.....	180
53. Turbines Francis.....	185
54. Turbines mixtes.....	192
55. Turbines tangentielles. Turbines Pelton.....	195
56. Fonctions caractéristiques des turbines.....	201
57. Installation des turbines.....	201
58. Essais des turbines.....	206
59. Régulateurs de vitesse.....	209
60. Régulateurs de pression. Régulateurs absorbeurs.....	212
CHAPITRE IX. — Réservoirs naturels et réservoirs artificiels.....	217
61. Rôle des réservoirs naturels et des réservoirs artificiels.....	217
62. Lacs régulateurs.....	219
CHAPITRE X. — Contribution à l'étude de l'aménagement et de l'exploitation des chutes d'eau et des usines hydroélectriques.....	223
63. Puissance variable des cours d'eau.....	223
64. Rayons d'action économique des centrales à vapeur et des centrales hydrauliques.....	225
65. Utilisation rationnelle des chutes d'eau.....	226
66. Association des chutes d'eau.....	228
CHAPITRE XI. — Captation et utilisation de l'énergie des marées.....	230
67. Principes généraux de la captation.....	230
68. Puissance des marées.....	233

69. Procédés et cycles de captage de l'énergie.....	235
70. Conditions de fonctionnement d'une usine marémotrice.....	239
71. Systèmes utilisateurs et installation d'usines génératrices.....	241
72. Usines accouplées.....	248
73. Adaptation des turbines au régime des marées.....	249
CHAPITRE XII. — Matériaux pour l'étude des usines.....	250
I. — <i>Avant-projet pour l'établissement d'une usine hydroélectrique.</i>	
74. Aménagement hydroélectrique.....	251
75. Ligne de transport d'énergie électrique.....	255
76. Etude financière.....	257
II. — <i>Bilan des forces hydroélectriques mondiales.</i>	
77. Richesse de la France en houille blanche.....	258
78. Richesses des principales nations du monde.....	259
III. — <i>Législation et réglementation des cours d'eau.</i>	
A. — <i>Forces hydrauliques.</i>	
79. Lois et décrets du régime antérieur à la loi du 16 octobre 1919.....	260
B. — <i>Distribution d'énergie électrique.</i>	
80. Lois, décrets, circulaires et arrêtés.....	261
IV. — <i>Concessions et autorisations.</i>	
81. Réglementation des usines hydrauliques.....	262
82. Formalités pour l'obtention des concessions et des autorisations.....	264
83. Autorisation, approbation et récolement des travaux.....	267

DEUXIÈME PARTIE

Production et transmission de l'énergie électrique.

CHAPITRE XIII. — Production et transformation de l'énergie électrique.....	270
I. — <i>Génératrices à courant continu.</i>	
84. Caractéristiques des machines à courant continu.....	270
85. Régulation et couplage des dynamos.....	274
II. — <i>Génératrices à courant alternatif.</i>	
86. Généralités sur le courant alternatif.....	275
87. Nature des alternateurs.....	277
88. Conditions principales réglant le fonctionnement des alternateurs.....	279
89. Turbo-alternateurs.....	287
III. — <i>Moteurs synchrones. Moteurs asynchrones. Moteurs asynchrones synchronisés triphasés.</i>	
90. Moteurs synchrones.....	289
91. Moteurs asynchrones.....	290
92. Démarrage, régulation et rendement des moteurs asynchrones.....	292
93. Moteurs asynchrones synchronisés.....	297
IV. — <i>Moteurs générateurs. Commutatrices.</i>	
94. Moteurs générateurs.....	298
95. Commutatrices.....	299

96. Convertisseurs de fréquence.....	304
97. Sous-stations transformatrices.....	304
<i>V. — Transformateurs statiques.</i>	
98. Rôle et conditions de fonctionnement des transformateurs dans les transports de l'énergie électrique.....	305
99. Calcul des pertes dans un transformateur.....	310
CHAPITRE XIV. — Lignes et réseaux de transport de force à haute tension.....	314
<i>I. — Caractéristiques des lignes à haute tension.</i>	
100. Conditions générales du fonctionnement des lignes de transmission d'énergie à grande distance.....	315
101. Inductance, capacité et chute de tension.....	318
102. Méthodes graphiques pour le calcul des lignes de transmission d'énergie électrique.....	325
103. Calcul d'une ligne de transmission d'énergie à haute tension.....	330
<i>II. — Supports des lignes.</i>	
104. Tension mécanique des conducteurs. Calculs.....	334
105. Nature des conducteurs.....	340
106. Installation des conducteurs des lignes.....	342
107. Poteaux en bois.....	344
108. Calcul des poteaux en bois et des ferrures.....	345
109. Poteaux métalliques.....	350
110. Calcul d'un pylône métallique.....	352
111. Poteaux en ciment armé.....	355
112. Calcul d'un poteau en ciment armé.....	355
113. Protection et isolement des lignes.....	359
<i>III. — Armement des lignes.</i>	
114. Interrupteur et coupe-circuitss.....	361
115. Isolateurs ordinaires.....	366
116. Isolateurs de suspension.....	368
117. Parafoudres.....	373
CHAPITRE XV. — Usines centrales et réseaux.....	380
<i>I. — Usines centrales électriques.</i>	
118. Conditions générales de fonctionnement.....	380
119. Couplage en parallèle des usines hydroélectriques.....	382
120. Fonctionnement des alternateurs asynchrones.....	382
<i>II. — Centrales à vapeur.</i>	
121. Conditions générales d'exploitation.....	384
122. Rôle des turbines à vapeur.....	386
123. Fonctionnement des turbines à vapeur.....	387
124. Condenseurs des turbines à vapeur.....	391
125. Turbo-alternateurs.....	393
<i>III. — Réseaux.</i>	
126. Conditions générales de fonctionnement.....	395
127. Interconnexion des centrales.....	397
128. Réseaux d'interconnexion.....	398
129. Super-centrales.....	400

TROISIÈME PARTIE

Utilisations de l'énergie électrique.

CHAPITRE XVI. — Traction électrique. Electrochimie. Électrométallurgie.....	407
I. — <i>Traction électrique.</i>	
130. Avantages de la traction électrique.....	407
131. Systèmes de traction.....	409
132. Usines hydroélectriques pour la traction des chemins de fer.....	409
II. — <i>Électrochimie.</i>	
133. Dissociation électrolytique.....	412
134. Conductibilité des électrolytes.....	414
135. Décomposition électrolytique et polarisation.....	415
136. Phénomènes caractérisant la décomposition.....	416
137. Electrolyse aqueuse des alcalis et des chlorures.....	418
138. Fabrication des hypochlorites.....	419
139. Fabrication des chlorates et perchlorates.....	419
140. Fabrication de la soude.....	421
141. Affinage du cuivre.....	421
142. Electrolyse ignée.....	422
143. Avantages du four électrique.....	423
144. Propriétés de l'arc électrique.....	424
145. Classification des fours électriques.....	425
146. Fabrication des électrodes.....	427
147. Fabrication du carbure de calcium.....	428
148. Production de l'azote.....	430
149. Fabrication de la cyanamide.....	431
150. Fabrication de l'aluminium.....	432
III. — <i>Electrosidérurgie.</i>	
151. Avantages du four électrique en électrosidérurgie.....	433
152. Types de fours utilisés en électrosidérurgie.....	434
153. Fabrication des ferro-alliages.....	439
154. Hauts fourneaux électriques.....	441
155. Réglage des fours électriques.....	444